

**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРИМЕНЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ОТКАЗАХ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ**

**М.И. Калинов, В.А. Родионов (Санкт-Петербург)**

В процессе эксплуатации космических систем наблюдения (КСН) с малыми космическими аппаратами (МКА) возможны отказы отдельных элементов их бортовых систем (БС). При этом возникает необходимость выбора возможного способа дальнейшего применения таких МКА по целевому назначению. Вопросы обоснования рациональных вариантов подобного выбора в настоящее время проработаны еще недостаточно.

Отказы отдельных элементов бортовых систем МКА частично компенсируются их реконфигурацией. При этом ухудшаются (по сравнению со штатным режимом) точностные и энергетические характеристики МКА, оказывающие непосредственное влияние на работу его бортового специального комплекса (БСК). В то же время принципиально возможно «смещать» ухудшение этих характеристик во времени.

Выбор временных интервалов, позволяющих рационально перераспределять ухудшение характеристик МКА с целью достижения максимального эффекта от его применения в подобных условиях, возможен с помощью сценарно-временного метода оценки эффективности применения КСН, который реализуется на основе имитационного моделирования процесса функционирования космической системы и розыгрыша возможных сценариев действий объекта наблюдения (ОН).

Имитационное моделирование позволяет производить оценку эффективности применения КСН с МКА как в режиме штатного функционирования, так и при возникновении нештатных ситуаций, связанных с отказами отдельных элементов их бортовых систем. Полученные оценки в дальнейшем могут быть использованы при планировании применения МКА по целевому назначению [1].

Сценарно-временной метод позволяет произвести трансформацию массива исходных данных в оценки искомых показателей эффективности применения КСН. При этом, с одной стороны, осуществляется моделирование процесса функционирования КСН (от орбитального движения МКА до распознавания объекта на пункте приема информации (ППИ) в условиях фоно-целевой обстановки различной степени сложности), а с другой – моделирование действий объекта наблюдения путем розыгрыша некоторого количества сценариев, имитирующих неопределенность его возможного положения и состояния («обнаружен» или «не обнаружен»).

При каждом пролете МКА над неподвижной (динамичной) областью возможного положения объекта (ОВПО) (с учетом принятых ограничений по границам этой области и скорости перемещения объекта) по всем сценариям возможных действий объекта воспроизводятся явления (опыты), благоприятный исход которых (объект попал в полосу обзора МКА, зафиксирован его бортовым специальным комплексом, информация об объекте получена на ППИ, объект распознан) означает появление события «обнаружение объекта». В противном случае объект считается не обнаруженным. С целью обеспечения приемлемых для прогнозных расчетов точности и надежности получаемых оценок (доверительного интервала 0,05 и доверительной вероятности 0,7-0,9) выбрано 100 сценариев возможных действий объекта.

Для удобства прогнозирования аналитические зависимости и логические условия применяемых математических моделей трансформированы в компьютерную модель на языке программирования высокого уровня. Пример получения и отображения результатов одной реализации при моделировании процесса функционирования КСН (интервал оценки – 3 суток) и 10 сценариях (m) действий объекта представлен на рисунке 1 [2].

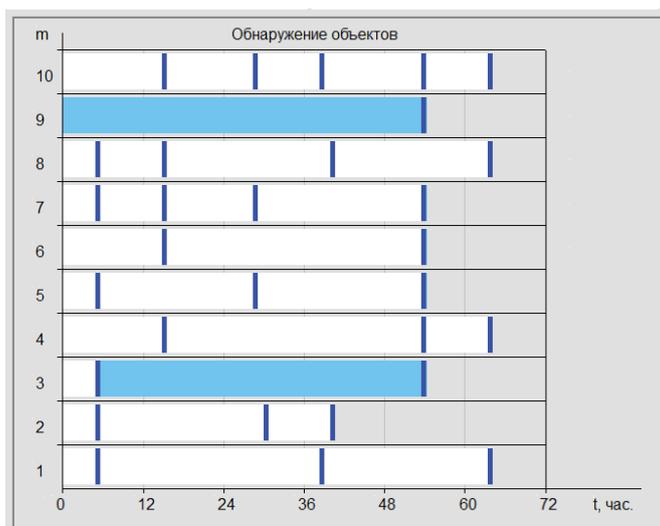


Рис. 1 – Отображение результатов одной реализации при моделировании процесса функционирования КСН с МКА и 10 сценариях действий объекта (вариант)

