

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОДВИЖНЫХ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

Геннадий Федорович ХАХУЛИН родился в 1941 г. в городе Егорьевске Московской области. Заведующий кафедрой МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области теории оптимизации и исследования операций; системного анализа; моделирования технических систем; управления подвижными объектами. Автор более 200 научных работ. E-mail:kaf302@mai.ru

Gennady F. KNAKHULIN, D.Sci., was born in 1941, in the Moscow Region. He is the Head of the Department at the MAI. His major research interests are in the optimization and computer simulation for complex engineering systems. He has published more than 200 technical papers. E-mail: kaf302@mai.ru

Сергей Александрович НОВИКОВ родился в 1982 г. в городе Москве. Старший научный сотрудник МАИ. Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области исследования операций; моделирования технических систем; управления подвижными объектами. Автор более 20 научных работ. E-mail:kaf302@mai.ru

Sergey A. NOVIKOV, was born in 1982, in Moscow. He is a Senior Research Associate at the MAI. His research interests include operations research, simulation of engineering systems, control systems for movable objects. He has published 20 technical papers. E-mail: kaf302@mai.ru

Алексей Игоревич ПОСАДСКИЙ родился в 1984 г. в городе Москве. Младший научный сотрудник МАИ. Основные научные интересы — в области исследования операций; моделирования технических систем; управления подвижными объектами. Автор шести научных работ. E-mail:kaf302@mai.ru

Aleksey I. POSADSKY, was born in 1984, in Moscow. He is a Junior Research Associate at the MAI. His research interests include operations research, simulation of engineering systems, control systems for movable objects. He has published 6 technical papers. E-mail: kaf302@mai.ru

Владимир Иванович ЕСКИН родился в 1946 г. в городе Раменское Московской области. Доцент МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области исследования операций, поддержки принятия решений; эффективности функционирования сложных технических систем. Автор более 70 научных работ. E-mail:kaf302@mai.ru

Vladimir I. ESKIN, Ph.D., was born in 1946, in the Moscow Region. He is an Associate Professor at the MAI. His major research interests are in operations research, decision support techniques, efficiency of complex engineering systems. He has published over 70 technical papers. E-mail:kaf302@mai.ru

Представлены результаты исследования задачи планирования наблюдений в автоматизированной системе космического мониторинга подвижных морских объектов, подтверждающие адекватность постановки задачи планирования, эффективность метода и алгоритма формирования плана. Ввиду большого количества используемых аббревиатур в конце статьи приводится их список.

Investigation results are presented for observation scheduling algorithm intended for computer-aided space monitoring system aimed to movable naval objects. The results confirm adequacy of observation problem statement as well as efficiency of used technique and schedule generation algorithm.

Ключевые слова: автоматизированная система космического мониторинга, подвижные морские объекты, задача планирования наблюдений, метод и алгоритм решения, вычислительные эксперименты, имитационные исследования

Keewords: computer-aided space monitoring system, movable naval objects, observation scheduling problem, solution method and algorithm, computer experiments, simulation investigations.

Введение

Рассматривается автоматизированная система космического мониторинга (АСКМ) подвижных морских объектов (ПМО). Активными средствами

системы являются группировки космических аппаратов (КА) с аппаратурой осмотра (АО) различного типа (радиолокационной, радиотехнической, видеонаблюдения и т.п.), способной просматривать заданные области земной поверхности и собирать

информацию по различным характеристикам ПМО (координатам, курсу, скорости движения, типу ПМО и др.), являющимся позициями его формуляра. Процесс сбора информации имеет стохастический характер, что связано с ошибками в прогнозе местоположения ПМО, частичностью перекрытия зоной наблюдения АО прогнозируемой области возможных положений (ОВП) ПМО, вероятностным характером самого процесса обнаружения. Полученная с помощью АО КА информация о ПМО с запаздыванием доводится до центрального пункта обработки информации (ЦПОИ) системы, т.е. имеющаяся в ЦПОИ информация о ПМО в определенной степени устаревает по отношению к моментам ее получения АО КА. С учетом этих факторов и ресурсных ограничений АО (по времени работы, количеству включений на отдельных витках КА или на всем периоде планирования, объему бортового долговременного запоминающего устройства (ДЗУ) и др.) для АСКМ поставлена и решена задача составления плана наблюдений ПМО на некоторый фиксированный временной интервал планирования (например, на сутки) [1], в котором определяются времена включения и выключения АО КА с целью получения информации о тех или иных позициях формуляра ПМО.

Общая характеристика задачи планирования, метода и алгоритма ее решения

Формализованная постановка задачи планирования представляет собой нелинейную комбинаторную задачу стохастического программирования. Стохастический характер задачи определяется ее критерием, представляющим собой максимум математического ожидания суммарной площади над процессами старения информации в ЦПОИ о различных позициях формуляра наблюдаемых ПМО с учетом важности этих позиций и важности самих ПМО. Эта суммарная площадь интерпретируется как степень информационной определенности о ПМО, интегрально существующей в ЦПОИ на интервале планирования. Введенные в формализованной постановке процессы старения информации имеют стохастический характер: их реализация зависит от успешности реализации событий запланированных наблюдений. Оптимизационные переменные в задаче принимают бинарные значения (1 или 0) и определяют факт включения или отказа от включения в формируемый план тех или иных возможностей наблюдения ПМО различными КА. Область допустимых решений задачи имеет детерминированный вид и определяется заданными, перечисленными выше ресурсными ограничениями АО КА.

