
УДК 629.78 (075)

Оценка производительности космического аппарата, выраженной в площади отснятой Земной поверхности с учетом надежности

Лохматкин В. В.

Научно-производственный ракетно-космический центр (НП РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»),

ул. Земеца, 18, Самара, 443009, Россия

e-mail: lohmatkin.vadim@yandex.ru

Аннотация

Разработаны математические модели отказов бортовых систем космического аппарата. Используя логико-вероятностные методы исследования работоспособности сложных технических систем и статистические данные по отказам, разработан алгоритм для оценки производительности съемки с учетом показателей надежности космической системы наблюдения.

Ключевые слова

алгоритм, математическая модель, частичные отказы, космический аппарат наблюдения

Актуальность исследования

Современные космические аппараты наблюдения (КАН) используются для получения картографической информации на местности. Это позволяет изготавливать снимки местности в заданной картографической проекции, исправлять и уточнять карты местности. С помощью используемого режима съемки в интересах решения задач картографирования, необходимо получить максимальную площадь отснятой поверхности Земли за виток. При возникновении частичных отказов бортовых обеспечивающих систем (БОС) и целевой аппаратуры КАН снижается производительность съемки при получении картографической информации. Последнее связано с уменьшением площади отснятого элемента поверхности Земли, а также сокращением длины стереомаршрута. Также возможно снижение точности определения географических координат объектов наблюдения на местности.

Площадь отснятого элемента поверхности Земли определяется шириной полосы захвата. Величина ширины полосы захвата определяется показателями надежности оптоэлектронных преобразователей (ОЭП) системы приема и преобразования информации (СППИ). ОЭП состоит из отдельных участков матрицы линейки, включающих прибор с зарядовой связью (ПЗС). При возникновении частичных отказов ОЭП СППИ происходит отказ отдельных участков и уменьшение ширины полосы захвата. На основе оценки ширины полосы захвата можно спрогнозировать производительность космического аппарата, выраженной в площади.

Существующие методы оценки производительности съемки КАН не позволяют в полной мере оценить влияние времени обнаружения и устранения частичных отказов ОЭП на производительность выраженной в площади. Накопленный статистический материал позволяет лишь оценить размеры элемента площадки снимаемой Земной поверхности. Оценка производительности съемки в площади, с учетом показателей надежности БОС и ОЭП, в научно-технической литературе не встречалась.

Этапы решения

Для решения поставленной задачи необходимо:

- разработать математические модели отказов ОЭП;
- выбрать метод моделирования, принять допущения и определить исходные данные для расчетов;
- разработать программное обеспечение.

Метод моделирования

В данной работе для оценки производительности съемки, выраженной в площади, применяется метод имитационного моделирования, так как графоаналитический метод трудоемкий и не позволяет учесть влияние частичных отказов БОС и ОЭП СППИ космического аппарата, влияющих на исследуемый показатель целевой эффективности.

Расчетная схема

Схема размещения ОЭП в фокальной плоскости опто-телескопического комплекса представлена на рис. 1.

