

На правах рукописи

УДК 519.854(075.8):519.876.5(075)

НОВИКОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ПЛАНИРОВАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ  
КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОДВИЖНЫХ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.13.01

«Системный анализ, управление и обработка информации»  
(информатика, управление и вычислительная техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва  
2008

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Московского авиационного института (государственного технического университета) «МАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Хахулин Геннадий Федорович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Павлова Наталия Владимировна;  
кандидат технических наук  
Колесов Денис Владимирович

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие  
центральный научно-исследовательский институт  
(ФГУП ЦНИИ) «Комета»

Защита диссертации состоится « 10 » ноября 2008 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.11 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) «МАИ» по адресу: 125993, А-80, ГСП-3, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4, зал заседаний Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.11  
кандидат технических наук, доцент

Горбачев Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

В последнее время все более широкое распространение получают глобальные источники информации – источники, которые могут получать и передавать потребителям информацию по всем районам Земли. Такими источниками информации являются спутниковые системы мониторинга, оснащенные космическими аппаратами (КА) – наблюдателями, которые способны осматривать земную поверхность аппаратурой осмотра (АО) различного типа и передавать полученную информацию на наземные комплексы приема/передачи данных своей группировки.

В настоящее время актуальной является задача создания автоматизированной системы космического мониторинга (АСКМ) подвижных морских объектов, которая использовала бы КА-наблюдатели различных космических систем (КС), принадлежащих различным владельцам и предназначенных для выполнения различных целевых задач, а получаемая с их помощью информация о подвижных морских объектах (ПМО), за которыми осуществляется наблюдение, интегрировалась и обрабатывалась бы в едином центре с целью эффективного решения задачи сопровождения (ЗС) ПМО и задачи выдачи информации (ЗВИ) конечным потребителям, взаимодействующим с АСКМ.

В связи с тем, что используемые КА-наблюдатели должны решать не только задачи АСКМ, но и целевые задачи своих владельцев, а также в связи с ограниченностью энергии, на бортовую АО КА-наблюдателей накладываются ресурсные ограничения по возможности ее использования. Из-за ограничений на работу аппаратура осмотра КА, как правило, не может осмотреть все заданные районы земной поверхности. Поэтому в системе должна решаться задача оптимального использования ограниченных ресурсов АО КА, выделенных для наблюдений за ПМО, с целью максимизации эффективности проведения наблюдений.

Задачу оптимального использования ресурсов возможно решить только посредством планирования наблюдений на некоторый интервал времени в будущем. Задача планирования работы АО КА является одной из наиболее важных задач, которые должны решаться в АСКМ.

При постановке и решении задачи планирования должны быть учтены следующие факторы:

- основная целевая установка АСКМ относительно сбора информации по различным ПМО, заключающаяся в эффективном решении ЗС и ЗВИ;
- динамика взаимного движения областей наблюдения АО КА и прогнозируемых областей возможных положений (ОВП) ПМО при определении возможности наблюдения;
- неопределенность движения ПМО;
- стохастическая природа реализации планируемых наблюдений;
- динамика движения КА относительно наземных информационных комплексов (НИК) для определения моментов времени доведения собранной на борту информации до центра приема и обработки информации (ЦПОИ);
- ресурсные ограничения, накладываемые на бортовую АО по количеству включений на витке и за сутки, по времени работы на витке и за сутки, по емкости бортового ДЗУ;
- ограничения по видео и метеоусловиям на проведение наблюдений определенными типами АО;
- динамика старения информации по различным характеристикам ПМО, получаемым в ЦПОИ;
- важности различных ПМО с точки зрения необходимости первоочередного получения данных по ним;
- важности отдельных характеристик ПМО с точки зрения необходимости иметь по ним актуальные данные;
- возможности по сбору информации по различным характеристикам ПМО различными типами АО КА.

В настоящее время отсутствует постановка и решение задачи планирования, учитывающая все перечисленные факторы. Следовательно, постановка и решение задачи планирования наблюдений за ПМО является актуальной научной задачей.

Актуальная научная задача – сформировать такую формализованную постановку, которая удовлетворяет перечисленным требованиям, предложить метод решения задачи, обеспечить эффективность процесса планирования, разработать инструмент, позволяющий исследовать эффективность алгоритмов планирования.

