

УДК 629.78 (075)

Модели для оценки показателей целевой эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом надёжности бортовых систем

Лохматкин В.В.

*Ракетно-космический центр «Центральное специализированное конструкторское бюро - Прогресс», РКЦ «ЦСКБ – Прогресс»,
улица Земеца, 18, Самара, 443009, Россия,
e-mail: lohmatkin.vadim@yandex.ru*

Аннотация

Предложена методика для оценки показателей целевой эффективности с учётом надёжности бортовых систем космического аппарата. Предложенная методика основана на имитационном моделировании целевого функционирования КА с использованием статистических данных по отказам бортовых систем.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, показатели целевой эффективности, производительность съёмки.

Актуальность и постановка задачи исследования

К числу важнейших показателей целевой эффективности, определяющих эффективность целевого функционирования космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), относятся производительность съёмки и периодичность наблюдения. Одним из важнейших показателей целевой эффективности космического аппарата КА наблюдения, определяющего информативность снимков и объём информации

дистанционного зондирования Земли (ИДЗЗ), является производительность съёмки. Для космических аппаратов с оптико-электронной целевой аппаратурой, зондирование поверхности Земли может осуществляться с учётом различных видов съёмки:

- объективное зондирование;
- съёмка площадок;
- стереосъёмка маршрутов.

В этой связи показатели производительности съёмки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) можно выразить числом отснятых объектов наблюдения (ОН) и в площади отснятой поверхности Земли за срок активного существования КА. Используя тот или иной режим работы целевой аппаратуры на маршруте съёмки необходимо получить максимальную производительность за виток.

В общем случае в процессе эксплуатации КА наблюдения на показатели производительности съёмки влияют показатели надёжности КА и условия функционирования (облачность). Следует отметить, что показатели надёжности КА зависят от показателей надёжности бортовых систем (БС) и их элементов с учётом различных схем резервирования и функционирования. При возникновении частичных отказов БС возникают простои по целевому функционированию КА, и происходит снижение показателей производительности съёмки.

В общем случае влияние показателей надёжности КА ДЗЗ на показатели производительности съёмки E можно представить в виде типового графика, как это показано на рис. 1. На этом рисунке: $E_1(P)$, $E_2(P)$ и $E_3(P)$ - возможные формы зависимостей показателей производительности съёмки от показателя надёжности КА; E_0 - значение показателя производительности съёмки при надёжности КА, равной единице; $E_{дон}$ - допустимый уровень показателя производительности съёмки КА, ΔE – допустимые потери производительности

от снижения надёжности КА, P_{1H} , P_{2H} и P_{3H} - показатели надёжности, соответствующие допустимому уровню потери производительности.

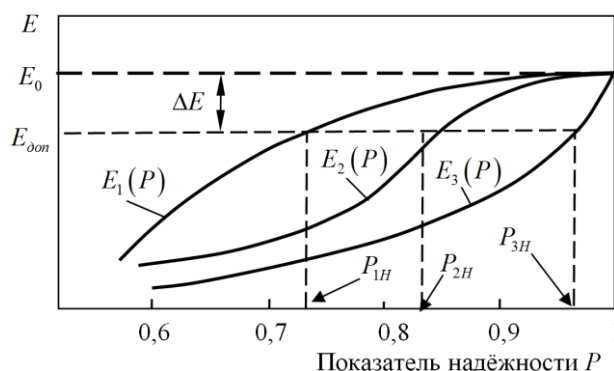


Рис. 1. Влияние показателя надёжности КА на показатели целевой эффективности

Однако проблема состоит в том, что получить такие зависимости для реальных КА наблюдения можно используя общеизвестный метод оценки на основе сбора и обработки статистических данных по отказам КА. Но это трудоёмкий процесс, а с другой стороны статистических данных не хватает, так как запуск КА нового типа не такое, уж частое событие. Кроме того, для новых КА с новым блочным составом БС накопленный статистический материал по ранее эксплуатирующимся КА ДЗЗ не удастся использовать в полной мере. Поэтому задача получения зависимостей показателей производительности съёмки с учётом надёжности является актуальной.

Одним из важных целевых показателей эффективности космических систем (КС) ДЗЗ является периодичность наблюдения, которая, как правило, измеряется временем между двумя соседними (смежными) съёмками единичного объекта наблюдения (ОН). В общем случае периодичность является случайной величиной, поэтому наиболее полно она характеризуется функцией распределения или функцией плотности распределения. В качестве частных показателей периодичности используются числовые характеристики этой случайной величины: математическое ожидание, дисперсия, верхние или

нижние доверительные границы, крайние значения периодичности из выборки и др. Периодичность может характеризоваться и вероятностными показателями, например, вероятностью того, что показатель периодичности будет не хуже заданного.

В общем случае значение показателей периодичности космической системы (КС) ДЗЗ зависит от многих факторов - её *свойств* (*характеристик*), *условий* применения средств КС и *управления* этими средствами. Применительно к КАН на показатели периодичности в большей степени влияют следующие факторы:

- параметры рабочей орбиты, характеристики целевой аппаратуры (ширина полосы обзора, предельные углы отклонения оптической оси от надира);

- геодезическая широта расположения ОН, нахождение ОН в световом пятне или вне его (для КА наблюдения в видимом спектре);

- распределение работ по зондированию между отдельными видами съёмки, оптимизация маршрутов съёмки, циклограммы работы бортовой и обеспечивающей аппаратуры и др.

Кроме того, на реальные показатели периодичности существенное влияние оказывают такие случайные факторы, как частичные отказы бортовых систем (БС). При возникновении определенных отказов БС, относящихся к классу восстанавливаемых, съёмка может не состояться какое-то время, и БС как бы «простаивают» по целевому функционированию. В этой связи уместно говорить не о баллистической периодичности, а о действительной (эффективной).

Отметим, что если в качестве показателя периодичности рассматривать частоту съёмки смежных объектов за определённый период времени, то характер кривых на графике (см. рис.1) изменится - с уменьшением надёжности показатель периодичности должен уменьшаться.

