

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА МОРСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

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

Космические системы наблюдения (КСН) находят все более широкое применения при решении задач информационного обеспечения процесса эксплуатации морской техники. Важной тенденцией развития КСН является появление многоспутниковых систем, решающих задачи наблюдения за морскими объектами. Орбитальная группировка (ОГ) таких систем может включать до нескольких десятков космических аппаратов (КА). Появление многоспутниковых систем неразрывно связано с созданием малых космических аппаратов, имеющих ограниченные возможности бортовой аппаратуры, но более дешевых по сравнению с «большими» и более дорогими КА, традиционно применяемыми для решения задач наблюдения. Особенности построения ОГ малых КА многоспутниковых систем и существенные ограничения их бортовых специальных комплексов (БСК) приводят к необходимости пересмотра методического подхода к задаче прогнозирования результатов применения этих систем для наблюдения за морскими объектами.

Для прогнозирования результатов применения многоспутниковых систем наблюдения за морскими объектами (МСНМО) (далее – прогнозирования) по целевому назначению (оценки эффективности применения, информационных, свойств и возможностей) удобно использовать известный сценарно-временной метод оценки эффективности применения КСН за морскими объектами и соответствующую ему методику, адаптированную в ходе исследований к решаемой задаче [1, 2].

В сценарно-временном методе используются 5 основных правил (проверок) для определения по каждому из сценариев возможных действий объекта наблюдения (ОН), имитирующих неопределенность его положения в заданном районе, факта появления события «обнаружение объекта», а затем – вероятности обнаружения ОН. С помощью имитационных моделей орбитального движения КА, функционирования бортового специального комплекса КА, приема полученных данных на пункте приема информации (ППИ), распознавания зафиксированных КА объектов, а также имитационной модели движения ОН в заданном районе реализуются правила накрытия полосой обзора КА заданного района, попадания объекта в полосу обзора КА, фиксации объекта бортовым специальным комплексом КА, приема данных на ППИ и распознавания объекта.

Имитация неопределенности положения объекта наблюдения при пролете КА над заданным районом осуществляется розыгрышем с помощью датчика случайных чисел возможных первоначальных местоположений ОН – объектов (сценариев его действий), а затем (при последующих пролетах КА) – его новых местоположений с учетом равновозможности курса и неопределенности скорости (в диапазоне от ее минимальных до максимально возможных значений). Смена курса происходит или через некоторое (заданное) время, или при подходе объекта к границе района. В последнем случае курс объекта выбирается таким образом, чтобы объект оставался в заданном районе. При этом количество разыгрываемых сценариев (объектов) выбирается исходя из требований к надежности и точности получаемых оценок.

Произведенная в ходе исследований адаптация методики прогнозирования к решаемой задаче состояла в разработке новой формы представления необходимой для анализа информации. В отличие от предыдущих результирующих форм

представления информации, в новой усовершенствованной методике (далее – методике) дополнительно в графическом виде приводятся данные о временах пролета каждого КА над заданным районом на интервале оценки (обозначены символами «•») (график «Номера КА»), а также данные об их информативности – доле площади района  $dS$  (в процентах), просмотренной каждым КА ( $nka$  – номер КА) на интервале оценки (график «Обзор»). Для сравнения одновременно с  $dS$  на этом графике отображается и сумма вероятностей обнаружения объекта наблюдения (ОН) каждым КА, иллюстрирующая влияние времени устаревания данных об объекте на вероятность его правильного распознавания (рис. 1). Предварительно производится расчет указанных данных в соответствующих блоках методики.

Методика позволяет производить сравнение результатов прогноза применения МСНМО, а также информативности каждого КА в зависимости от состава и баллистической структуры орбитальной группировки КА, района наблюдения, времени начала интервала оценки, характеристик БСК, допустимого времени устаревания данных и т.д. На основе такого сравнения (анализа) формируются предложения об исключении из рассмотрения (т.е. невключении БСК) КА с низкой информативностью (при допустимом (незначительном) снижении ожидаемых результатов применения МСНМО).