### **Объект исследования**

Автоматизированная система космического мониторинга подвижных морских объектов.

### **Предмет исследования**

Процесс планирования наблюдений областей возможного положения подвижных морских объектов в автоматизированной системе космического мониторинга.

### **Цель исследования**

Постановка и решение задачи планирования наблюдений областей возможного положения подвижных морских объектов в системе космического мониторинга, исследование эффективности полученных решений.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленных целей были решены следующие научно-технические задачи:

1. Анализ процесса функционирования АСКМ.
2. Формализованная постановка задачи планирования наблюдений областей возможных положений подвижных морских объектов.
3. Разработка метода и алгоритма решения поставленной задачи планирования наблюдений.
4. Программная реализация разработанных алгоритмов.

5. Разработка имитационной модели АСКМ для исследования эффективности процесса планирования.

6. Проведение исследований по оценке эффективности формируемых планов наблюдений.

### **Методы исследования**

Поставленные задачи решались с использованием методов системного анализа, математического программирования, теории оптимального планирования и управления, имитационного моделирования, теории вероятностей и математической статистики.

### **Научная новизна** работы заключается в получении следующих результатов:

1. Осуществлена формализованная постановка задачи планирования наблюдений ОВП ПМО в АСКМ в виде задачи стохастического математического программирования, учитывающая вероятностный характер процесса наблюдения, старение информации, полученной в результате наблюдений, различного рода ограничения на работу бортовой АО КА, осуществляющей процесс наблюдения.

2. Разработан косвенный метод расчета значений целевой функции задачи планирования, позволивший разработать эффективный алгоритм решения задачи планирования.

3. Создана имитационная модель процесса функционирования АСКМ для оценки эффективности процесса планирования наблюдений.

### **На защиту выносятся следующие результаты исследований**

1. Формализованная постановка задачи планирования наблюдений ОВП ПМО аппаратурой осмотра КА, учитывающая стохастический характер процесса обнаружения ПМО, процессы старения информации о ПМО, различного рода ограничения на возможность использования бортовой аппаратуры осмотра КА, важности ПМО и их отдельных информационных характеристик (позиций формуляра) для решения целевых задач системы.

2. Метод и алгоритм решения задачи планирования.

3. Имитационная модель, позволяющая исследовать эффективность алгоритмов планирования и АСКМ в целом.

4. Результаты имитационных экспериментов по оценке эффективности процесса планирования.

**Практическая значимость результатов** заключается в

1. создании на этапе проведения ОКР рабочих алгоритмов планирования наблюдений для проектируемой на ФГУП «ЦНИИ “Комета”» автоматизированной системы космического мониторинга подвижных морских объектов,

2. получении результатов имитационных исследований, использованных при проведении ОКР на предприятии ФГУП «ЦНИИ “Комета”» для оценки эффективности процесса функционирования АСКМ с учетом проектируемых алгоритмов планирования.

**Внедрение результатов**

Результаты работы внедрены на ФГУП ЦНИИ «Комета» в качестве составной части ОКР по разработке АСКМ ПМО.

Внедрение результатов работы подтверждается соответствующим актом.

**Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на 4-ой международной конференции «Авиация и космонавтика-2005», Москва, 2005 г.;
- на 13-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2006», Москва, 2006 г.;
- на XVI международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», Алушта, 2007 г.

**Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 отчетах по НИР и в 9 печатных работах, в том числе одна публикация в ведущем рецензируемом научном журнале «Вестник МАИ», входящем в список ВАК РФ.