Показана возможность использования для решения задачи косвенного метода, основанного на аналитическом расчете значения целевой функции при фиксированных значениях оптимизационных переменных путем осреднения по вероятностям успешной реализации наблюдений тех участков площадей над процессами старения, которые вносят вклад в общее значение целевой функции.

Для оптимизации использован метод неявного перебора, основанный на стратегии локального поиска [2]. Для поиска допустимого решения используется метод максимального приращения целевой функции. После нахождения допустимого решения осуществляется перебор возможностей его улучшения путем перебора в локальной окрестности.

В алгоритмической реализации осуществляется контроль всех ресурсных ограничений. При выходе за пределы области допустимых решений исключение некоторых возможностей наблюдения из формируемого плана осуществляется по принципу минимального уменьшения целевой функции.

Цели исследования алгоритма планирования

Первостепенной задачей исследования является получение уверенности в правильности работы алгоритма планирования, в адекватном учете при составлении плана возможностей АСКМ по наблюдению за ПМО: состава группировки КА-наблюдателей, повышение оперативности доведения информации до ЦПОИ за счет использования спутников-ретрансляторов, ресурсных ограничений АО КА.

Предложенный алгоритм использует эвристические правила как при поиске допустимых решений, так и при их улучшении. Он не гарантирует нахождение точного оптимального решения. Многие его правила нацелены на повышение быстродействия работы алгоритма. Поэтому хотелось бы получить хотя бы экспериментальные оценки близости формируемых решений к точному оптимальному и эффективности правил, применяемых для сокращения перебора.

Одна из основных целей исследования состоит в анализе соответствия целевой функции формализованной постановки задачи конечным критериям эффективности функционирования АСКМ. Такими критериями в АСКМ являются вероятности успешного решения задачи слежения (ЗС) за ПМО и вероятности успешного решения задачи выдачи информации (ЗВИ) о характеристиках ПМО конечным потребителям. Связать эти показатели в оптимизационной задаче непосредственно с оптимизационными переменными не удастся вследствие сложности и стохастичности взаимосвязей. Поэтому хотелось бы получить уверенность в том, что

решение задачи планирования по предложенному в ней критерию обеспечивает улучшение указанных выше конечных показателей эффективности системы.

Для проведения исследований по всем перечисленным вопросам была разработана имитационная модель АСКМ, в составе которой были реализованы алгоритмы планирования, процесс отработки составленного плана и оценка качества планирования по указанным выше конечным показателям эффективности рассматриваемой системы.

Имитационная модель АСКМ как инструментальное средство исследования алгоритмов планирования

Имитационная модель (ИМ) в задачах исследования алгоритмов планирования наблюдений ПМО имеет двойное назначение:

- основное назначение — оценка эффективности работы алгоритмов планирования, работающих в составе АСКМ;
- вспомогательное назначение — подготовка исходных данных для работы алгоритма планирования (определение перечня возможностей наблюдений ПМО и параметров этих наблюдений при взаимодействии АО КА с динамически изменяющимися на периоде планирования ОВП ПМО).

Состав, параметры моделируемых объектов и процессов, представленных в ИМ

Космические аппараты — наблюдатели, оснащенные аппаратурой осмотра различных типов для сбора информации о ПМО. В модели принято, что КА-наблюдатели осуществляют движение по невозможным круговым или эллиптическим орбитам. Движение спутников задается алгебраическими уравнениями и рассматривается как непрерывный процесс.

АО характеризуется следующими данными: типом, вероятностью обнаружения ПМО; заданными возможностями определения данных по различным позициям формуляра ПМО; шириной и конфигурацией полосы обзора АО, размерами мгновенной зоны видимости и возможностью ее перенацеливания; точностью определения параметров ПМО; влиянием внешней среды на возможности наблюдения. Например, условиями успешной работы АО оптического типа являются благоприятные погодные условия в районе наблюдения и достаточная освещенность места наблюдения (угол места Солнца для места наблюдения не меньше заданного); ресурсными ограничениями работы АО по времени работы и по количеству включений на одном витке и за одни сутки, по емкости бортового ДЗУ,

по скорости перенацеливания оптической оси камеры для оптической АО.

Спутники-ретрансляторы (СР) — это КА, движущиеся по высоким круговым или эллиптическим орбитам, способные получать данные от КА-наблюдателей и передавать их на наземный информационный комплекс (НИК) во время ближайшего сеанса связи.

ПМО — это надводные корабли различных классов (большой, средний, малый), осуществляющие движение по траекториям некоторых видов (прямолинейное равномерное движение, броуновское движение в заданном районе, движение по сложной пилообразной траектории). Для каждого ПМО заданы важности с точки зрения первоочередности их наблюдения АО КА и необходимости иметь по ним полную актуальную информацию.

НИК осуществляют информационное взаимодействие с КА и передачу данных, полученных при наблюдениях в ЦПОИ. КА объединены в несколько группировок (космических систем (КС)). Каждый НИК обеспечивает сбор информации от КА, принадлежащих той же КС, что и сам НИК. Задаются координаты НИК и угол места для гарантированного приема информации от КА. Количество НИК не ограничено и задается при моделировании.