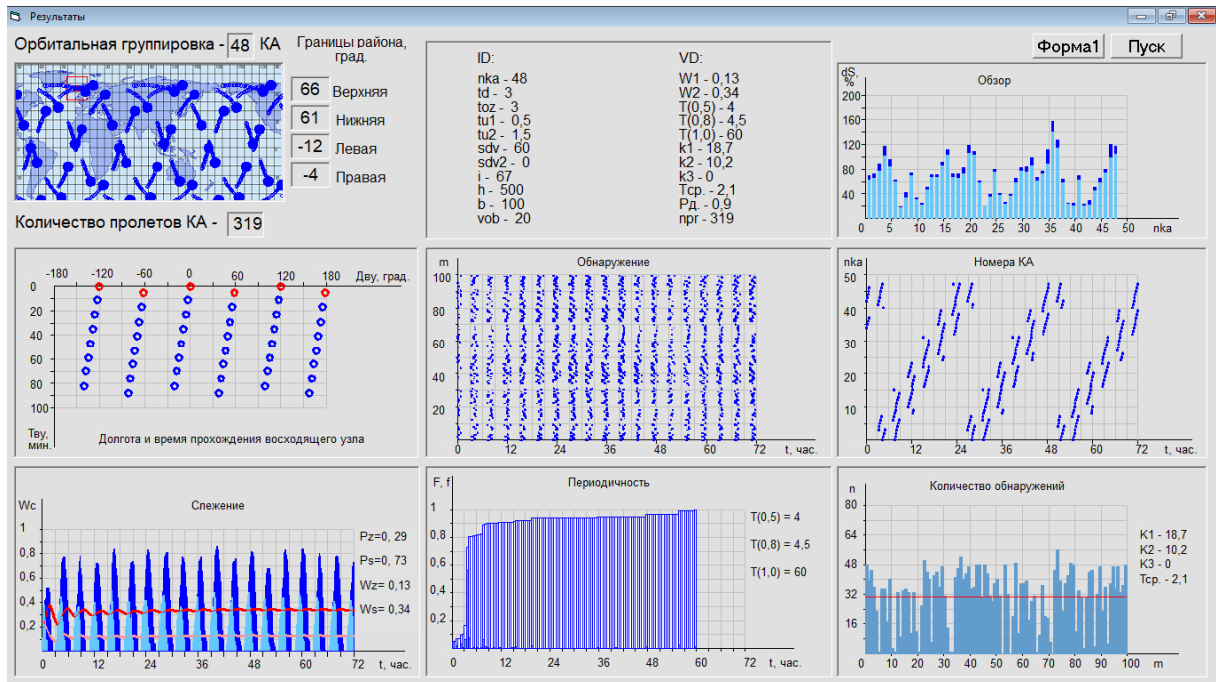


Рис. 1. Результирующая форма отображения информации в методике прогнозирования результатов применения МСНМО в районе СВА

Для иллюстрации возможностей методики рассмотрен пример прогнозирования результатов применения МСНМО на трехсуточном интервале в районе Северо-Восточной Атлантики (СВА). Координаты 100 объектов и направления их движения (сценариев действий объекта наблюдения) в данном районе разыгрывались с помощью датчика случайных чисел. Моделировалось невозмущенное движение КА. Количество КА – 48 (6 групп по 8 КА в группе). Наклонение орбиты КА – 67 градусов. Высота орбиты КА – 500 км. Ширина полосы обзора КА – 200 км. Время устаревания данных для задачи слежения – 0,5 и 1,5 ч. Шаг по времени – 20 с. Содержание текстографической информации на экране компьютера (кроме указанной выше):

– район наблюдения на фоне цифровой морской карты, отрезки трасс полета КА и текущее положение КА в начале интервала оценки, данные о границах района наблюдения;

– структура орбитальной группировки – долгота восходящего узла (Дву), время прохождения восходящего узла (Тву) на первые сутки существования системы для первого витка каждого КА;

– исходные данные для прогнозирования результатов применения МСНМО (ID): количество КА в системе ( $n_{ка}$ ), номер суток начала интервала оценки ( $t_d$ ), интервал оценки ( $t_{oz}$ ), время устаревания, ч. ( $t_{u1}$ ,  $t_{u2}$ ), угол между плоскостями орбит первых КА в группе ( $sdv$ ), угол сдвига по долготе восходящего узла каждого КА в группе ( $sdv2$ ), наклонение орбиты КА ( $i$ ), высота орбиты КА ( $h$ ), полуширина полосы обзора КА ( $b$ ), максимальная скорость движения объекта, км/ч. ( $v_{об}$ );