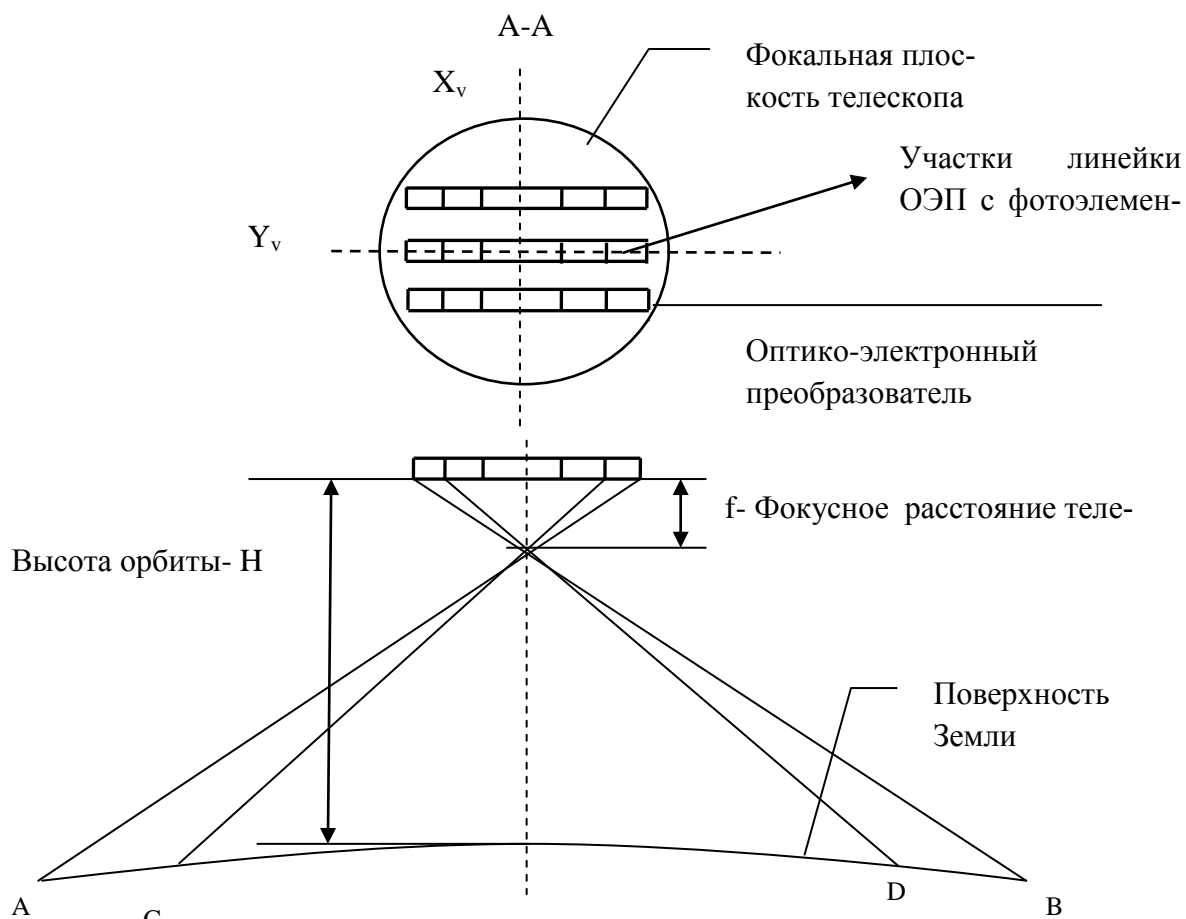


Рис. 1 Схема размещения ОЭП

На приведенном рисунке X_v , Y_v – оси визирной системы координат. Данная схема позволяет рассмотреть различное сочетание количества отказавших участков линейки оптико-электронных преобразователей СППИ. Ширина полосы захвата, соответствующая безотказной работе ОЭП соответствует дуге АВ. Ширина полосы захвата, соответствующая появлению частичных отказов ОЭП соответствует дуге CD. Уменьшение ширины полосы захвата происходит при возникновении отказов крайних участков линейки ОЭП. Частичные отказы ОЭП, связанные с неработоспособностью центральных участков линейки приводят к нарушению сплошности изображения и на значение ширины полосы обзора не влияют. Исходя из представленной схемы, зная число участков линейки ОЭП можно определить значение рас-

четного коэффициента, который определяет ширину полосы захвата. В случае безотказной работы линеек ОЭП он равен единице. При отказах крайних участков элементов линейки этот коэффициент меньше единицы. Физический смысл коэффициента s заключается в том, что он является поправкой для расчета ширины полосы захвата.

Состав моделей

Оценка производительности съемки, выраженной в площади, производится с использованием следующих моделей:

- модели для организации имитации моделирования орбитального полета КАН;
- модели для имитации целевого функционирования КАН;
- модели имитационного моделирования отказов бортовых систем КАН;
- модели для имитационного моделирования частичных отказов ОЭП СППИ.

Первая модель рассмотрена в работе [1]. Вторая модель также рассмотрена в работе [1] и включает модели для имитации поворотов КАН по углу крена. Последние две модели будут рассмотрены ниже.

Суть моделирования

Оцениваются показатели производительности съемки в площади с учетом условий эксплуатации БС, целевой аппаратуры (СППИ) и облачности. С этой целью рассчитывается случайное время отказов БС, участков линейки ОЭП СППИ. На основе статистических данных выбирается время простоя по целевому функционированию для БС и приборов СППИ.

В каждый момент времени оценивается работоспособность БС и ОЭП СППИ. В случае работоспособности КАН подсчитывается суммарная площадь отснятой поверхности Земли. При неработоспособности КА счетчик площади не включается. При возникновении частичных отказов ОЭП счетчик площади работает с учетом уменьшения ширины полосы захвата. В случае устранения частичных отказов ОЭП коэффициент, определяющий ширину полосы захвата принимает единичное значение и площадь отснятого элемента восстанавливается. В качестве базового используется методика и программное обеспечение для имитационного моделирования влияния частичных отказов БС на производительность, выраженную в числе отснятых объектов наблюдения. Доработка программного обеспечения связано с введением блока, анализирующего работоспособность участков линейки ОЭП. В зависимости от числа участков линейки и количества работоспособных ОЭП в целом определяется значение расчетного коэффициента, определяющего уменьшение ширины полосы захвата.

Основные допущения

- Используется экспоненциальный закон распределения при расчете случайного времени отказов БС КАН;
- Форма Земли- сферическая, однако для расчета параметров орбиты используются уравнения эллиптического движения с периодической коррекцией расчетных значений долготы восходящего узла (прецессии орбиты) и аргумента перигея в процессе длительного полета, вызванных несферичностью Земли (учитываются вековые возмущения от второй зональной гармоники в разложении геопотенциала).

Постановка задачи

Оценить влияние показателей надежности БОС и ОЭП СППИ КАН на производительность съемки, выраженной в площади. Из-за сложности блочного состава СППИ не удастся методами последовательно-параллельного соединения элементов оценить влияние частичных отказов ОЭП на выходной эффект. Поэтому предполагается построить дерево отказов СППИ и на его основе разработать математические модели отказов ОЭП.

Влияние частичных отказов бортовых систем на производительность, выраженную, в площади, связано с простоями по целевому функционированию космического аппарата. При этом площадь отснятого элемента поверхности Земли не изменяется. В случае возникновения частичных отказов ОЭП простоев по целевому функционированию не будет. При этом уменьшается ширина полосы захвата. Поэтому необходимо оценить производительность, выраженную в площади с учетом и без учета частичных отказов ОЭП и бортовых систем.

