

УДК 629.78 (075)

**Модели для оценки производительности моноскопической
стереосъёмки космических аппаратов дистанционного зондирования
Земли с учётом надёжности бортовых систем**

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 бортовых систем космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на производительность моноскопической стереосъёмки.

Ключевые слова: космический аппарат, моноскопическая стереосъёмка, силовой гироскопический комплекс, отказ.

Актуальность и постановка задачи исследования

Показатели производительности съёмки космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) определяются числом отснятых объектов наблюдения (ОН), площадью стереомаршрутов и площадок. На

производительность съёмки, выраженной в площади стереомаршрутов существенное влияние оказывают частичные отказы бортовых систем (БС) с учётом режимов работы оптико-электронной целевой аппаратуры и надёжность приборов бортового комплекса управления (БКУ).

Объектовое зондирование и площадная съёмка позволяют получить снимки на плоскости. Стереосъёмка (частный случай конвергентной съёмки), позволяет получить снимки с учётом изменения рельефа и высоты на местности зондируемого района поверхности Земли и может осуществляться как с различных витков, так и на одном витке. В данной работе рассматривается стереосъёмка, осуществляемая на одном витке (см. рис.1), где b - ширина полосы захвата оптико-электронной целевой аппаратуры, а B - ширина полосы обзора КА ДЗЗ. Из рис.1 видно, что конвергентная съёмка – это съёмка одного и того же района поверхности Земли с учётом заданной полётной конфигурации КА (стереосъёмка с перенацеливанием КА между маршрутами, стереосъёмка с заданным углом съёмки), при условии равенства стереоуглов ($\alpha_{c1} = \alpha_{c2}$).

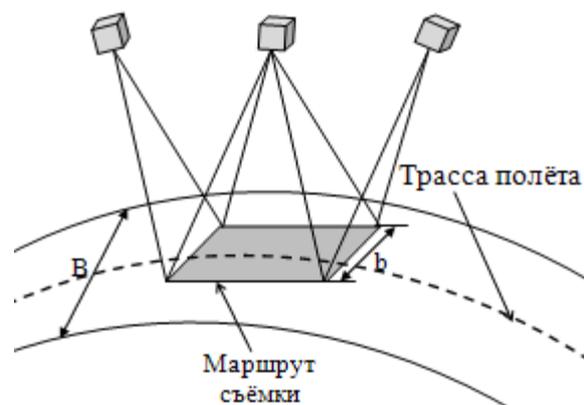


Рис. 1. Схема моноскопической стереосъёмки

Соответствующие углы в свою очередь связаны кинематическим соотношением для стереосъёмки:

$$-\alpha_{c1} + \omega \cdot t = +\alpha_{c2}, \quad (1)$$

где ω - угловая скорость КА в процессе программного поворота, осуществляемого относительно т. O_2 (см. рис.6), а t - время программного поворота.

В процессе эксплуатации КА ДЗЗ возникают частичные отказы, которые приводят к простоям по целевому функционированию или к ухудшению динамических характеристик системы управления движением (СУД), определяющих эффективность целевого функционирования КА. Примером последней является угловая скорость переориентации КА ДЗЗ в процессе программного поворота. Вопрос о влиянии времени простоя на показатели производительности съёмки, выраженной числом отснятых ОН и в площади были рассмотрены в работах [7], [8]. Влияние динамических характеристик СУД при отказе одного из силовых гироскопов силового гироскопического комплекса (СГК) на производительность стереосъёмки, приводит к уменьшению стереоуглов ($\alpha < \alpha_{c1}$) и к уменьшению длины стереомаршрута.

В общем случае влияние показателей надёжности КА ДЗЗ на показатели производительности съёмки E можно представить в виде типового графика, как это показано на рис. 2. На этом рис. 2: $E_1(P)$, $E_2(P)$ и $E_3(P)$ - возможные формы зависимостей производительности стереосъёмки от показателя надёжности КА с учётом отказов БС (без учёта отказов СГК); с учётом частичных отказов ОЭП СПИИ и с учётом отказов бортовых обеспечивающих систем; с учётом отказов БС,

включая отказы СГК и СППИ, соответственно; E_0 - значение показателя производительности съёмки при надёжности КА, равной единице; $E_{доп}$ - допустимый уровень показателя производительности съёмки КА, ΔE – допустимые потери производительности от снижения надёжности КА, $P_{1Н}$, $P_{2Н}$ и $P_{3Н}$ - показатели надёжности, соответствующие допустимому уровню потери производительности.