Представленные результаты могут быть интерпретированы следующим образом. Всего на интервале оценки произошло 8 информативных пролетов МКА через ОВПО. Количество благоприятных исходов опытов (обозначены на рисунке утолщенными вертикальными отрезками) в каждом пролете различно (в первом пролете – 6, во втором – 5, в третьем – 3 и т.д.). Отношение количества благоприятных исходов опытов к количеству сценариев ( $m = 10$ ) позволяет получить оценку мгновенной вероятности обнаружения объекта в текущем пролете МКА (в первом пролете – 0,6, во втором – 0,5, в третьем – 0,3 и т.д.). Пролонгация полученных оценок мгновенной вероятности обнаружения объекта на допустимое время устаревания данных и их нормирование интервалом оценки позволяют, в конечном итоге, получить искомую оценку вероятности слежения  $W_{сл.}$  за ним.

Количество благоприятных исходов опытов по каждому из сценариев на интервале оценки соответствует количеству обнаружений объекта (по первому сценарию – 3, по второму – 3, по третьему – 2 и т.д.), а его последующее нормирование по этому интервалу (в сутках) – количеству обнаружений в сутки. Для практических целей часто используют усредненное по всем сценариям, а при более детальном исследовании – минимальное и максимальное значения данного показателя ( $k_{ср.}$ ,  $k_{мин.}$ ,  $k_{макс.}$  соответственно).

Измерение интервалов времени между обнаружениями объекта (при его действиях по всем сценариям) и их последующая статистическая обработка позволяют построить дифференциальный и интегральный законы распределения вероятностей попадания в такие временные интервалы. Для понимания и удобства восприятия может быть задан определенный уровень вероятности (например, 0,8) попадания в интервалы времени между обнаружениями объекта  $T_{0,8}$  при равновероятном времени начала решения задачи мониторинга. На рисунке такие интервалы показаны белым цветом. На практике это означает, что время ожидания последующего обнаружения объекта (с вероятностью не ниже 0,8) не превысит максимального значения таких интервалов. Интервалы, превышающие это значение, показаны на рисунке более темным цветом (третий и девятый сценарии действий объекта).

Иными словами, результаты имитационного моделирования процесса функционирования КСН (при различных сценариях действий объекта) позволяют после их статистической обработки получать искомые оценки эффективности применения системы по целевому назначению. Путем добавления блоков ввода исходных данных, накопления результатов моделирования, их статистической обработки и визуализации получаемых оценок показателей в удобном для выполнения исследований виде производится преобразование компьютерных моделей в компьютерную методику в рамках разработанного метода [3]. Пример отображения результатов моделирования и оценки эффективности применения КСН с МКА (наклонение орбиты – 65

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

градусов, высота орбиты – 418 км, ширина полосы обзора – 2000 км) в штатном варианте представлен на рисунке 2.