Решение данной задачи сводится к анализу статистического материала по отказам БС с применением метода моделирования целевого функционирования КА. Автором статьи ранее был рассмотрен вопрос об оценке показателя производительности съёмки, выраженного числом отснятых ОН с учётом надёжности КА ДЗЗ [7]. Однако публикаций по оценке показателей целевой эффективности в целом с учётом различных видов съёмки и частичных отказов БОС и оптико-электронной целевой аппаратуры в научной не встречалось.

Рассмотрим вопрос об оценке производительности съёмки в площади с учётом и отказов БС. Сначала рассмотрим вопрос об оценке производительности съёмки в площади с учётом отказов БС.

Суть моделирования

Производится имитация орбитального движения КА и его функционирования по целевому назначению. Организуется также имитация отказов элементов целевой аппаратуры и БОС в зависимости от моделируемого уровня надёжности. Для каждого момента времени имитации производится проверка работоспособности бортовых систем и оценивается возможность проведения зондирования поверхности Земли. В случае отказа оценивается случайное время вынужденных перерывов в работе той или иной бортовой системы. Показатель периодичности подсчитывается с учётом этих перерывов. В случае работоспособности КА подсчитывается либо число отснятых объектов наблюдения, либо площадь зондирования в зависимости от анализируемого показателя производительности съёмки. В случае если возникает частичный отказ БС, то счётчик показателей производительности съёмки приостанавливается. Расчёт останавливается при отказах КА, при которых невозможно дальнейшее функционирование по целевому назначению (возникновение критических отказов), либо при достижении времени, равному сроку активного существования. Такого рода расчёты проводятся для различных уровней надёжности.

Моделирование целевого функционирования

Используемые модели и алгоритмы для имитационного моделирования функционирования КА по целевому назначению (без учёта надёжности) были разработаны ранее [4].

Моделирование отказов и времени простоя элементов бортовых систем

При имитации случайного времени отказов какого-либо элемента бортовых систем принят экспоненциальный закон распределения, который характерен для периода нормальной работы элементов сложных изделий (исключая период приработки и старения). Этот закон наиболее распространён в практике расчёта надёжности бортовых систем КА и их элементов [5].

В качестве исходных данных используется статистические данные по аналогичным элементам. Если имеются данные по интенсивности отказов λ , то моделирование случайного времени отказа элемента производится по формуле (1)

$$t_{\text{отк}} = \frac{-\ln \xi}{\lambda}, \quad (1)$$

где ξ - случайное число с равномерным законом распределения на отрезке [0, 1].

Если статистических данных по интенсивности отказа нет, то в качестве исходных данных используются вероятность безотказной работы элемента P за какой-либо промежуток времени τ . Расчет интенсивности отказов элемента производится по зависимости, которая является обратной по отношению к экспоненциальному закону:

$$\lambda = \frac{-\ln P}{\tau}. \quad (2)$$

Далее определяется случайное время отказа элемента по формуле (1).

Адекватность данной модели проверялась численно путём построением функции плотности распределения и сопоставлением с теоретической

функцией. Показано, что при 20 тыс. испытаний статистическая и теоретическая функция распределений практически совпадают.

Время простоя по целевой работе бортовой системы (с момента отказа до момента восстановления работоспособности) определяется с учетом статистических данных по эксплуатирующимся КА ДЗЗ. В табл. 1 в качестве примера приведены время простоя t_{zi} и относительная частота возникновения отказа h_i одного из эксплуатируемых КА.

Табл. 1. Статистические данные по времени простоя и частоте отказов

Время простоя t_{zi} , час	Относит. частота, возникн. отказа h_i
До 0,15	0,429
0,15 ... 1,5	0,233
1,5 ... 4,14	0,135
4,14 ... 3,2	0,015
3,2 ... 6,0	0,168
6,0 ... 30	0,020
	$\Sigma = 1,000$

Учитывая, что сумма относительных частот равна единице, моделирование времени простоя можно производить таким же образом, что и моделирование дискретных случайных величин по методике [5]. Иллюстрация сути моделирования частоты отказов приведена на рис. 2, где за вероятности p_i приняты соответствующие частоты h_i .

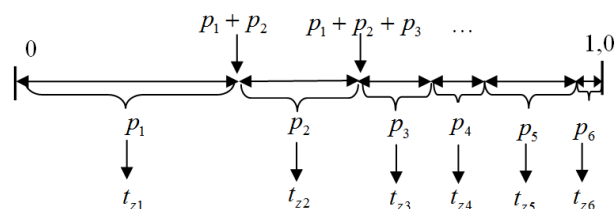


Рис. 2. Графическая иллюстрация моделирования частоты отказов и времени простоя

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 $0 \leq \xi < 0,429$) то время простоя по целевому функционированию принимается равным t_{z1} (0,15 часа);

Если $p_1 \leq \xi < (p_1 + p_2)$ (в примере $0,429 \leq \xi < 0,662$), то время простоя - t_{z2} (1,5 часа);

Если $(p_1 + p_2) \leq \xi < (p_1 + p_2 + p_3)$ (т. е. $0,662 \leq \xi < 0,797$), то принимается t_{z3} (4,14 часа);

Если $(p_1 + p_2 + p_3) \leq \xi < (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)$ (т. е. $0,797 \leq \xi < 0,812$), то t_{z4} (3,2 часа);

Если $(p_1 + p_2 + p_3 + p_4) \leq \xi < (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) = 1$, (т. е. $0,812 \leq \xi < 1,000$), то время простоя принимается равным t_{z5} (6 часов);

Если $(p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) \leq \xi < (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6) = 1$, (т. е. $0,980 \leq \xi < 1,000$), то время простоя принимается равным t_{z6} (30 часов).

Моделирование отказов бортовых систем и КА

Из-за сложности бортового состава КА не всегда удается методами последовательно-параллельного соединения элементов оценить влияние отказов на показатели надёжности КА. Например, невозможно построить структурную схему надёжности для силового гироскопического комплекса, переключающегося в случае отказа одного из силовых гироскопов по сложной логике. Поэтому в данной работе использован метод исследования надёжности структурно-сложных систем [5]. Инструментом моделирования в этом методе являются логико-вероятностные функции отказа (или сохранения работоспособного состояния) анализируемых систем. Для облегчения

построения логико-вероятностных функций сложных систем предварительно строят так называемые деревья отказов [5]. Отметим, что построение деревьев отказов производится на основе анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО).