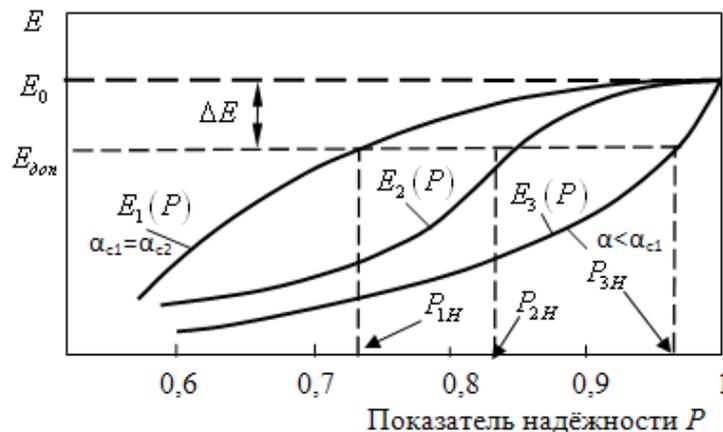


Рис. 2. Влияние показателей надёжности БС на производительность моноскопической стереосъёмки

Зависимости такого рода, если они получены на этапе эскизного проектирования КА, могут служить, с одной стороны, для более точного прогнозирования производительности стереосъёмки с учётом динамических характеристик СУД, а с другой стороны, для комплексной оценки с учётом показателей надёжности СГК и СППИ. Получение зависимости влияния показателей надёжности КА ДЗЗ на производительность стереосъёмки основано на моделировании целевого функционирования КА [1]-[4].

Однако, проблема состоит в том, что в настоящее время оценка производительности стереосъёмки осуществляется исходя из динамических

характеристик СУД, в том числе, с учётом числа силовых гироскопов и параметров рабочей орбиты КА ДЗЗ. Решение данной проблемы осложняется ещё и тем, что в научной литературе не рассматривались работы по моделированию производительности стереосъёмки с учётом целевого функционирования КА ДЗЗ.

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. В каждый момент времени имитации производится проверка работоспособности бортовых систем и оценивается возможность проведения зондирования поверхности Земли с учётом различных режимов съёмки КА ДЗЗ. В случае отказа оценивается случайное время вынужденных перерывов в работе той или иной бортовой системы. В случае работоспособности КА подсчитывается либо число отснятых объектов наблюдения, либо площадь стереомаршрутов или площадок в зависимости от режима съёмки. В случае если возникает частичный отказ БОС, то счётчик показателей производительности съёмки приостанавливается. При возникновении частичных отказов ОЭП СППИ счётчики площади зондирования и площади стереомаршрутов работают с уменьшением ширины полосы захвата. При возникновении частичных отказов СГК счётчик площади стереомаршрутов производит расчёт с уменьшением длины маршрута. В случае возникновения последовательно частичных отказов СППИ и СГК, площадь стереомаршрутов суммируется нарастающим итогом с учётом уменьшения ширины полосы захвата и длины маршрута. Расчёт останавливается при отказах КА, при которых невозможно дальнейшее

функционирование по целевому назначению (возникновение критичных отказов), либо при достижении времени, равному сроку активного существования. Такого рода расчёты проводятся для различных уровней надёжности.

Моделирование отказов и времени простоя элементов бортовых систем

Моделирование влияния отказов БС на производительность стереосъёмки сводится к разработке математических моделей отказов БОС, целевой аппаратуры (СППИ) и приборов СГК. Первые две модели были разработаны и рассмотрены в работе [8]. Необходимо рассмотреть вопрос о моделировании приборов СГК. При разработке математических моделей отказов СГК будем рассматривать отказ только одного силового гироскопа. Этот факт можно объяснить двумя обстоятельствами. Во-первых, при отказе одного силового гироскопа происходит резкое снижение угловой скорости программного поворота (почти в 2 раза). Таким образом, отказ двух и более силовых гироскопов приводит к невозможности зондирования маршрутов в режиме стереосъёмки. Во-вторых, во время эксплуатации КА ДЗЗ один и тот же силовой гироскоп может отказывать несколько раз. В настоящей работе будем рассматривать системные отказы СГК, когда один из гироскопов восстанавливает свою работоспособность несколько раз, а отказы других приборов СГК происходят один раз за срок активного существования КА ДЗЗ. Примером нескольких отказов силового гироскопа может быть нарушение обмена между окончательным устройством силового гироскопа по мультиплексному каналу обмена с бортовой вычислительной системой. В качестве отказов СГК, которые происходят

один раз можно рассматривать переход с основного на резервный комплект блока управления приводом силового гироскопа.

При имитации случайного времени отказа для силового гироскопа с несколькими отказами используется экспоненциальный закон распределения, который характерен как для этапа лётных испытаний, так и для нормальной работы элементов сложных БС КА ДЗЗ.

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 (2):

$$t_{\text{отк}} = \frac{-\ln M[\xi]}{\lambda}, \quad (2)$$

где $M[\xi]$ - массив случайных чисел с равномерным законом распределения на отрезке $[0, 1]$, соответствующих нескольким отказам силового гироскопа.

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:

$$\lambda = \frac{-\ln P}{\tau}. \quad (3)$$

Далее определяется случайное время отказа элемента по формуле (2).

Адекватность данной модели проверялась численно путём построения функций надёжности для нескольких КА, на примере КА *Landsat*. С 1972 года по 2013 год было запущено 7 КА, срок службы которых был следующим: *Landsat 1* –

лет; Landsat 2 – 7 лет; Landsat 3- 5 лет; Landsat 4 – 11 лет; Landsat 5- 28 лет; Landsat 6- 0 (авария на старте); Landsat 7 – 14 лет.

Для обоснования выбора закона распределения при моделировании отказов КА, необходимо построить эмпирическую функцию надёжности для КА *Landsat* и теоретические функции надёжности для экспоненциального, нормального и усечённого нормального законов распределения. Указанные функции построены и приведены на рис. 3.