В ИМ АСКМ принято, что ЗВИ решается, если с момента последнего определения аппаратурой осмотра КА координат, класса ПМО и некоторых других характеристик его формуляра прошло не более заданного интервала времени

ЗС решается, если радиус области, в которой может находиться ПМО (учитывая его последнее успешно реализованное обнаружение, данные по которому доведены до ЦПОИ), не превышает заданной в исходных данных величины.

Реализация ИМ

ИМ реализована в классе непрерывно-дискретных моделей с использованием событийного подхода к формализации на основе системы имитационного моделирования (СИМ) Modelling [3]. При продвижении модельного времени применяется комбинация метода модельных событий и фиксированного шага.

Непрерывными процессами, реализованными в модели, являются движения КА и ПМО.

Дискретная часть ИМ реализована с помощью следующих модельных событий: попадание ПМО в зону осмотра АО КА, попадание КА-наблюдателя в зону связи со спутником-ретранслятором, вход КА в зону связи с наземным информационным комплексом, начало передачи данных между объектами системы, окончание передачи данных между

объектами системы, прохождение ПМО граничной точки маршрута, потеря ПМО, включение АО КА, выключение АО КА, прохождение КА начала нового витка, решение ЗВИ по отдельным ПМО.

В ИМ реализован развитый визуальный и графический интерфейс, позволяющий эффективно вести подготовку исходных данных, организацию имитационных экспериментов, в интерактивном режиме осуществлять взаимодействие пользователя с моделью, в наглядном виде получать выходные результаты.

ИМ может функционировать в двух основных режимах: в режиме баллистического прогноза и подготовки данных для алгоритма планирования; в режиме отработки составленного плана.

Полный цикл работы ИМ АСКМ состоит из последовательной работы модели в каждом из двух режимов. Схема полного цикла суточного функционирования модели представлена на рис. 1.

Сначала пользователь вводит необходимые для эксперимента исходные данные и запускает процесс моделирования в режиме составления баллистического прогноза и формирования массива возможностей. После формирования массива возможностей осмотров автоматически запускается работа алгоритма составления плана осмотров. Пользователь имеет возможность ознакомиться с результатами планирования — трассировкой работы алгоритма и составленным планом наблюдений. Далее опять запускается процесс моделирования в режиме отработки составленного плана с теми же исходными данными и составленным планом осмотров. По результатам моделирования рассчитываются значения конечных показателей критерия моделирования.

ИМ может работать также в комбинированных режимах, например в режиме многосуточного фун-

кционирования системы. Для обеспечения такого режима работы решена задача автоматического запуска модели в режимах отработки составленного плана модели и баллистического прогноза и планирования осмотров с зафиксированным начальным состоянием.

В состав показателей критерия оценки результатов моделирования входят:

- математическое ожидание важности ПМО, по которым решается ЗВИ (МОВАжЗВИ);
- математическое ожидание важности ПМО, по которым решается ЗС (МОВАжЗС);
- вероятности решения ЗВИ по каждому ПМО;
- вероятность решения ЗВИ, осредненная по всем ПМО;
- статистические характеристики интервалов времени, когда может быть решена ЗВИ по каждому ПМО;
- статистические характеристики времени обновления данных о ПМО в ЦПОИ;
- статистические характеристики интервалов времени сопровождения каждого ПМО;
- статистические характеристики интервалов времени, когда каждый ПМО не сопровождается;
- статистические характеристики количества одновременно сопровождаемых ПМО;
- статистические характеристики количества ПМО, для которых одновременно может быть решена ЗВИ;
- вероятности решения ЗС для каждого ПМО;
- осредненная по всем ПМО вероятность решения ЗС;
- доля использования ресурсов АО каждым КА;
- статистические характеристики интервалов времени между осмотрами ОВП ПМО.

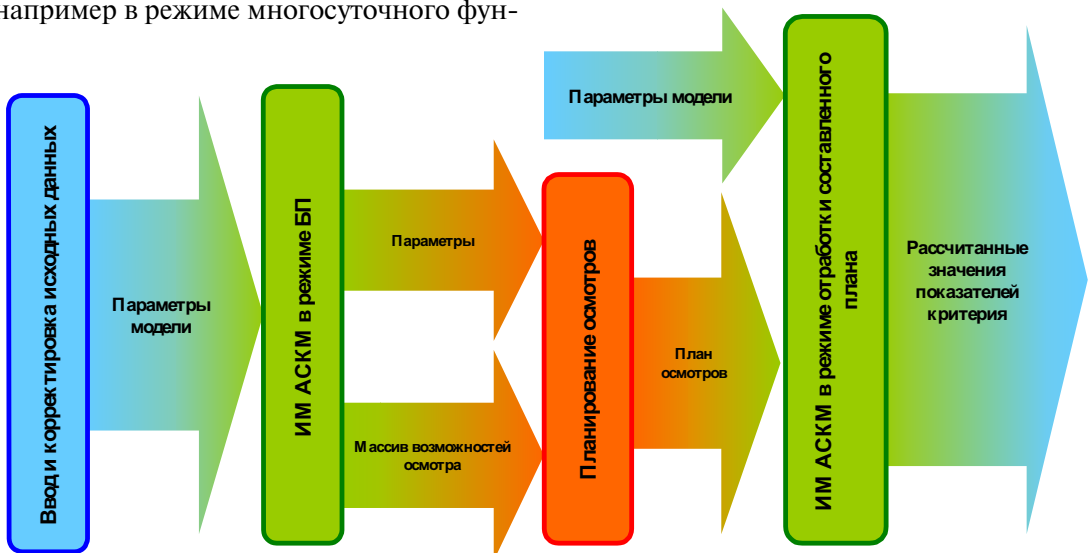


Рис. 1. Схема функционирования ИМ АСКМ

Результаты исследований алгоритма планирования

В проведенных имитационных экспериментах (ИМЭ) предполагается, что АСКМ располагает тремя группировками КА:

1) шесть КА радиотехнического наблюдения (РТН). Двигутся по круговым орбитам с высотой 472 км, наклонением 67,1°;

2) шесть КА радиолокационного наблюдения (РЛН). Двигутся по круговым орбитам с высотой 913 км, наклонением 67,1°. На орбите КА размещены равномерно;

3) три КА оптического наблюдения. Двигутся по круговым орбитам с высотой 450 км (один КА) и 800 км (два КА), наклонением 70 и 98° соответственно.

Влияние состава группировки КА

В проведенных экспериментах варьировался состав КА, производящих наблюдения за десятью ПМО, движущимися в различных районах водной

акватории мирового океана. Количество КА в АСКМ наращивалось пошагово. На каждом шаге добавляется один КА из одной из трех имеющихся группировок. Осуществлялся выбор такого КА для добавления в АСКМ, который максимально увеличивает МОВажЗВИ. Фиксировались значения целевой функции задачи планирования (ЦФЗП) и оценки основных конечных критериев (МОВажЗВИ, МОВажЗС). Следует пояснить, что значения всех показателей имеют нормированный характер на отрезке [0,1].

Основные результаты экспериментов сведены в табл. 1.

Графически результаты экспериментов, занесенные в табл. 1, представлены на рис. 2.

Кривые имеют характер насыщения. Следовательно, существует рациональный состав группировки КА для эффективного наблюдения за ПМО, например 12 КА для нашего примера. Дальнейшее

Таблица 1

Результаты ИМЭ по варьированию состава группировки КА

Номер эксперимента	Состав группировки	ЦФЗП	МОВажЗВИ	МОВажЗС
1	0 КА РТН, 1 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.1522474	0.04062	0.28389
2	1 КА РТН, 1 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.2190621	0.03805	0.46816
3	1 КА РТН, 1 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.2565185	0.04611	0.54789
4	2 КА РТН, 1 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.2781064	0.04323	0.64382
5	1 КА РТН, 2 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.2801495	0.05350	0.58427
6	2 КА РТН, 2 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.3055108	0.06951	0.67437
7	1 КА РТН, 3 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.3353194	0.08364	0.66739
8	1 КА РТН, 2 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.2831049	0.05844	0.60889
9	2 КА РТН, 3 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.3603270	0.10812	0.69326
10	1 КА РТН, 4 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.3924416	0.11180	0.73691
11	1 КА РТН, 3 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.3534243	0.08909	0.68434
12	2 КА РТН, 4 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.4058435	0.12895	0.76635
13	1 КА РТН, 5 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.4241116	0.13552	0.80500
14	1 КА РТН, 4 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.4001316	0.11607	0.76309
15	2 КА РТН, 5 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.4354515	0.15687	0.80573
16	1 КА РТН, 6 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.4655797	0.15999	0.84590
17	1 КА РТН, 5 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.4254328	0.13728	0.82365
18	2 КА РТН, 6 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.5024450	0.18653	0.85583
19	1 КА РТН, 6 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.4771149	0.17312	0.82003
20	3 КА РТН, 6 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.5295685	0.20379	0.86649
21	2 КА РТН, 6 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.5161052	0.19615	0.86538
22	4 КА РТН, 6 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.5372836	0.21233	0.86958
23	3 КА РТН, 6 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.5269912	0.20431	0.86788
24	5 КА РТН, 6 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.5581318	0.23906	0.87903
25	4 КА РТН, 6 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.5367603	0.21049	0.88028
26	6 КА РТН, 6 КА РЛН, 0 КА ОптН	0.5631844	0.23646	0.90635
27	5 КА РТН, 6 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.5560730	0.24437	0.87667
28	6 КА РТН, 6 КА РЛН, 1 КА ОптН	0.5656130	0.24316	0.91010
29	6 КА РТН, 6 КА РЛН, 2 КА ОптН	0.5678327	0.25344	0.90635
30	6 КА РТН, 6 КА РЛН, 3 КА ОптН	0.5743188	0.25872	0.90635