Исходные данные

В качестве исходных данных для построения алгоритма влияния частичных отказов ОЭП на производительность в площади, являются дерево отказов и логическая функция отказов СППИ, показатели надежности приборов целевой аппаратуры и коэффициент определяющий ширину полосы захвата. С помощью логико-вероятностных методов можно оценить влияние различного числа отказавших участков линейки ОЭП на производительность в площади [3]. Подробно анализируется ОЭП1, на примере одного участка линейки. Аналогично можно рассмотреть логическую функцию отказов для остальных ОЭП. На основе логической функции отказов можно рассмотреть различные варианты количества отказавших участков линейки ОЭП. Критическими отказами для СППИ являются отказ блока распределения питания (БРП) и отказ все трех ОЭП. Блок распределения питания включает в себя ос-

новой (событие C_1) и резервный (событие C_2) комплекты. Отказ блока ОЭП может быть связан с отказом блока управления (БУ), в том числе и схемой управления, а так же с неработоспособностью блока сжатия. События C_3, C_4, C_5 - события, соответствующие отказу первого, второго и третьего участков линейки ОЭП. В общем случае их может быть больше. Рассмотрим анализ взаимного влияния отказов на примере первого участка линейки ОЭП с фотоэлементом. Работоспособность элемента линейки определяется безотказной работой источника питания (событие C_7), j -го тракта обработки сигнала ОЭП1 (событие C_8), канальной частью ячейки формирователя рабочей частоты ОЭП1 (событие C_9) и j -м опто-волоконным трактом передачи информации ОЭП1 в флеш-память высокоскоростной радиолинии (событие C_{10}). Дерево отказов СППИ с учетом выше изложенного представлено ниже (см. рис. 2).

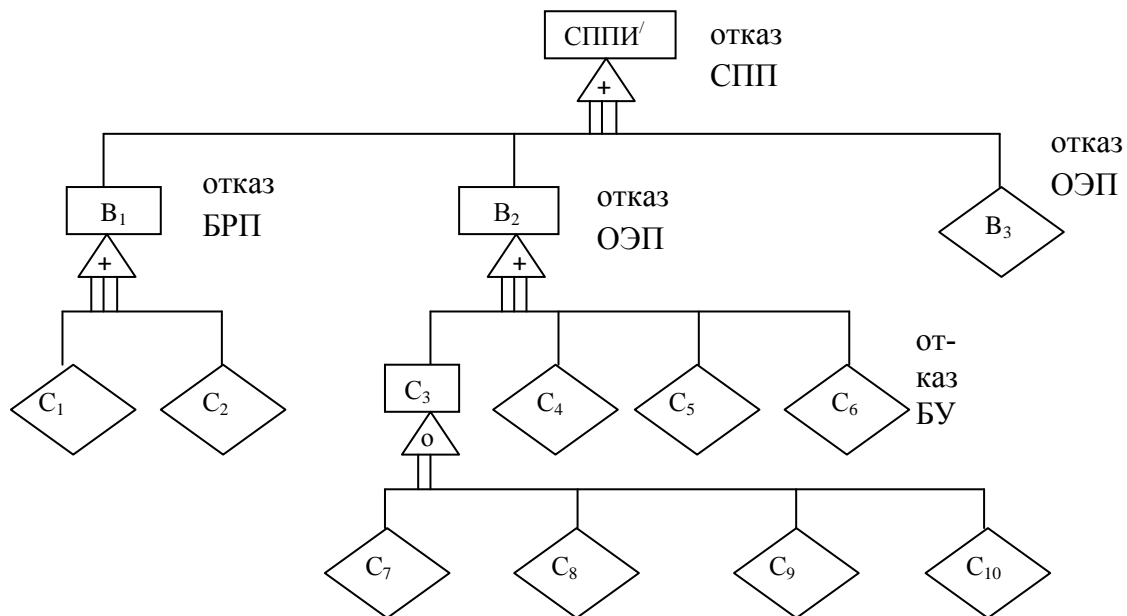


Рис.2 Дерево отказов СППИ

Используя дерево отказов, логическая функция отказов СППИ запишется в виде:

$$A'_{сппи} = (C_1 \wedge C_2) \vee ((C_7 \vee C_8 \vee C_9 \vee C_{10}) \wedge C_4 \wedge C_5 \wedge C_6) \vee B_3 \quad (1)$$

Построенное дерево отказов позволяет оценить влияние отказа какого-либо из приборов ОЭП на работоспособность СППИ. Рассматривая дерево отказов каждой бортовой системы можно перейти к логической функции отказов КАН в целом. С помощью формулы (1) и соответствующих логических функций отказов БОС КАН, можно оценить производительность съемки, выраженной в площади.