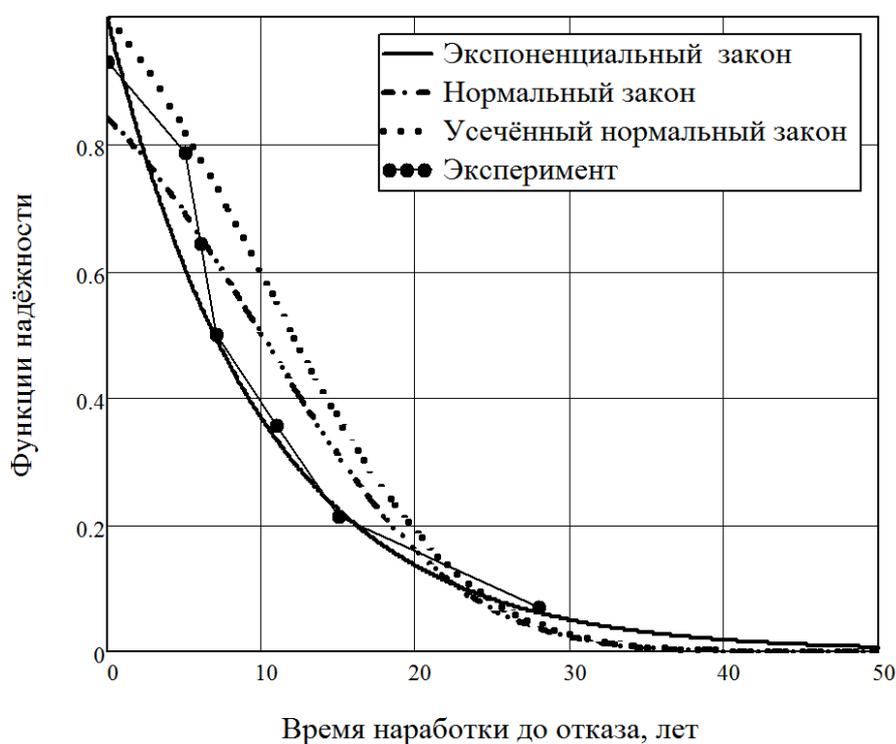


Рис. 3. Функции надёжности КА

Экспоненциальный закон надёжности был построен для параметра интенсивности отказов, равном $0,097 \text{ 1/год}$. Этот параметр был определён на основе оценки математического ожидания времени отказа КА *Landsat*, которое составило $m_t = 10,29$ (без учёта аварийного КА) лет. Для построения нормального закон надёжности кроме математического ожидания рассчитывалось

среднеквадратическое отклонение. Оно составило $D_t=4,93$ года. Усечённый нормальный закон строился на основе следующей зависимости (4):

$$H_{yc}(t) = 1 - \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}D_t} \int_0^x \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-m_t)^2}{D_t^2}\right) dt}{1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}D_t} \int_0^x \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-m_t)^2}{D_t^2}\right) dt}. \quad (4)$$

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. 4, где за вероятности p_i приняты соответствующие частоты h_i .

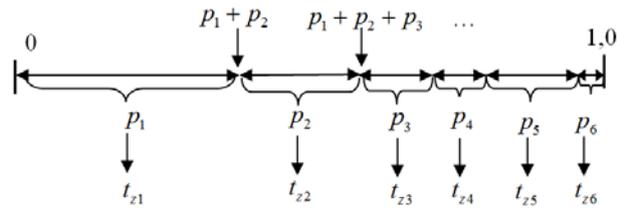


Рис. 4. Графическая иллюстрация моделирования частоты отказов и времени простоя

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

Время простоя по целевому функционированию, будет определяться также уровнем надежности прототипа космического аппарата наблюдения. Чем ниже уровень надежности космического аппарата наблюдения, тем чаще он будет переводиться в различные режимы полета, где не запланирована работа с целевой аппаратурой. При определении времени простоя космического аппарата необходимо ввести коэффициент, определяющий уровень надежности космического аппарата. Расчет времени простоя основывается на методе весовых коэффициентов. Учитывая выше сказанное время простоя можно определить по формуле (5):

$$t_{zi2} = t_{zi} \cdot \frac{1 - H_{прот.}}{1 - H_{КА}}; \quad (5)$$

где t_{zi} - значение времени простоя по целевому функционированию, определенное по табл. 1; $H_{прот.}$ - значения расчётных точек, определяемых уровнем надёжности прототипа КА; $H_{КА}$ - уровень надёжности эксплуатирующегося КА; t_{zi2} - время простоя по целевому функционированию пересчитанное для различных уровней надёжности КАДЗЗ.

Считая, что данные табл. 1 соответствуют $H_{КА} = 0,8751$ для выборочного значения $t_{zi} = 6 \text{ часов}$ при $H_{прот.} = 0,9$, получим, $t_{zi2} = 4,8 \text{ часа}$. Таким образом, с увеличением надёжности КА время простоя по целевому функционированию снижается. Легко убедиться в том, что обратная картина наблюдается при снижении уровня надёжности прототипа КА.