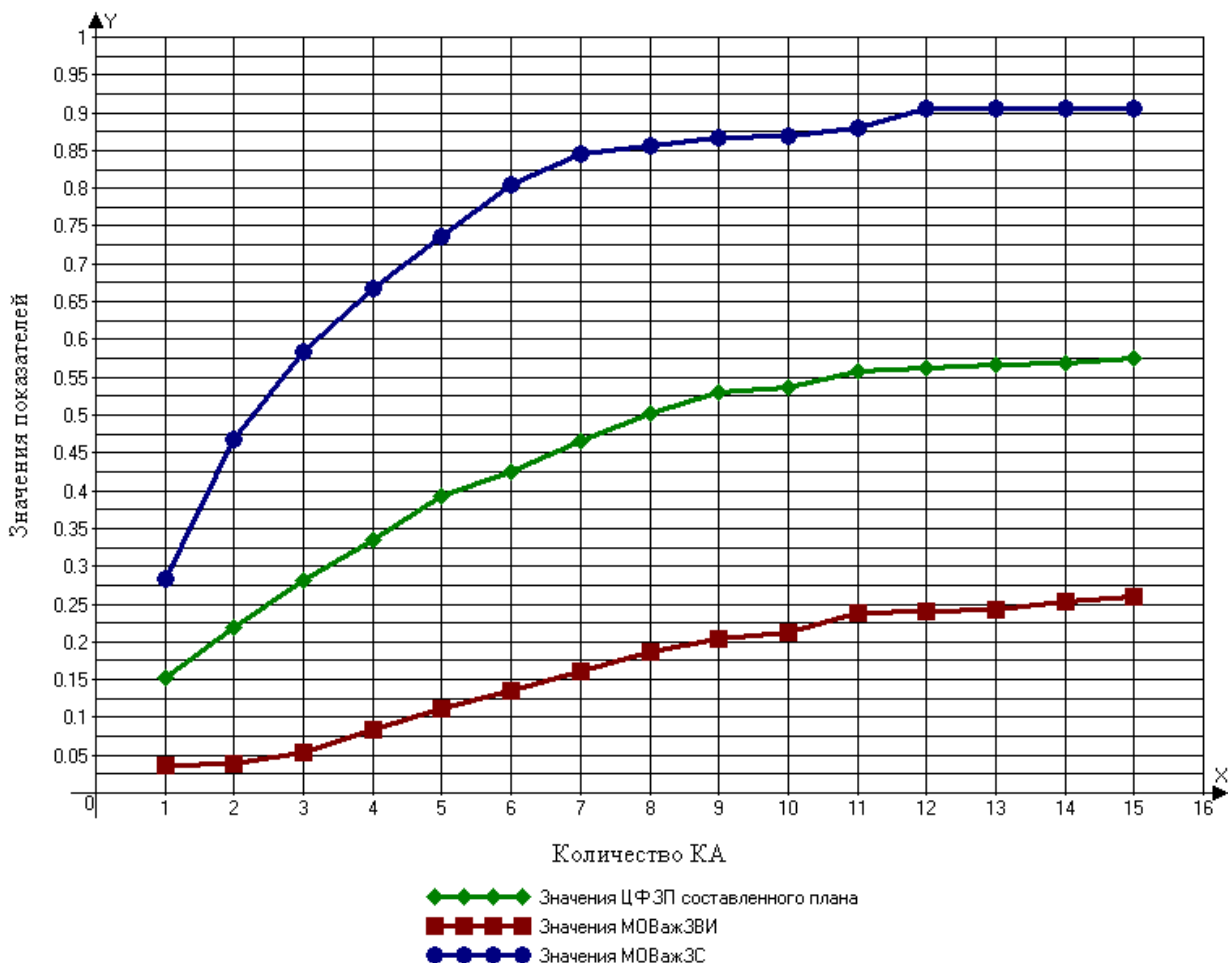


Рис. 2. Зависимости показателей эффективности АСКМ и составленного плана от количества КА по результатам экспериментов 1

наращивание группировки КА нецелесообразно, поскольку увеличение группировки КА от 12 до 15 приводит к увеличению ЦФЗП всего на 2%, МОВажЗВИ — на 9%, МОВажЗС — 0%.

Выводы

1. Имитационная модель позволяет выбрать рациональный состав группировки, а при наличии стоимостной модели результаты работы модели могут быть использованы для определения оптимального состава группировки КА для наблюдений за заданным набором и расположением ПМО.

2. Алгоритм планирования наблюдений чувствителен к изменению состава и параметров КА-наблюдателей и адекватно использует их возможности для осуществления наблюдений ПМО.

Влияние использования в АСКМ спутников-ретрансляторов на эффективность планирования

В эксперименте участвуют 1 НИК, 12 КА и 10 ПМО. В данной серии экспериментов варьируется количество СР.

В табл. 2 приведены значения ЦФЗП и соответствующие им конечные показатели критерия эффективности, полученные при моделировании.

Введение одного СР привело к увеличению ЦФЗП на 30%, МОВажЗВИ — на 63%, МОВажЗС — на 7%.

Введение в дополнение к первому второго СР привело к увеличению ЦФЗП на 1%, МОВажЗВИ — на 11%, МОВажЗС — на 1%.

Таблица 2

Результаты ИМЭ по варьированию СР

Номер эксперимента	Количество СР	ЦФЗП	МОВажЗВИ	МОВажЗС
1	0	0,443159	0,15201	0.83266
2	1	0,5752061	0,24798	0.89359
3	2	0,579508	0,27472	0.90557

Очевидно, что применение спутников-ретрансляторов способствует существенному увеличению как ЦФЗП для составленных планов, так и конечных показателей эффективности системы. Объясняется это тем, что благодаря применению СР сокращаются задержки в доведении данных до ЦПОИ.