В качестве примера на рис. 3 приведено упрощенное дерево отказов типового КА наблюдения, в котором учитываются бортовые системы и некоторые элементы, влияющие на показатели производительности КА. Треугольниками со значками плюс обозначены графические символы, соответствующие логическому сложению (дизъюнкции), со знаками умножения (точки) – логическому умножению (конъюнкции).

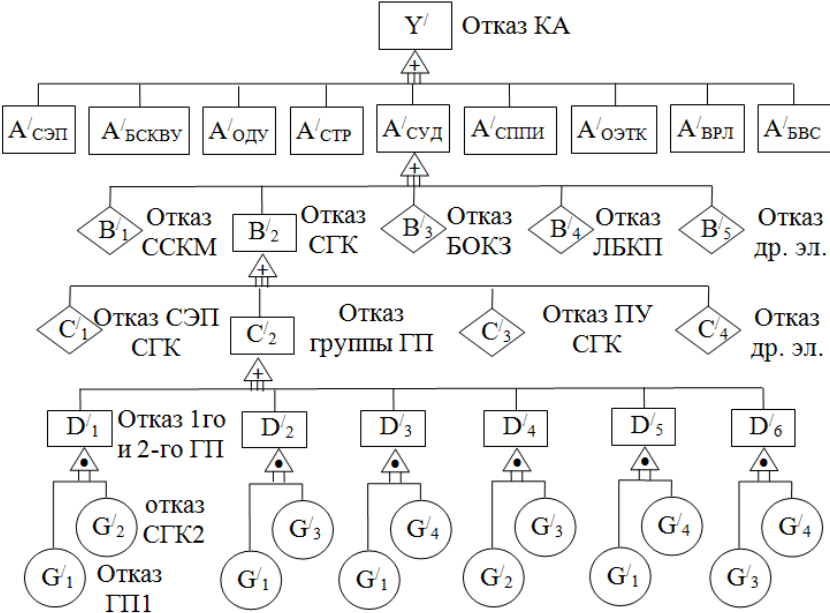


Рис. 3. Дерево отказов КА ДЗЗ

На этом рисунке литерами *A* со штрихами и индексами обозначены события отказов следующих бортовых систем КА: электропитания (СЭП), управления движением (СУД), объединенной двигательной установки (ОДУ), терморегулирования (СТР), бортового синхронизирующего устройства (БСКВУ), приёма и преобразования информации (СППИ), оптико-электронного

телескопического комплекса (ОЭТК), высокоскоростной радиолинии (ВРЛ), бортовой вычислительной системы (БВС).

В этом дереве детализированы не все связи элементов и систем по отказам. Подробнее развёрнута лишь ветвь по отказам СУД, соответствующая событию $A'_{СУД}$. В этой ветви представлены события отказов некоторых систем, входящих в систему СУД и обозначенных литерами B с индексами от единицы до пяти: сброса кинетического момента (СККМ), силового гироскопического комплекса (СГК), блока определения координат звёзд (БОКЗ), лазерного бесплатформенного командного прибора (ЛБКП) и других элементов (событие B_5).

Ниже в дереве отказов развёрнута только ветвь, касающаяся отказов силового гироскопического комплекса (событие C'_2), предназначенного для ориентации КА. При построении этой ветви было учтено, что СГК имеет четыре силовых гироскопа (ГП), а безотказная работа СГК обеспечивается безотказной работой любых трёх гироскопов. Кроме этого в состав СГК входят: система энергопитания (СЭП) СГК, приборы управления (ПУ) СГК и др. подсистемы, которые в данном анализе не рассматриваются. Эти события обозначены C'_1 , C'_3 и C'_4 . Далее в дереве подробнее развёрнуты события, касающиеся лишь отказов групп гироскопов (события D'_1, \dots, D'_6 , которые соответствуют отказу любой пары ГП). События G'_1, G'_2, G'_3, G'_4 соответствуют отказам первого, второго и т. д. силовых ГП соответственно.

На основе дерева отказов нетрудно составить логическую функцию отказа КА

$$\begin{aligned}
 Y'_{КА} = & A'_{СЭП} \vee A'_{БСКВУ} \vee A'_{ОДУ} \vee A'_{СТР} \vee \\
 & \vee B'_1 \vee C'_1 \vee G'_1 G'_2 \vee G'_1 G'_3 \vee G'_1 G'_4 \vee G'_2 G'_3 \vee \\
 & \vee G'_2 G'_4 \vee G'_3 G'_4 \vee C'_3 \vee C'_4 \vee B'_3 \vee B'_4 \vee \\
 & \vee A'_{СПИИ} \vee A'_{ОЭТК} \vee A'_{ВРЛ} \vee A'_{БВС} . \quad (3)
 \end{aligned}$$

Если функцию такого рода построить с учётом всех ветвей и элементов, входящих в КА, то с помощью неё можно оценивать работоспособность КА в зависимости от отказа тех или иных элемента.

Нормирование показателей надёжности бортовых систем по заданному показателю надёжности КА

Моделирование целевого функционирования производится при определённом значении показателя надёжности КА. Этот показатель при достижении заданного количества циклов статистических испытаний должен меняться с целью получения функциональной зависимости влияния надёжности на показатели производительности КА. Причём, при каждом новом уровне значений показателя надёжности КА показатели надёжности бортовых систем должны соответствовать этому уровню. А именно, такими, чтобы с учётом взаимосвязей, выраженных с помощью дерева отказов и логических функций, обеспечивать именно требуемый уровень показателя надёжности КА. С этой целью используется метод нормирования надёжности бортовых систем КА в зависимости от надёжности КА в целом. В данной работе использован метод нормирования с помощью весовых коэффициентов [5]. Этот метод основан на пропорциональном изменении вероятностей отказов бортовых систем проектируемого КА относительно аналогов (прототипов) КА, для которых известны статистические характеристики отказов. Алгоритм нормирования следующий.