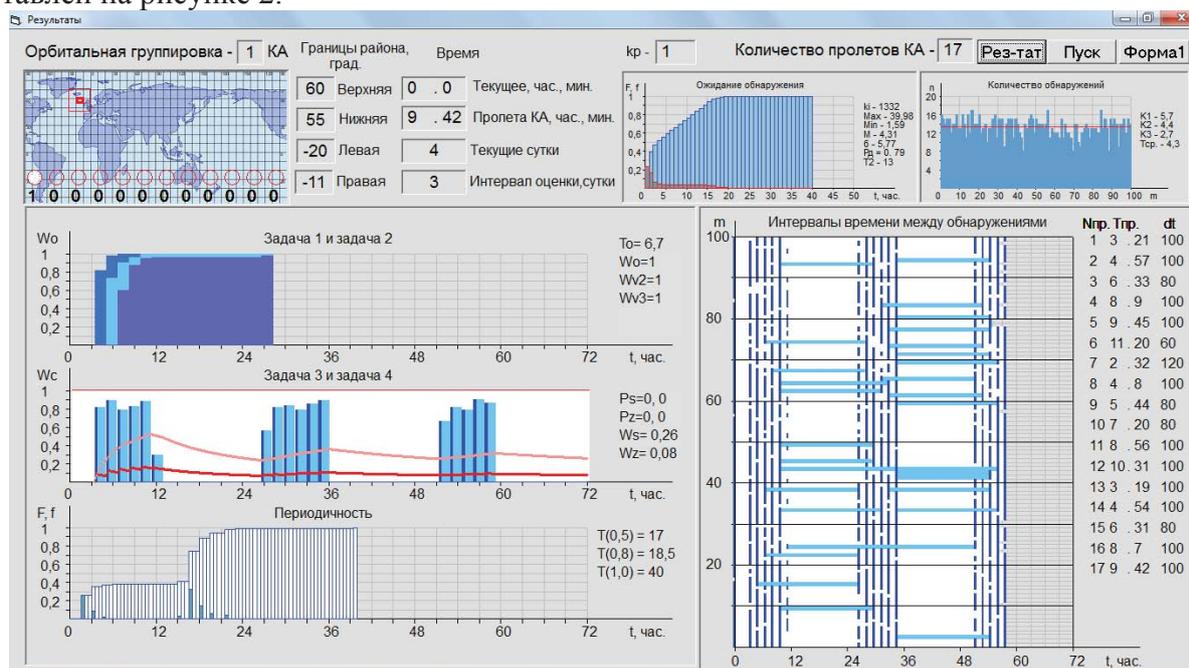


Рис. 2 – Отображение результатов моделирования и оценки эффективности применения КСН с МКА (штатный вариант)

Содержание текстографической информации при отображении результатов моделирования и оценке эффективности применения КСН с МКА:

- в левой верхней части – графическое отображение района наблюдения на фоне цифровой морской карты, номера активных МКА, количество МКА в орбитальной группировке, данные о границах района наблюдения, текущее время функционирования КСН, время текущего пролета МКА, текущие сутки, интервал оценки;
- в левой нижней части – графики с оценками эффективности решения частных задач наблюдения и периодичности обнаружения ОН. В правых частях этих графиков представлены следующие данные: максимальное время ( $T_0$ ), необходимое для обнаружения ОН, вероятности обнаружения и выявления (двух-трехкратного обнаружения ОН –  $W_0$ ,  $W_{v2}$ ,  $W_{v3}$ ; вероятности слежения за ОН –  $P_s$ ,  $P_z$  (мгновенные значения) и  $W_s$ ,  $W_z$  (средние значения) (время устаревания данных – 1,5 и 0,5 часа соответственно); интервал времени между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,5; 0,8; 1,0 –  $T(0,5)$ ;  $T(0,8)$ ;  $T(1,0)$ ;
- в правой верхней части – текущее значение коэффициента реконфигурации, номер текущего пролета МКА, распределение вероятностей попадания в интервалы времен ожидания обнаружения ОН, его числовые характеристики, время ожидания обнаружения с вероятностью не ниже 0,8 –  $T_2$ , распределение количества обнаружений (по сценариям), среднее значение интервала обнаружения  $T_{cp}$ , максимальное, среднее и минимальное значения количества обнаружений ОН в сутки ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ );
- в правой нижней части – график появления события «Обнаружение объекта» по 100 сценариям, имитирующим неопределенность положения ОН в заданном районе на интервале оценки, график пролетов МКА через заданный район наблюдения (номер пролета ( $N_{пр}$ ), начало пролета ( $T_{пр}$ ) (в часах и минутах каждые сутки) продолжительность пролета ( $dt$ ) (в секундах).