Выводы

1. Алгоритм планирования наблюдений чувствителен к уменьшению времен запаздывания в доведении данных до ЦПОИ.

2. Формирование плана на основе разработанного алгоритма планирования эффективно использует возможности системы по оперативности доведения информации до ЦПОИ для увеличения конечных показателей эффективности АСКМ.

Влияние ресурсных ограничений АО на эффективность планирования

В ИМЭ участвуют 9 КА, 10 ПМО, 2 НИК. Варьируется только количество ресурсов АО КА.

Сначала по итогам баллистического прогноза рассчитано количество ресурсов, необходимых для

включения в план всех возможностей наблюдений. Это количество условно принято за 100%. В каждом последующем эксперименте количество ресурсов уменьшалось на 15%. Основные результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 3. На рис. 3 эти результаты представлены графически.

Кривые имеют характер насыщения. Следовательно, существует рациональный объем ресурсов, необходимый для эффективного наблюдения за ПМО, например 70% для нашего примера. Увеличение количества ресурсов с 70 до 100% привело к

Таблица 3

Результаты ИМЭ по варьированию ресурсных ограничений АО

Номер эксперимента	Количество ресурсов	ЦФЗП	МОВажЗВИ	МОВажЗС
1	100%	0.5445720	0.22164	0.86688
2	85%	0.5414797	0.22070	0.86153
3	70%	0.5342107	0.21320	0.86153
4	55%	0.5135605	0.18650	0.85278
5	40%	0.4622163	0.14268	0.85215
6	25%	0.3714450	0.09778	0.76882
7	10%	0.2163792	0.03743	0.38451

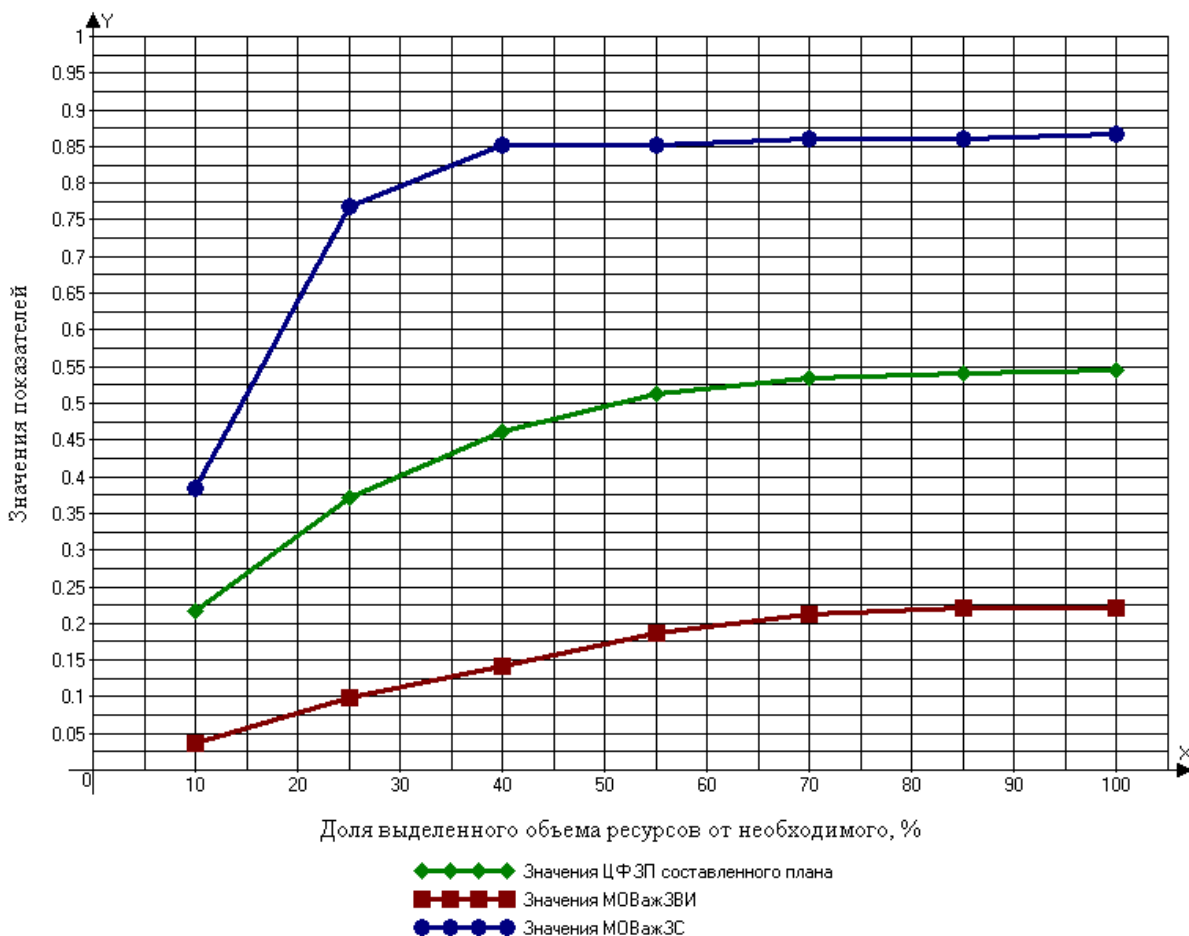


Рис. 3. Зависимости показателей эффективности АСКМ и составленного плана от количества выделенных ресурсов

увеличению ЦФЗП всего на 2%, МОВажЗВИ — 4%, МОВажЗС — менее 1% (0,6%).