1. Ввод показателей надёжности проектируемого КА и прототипа.
2. Ввод показателей надёжности бортовых систем (БС) P_i прототипа (по статистике).
3. Расчёт показателей надёжности БС с помощью метода весовых коэффициентов [5].
4. Определение показателей надёжности составных частей БС (при необходимости).

5. При необходимости производятся итерационные расчёты для обеспечения заданной точности нормирования.

Алгоритм имитационного моделирования

Алгоритм для оценки влияния частичных отказов БС и времени простоя по целевому функционированию на производительность съёмки в площади основывается на алгоритме для оценки производительности съёмки, выраженной числом отснятых ОН. Блок – схема доработанного алгоритма приведена на рис 5.

1. Ввод исходных данных для имитации целевого функционирования КА (параметров орбит, среднего времени перенацеливания, срока активного существования, параметров надёжности БС прототипа КА, количества расчётных точек показателей надёжности КА и др.)

2. Задание и изменение значений надёжности КА, например, 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 и 0,95.

3. Нормирование показателей надёжности БС для заданных значений надёжности КА.

4. Задание и изменение числа статистических испытаний при конкретном значении показателя надёжности КА.

5. Расчёт времени отказов элементов всех бортовых систем КА (по очереди).

6. Расчёт времени простоя КА по целевому функционированию.

Расчёты в пунктах 5 и 6 осуществляется по методике, изложенной ранее.

7. Запуск подпрограммы имитации полёта и целевого функционирования КА.

8. Проверка работоспособности КА с использованием логико-вероятностных функций.

Если событие $Y'_{КА}$, посчитанное по формуле (3), принимает значение «Истина» (True), то КА считается работоспособным. В противном случае

событие $Y'_{КА}$ принимает значение «Ложь» (False), КА считается неработоспособным и осуществляется переход к пункту 16.

9. Проверка условия попадания текущего времени полёта КА в интервал между случайным временем отказа и суммой случайного времени отказа и времени простоя КА каждой бортовой системы (проверка состояния простоя).

$$t_{cл.i} \leq t < (t_{cл.i} + t_{z.i}). \quad (4)$$

Если это условие выполняется, то логической переменной A'_i , характеризующей работоспособность или неработоспособность рассматриваемой i -й БС, присваивается значение «ложь», в противном случае «истина». Условие (4) проверяется для всех бортовых систем.

Если условие не выполняется (для всех БС), то осуществляется переход к пункту 14.

10. Проверка условия нахождения КА в световом пятне (области поверхности Земли, ограниченной линией с заданным углом Солнца над горизонтом). Если условие не выполняется, то осуществляется переход к пункту 16.

11. Расчёт текущего значения показателя периодичности съёмки и запись в массив для последующей статистической обработки.

12. Проводится анализ режимов съёмки. Вызывается случайное число ξ с равномерным законом распределения на отрезке $[0, 1]$ (см. рис.4) .

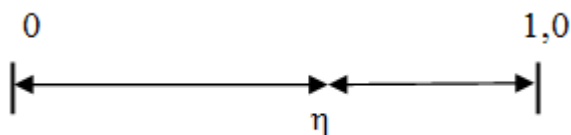


Рис. 4 Графическая иллюстрация моделирования режимов съёмки

Если случайное число лежит в промежутке $0 \leq \xi < \eta$, то осуществляется площадная съёмка и включается счётчик отснятой площади;

Если случайное число лежит в промежутке $\eta \leq \xi < 1,0$, то осуществляется объективное зондирование и включается счётчик отснятых ОН.

Выбор безразмерного коэффициента, определяющего режим съёмки, производится на основе статистических данных. Введение этого блока в блок-схему алгоритма позволяет осуществлять переменное подключение счётчиков соответствующих анализируемым показателям производительности съёмки.



Рис. 5. Блок-схема алгоритма имитационного моделирования

13. Включается счётчик отснятых объектов (производится добавление единицы к текущему количества отснятых объектов). Счётчик срабатывает не

на каждом цикле приращения времени имитации полёта КА, а ещё при одном дополнительном условии, а именно, при наступлении каждого нового цикла перенацеливания. Результаты запоминаются.

14. Если условие в пункте 11 выполняется, то включается счётчик площади (производится добавление элемента площадки Δs к текущей суммарной отснятой площади Земли). Счётчик срабатывает не на каждом цикле приращения времени имитации полёта КА, а ещё при одном дополнительном условии, а именно, при наступлении каждого нового цикла перенацеливания. Результаты запоминаются.

15. Осуществляется сравнение текущего времени имитации полёта со значением срока активного существования (АС) $t = T_{AC}$.

Если это условие выполняется, то осуществляется переход к пункту 4.

16. Проверка условия равенства количества проведенных статиспытаний заданному количеству. Если это условие не выполняется, то осуществляется переход к пункту 4.

17. Осуществляется приращение времени имитации на шаг расчёта $t = t + \Delta t$.

18. Расчет статистических характеристик (математического ожидания, дисперсии, доверительных границ, показателя производительности для заданного уровня надёжности КА).

19. Проверка условия равенства числа расчетных точек соответствующих уровням надёжности КА заданному. Если это условие не выполняется, то осуществляется переход п. 7.

20. Вывод результатов расчета.

21. Остановка программы.

Рассмотрим модели для оценки производительности съёмки в площади с учётом частичных отказов оптико-электронных преобразователей (ОЭП) системы приёма и преобразования информации (СППИ).

Модели частичных отказов СППИ

Вопрос о влиянии показателей надёжности элементов ОЭП СППИ на производительности съёмки был рассмотрен в работе [8]. В приведённой работе учитывались отказы отдельно взятых зон компенсации (ЗК) [9]. Однако, существуют частичные отказы ОЭП, которые приводят к отказам сразу несколько ЗК. Кроме того, отказы групп ЗК в большей степени влияют на ширину полосы захвата целевой аппаратуры КА ДЗЗ (см.рис 6.). Под группой ЗК понимаются заштрихованные участки ОЭП.

Алгоритм имитационного моделирования частичных отказов ОЭП СППИ

При имитации случайного времени отказов групп ЗК использовались формулы (1) –(2). Однако в данной работе учитывались невосстанавливаемые отказы ЗК. Это объясняется невозможность резервирования самой зоны компенсации при отказе источника питания линейного участка ОЭП.