Алгоритм и модели для оценки влияния частичных отказов БОС и ОЭП на производительность КАН

Прогнозирование производительности, представленной в виде площади, основано на алгоритме для оценки производительности космического аппарата наблюдения с учетом надежности бортовых систем (БС). Основным отличием вновь разработанного алгоритма является включение блока, анализирующего работоспособность оптико-электронных преобразователей системы приема и преобразования информации. При этом анализируется число зон компенсации оптико-электронных преобразователей. Рассмотрим основные этапы построения алгоритма (см. рис.4,5):

1. Ввод показателей надежности проектируемого КА.
2. Ввод показателей надежности прототипа КА.
3. Определение количества расчетных точек, соответствующих уровням надежности КА.
4. Ввод показателей надежности БС P_i и срока их активного существования космического аппарата τ , равного времени одного статистического испытания.
5. Определение показателей надежности БС с помощью метода весовых коэффициентов [2].
6. Расчет интенсивности отказов БС с использованием экспоненциального закона распределения:

$$\lambda_i = \frac{-\ln P_i}{\tau}; \quad (2)$$

7. Ввод числа статистических испытаний.
8. Вызов генератора случайных чисел для расчета случайного времени отказа i -й бортовой системы.

$$t_{сл.откi} = \frac{-\ln \xi_i}{\lambda_i}, \quad (3)$$

где $\xi_i \in [0, 1]$ - случайное число с равномерным законом распределения на отрезке $[0, 1]$.

9. Вызов генератора случайных чисел с равномерным законом распределения на отрезке $[0, 1]$ для определения времени простоя по целевому функционированию КАН. Определение времени простоя t_z осуществляется в зависимости от относительного значения частоты возникновения отказа p_i для каждой бортовой системы и приборов ОЭП. В частности в статье были выбраны следующие значения t_{zi} , p_i .

Таблица 1. Статистические данные по отказам

t_{zi}	10 мин	1,5 ч	4,139ч	3,2ч	частичные отказы	снижение τ	не выполнение целевой задачи
p_i	0,212	0,233	0,135	0,015	0,205	0,012	0,188

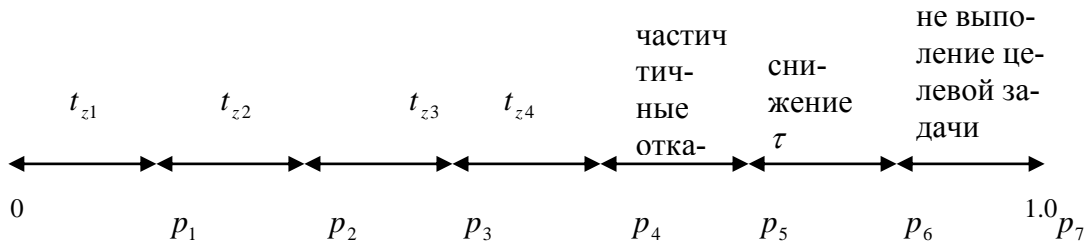


Рис. 3 Характеристика отказов космического аппарата

10. Начало работы подпрограммы имитации орбитального полета КА.

11. Для оценки работоспособности всех БОС и элементов ОЭП вводится счетчик бортовых систем КАН. Проверка работоспособности бортовых систем производится для каждой секунды орбитального полета КАН и осуществляется циклически.

12.1. Проверка условия попадания текущего времени полета КА в интервал между случайным временем отказа и суммой случайного времени отказа и времени простоя КА (см.рис.4).

$$t_{сл. i} \leq t \leq t_{сл. i} + t_{zi} \quad (4)$$

12.2. Если пункт 12.1 выполняется, то логической переменной, характеризующей неработоспособность рассматриваемой БС присваивается значение «ложь» (12.2), а в противном случае «истина» (12.2) (см.рис.4).

12.3. Присвоение значения логической переменной, определяющей работоспособность БС(см.рис.4).

12.4. Анализ окончания циклов проверки работоспособности БС. Если число рассмотренных БС равно заданному числу, то переходим к пункту 13. В противном случае возвращаемся к пункту 11.

13.1. Подпрограмма определения эмпирического коэффициента s , определяющего ширину полосы захвата КАН. Если случайное время отказов групп участков линейки ОЭП больше срока активного существования КАН, то уменьшение ширины полосы захвата не происходит и переходим к пункту 13.2. В противном случае к пункту 13.3.

13.2. Значение коэффициента $s=1.0$.

13.3. Определение числа отказавших крайних участков линейки ОЭП.

13.3.1. Если число отказавших крайних участков линейки $N_{\text{уч}}=1$, то $s=0.83$ (13.3.2).

13.3.3. Если число отказавших крайних участков линейки $N_{\text{уч}}=2$, то $s=0.67$ (13.3.4).

Здесь значения коэффициента s рассчитаны для случая шести участков в линейки ОЭП.

13.3.4. В общем случае в алгоритме рассмотрен случай отказа $N_{\text{участков}}$.

14. Анализ окончания циклов проверки работоспособности БС. Если число рассмотренных БС равно заданному числу, то переходим к пункту 15. В противном случае возвращаемся к пункту 11.

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

16. Проверка условия работоспособности КАН. Если это условие выполняется, то переходим к пункту 17. В противном случае переходим к пункту 23.

17. Проверка попадания КА в световое пятно. Если это условие выполняется, то переходим к пункту 18. В противном случае переходим к пункту 23.

18. Осуществляется сравнение срока активного существования с текущим временем имитации орбитального полета КАН (времени одного статистического испытания). Если это условие выполняется, то переходим к пункту 19. В противном случае переходим к пункту 23.

19. Анализ проведения режимов съемки. Если случайное число с равномерным законом распределения на отрезке $[0,1]$ меньше или равно η , то производится объектовая съемка и включается счетчик отснятых объектов наблюдения (20). В противном случае производится маршрутная съемка и включается счетчик отснятой площади (21). Здесь A - площадь элемента снимаемой площадки.