Выводы

1. Алгоритм планирования наблюдений адекватно учитывает ресурсные ограничения АО КА.

2. С помощью ИМ АСКМ возможно выявить необходимый рациональный объем ресурсов, обеспечивающий эффективное планирование наблюдений, а при наличии стоимостной модели результаты работы модели могут быть использованы для определения необходимого рационального количества ресурсов для наблюдения за заданными ПМО. Решение этой задачи очень актуально для рассматриваемой АСКМ, так как в ней могут быть использованы возможности различных по исходному функциональному назначению КС для решения задач наблюдения за ПМО.

Исследование алгоритма планирования по точности и быстродействию

Проведены эксперименты по сравнению результатов работы эвристического алгоритма планирования и алгоритма полного перебора всех возможных

Однако для 19 возможностей решение по эвристическому алгоритму было получено более чем в 1000 раз быстрее, а для 28 возможностей — в 10000 раз быстрее, чем по алгоритму полного перебора.

Проведены эксперименты по оценке быстродействия предложенного алгоритма планирования. В экспериментах оценивалось время машинного счета для различного количества возможностей наблюдения в исходном массиве. Полученные результаты приведены в табл. 5.

467 возможностей получено при составлении суточного плана наблюдений для 15 КА по 10 ПМО.

Для 467 возможностей, а это размерность задачи полного перебора 2467, алгоритм составил план наблюдений чуть более чем за 2 мин.

Выводы

1. Разработанный алгоритм планирования наблюдений ПМО показал высокую результативность по близости формируемых им решений по отношению к оптимальным.

2. Разработанный алгоритм планирования наблюдений обладает высоким быстродействием.

Таблица 4

Результаты сравнения предложенного алгоритма планирования и алгоритма полного перебора

Номер эксперимента	Количество возможностей	Эвристический алгоритм планирования наблюдений		Алгоритм полного перебора	
		ЦФЗП; план наблюдений	Время счета, с	ЦФЗП; план наблюдений	Время счета, с
1	7	0,1896; 1010110	0,109	0,1896; 1010110	0,063
2	14	0,1388; 01010010001100	0,172	0,1388; 01010010001100	7,922
3	19	0,233; 1111110001111111001	0,219	0,233; 1111110001111111001	261,282
4	22	0,1605; 0010100100011100110000	0,328	0,1605; 0010100100011100110000	400,718
5	28	0,132; 111111000010000011010010001	0,484	0,132; 111111000010000011010010001	4914,235

Таблица 5

Основные результаты экспериментов по оценке быстродействия алгоритма планирования

Номер эксперимента	Количество возможностей	Время счета, с
1	30	1,031
2	59	3,562
3	90	6,078
4	167	15,172
5	263	32,671
6	342	53,985
7	381	72,391
8	467	124,328

планов наблюдений. Эксперименты проводились для малых размерностей задачи — до 28 возможностей. Оценивались ЦФЗП составленных планов, сами составленные планы и времена машинного счета. Результаты экспериментов представлены в табл. 4.

В проведенных экспериментах результаты работы эвристического алгоритма планирования и алгоритма полного перебора полностью совпали. То есть применение эвристического алгоритма планирования приводило к точному оптимальному решению задачи.

*Исследование соответствия критерия
формализованной постановки задачи планирования
конечным показателям эффективности
функционирования АСКМ*

Результаты множества проведенных ИМЭ по формированию планов наблюдений и его оценки по конечным показателям эффективности АСКМ отображены на двух графиках зависимостей МОВаж-

ЗВИ от ЦФЗП составленных планов (рис. 4) и МОВажЗС от ЦФЗП (рис. 5).

Визуально на графиках видна сильная положительная корреляция между рассматриваемыми показателями. Результаты расчетов подтверждают это: коэффициенты корреляции между ЦФЗП и МОВажЗВИ и ЦФЗП и МОВажЗС имеют значения 0,977 и 0,934 соответственно.