При разработке данного алгоритма использовался алгоритм, приведённый на рис. 5. Основные отличия заключаются во введении блока анализа отказов ОЭП СППИ. Рассмотрим пункты 14-18 в составе вновь разработанного алгоритма. Пункты алгоритма, представленного на рис.5 1-13 остаются неизменными. Пункты 15-21 также остаются в первоначальном варианте, только изменяется нумерация нижестоящих пунктов алгоритма.

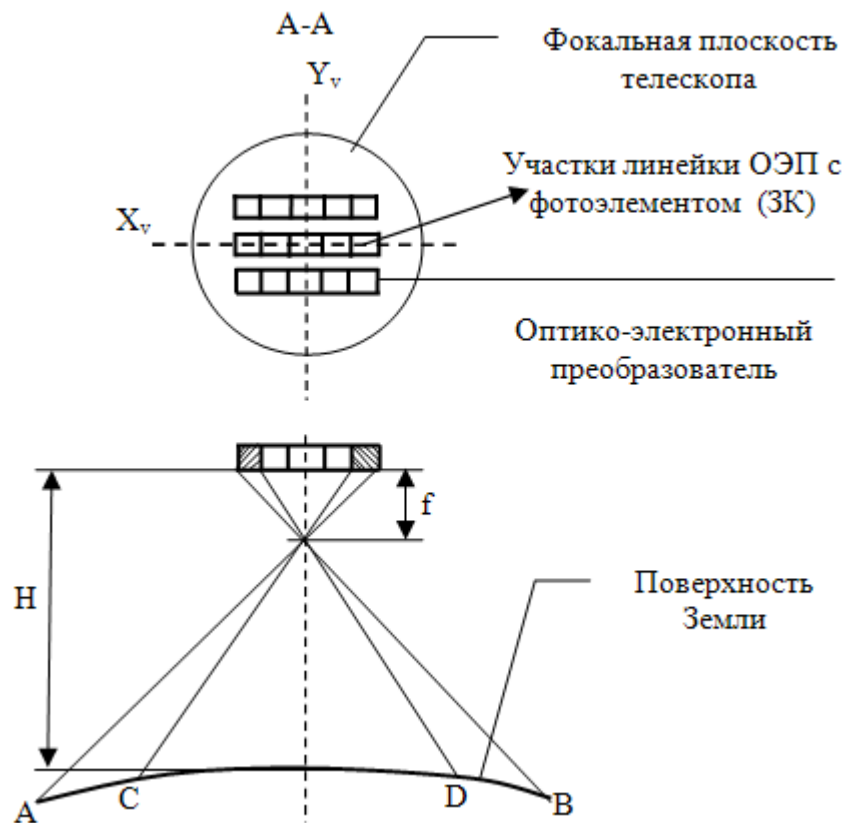


Рис. 6 Схема размещения ОЭП

14. Проверка условия равенства текущего времени полёта КА и случайного времени отказа группы ЗК.

$$t \geq t_{сл.зк.i} \tag{5}$$

Если это условие выполняется, то логической переменной A'_i , характеризующей работоспособность или неработоспособность рассматриваемой i -й ЗК, присваивается значение «ложь», в противном случае «истина». Условие (5) проверяется для всех групп ЗК.

Если условие не выполняется (для всех ЗК), то осуществляется переход к пункту 14.

15. В данном пункте осуществляется определение коэффициента $\bar{\sigma}$ с учётом статистического материала, представленного в табл. 2.

Табл. 2. Статистика по отказам СППИ

n	$l, м$	$b_{пол.зах, км}$	\bar{s}
0	0,32	38	1,0
1	0,214	25,33	0,667
2	0,108	12,83	0,338

Здесь n - число отказавших групп зон компенсации СППИ, l - длина линейки ОЭП в метрах, $b_{пол.зах}$ - ширина полосы захвата в километрах.

16. Присвоение значения логической переменной, определяющей работоспособность группы ЗК в зависимости от выполнения условия в пункте 14.

17. Подключение подпрограммы учёта частичных отказов СППИ.

18. Подключение счётчика площади с учётом определённого ранее коэффициента \bar{s} .

Блок- схема доработанного алгоритма приведена на рис. 7.

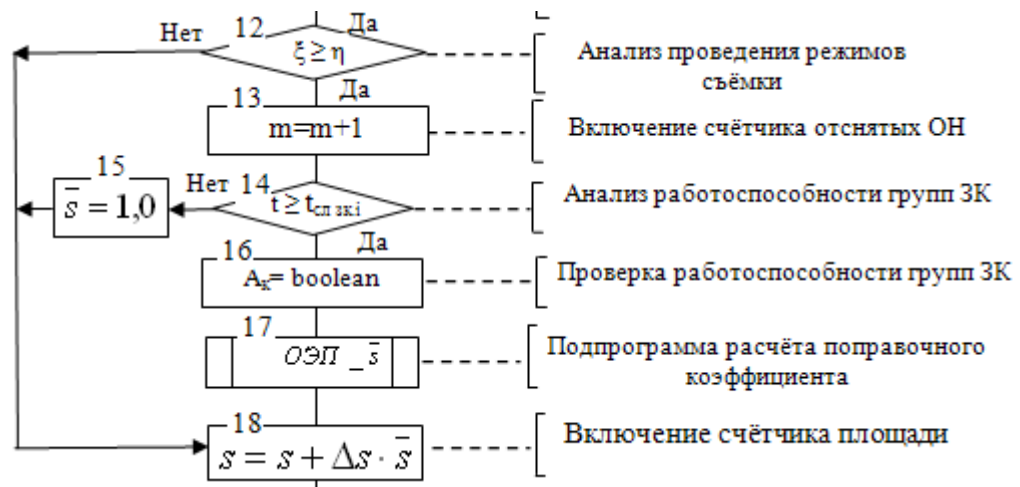


Рис. 7 Блок-схема алгоритма с учётом частичных отказов ЗК ОЭП

Программное обеспечение

На основе представленных алгоритмов разработано программное обеспечение, с помощью которого можно на этапе проектирования прогнозировать показатели целевой эффективности КА наблюдения с учётом

отказов бортовых систем и перерывов в работе элементов до восстановления работоспособного состояния. В качестве базового использовано программное обеспечение для моделирования орбитального полета КА и оценки целевых показателей эффективности [4]. Доработка программного кода связана с введением процедуры исходных данных по показателям надёжности и расчётом случайного времени отказов бортовых систем и времени простоя КА с учётом частичных отказов БС. При оценке показателей производительности съёмки в площади с учётом частичных отказов СППИ, использовались программы для оценки производительности съёмки выраженной числом отснятых ОН. Доработка программного кода в этом случае связана с введением процедуры по учёту частичных отказов ОЭП и определению коэффициента ε . Программа реализована в среде программирования Delphi 7, операционная система Windows. Перед запуском программы вводятся исходные данные для оценки показателей производительности съёмки с учётом выбранных условий функционирования КА ДЗЗ.