Моделирование режимов съёмки КА ДЗЗ

В процессе целевого функционирования КА ДЗЗ зондирование поверхности Земли может осуществляться: в режиме объектового наблюдения, съёмки площадок

и стереомаршрутов. 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 $0 \leq \xi < p_m$, то считается, что производится объективное зондирование.

Если случайное число оказалось в промежутке $p_m \leq \xi < p_m + p_s$, то считается, что производится площадная съёмка.

Если случайное число оказалось в промежутке $p_m + p_s \leq \xi < 1,0$, то считается, что осуществляется стереосъёмка.

Иллюстрация сути моделирования режимов съёмки КА ДЗЗ приведена на рис.

5

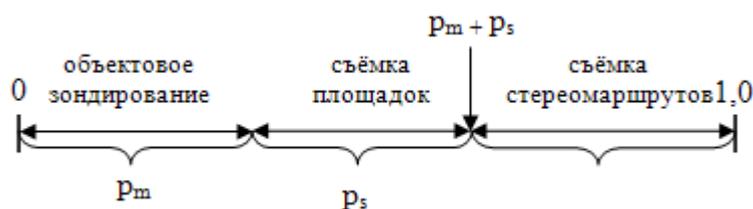


Рис. 5. Графическая иллюстрация моделирования режимов съёмки

Модели частичных отказов СГК

Вопрос о влиянии частичных отказов СГК и других приборов БС на показатели целевой эффективности был рассмотрен в работе [7], [8]. В данной работе учитываются частичные отказы одного из трёх силовых гироскопа,

входящего в состав СГК. Влияние отказов СГК на рассматриваемые показатели производительности съёмки, имеет различный характер. Так, отказ силового гироскопа, при оценки производительности съёмки, выраженной числом отснятых ОН и площадной съёмки, приводит к увеличению времени перинацеливания КА, но при этом площадь снимаемого элемента не уменьшается. В случае отказов СГК в момент стереосъёмки площадь зондируемого элемента уменьшается за счёт сокращения длины стереомаршрута. Математические модели отказов СГК основаны на построении кинематической схемы стереосъёмки (см. рис. 6) и последующем определении длины стеремаршрута с учётом отказов силового гироскопа. Ввиду малого значения угла θ , на основе формул (6):

$$l_{стер} = \frac{\pi \cdot R_3 \cdot (2 \cdot \theta)}{180^0}; \quad DB = R_3 \cdot \sin \theta; \quad tg \alpha_{c1} = \frac{DB}{PO_2}. \quad (6)$$

получим длину стереомаршрута с учётом отказов силового гироскопа (длина дуги XX_1):

$$l_{отк} = \frac{l_{стер}}{tg \alpha_{c1}} \cdot tg \alpha, \quad (7)$$

где $l_{стер}$ - исходное значение длины стереомаршрута (АВ) (см. табл. 1), α - стереоугол с учётом отказов СГК, рассчитанный с использованием (1).

Из формулы (7) видно, что при равенстве стереоуглов мы получаем первоначальную длину стеремаршрута. Полученные значения длин стереомаршрутов для различных значений стереоуглов можно представить в виде таблицы 2, в зависимости от числа отказавших силовых гироскопов $n_{сгк}$.

Табл. 2. Статистические данные по отказам СГК

$n_{сгк}$	$l_{стер, км}$	$\alpha_{с1, град}$	\bar{c}
0	115	+25°	1,0
1	40,3	+7,5°	0,35

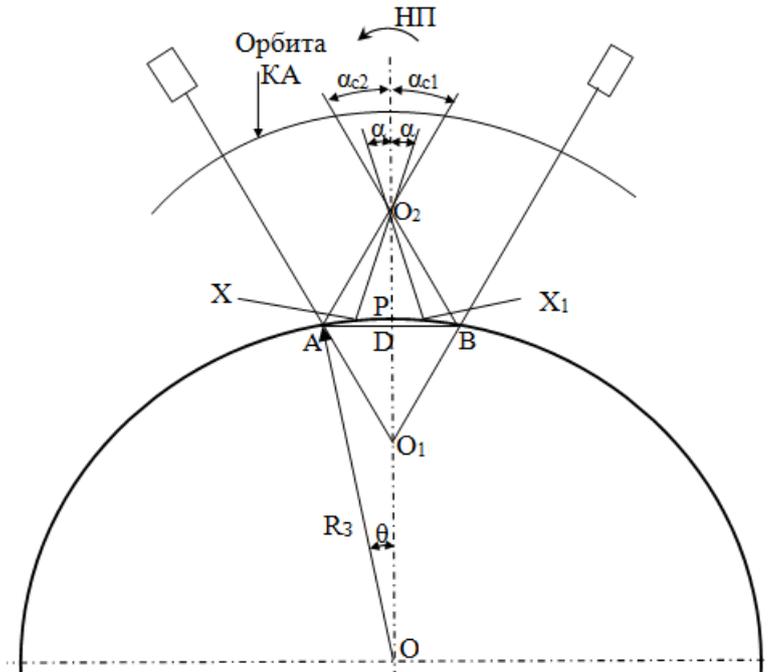


Рис. 6. Кинематическая схема стереосъёмки с учётом отказов СГК

Коэффициент \bar{c} определяется из соотношения длины стереомаршрута с учётом отказов силового гироскопа к длине стереомаршрута без учёта отказов СГК:

$$\bar{c} = \frac{l_{отк.}}{l_{стер.}} \quad (8)$$

Значения стереоуглов, приведённых в табл. 2. рассчитаны для значения угловой скорости перинацеливания КА, равной $\omega = 1,4^0 / сек.$