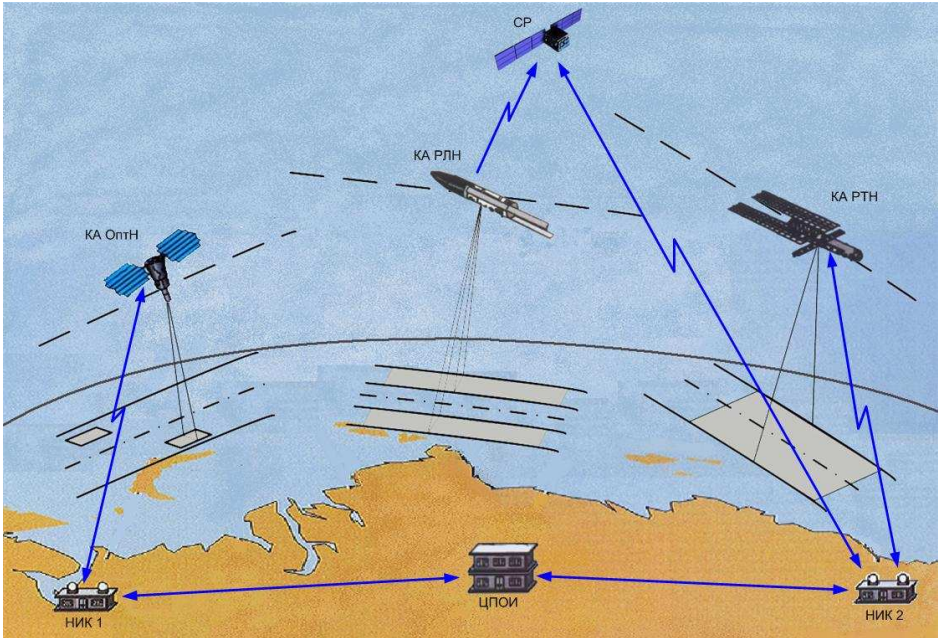
### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем диссертации – 149 страниц машинописного текста, включает 52 рисунка и 13 таблиц.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** представлено описание АСКМ, входящих в нее объектов, процесса функционирования, назначения и решаемых задач. Произведен системотехнический анализ (в том числе и формализованный анализ) процессов, происходящих в АСКМ, и связанных с постановкой и решением задачи планирования наблюдений, приведена содержательная постановка задачи планирования наблюдений и обоснована актуальность темы диссертации.



**Рис. 1. Структурная схема АСКМ ПМО**

В диссертации рассматривается автоматизированная система космического мониторинга подвижных морских объектов, предназначенная для федерального контроля судоходства в интересах различных ведомств центрального подчинения (рис. 1). Активными средствами системы являются группировки космических аппаратов с АО различного типа, собирающей информацию по различным характеристикам ПМО (координатам, курсе, скорости движения, классу ПМО и др.). Процесс сбора информации имеет стохастический характер, что связано с неопределенностью движения ПМО, ошибками в прогнозе местоположения

ПМО, частичностью перекрытия зоной обзора АО прогнозируемой ОВП ПМО, вероятностным характером самого процесса обнаружения. Полученная с помощью АО КА информация о ПМО с запаздыванием доводится до ЦПОИ системы через НИК, осуществляющие прием/передачу данных между КА и ЦПОИ. В АСКМ предусмотрено наличие спутников-ретрансляторов (СР). Ретрансляционная аппаратура находится на высокоорбитальных КА. СР способен принимать и передавать данные между КА и НИК. На основе полученной в ЦПОИ информации должны решаться задача сопровождения (ЗС) ПМО, а также задача выдачи информации (ЗВИ) о характеристиках ПМО конечным потребителям (службы спасения, рыбоохраны, экологического мониторинга, пограничной охраны и т.п.). Для решения ЗС и ЗВИ в АСКМ должен формироваться информационный образ ПМО, которым является формуляр, определяющий текущие значения отдельных измеряемых и рассчитываемых характеристик ПМО, таких, например, как координаты, момент времени последнего определения координат, курс, скорость, класс, государственная принадлежность, важность и другие.

Заказчиком сформулированы два наиболее важных конечных показателя эффективности функционирования АСКМ: математическое ожидание важности ПМО, по которым решается ЗВИ (МОВажЗВИ) и математическое ожидание важности ПМО, по которым решается ЗС (МОВажЗС).

Ранее полученная информация обладает свойством старения с точки зрения использования ее для решения указанных задач на определенный момент. С точки зрения конечных потребителей информации, чем более свежей является полученная информация о ПМО, тем эффективнее могут быть организованы их действия по взаимодействию с ПМО. В данной работе предполагается, что по каждой позиции формуляра ПМО имеется предельное запаздывание, после которого полученная ранее по ним информация перестает быть актуальной и не может эффективно использоваться потребителями информации для организации своих действий.