С помощью разработанного программного обеспечения можно также рассчитывать исходные данные для нормирования показателя надёжности КА исходя из допустимого уровня потери производительности космической системы. Заметим, что нормирование проводится не только по показателю производительности, но и с учётом других показателей целевой эффективности, а также с учётом резервирования, ограничений по массе БС, ресурсов, срока активного существования и др.

Результаты моделирования

Моделирование производительности съёмки проводилось при следующих параметрах: орбита круговая с высотой 730 км и наклоном 98,3 градуса, ширина полосы захвата 38 км, долгота восходящего узла 30 градусов, угол Солнца над горизонтом, выше которого возможна съёмка 30 градусов, время

перенацеливания 40 с, угол отклонения оптической оси КА от надира до 45 градусов, расчётный срок активного существования КА 3 года.

Теоретическое значение производительности съёмки, выраженной числом отснятых ОН при абсолютной надёжности КА равно 180000 отснятых объектов за расчётный срок активного существования или 180 объектов в сутки. Доверительные границы оценивались с доверительной вероятностью $\gamma = 0,90$.

На рис. 8 представлена зависимость производительности съёмки от уровня показателей надёжности КА. Точки на графике соответствуют математическим ожиданиям показателей производительности, а вертикальными отрезками – доверительные интервалы, соответствующие 90 процентной доверительной вероятности. Сплошная кривая на графике соответствует сглаженным результатам, а пунктирная – аппроксимации линейной зависимостью (линия тренда), уравнение которой представлено на поле рисунка. Горизонтальная пунктирная прямая линия соответствует значению производительности без учёта влияния отказов. Числа в поле рисунка рядом с расчётными точками соответствуют числу проведённых статистических испытаний.

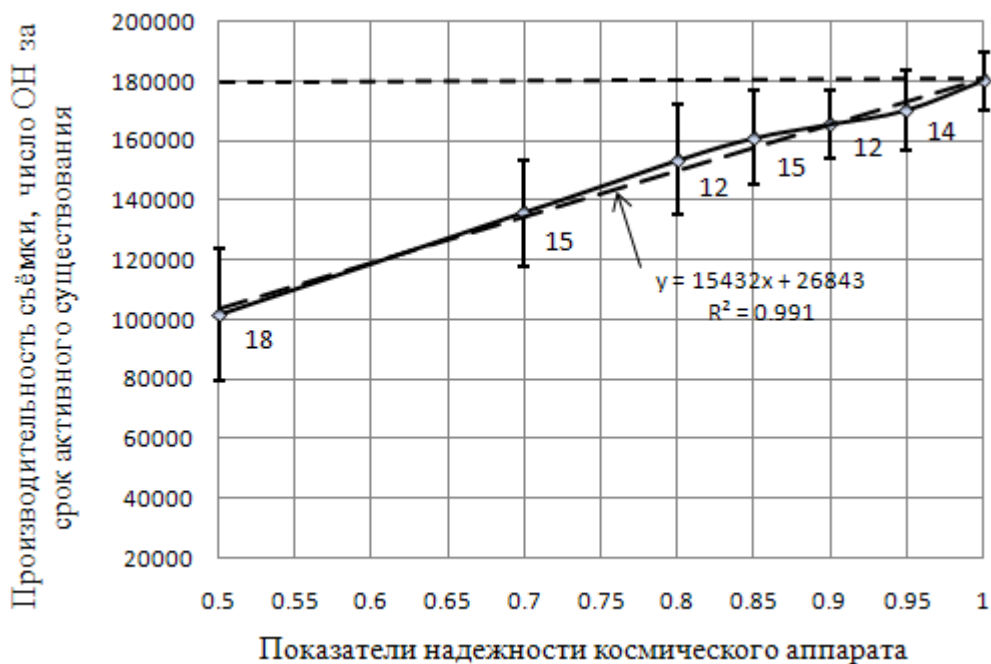


Рис. 8. Зависимость производительности съёмки в числе ОН от уровня надежности КА ДЗЗ

Теоретическое значение производительности съёмки, выраженной в площади при абсолютной надежности КА равно 37 млн. км^2 за расчётный срок активного существования 3 года. Доверительные границы оценивались с доверительной вероятностью $\gamma = 0,90$. На рис.9-10 представлены зависимость производительности съёмки в площади без учёта и с учётом частичных отказов ОЭП СППИ. Сравнительный анализ этих графиков говорит об адекватности рассмотренных моделей частичных отказов БОС и оптико-электронной целевой аппаратуры.