22. Производится запись показателей производительности съемки в массив.

23. Приращение текущего времени орбитального полета КА на шаг расчета.

24. Организуется цикл по текущему времени орбитального полета.

25. Подключается подпрограмма учета критических отказов.

25.1 В случае равенства текущего времени возникновения критического отказа БС соответствующей логической переменной присваивается значение «истина» и переходим к пункту 22.

25.2 В противном случае соответствующей логической переменной присваивается значение «ложь» и переходим к пункту 23.

26. Проверка условия равенства количества проведенных статистических испытаний заданному. Если это условие выполняется, то переходим к пункту 7.

27. Расчет математического ожидания производительности съемки для заданного уровня надежности КА.

28. Проверка условия равенства числа расчетных точек заданному числу. Если это условие не выполняется, то переходим к пункту 3.

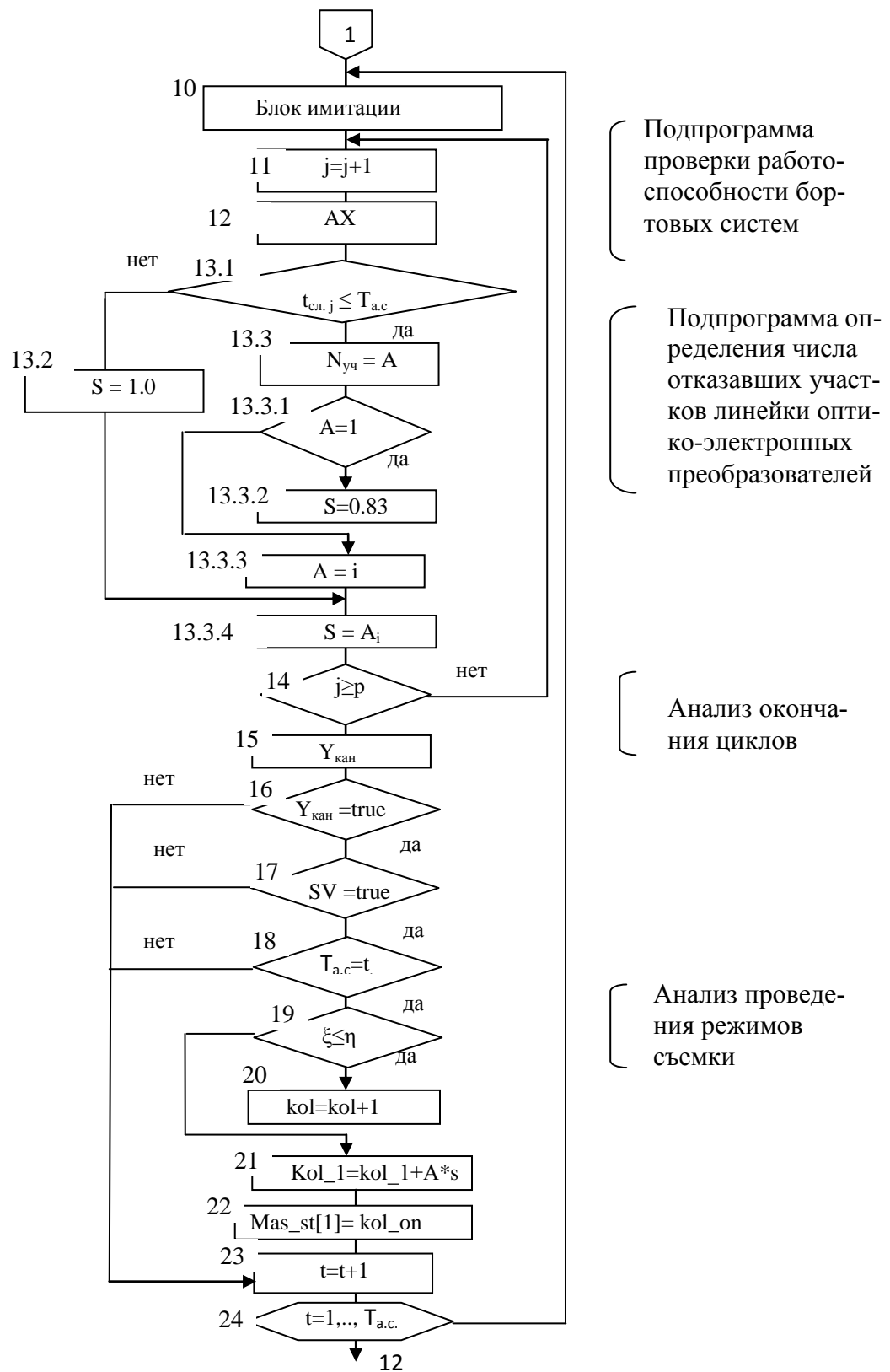
29. Расчет среднего значения производительности съемки для заданных значений показателя надежности прототипа КА.

30. Вывод результатов расчета.

Конец алгоритма.