Формально ухудшение характеристик МКА при отказах отдельных элементов их БС может учитываться с помощью коэффициента реконфигурации  $kp$ . В ходе исследований производилась оценка эффективности применения КСН с МКА на трехсуточном интервале по трем районам

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

(Северо-восточная Атлантика (СВА), Средиземное море (СРМ), Тихий океан (ТОФ)). При этом рассматривалось три типа ситуаций (таблица 1):

- все элементы БС МКА находятся в работоспособном состоянии (отказов элементов на момент прогнозирования не зафиксировано, штатная ситуация);
- произошел отказ элементов БС МКА, ограничивающий его работоспособность (нештатная ситуация, первичная реконфигурация);
- произошел отказ элементов БС МКА, ограничивающий его работоспособность (нештатная ситуация, рациональная реконфигурация).

Таблица 1 – Значения коэффициента реконфигурации БС МКА (вариант)

№ п/п	Время, с	Коэффициент реконфигурации кр		
		Ситуация 1	Ситуация 2	Ситуация 3
1	120	1	0	0
2	87000	1	0,5	1
3	130000	1	1	0,5
4	170000	1	0,5	1
5	213000	1	0	0

Результаты моделирования и оценки эффективности применения КСН с МКА представлены в таблице 2 и на рисунках 3, 4.

Таблица 2 – Результаты моделирования и оценки эффективности применения КСН с МКА

№ п/п	Наименование показателя	Ситуация 1			Ситуация 2			Ситуация 3		
		СВА	СРМ	ТОФ	СВА	СРМ	ТОФ	СВА	СРМ	ТОФ
1	Вероятность слежения за ОН при допустимом времени устаревания данных 1,5 часа	0,26	0,09	0,11	0,09	0,03	0,02	0,17	0,04	0,02
2	Максимальное значение интервала времени между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,8, час.	18,5	33,0	23,5	28,5	48,5	39,0	28,5	48,5	47,0
3	Среднее количество обнаружений ОН в сутки	4,4	1,6	2,0	1,7	0,5	0,4	2,8	0,7	0,4

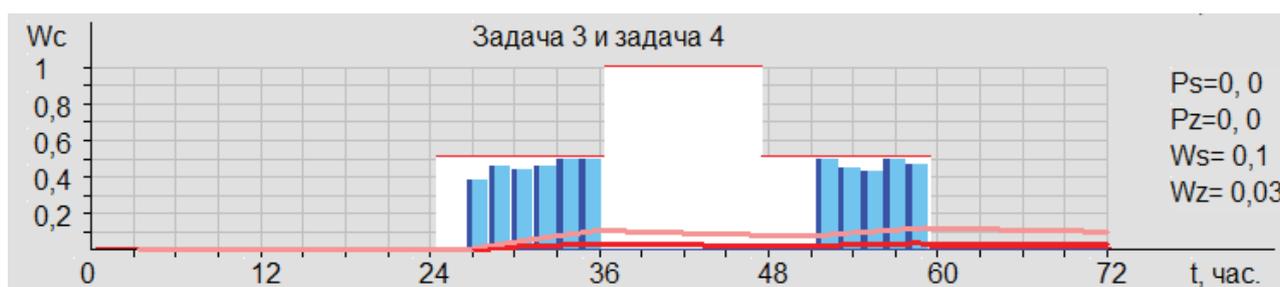


Рис. 3 – Отображение мгновенного и среднего значений вероятности слежения за ОН при первичной реконфигурации БС МКА (нештатная ситуация)