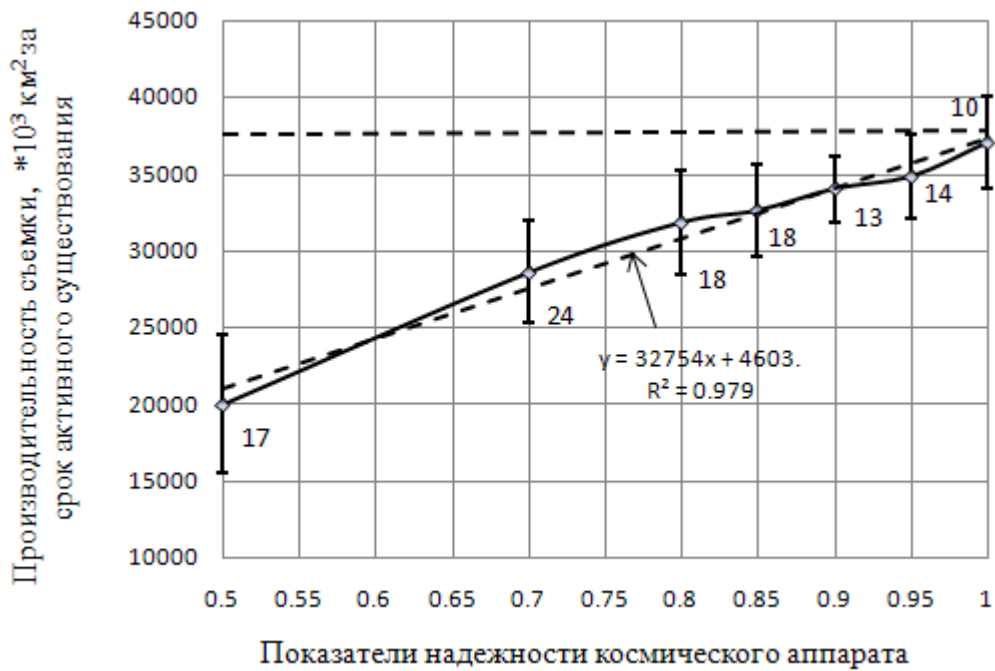


Рис. 9 Зависимость математического ожидания производительности и границ доверительных интервалов производительности съемки без учёта частичных отказов ОЭП, с учётом отказов БОС

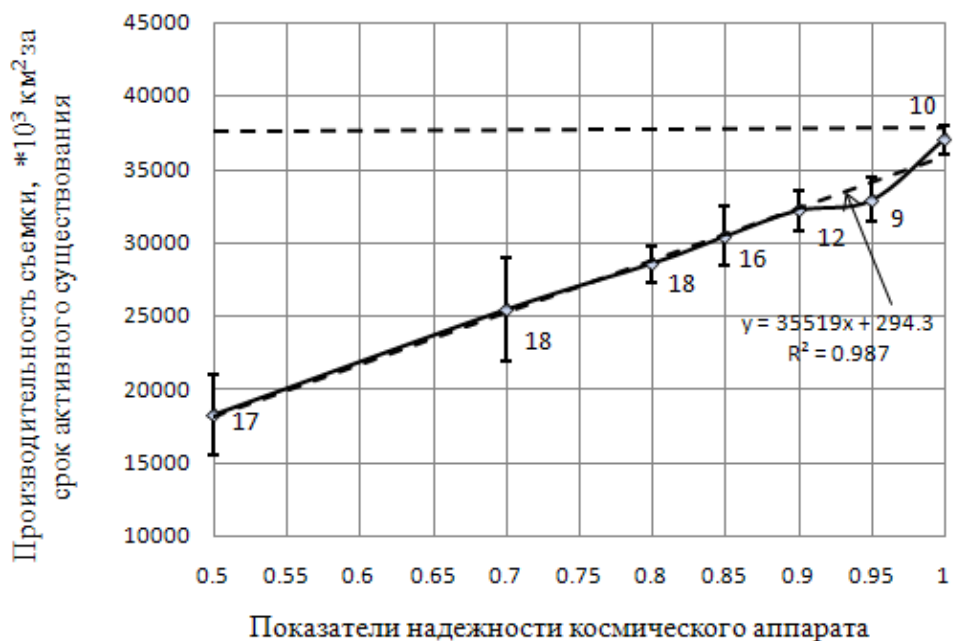


Рис. 10 Зависимость математического ожидания производительности и границ доверительных интервалов производительности съёмки с учётом частичных отказов ОЭП КА, с учётом отказов БОС

Моделирование периодичности съёмки проводилось при следующих параметрах солнечно-синхронной орбиты: орбита высотой 475 км и наклоном 97,0 градусов, долгота восходящего узла 0 градусов, угол Солнца над горизонтом, выше которого возможна съёмка 30 градусов, угол отклонения оптической оси КА от надира до 45 градусов, широта единичного объекта наблюдения 50 градусов, долгота 70. Расчётный срок активного существования КА 3 года.

Результаты расчётов с использованием разработанного программного обеспечения представлены в табл. 3, где $P_{КА}$ - показатель надёжности КА, $N_{ст}$ - количество статистических испытаний, $m_{пер}$ - математическое ожидание периодичности, P_H и P_B - нижняя и верхняя границы доверительной вероятности соответственно, Δ - потеря периодичности, выраженная в процентах. Теоретическое значение периодичности при абсолютной надёжности КА равно 34,4 часа. Доверительные границы оценивались с доверительной вероятностью $\gamma = 0,90$.

Табл. 3. Результаты моделирования периодичности съёмки

$P_{КА}$	$N_{ст}$	$m_{пер}$	P_H	P_B	$\Delta, \%$
0,500	18	77,94	71,4	84,5	55,99
0,700	23	62,82	55,9	69,8	45,4
0,800	14	47,44	44,74	50,14	27,72
0,850	10	46,9	42,82	50,98	26,87
0,900	10	42,77	39,63	45,9	19,8
0,950	10	38,54	35,7	41,4	11,00
1,000	10	34,3	31,3	37,3	0

На рис. 11 представлена зависимость периодичности наблюдения съёмки от уровня надёжности КА. Сплошной линией представлена сглаженная кривая математического ожидания периодичности. Штрихпунктирными линиями с одной точкой между штрихами представлены границы доверительных интервалов. Аппроксимация линейной зависимостью (линия тренда)

представлена пунктирной линией, уравнение которой представлено на поле рисунка. Горизонтальная штрихпунктирная линия с двумя точками между штрихами соответствует периодичности наблюдения при надёжности КА, равной единице. Эта линия представлена для сравнения данных.