Рис.4 Блок схема имитационного моделирования отказов бортовых систем космического аппарата наблюдения на производительность съемки



2

Рис.4 Блок схема имитационного моделирования влияния отказов целевой аппаратуры на производительность съемки (продолжение)

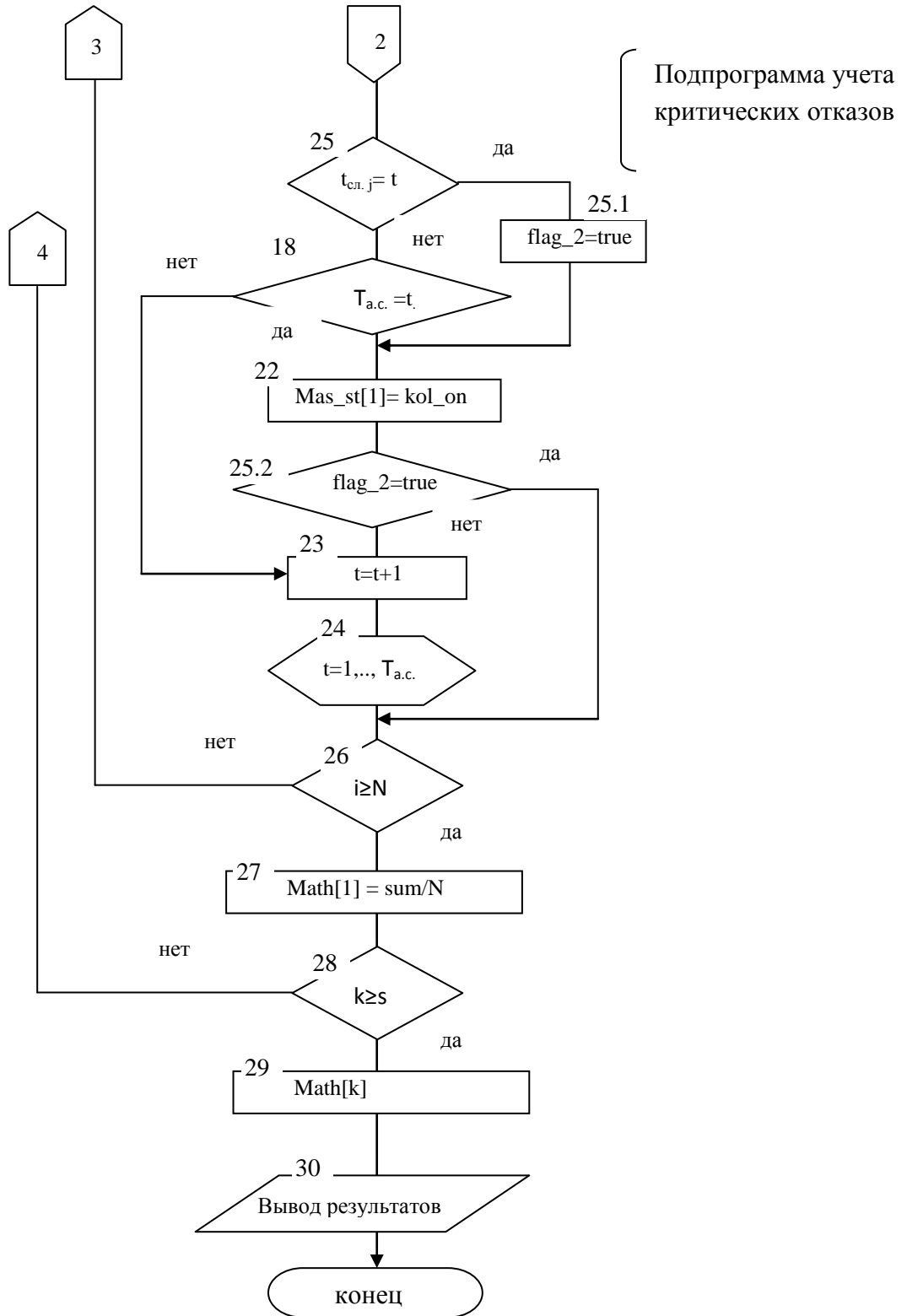


Рис.4 Блок схема имитационного моделирования отказов бортовых систем космического аппарата наблюдения на производительность съемки (окончание)

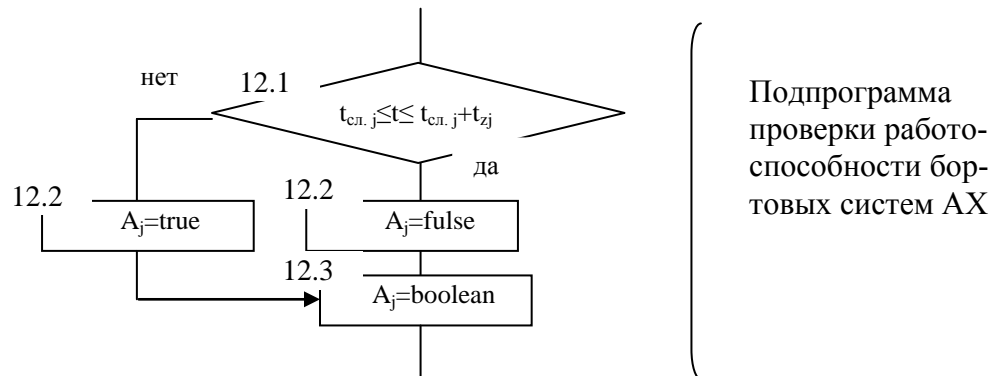


Рис.5 Блок-схема алгоритма проверки работоспособности бортовых систем

Результаты моделирования

Результаты расчета производительности съемки космического аппарата, выраженной в площади, с использованием программного обеспечения приведены ниже. Теоретическое значение производительности равно $33093 \cdot 10^3 \text{ км}^2$. Расчеты точности моделирования оценивались с помощью доверительных интервалов с доверительной вероятностью $\gamma=0.7$.