– выходные данные прогнозирования результатов применения МСНМО (VD): вероятности слежения за ОН при временах устаревания  $t_{u1}$  и  $t_{u2}$  ( $W_1$  и  $W_2$ ) (под слежением понимается обновление информации об объекте (его обнаружение) не реже допустимого времени устаревания данных), максимальный интервал времени между обнаружениями объекта с вероятностью не хуже 0,5 ( $T(0,5)$ ), не хуже 0,8 ( $T(0,8)$ ), не хуже 1,0 ( $T(1,0)$ ), количество обнаружений объекта в сутки максимальное ( $k_1$ ), среднее ( $k_2$ ), минимальное ( $k_3$ ), средний интервал времени между обнаружениями объекта, ч. ( $T_{ср.}$ ), доверительная вероятность результатов оценки ( $P_d$ ), количество пролетов КА через район наблюдения ( $n_{пр}$ );

– данные об обнаружении каждого из 100 разыгранных объектов на интервале оценки (обозначены символами «●») (график «Обнаружение»);

– текущие данные о решении задачи слежения за ОН: мгновенные ( $P_z$  ( $P_s$ )) и средние ( $W_z$  ( $W_s$ )) значения вероятностей слежения за ОН при времени устаревания  $t_{u1}$  и  $t_{u2}$ .

Для наглядности зависимости вероятностей слежения за ОН от времени количество обнаружений ( $n$ ) каждого объекта ( $m$ ), а также интегральный  $F(t)$  и дифференциальный  $f(t)$  законы распределения вероятностей попадания во временные интервалы между обнаружениями объектов, количество обнаружений ОН представлены в графическом виде.

Основные показатели прогнозирования результатов применения МСНМО:

– вероятности слежения за ОН (далее – вероятности слежения)  $W_{0,5}$  и  $W_{1,5}$  с допустимым временем устаревания данных 0,5 и 1,5 ч;

– максимальный интервал времени между обнаружениями ОН с вероятностью не хуже 0,8, ч, ( $T_{0,8}$ ) (далее – интервал времени между обнаружениями);

– среднее количество обнаружений ОН в сутки, ( $k_2$ ) (далее – среднее количество обнаружений).

Пример исключения из рассмотрения КА с низкой информативностью (при допустимом (незначительном) снижении ожидаемых результатов применения МСНМО) приведен на рис. 2. Для этого проведен визуальный анализ данных, представленных на рис. 1. Совершенно очевидно, что КА №№ 7, 11, 23, 27, 39, 40, 41, 42 (всего 8 КА) обладают низкой информативностью, поэтому они исключаются из дальнейшего рассмотрения (при планировании применения МСНМО в заданном районе целесообразно исключить работу БСК КА с указанными номерами).

Сравнительный анализ показал, что исключение указанных КА практически не влияет на оцениваемые показатели. Вероятности слежения  $W_{0,5}$  и  $W_{1,5}$  при орбитальной группировке (ОГ) из 48 КА составляют 0,13 и 0,34, при 40 КА – 0,13 и 0,32, среднее количество обнаружений  $k_2$  – 10,2 и 9,9 соответственно. Интервал

времени между обнаружениями – 4,5 ч и 8 ч. Но такой интервал появляется с вероятностью не хуже 0,8. В то же время с вероятностью не хуже 0,79 и при 40 КА интервал времени между обнаружениями  $T_{0,8}$  также будет 4,5 ч.