Алгоритм имитационного моделирования

Алгоритм для оценки влияния частичных отказов бортовых систем и динамических характеристик СУД на производительность стереосъёмки КА ДЗЗ представлен ниже и включает в себя частные алгоритмы для расчёта нескольких

отказов силового гироскопа, моделирования частичных отказов ОЭП СППИ, моделирования режимов съёмки КА ДЗЗ с учётом частичных отказов бортовых систем. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 7.

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 [5].

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.

7.1 Задание в цикле число отказов СГК.

7.2 Получение массива случайных чисел.

7.3 Упорядочивание массива случайных чисел по убыванию.

7.4 Расчёт случайного времени отказа СГК (в соответствии с п.7.3).

7.5 Проверка условия равенства текущего времени орбитального полёта КА с суммой случайного времени отказа СГК и времени простоя по целевому функционированию КА ДЗЗ (проверка восстановления работоспособности СГК):

$$t \geq (t_{сл.сгки} + t_{з.сгки}) \quad (9)$$

Если это условие выполняется, то логической переменной A'_i , характеризующей работоспособность или неработоспособность рассматриваемого i -го силового гироскопа, присваивается значение «ложь», в противном случае «истина». Условие (4) проверяется для всех силовых гироскопов, в том числе, и для гироскопа с несколькими отказами.

Если условие не выполняется (для силового гироскопа с несколькими отказами), то осуществляется переход к пункту 15.

7.6 Проверка условия равенства количества смоделированных отказов силового гироскопа заданному количеству отказов. Если это условие не выполняется, то осуществляется переход к пункту 7.9.

7.7 Включается счётчик числа отказов силового гироскопа (производится добавление единицы к текущему количеству отказов). Счётчик срабатывает не на каждом цикле приращения времени имитации полёта КА, при дополнительном условии, а именно, при каждом восстановлении работоспособности силового гироскопа.

7.8 Расчёт времени отказа силового гироскопа для всех значений случайных чисел (по очереди).

7.9 Осуществляется сравнение максимального значения случайного времени отказа силового гироскопа, меньшего срока активного существования КА, с текущим временем орбитального полёта КА ДЗЗ. Если это условие выполняется, то осуществляется переход к пункту 7.10.

7.10 Определяется значение поправочного коэффициента по длине стереомаршрута при отказах силового гироскопа.

7.11 Определяется значение поправочного коэффициента по длине стереомаршрута при отсутствии отказов силового гироскопа.

8. Запуск подпрограммы имитации полёта и целевого функционирования КА.

9. Проверка работоспособности КА с использованием логико-вероятностных функций. Если событие $Y'_{КА}$, посчитанное по формуле работы [7], 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 14.

10. 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).

$$t_{сл.i} \leq t < (t_{сл.i} + t_{zi}). \quad (10)$$

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.

11. 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 14.