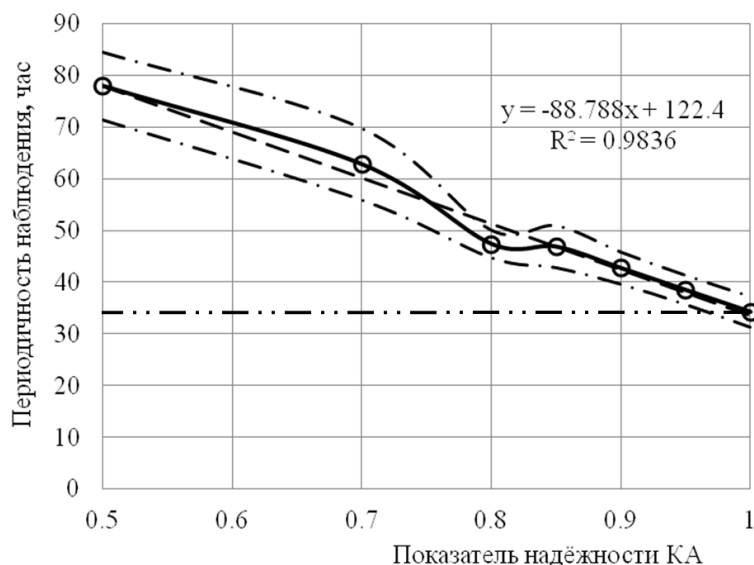


Рис. 11. Зависимость периодичности съёмки от уровня надёжности КА ДЗЗ

Верификация моделей и анализ результатов

Производительность съёмки, выраженной числом отснятых ОН при моделировании задавалась равной 180 объектов в сутки, что соответствует максимальной производительности КА ДЗЗ «Ресурс ДК» [6]. Пересчитанное значение показателя производительности КА за срок активного существования КА, равным 3 года при абсолютной надёжности КА составляет 180000 отснятых объектов, что совпадает с данными моделирования.

Производительность съёмки, выраженной в площади принималось раной 60тыс.км² при моделировании задавалась равной объектов в сутки, что соответствует максимальной производительности КА ДЗЗ «Ресурс ДК» [6]. Пересчитанное значение показателя производительности КА за срок активного существования КА, равным 3 года при абсолютной надёжности КА составляет,

37 млн.км² что совпадает с производительностью съёмки КА ДЗЗ «Ресурс ДК» за 3 года эксплуатации.

Полученные результаты моделирования для периодичности, рассчитанные с помощью данного программного обеспечения, примерно соответствуют показателям КА, разработанным в ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» для соответствующих параметров орбит и уровней надёжности. Периодичность наблюдения соответствует данным для КА ДЗЗ «Ресурс-П» до 3 суток. Данное значение периодичности рассматривается как наихудшее значение в диапазоне широт ОН от -80^0 до $+80^0$, а полученные значения в результате моделирования соответствуют статистическим данным.

Ожидаемое изменение показателей целевой эффективности КА вследствие снижения показателя надёжности КА в целом подтверждается и согласуется с методической точки постановкой задачи. «Всплеск» (неустойчивое поведение) соответствующих кривых $E(P)$ в области показателя надёжности 0,8 и 0,9 можно объяснить двумя обстоятельствами. Во-первых, мало количество статистических испытаний. Заметим, что это количество является критичным, так как имитация одного цикла, соответствующего сроку активного существования КА (3 года) на современных высокопроизводительных персональных ЭВМ достигает нескольких часов. При возрастании количества статиспытаний и увеличении количества расчётных уровней показателя надёжности КА кривая $E(P)$ возможно будет более гладкой и вогнутой. Во-вторых, не исключено, что по своей природе полученные кривые на рис. 8-10 близки к форме кривой $E_2(P)$ на рис. 1. Выяснение этих обстоятельств требует дополнительных исследований.

Выводы

Разработаны модели, алгоритм и программное обеспечение для имитационного моделирования влияния частичных отказов целевой

аппаратуры БОС КА ДЗЗ на показатели целевой эффективности за срок активного существования. С помощью данного программного обеспечения можно более точно прогнозировать показатели целевой эффективности на этапе проектирования КА и оценивать допустимые потери выходного эффекта при отказах КА. Кроме того, разработанные алгоритмы и модели могут использоваться для оценки оперативности доставки целевой информации на Землю с учётом надёжности КА.

Зависимости показателей целевой эффективности от показателей надёжности могут служить в качестве исходных данных для нормирования надёжности КА ДЗЗ на ранних этапах проектирования.

Библиографический список

1 *Ханцеверов, Ф. Р.* Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли [Текст] / *Ф. Р. Ханцеверов, В. В. Остроухов.* – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.

2 *Лебедев, А. А.* Космические системы наблюдения [Текст] / *А. А. Лебедев, О. П. Нестеренко.* – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.

3 *Малышев, В.В.* Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление [Текст] / *В. В. Малышев, М. Н. Красильщиков, О.П.Нестеренко, В.Т. Бобронников,* под ред. *В. В. Малышева* – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.

4. *Куренков, В. И.* Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие [Текст] / *В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов.* - Самара: Изд-во Самар-го. гос. аэрокосм. ун-та, 2006-296 с.

5. *Куренков, В. И.* Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов: учебн. пособие [Текст] / *В. И. Куренков, В. А. Капитонов.* - Самара: Изд-во Самар-го. гос. аэрокосм. ун-та, 2007-320 с.

6. *Кирилин, А.Н.* Основные результаты и планы ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» по созданию космических средств ДЗЗ социально - экономического назначения [Текст] / *А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Г. П. Анишаков.* - Вопросы электромеханики Т. 105 2008. с. 40-48.

7. *Лохматкин, В.В.* Прогнозирование производительности съёмки космического аппарата дистанционного зондирования Земли с учётом надёжности бортовых систем [Текст] / *В.В. Лохматкин, В.И. Куренков* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.- 2013.- Т. 15.- № 4(2).- С.465-472.

8. *Лохматкин, В.В.* Оценка производительности космического аппарата, выраженной в площади отснятой Земной поверхности с учётом надёжности [Текст] / *В.В. Лохматкин* // Труды МАИ.-2013.- №65.

9. *Петрицев, В.Ф.* Оптимальное сканирование космическим аппаратом поверхности Земли: учеб. пособие [Текст] / *В.Ф. Петрицев.*- Самара: Изд-во Самар-го. гос. аэрокосм. ун-та, 2007-96 с.