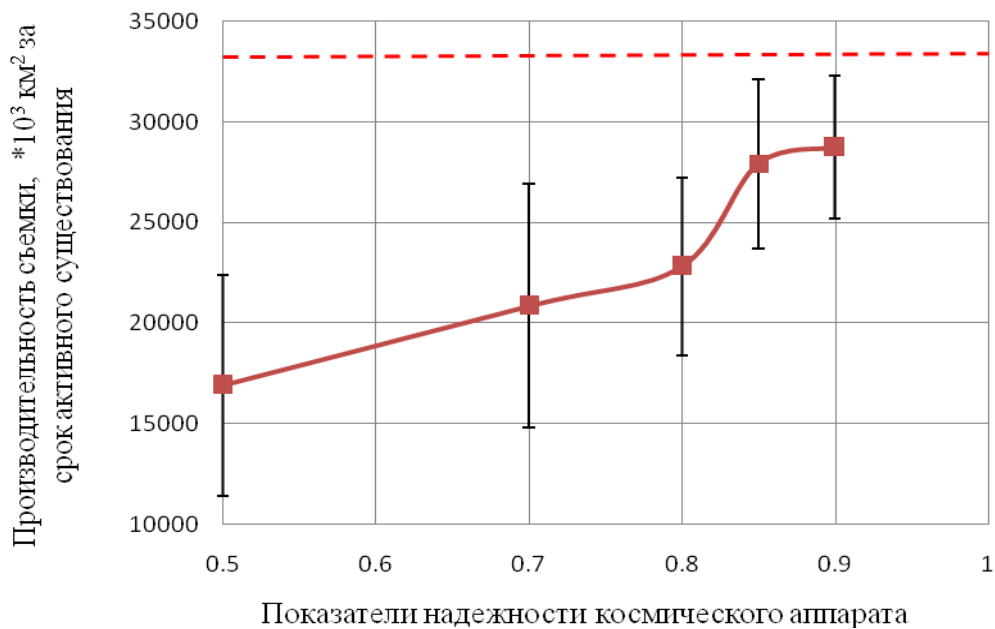


Рис.6 Зависимость математического ожидания производительности и границ доверительных интервалов от показателя надежности КАН с учетом частичных отказов ОЭП и БОС

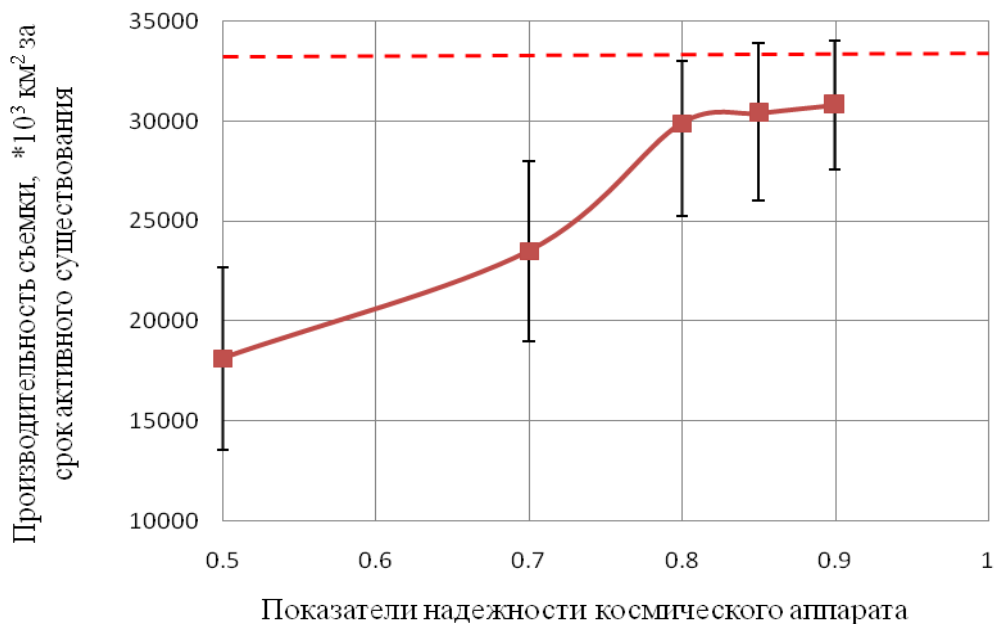


Рис. 7 Зависимость математического ожидания производительности и границ доверительных интервалов от показателя надежности КАН без учета частичных отказов ОЭП с учетом частичных отказов БОС