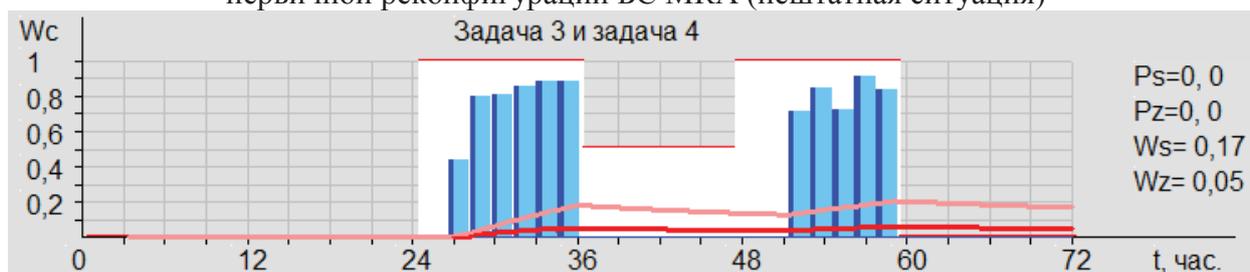


Рис. 4 – Отображение мгновенного и среднего значений вероятности слежения за ОН при рациональной реконфигурации БС МКА (нештатная ситуация)

### **Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования**

---

Анализ результатов моделирования и оценки эффективности применения КСН с МКА показал следующее:

1. Разработанные компьютерные модели и методика позволяют производить оценку эффективности применения КСН с КА, функционирующим в штатном режиме, а также в условиях различной реконфигурации его бортовой аппаратуры.

2. Для рассмотренных условий и исходных данных при первичной реконфигурации БС происходит приблизительно трех-пятикратное снижение эффективности применения КСН по показателям: вероятность слежения за ОН при допустимом времени устаревания данных 1,5 часа, среднее количество обнаружений ОН в сутки и полутора-двукратное – по показателю максимальное значение интервала времени между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,8. При этом сохраняется возможность решения целевых задач.

3. Установлена принципиальная возможность повышения эффективности применения КСН относительно варианта с первичной реконфигурацией БС. Для варианта с рациональной реконфигурацией в районах высоких широт (Северо-восточная Атлантика) эффективность применения КСН повышается в полтора-два раза по сравнению с вариантом первичной реконфигурации по показателям: вероятность слежения за объектом наблюдения при допустимом времени устаревания данных 1,5 часа (с 0,09 до 0,17), среднее количество обнаружений ОН в сутки (с 1,7 до 2,8); значение показателя максимальное значение интервала времени между обнаружениями ОН с вероятностью не ниже 0,8 при этом не изменяется (28,5 часов). Данный эффект объясняется наличием «сгустков» информативных пролетов КА над районами высоких широт.

4. Для низкоширотных районов такой эффект отсутствует в связи с квазиравномерным распределением информативных пролетов КА.

#### **Выводы**

С помощью имитационного моделирования процесса функционирования КСН с МКА и розыгрыша различных сценариев действий объектов наблюдения возможна и целесообразна оценка эффективности применения системы по целевому назначению в штатном режиме. На основе этих данных могут быть сформированы предложения по рациональному распределению сниженного в результате отказов отдельных элементов бортовых систем МКА ресурса его точностных и энергетических характеристик. Это позволяет в высокоширотных районах наблюдения за назначенными объектами повысить эффективность применения КСН в полтора-два раза по сравнению с вариантом первичной реконфигурации бортовых систем МКА.

#### **Литература**

1. Калинов М.И., Калинов П.М., Родионов В.А. Имитационное моделирование и оценка эффективности применения информационных космических систем при проектировании и эксплуатации морской техники. Труды Третьей международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС-2015». СПб., СПИИРАН, 2015. С. 88-92.
2. Гуляков В.В., Калинов М.И., Родионов В.А., Торгашов А.А. Опыт использования основных декартовых правил метода при исследовании эффективности применения информационных космических систем. Труды 19-й Всероссийской научно-практической конференции. Том 4. СПб.: НПО Спецматериалов. 2016. С. 268-275.
3. Анцев Г.В., Гуляков В.В., Калинов М.И., Родионов В.А. Моделирование и оценка эффективности применения многоярусной космической системы мониторинга морской поверхности. Морские информационно-управляющие системы. М.: АО «Концерн «Моринформсистема-Агат», 2017. № 2(12) С. 22-29.