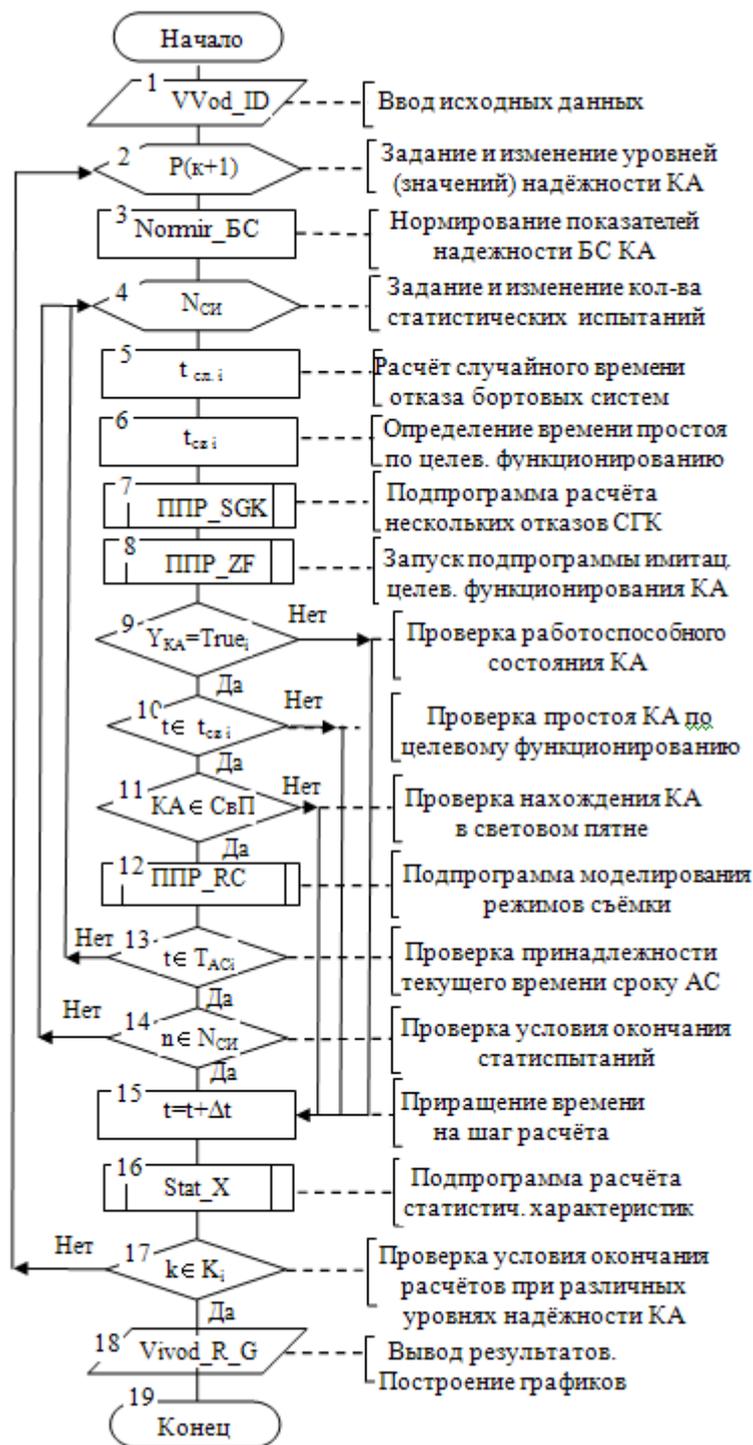


Рис. 7. Блок-схема имитационного моделирования

12.1 Проверка условия равенства текущего времени полёта КА и случайного времени отказа группы линейных участков.

$$t \geq t_{сл.лин.уч.и} \cdot \tag{11}$$

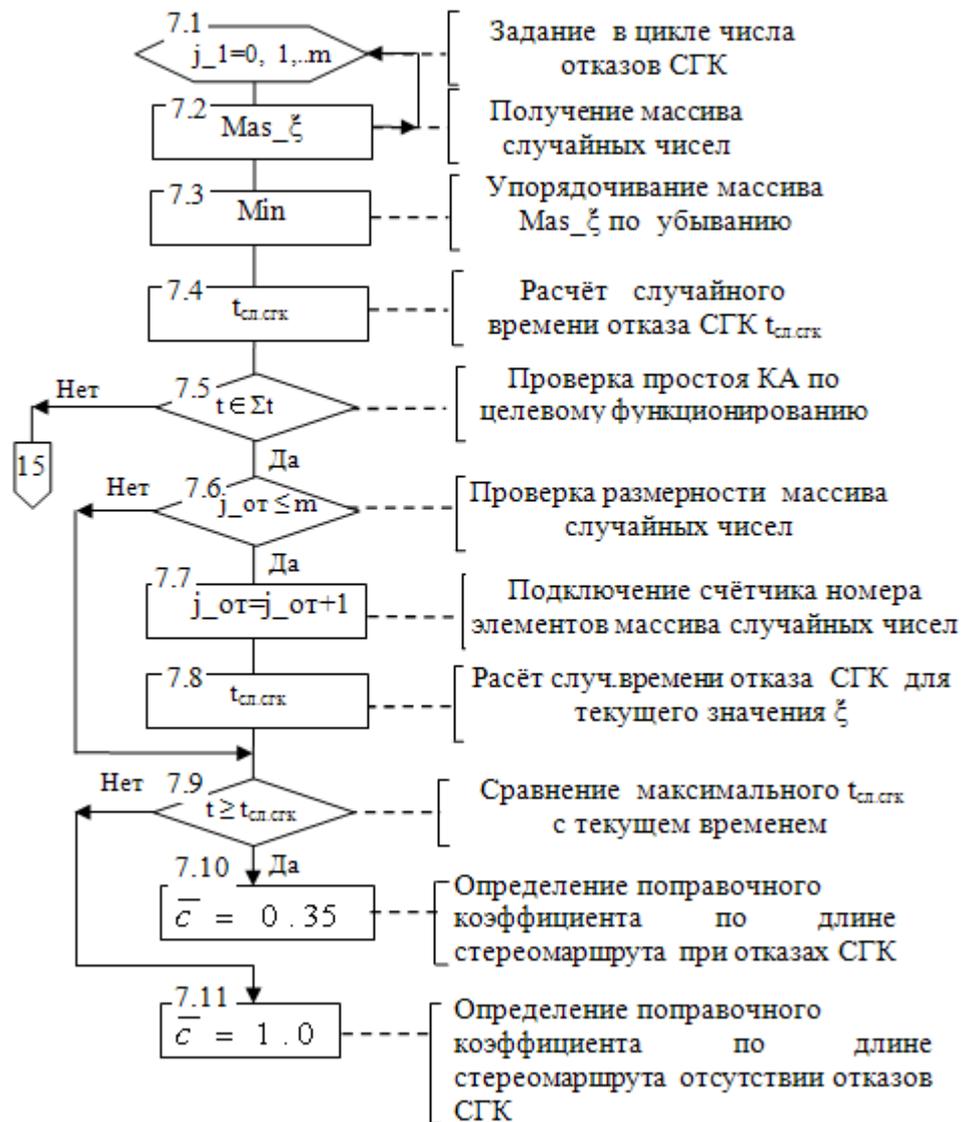


Рис. 8. Блок-схема имитационного моделирования нескольких отказов силового гироскопа

12.2 Присвоение значения логической переменной, определяющей работоспособность группы линейных участков в зависимости от выполнения условия в пункте 12.1.