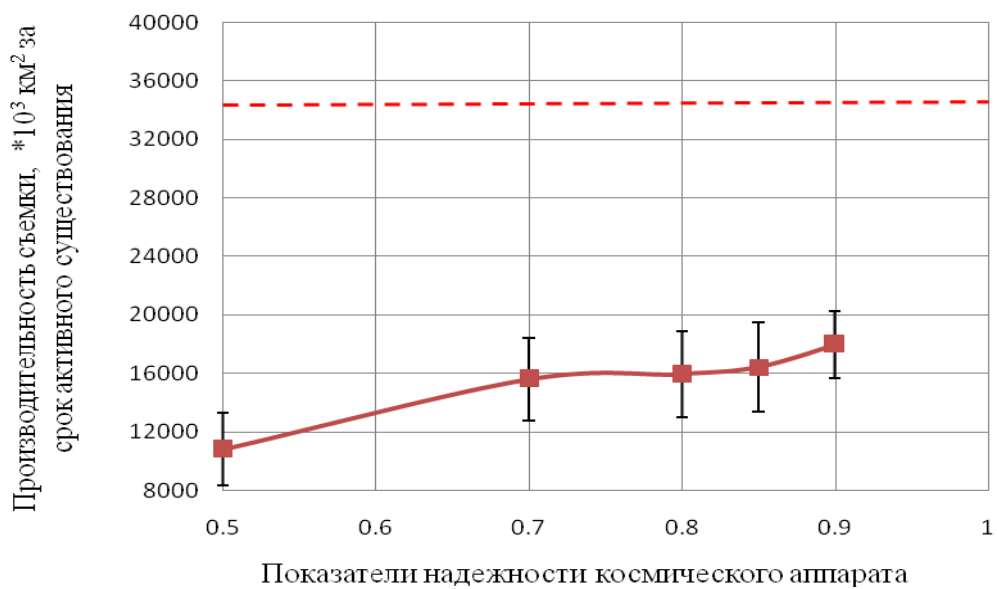


Рис.8 Зависимость математического ожидания производительности и границ доверительных интервалов от показателя надежности КАН с учетом частичных отказов ОЭП, БОС и облачности

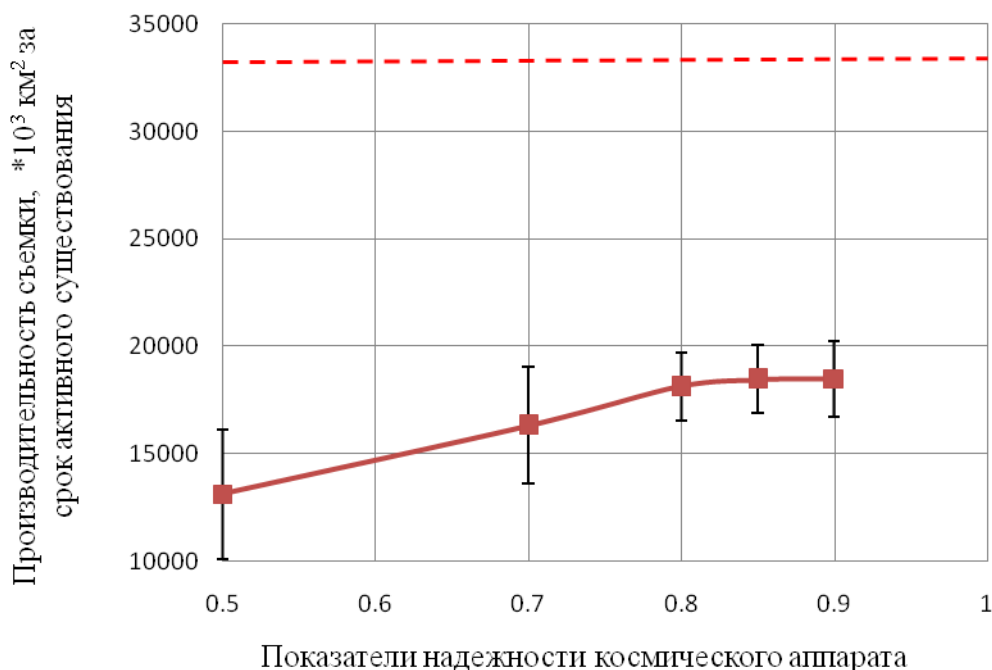


Рис.9 Зависимость математического ожидания производительности и границ доверительных интервалов от показателя надежности КАН без учета частичных отказов ОЭП и с учетом частичных отказов БОС и облачности

Оценка производительности в площади проводилась с учетом бала облачности над районами съемки. В случае если бал облачности не позволяет вести съемку, то счетчик суммарной отснятой площади приостанавливается.

Адекватность и непротиворечивость моделей частичных отказов ОЭП СППИ и БОС подтверждается тем, что производительность съемки, представленная в площади, с учетом отказов участков линейки ОЭП, будет меньше аналогичного показателя целевой эффективности без учета частичных отказов ОЭП. Аналогичные рассуждения справедливы и в отношении учета облачности. Расчеты производительности проводились для срока активного существования 3 года.

Вывод

Разработанные математические модели отказов и алгоритм имитационного моделирования влияния частичных отказов СППИ можно использовать для оценки производительности съемки, выраженной в площади с учетом условий съемки. Для этого необходимо дора-

ботать программное обеспечение для оценки производительности съемки, выраженной в числе объектов наблюдения.

Библиографический список

1. Куренков В.И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учебн. пособие / В.И. Куренков, В.В. Салмин, Б.А. Абрамов.- Самара: Изд-во СГАУ, 2006-296 с.
2. Куренков. В.И. Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов: учебн. пособие / В.И. Куренков, В.А. Капитонов.-Самара: Изд-во СГАУ, 2007-320 с.
3. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: “Радио и связь”, 1988-208 с.