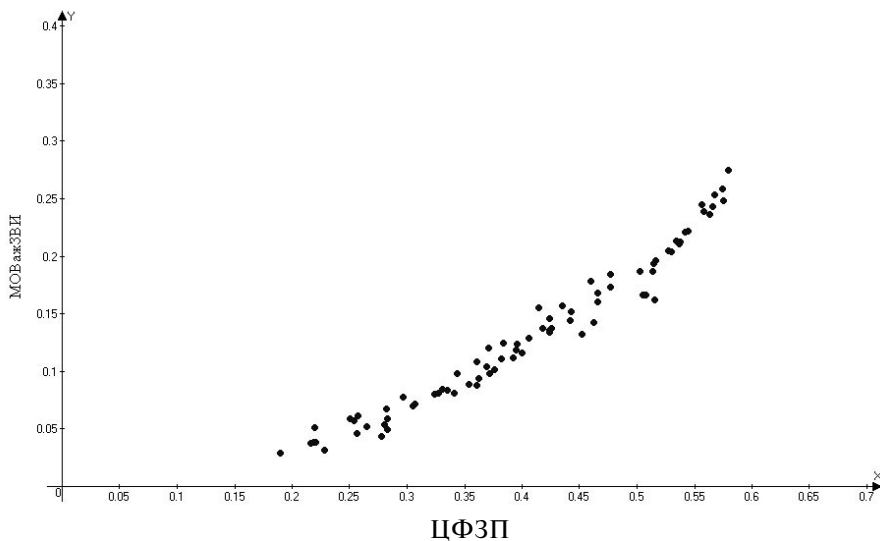


Рис. 4. График зависимости МОВажЗВИ от ЦФЗП

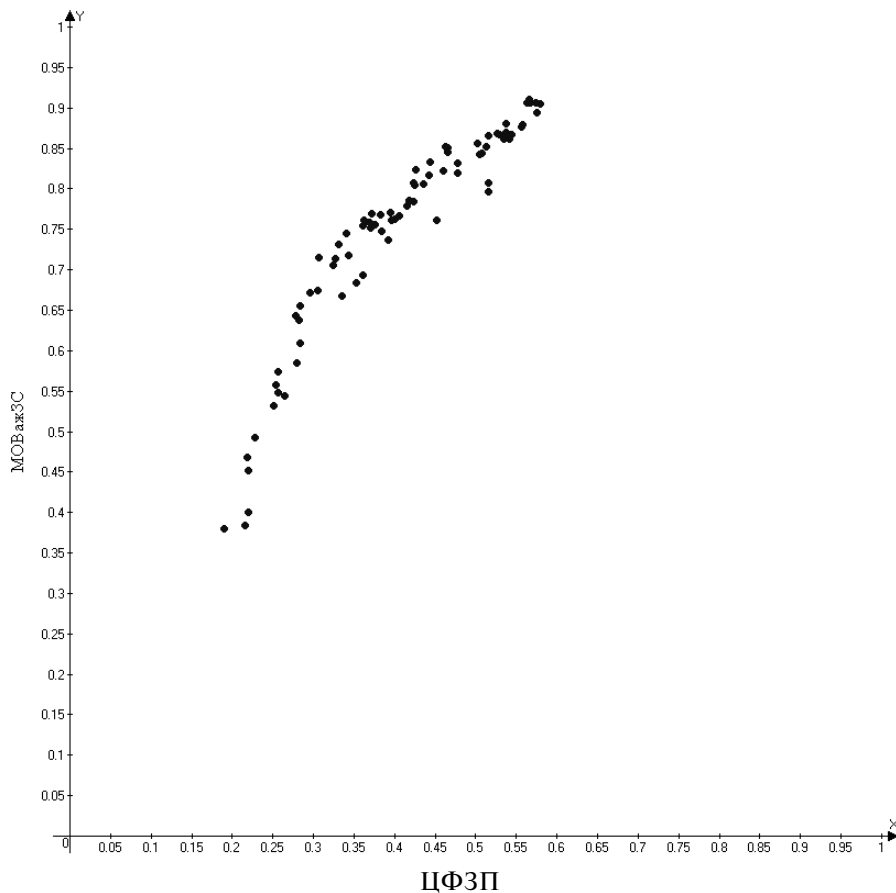


Рис. 5. График зависимости МОВажЗС от ЦФЗП

Полученные большие значения коэффициентов корреляции указывают на наличие связи между ЦФЗП и МОВажЗВИ, и ЦФЗП и МОВажЗС, близкой к линейной

Выводы

Предложенный критерий формализованной постановки оптимизационной задачи планирования наблюдений ПМО соответствует конечным целям и соответствующим показателям эффективности функционирования АСКМ.

На основе проведенных исследований можно сделать общий вывод об адекватности предложенной формализованной постановки задачи планирования наблюдений ПМО и об эффективности разработанного метода и алгоритма планирования.

Список аббревиатур

АСКМ — автоматизированная система космического мониторинга,

ПМО — подвижный морской объект,

КА — космический аппарат,

АО — аппаратура обнаружения,

ОВП — область возможных положений,

ЦПОИ — центральный пункт обработки информации,

ЗВИ — задача выдачи информации,

ЗС — задача сопровождения,

ИМ — имитационная модель,

СР — спутник-ретранслятор,

НИК — наземный информационный комплекс,

КС — космическая система,

СИМ — система имитационного моделирования,

МОВажЗВИ — математическое ожидание важности ЗВИ,

МОВаж ЗС — математическое ожидание важности ЗС,

ИМЭ — имитационные эксперименты,

РТН — радиотехническое наблюдение,

РЛН — радиолокационное наблюдение,

ЦФЗП — целевая функция задачи планирования.

Библиографический список

1. Хахулин Г.Ф., Новиков С.А., Посадский А.И., Ескин В.И. Задача планирования наблюдений подвижных морских объектов в системе космического мониторинга // Вестник МАИ. 2007. №3. С. 125-131.

2. Хахулин Г.Ф., Красовская М.А., Булыгин В.С. Теоретические основы автоматизированного управления: (Задачи, методы, алгоритмы теории оптимального планирования и управления). — М.: Изд-во МАИ, 2005.

3. Хахулин Г.Ф., Монахов С.В. Система имитационного моделирования Modelling для разработки дискретных и непрерывно-дискретных моделей. — М.: Изд-во МАИ, 2005.

Московский авиационный институт

Статья поступила в редакцию 15.05.09