12.3 Подключение подпрограммы учёта частичных отказов СППИ.

12.4 Производится анализ условия возможности объектового зондирования.

Если это условие выполняется, то переходим к пункту 12.5.

12.5 Включается счётчик отснятых объектов (производится добавление единицы к текущему количеству 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 перинацеливания. Результаты запоминаются.

12.6 Производится анализ условия возможности площадной съёмки. Если это условие выполняется, то переходим к пункту 12.7.

12.7 Включается счётчик площади зондирования (производится добавление элемента площадки к текущему значению площади зондирования).

12.8 Включается счётчик площади стереосъёмки (производится добавление элемента площадки стереомаршрута к текущему значению площади стереосъёмки).

13. 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.

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

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

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

17. Проверка условия равенства числа расчетных точек соответствующих уровням надёжности КА заданному.

Если это условие не выполняется, то осуществляется переход п. 7.

18. Вывод результатов расчета.

19. Остановка программы.

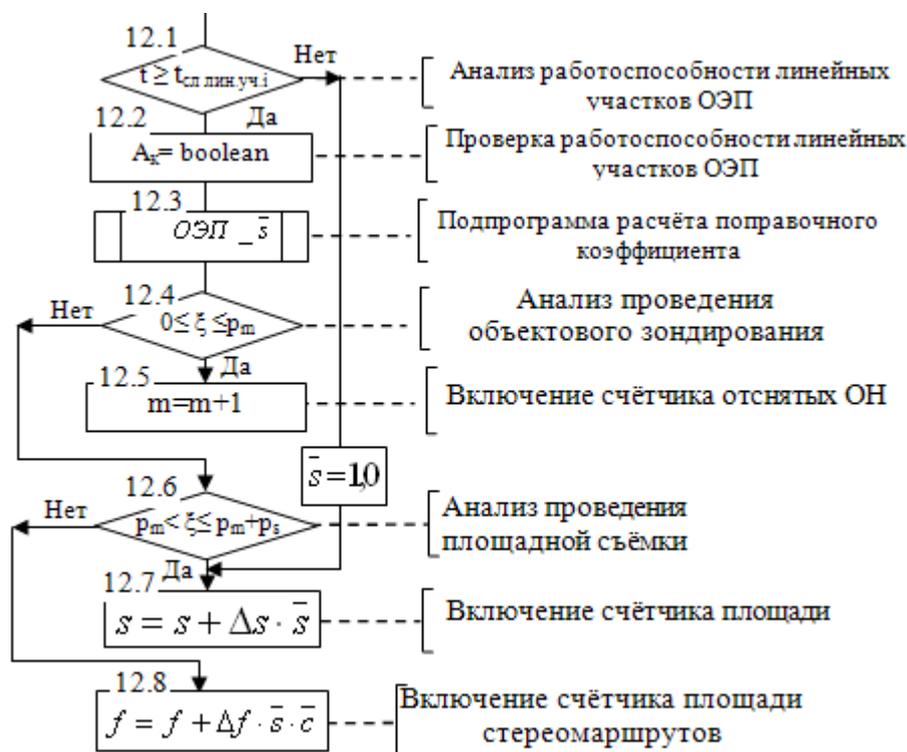


Рис. 9. Блок-схема имитационного моделирования режимов съёмки КА ДЗЗ с учётом частичных отказов бортовых систем

Программное обеспечение

На основе представленных алгоритмов разработано программное обеспечение, с помощью которого можно на этапе проектирования КА ДЗЗ прогнозировать производительность стереосъёмки с учётом отказов бортовых систем, перерывов в работе элементов до восстановления работоспособного состояния и с учётом динамических характеристик СУД. В качестве базового использовано программное обеспечение для моделирования орбитального полета КА и оценки целевых показателей эффективности с учётом отказов бортовых

систем [7]. Доработка программного кода связана с введением процедуры моделирования нескольких отказов одного силового гироскопа, входящего в состав СГК. Также доработка программного кода была связана с введением блока моделирования режимов съёмки КА ДЗЗ с учётом частичных отказов бортовых систем. При оценки показателей производительности стереосъёмки были использованы ранее разработанные модели частичных отказов СППИ. 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 производительности стереосъёмки 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 3 года, число силовых гироскопов в СГК принималось равной трём.

На рис. 10 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 соответствует значению производительности без учёта влияния отказов. Числа в поле рисунка рядом с расчётными точками соответствуют числу проведённых статистических испытаний.