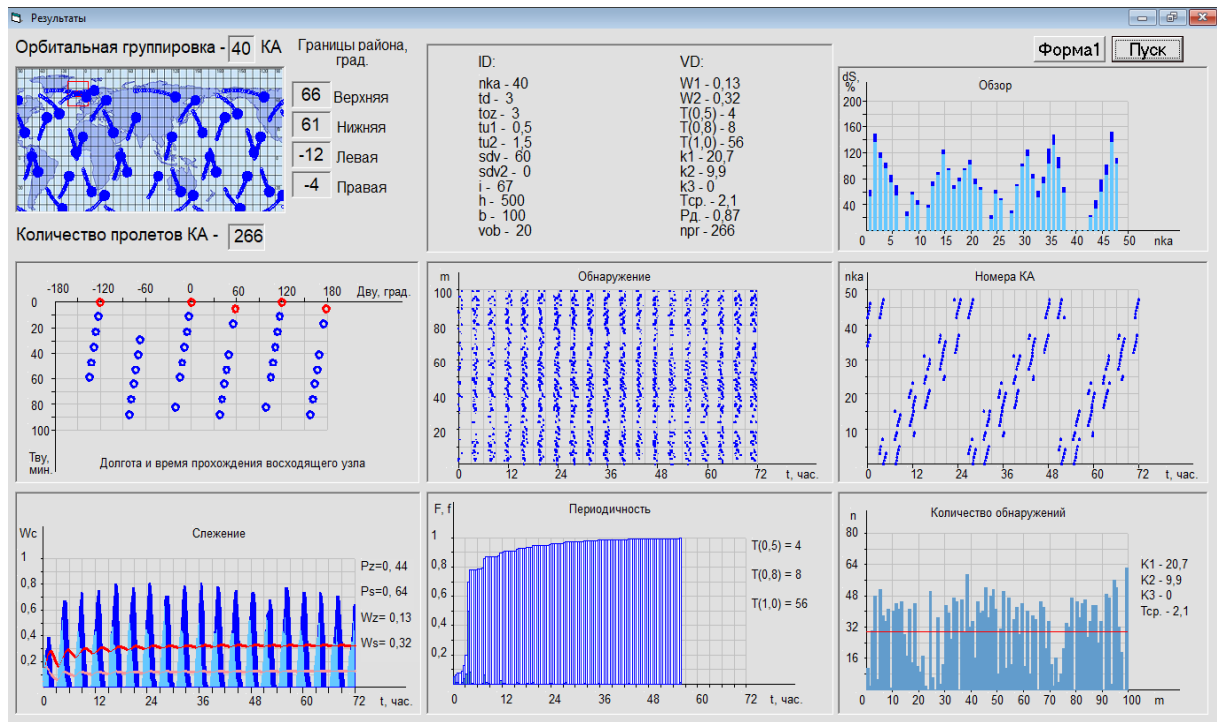


Рис. 2. Результаты прогнозирования применения МСНМО в районе СВА при исключенных 8 КА

Иными словами, в МСНМО возможно и целесообразно исключение из работы малоинформативных КА при их пролете над заданными районами. Сохраненный таким образом ресурс этих КА может быть использован в другие периоды применения МСНМО в этом районе или в других районах наблюдения.

В качестве других районов наблюдения в процессе исследований были рассмотрены районы Средиземного моря (СРМ) и Тихого океана (ТОФ).

Анализ результатов имитационного моделирования в районе СРМ показал, что КА №№ 5, 6, 7, 9, 10, 15, 16, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 32, 37, 38, 39, 41, 42, 48 (всего 20 КА) или обладают низкой информативностью, или не накрывают полосой обзора заданный район, поэтому они исключаются из дальнейшего рассмотрения. При применении МСНМО в заданном районе целесообразно исключить работу БСК КА с указанными номерами.

Сравнительный анализ показал, что исключение указанных КА также практически не влияет на оцениваемые показатели. Вероятности слежения  $W_{0,5}$  и  $W_{1,5}$  при орбитальной группировке из 48 КА составляют 0,07 и 0,23, при 28 КА – 0,07 и 0,23, среднее количество обнаружений  $k_2$  – 4,0 и 3,9 соответственно. Интервал времени между обнаружениями – 12 ч и 15,5 ч. Такой интервал появляется с вероятностью не хуже 0,8. В то же время с вероятностью не хуже 0,79 и при 28 КА интервал времени между обнаружениями  $T_{0,8}$  также будет 12 ч.

Анализ результатов имитационного моделирования в районе ТОФ показал, что КА №№ 2, 3, 13, 14, 18, 19, 29, 30, 33, 34, 45, 46 (всего 12 КА) или обладают низкой информативностью, или не накрывают полосой обзора район наблюдения, поэтому они

исключаются из дальнейшего рассмотрения. При применении МСНМО в заданном районе целесообразно исключить работу БСК КА с указанными номерами.

Сравнительный анализ показал, что исключение указанных КА не оказывает существенного влияния на оцениваемые показатели. Вероятности слежения  $W_{0,5}$  и  $W_{1,5}$  при орбитальной группировке из 48 КА составляют 0,1 и 0,32, при 36 КА – 0,1 и 0,32, среднее количество обнаружений  $k_2$  – 6,1 и 6,0 соответственно. Интервал времени между обнаружениями – 12 ч в обоих случаях.

Обобщенные сведения об активности КА (с учетом исходных данных) представлены в таблице. При этом для определенности каждому КА, бортовой специальный комплекс которого целесообразно включать при его пролете над заданным районом, присваивался признак активности «1», в противном случае признак активности был равен нулю. Для удобства строки таблицы формировались в соответствии с порядковым номером КА в группе (6 групп по 8 КА в каждой группе).