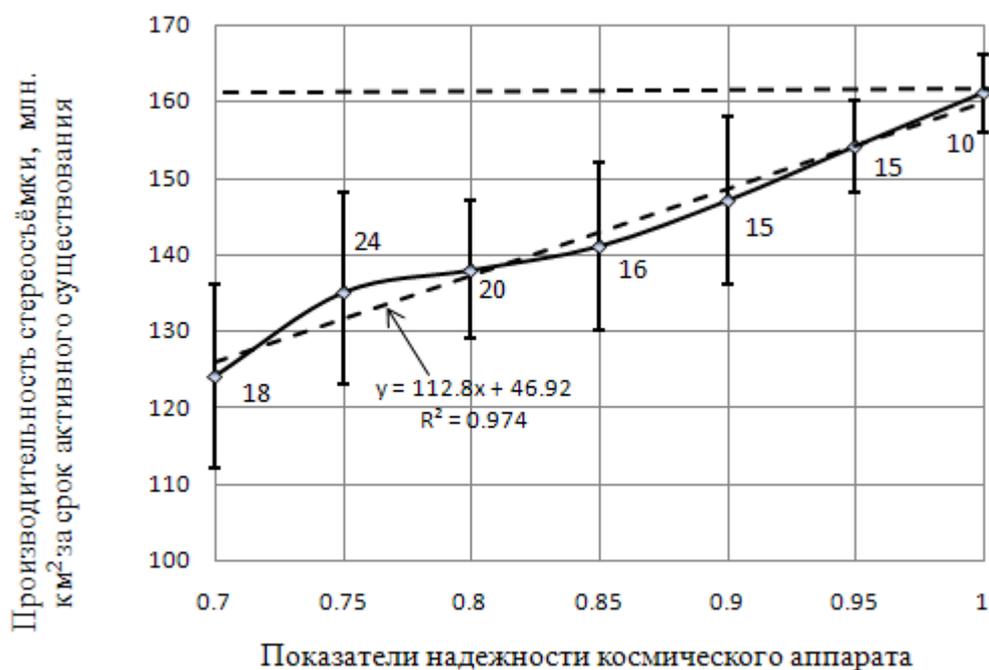


Рис. 10. Зависимость производительности стереосъёмки от уровня надёжности КА ДЗЗ

Теоретическое значение производительности стереосъёмки при абсолютной надёжности КА равно $161,4 \text{ млн. км}^2$ за расчётный срок активного существования 3 года. Доверительные границы оценивались с доверительной вероятностью $\gamma = 0,90$.

Верификация моделей и анализ результатов

Производительность стереосъёмки рассчитывалась исходя из площади стереомаршрута 4370 км^2 при длине 115 км и ширине полосы захвата 38 км моделировании, что соответствует параметрам маршрута КА ДЗЗ «Ресурс-П»

[6]. Пересчитанное значение показателя производительности КА за срок активного существования КА, равным 3 года при абсолютной надежности КА составляет, $161,4 \text{ млн. км}^2$.

Полученные результаты моделирования для производительности стереосъемки, рассчитанные с помощью данного программного обеспечения, примерно соответствуют показателям КА, разработанным в ОАО «РКЦ «Прогресс» для соответствующих параметров орбит и уровней надёжности.

Ожидаемое изменение показателей целевой эффективности КА вследствие снижения показателя надёжности КА в целом подтверждается и согласуется с методической точки постановкой задачи. «Всплеск» (неустойчивое поведение) кривой $E(P)$ в области показателя надёжности 0,75 и 0,85 можно объяснить двумя обстоятельствами. Во-первых, при уровнях надёжности эксплуатирующихся КА, на производительность стереосъемки влияют как частичные отказы групп линейных участков ОЭП СППИ, так, и, частичные отказы СГК. Во-вторых, при увеличении уровня надёжности КА ДЗЗ частота возникновения отказов ОЭП СППИ снижается и в основном на площадь стереосъемки влияют отказы СГК. Таким образом, уменьшается дисперсия для уровней надёжности близких к теоретическим значениям, и результаты моделирования будут менее «разбросанными». 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.

Выводы

Разработаны модели, алгоритм и программное обеспечение для имитационного моделирования влияния частичных отказов СГК, целевой аппаратуры, БОС КА ДЗЗ на производительность стереосъёмки за срок активного существования. С помощью данного программного обеспечения можно более точно прогнозировать производительность стереосъёмки на этапе проектирования КА и оценивать допустимые потери выходного эффекта при отказах КА. Кроме того, разработанные алгоритмы и модели могут использоваться для оценки диаскопической стереосъёмки с учётом надёжности КА.

Библиографический список

1. Ханцеверов Ф.Р., Остроухов В.В. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. Лебедев А.А. Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения. - М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
3. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / Под ред. В.В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.
4. Куренков В.И., Салмин В.В., Абрамов Б.А. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения / Учеб. Пособие. - Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2006. -296 с.

5. Куренков В.И., Капитонов В. А. Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов: Учебное пособие. - Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007. - 320 с.

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

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

8. Лохматкин В.В. Модели для оценки показателей целевой эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учётом надёжности бортовых систем, // Электронный журнал «Труды МАИ», 2014, выпуск 74: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49228> (дата публикации 25.04.2014)

9. Петрищев В.Ф. Оптимальное сканирование космическим аппаратом поверхности Земли: Учебное пособие. – Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007. - 96 с.