Обобщенные сведения об активности КА МСНМО

№ п/п	Номер КА, признак активности КА в районах СВА/СРМ/ТОФ					
1	1, 1/1/1	9, 1/0/1	17, 1/1/1	25, 1/0/1	33, 1/1/0	41, 0/0/1
2	2, 1/1/0	10, 1/0/1	18, 1/1/0	26, 1/0/1	34, 1/1/0	42, 0/0/1
3	3, 1/1/0	11, 0/1/1	19, 1/1/0	27, 0/1/1	35, 1/1/1	43, 1/1/1
4	4, 1/1/1	12, 1/1/1	20, 1/0/1	28, 1/1/1	36, 1/1/1	44, 1/1/1
5	5, 1/0/1	13, 1/1/0	21, 1/0/1	29, 1/1/0	37, 1/0/1	45, 1/1/0
6	6, 1/0/1	14, 1/1/0	22, 1/0/1	30, 1/1/0	38, 1/0/1	46, 1/1/0
7	7, 0/0/1	15, 1/0/1	23, 0/0/1	31, 1/1/1	39, 0/0/1	47, 1/1/1
8	8, 1/1/1	16, 1/0/1	24, 1/1/1	32, 1/0/1	40, 0/1/1	48, 1/0/1

Таким образом, выполненные на основе имитационного моделирования предварительные исследования позволили выявить факт различной информативности разных КА орбитальной группировки и целесообразность исключения малоинформативных КА из работы при пролете их над конкретными районами наблюдения.

Иными словами, методический подход к прогнозированию применения многоспутниковых систем наблюдения за морскими объектами на основе имитационного моделирования процесса ее функционирования представляет собой следующий порядок действий:

- выбор (разработку) метода и методики прогнозирования результатов применения МСНМО;
- формирование исходных данных;
- прогнозирование результатов применения МСНМО с помощью комплекса имитационных моделей орбитального движения КА, функционирования БСК КА,

приема полученных данных на ППИ, распознавания зафиксированных КА объектов и имитационной модели движения ОН в заданном районе;

– визуальное сравнение ожидаемых результатов применения каждого КА МСНМО (выбор номеров КА с низкой информативностью);

– исключение из рассмотрения КА с низкой информативностью (при допустимом (незначительном) снижении ожидаемых результатов применения МСНМО);

– разработка предложений по перераспределению ресурса между различными КА с оценкой его влияния на ожидаемые результаты применения МСНМО.

Такой подход позволяет осуществить рациональное распределение ресурса каждого КА орбитальной группировки в процессе планирования применения МСНМО.

Большой интерес представляет также оценка информативности КА на более длительных временных интервалах (в различные периоды функционирования ОГ КА), при различных значениях углов между плоскостями орбит первых КА в группе и углов сдвига по долготе восходящего узла каждого КА в группе, при различных характеристиках БСК КА и др. Отдельным направлением исследований является установление (оценка) возможности «выравнивания» расхода ресурса каждого КА в составе орбитальной группировки с целью недопущения «перерасхода» ресурса одних КА и «недорасхода» ресурса других КА. Получение таких оценок можно рассматривать как направление дальнейших исследований по данной тематике в интересах информационного обеспечения процесса эксплуатации морской техники.

#### **Выводы**

1. Представлен методический подход и показаны особенности имитационного моделирования при решении задачи прогнозирования результатов применения многоспутниковой системы наблюдения за морскими объектами.

2. Выявлен факт различной информативности разных космических аппаратов орбитальной группировки и показана целесообразность исключения малоинформативных космических аппаратов из работы при пролете их над конкретными районами наблюдения при допустимом (незначительном) снижении ожидаемых результатов применения системы.

3. Определены направления дальнейших исследований.

#### **Литература**

1. **Анцев Г.В., Гуляков В.В., Калинов М.И., Родионов В.А.** Опыт и перспективы применения отечественных космических систем радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга морской поверхности. М.: АО «Концерн «Моринформсистема-Агат», 2018. № 1(13) С. 8–17.
2. **Калинов М.И., Родионов В.А.** Особенности прогнозирования результатов применения многоспутниковой системы наблюдения за морскими объектами // Информатизация и связь. 2022. № 5. С. 42–49.