На конкретном КА установлена АО определенного типа (радиолокационная, радиотехническая, оптическая). Различные типы АО имеют различные возможности по сбору информации по перечню позиций формуляра ПМО.

На работу бортовой АО КА накладываются ограничения по возможности ее использования в АСКМ. В работе рассматриваются следующие ограничения:

- по числу включений АО КА на одном витке и на сутках,
- по времени работы АО КА на одном витке и на сутках,
- по скорости перенацеливания оптической аппаратуры с осмотра одной области на осмотр другой,
- по емкости бортового долговременного запоминающего устройства (ДЗУ),
- по освещенности места осмотра,
- по метеобстановке в месте осмотра.

Для осуществления планирования наблюдений необходимо определять массив всех возможностей наблюдения на интервале планирования, включающий, в частности, в себя следующую информацию по каждой возможности:

- Моменты времени возможного начала и окончания наблюдения.
- Момент времени возможного доведения данных текущего наблюдения до ЦПОИ.
- Объем бортового ДЗУ, необходимый для хранения данных текущего наблюдения.
- Доля перекрытия ОВП ПМО полосой обзора АО КА при текущем наблюдении.
- Освещенность места осмотра (угол места Солнца).
- Прогнозируемый коэффициент метеобстановки в месте осмотра.
- Угол разворота оптической оси камеры для АО оптического типа.

**Во второй главе** приведена формализованная постановка задачи планирования наблюдений, описаны метод и алгоритм решения задачи планирования, а также приведено описание программной реализации алгоритмов планирования.

Для осуществления формализованной постановки задачи планирования введены следующие обозначения:

$I$  – множество КА, для которых осуществляется планирование,

$M$  – множество ПМО, за которыми осуществляется наблюдение,

$KV_m (m \in M)$  - коэффициент важности  $m$ -го ПМО,

$KF$  – множество позиций формуляра ПМО

$KVF_k (k \in KF)$  - коэффициент важности  $k$  – ой позиции формуляра с точки зрения использования содержащейся в ней информации для решения ЗС и ЗВИ,

$I_k (k \in KF)$  - множество КА, АО которых получает информацию по  $k$ -ой позиции формуляра ПМО,

$[0, T_p]$  - интервал планирования,

$L_i (i \in I)$  - множество витков  $i$ -го КА на интервале планирования,

$N1_i (i \in I)$  - ограничение на количество включений АО  $i$ -го КА на одном витке интервала планирования,

$NS_i (i \in I)$  - ограничение на количество включений АО  $i$ -го КА на всем интервале планирования,

$T1_i (i \in I)$  - ограничение на время работы АО  $i$ -го КА на одном витке интервала планирования,

$TSI_i (i \in I)$  - ограничение на время работы АО  $i$ -го КА на интервале планирования,

$V_i (i \in I)$  - ограничение на объем ДЗУ АО  $i$ -го КА,

$KDP_i (i \in I)$  - коэффициент пересчета времени наблюдения АО  $i$ -го КА в объем памяти ДЗУ, требуемой для хранения информации, полученной в результате наблюдения,

$R_i$  - упорядоченное по времени множество всех возможных наблюдений для  $i$ -го КА,

$J_i (i \in I)$  - множество интервалов между соседними моментами сброса информации в ЦПОИ на всем интервале планирования для  $i$ -го КА,

$R_{ij} (i \in I, j \in J_i)$  - упорядоченное по времени множество всех возможных наблюдений для  $i$ -го КА на  $j$ -ом временном интервале между соседними моментами сброса информации в ЦПОИ,

$(i, r(m_r, l_r))$  или просто  $(i, r)$  ( $i \in I, r \in R_i, m_r \in M, l_r \in L_i$ ) - условное обозначение  $r$ -го по порядку наблюдения, осуществляемого  $i$ -ым КА ( $m_r$  - номер ПМО для этого наблюдения,  $l_r$  - номер витка  $i$ -го КА для этого наблюдения),

$D_{ir} (i \in I, r \in R_i)$  - длительность наблюдения  $(i, r)$ ,

$t_{ir}^u, t_{ir}^k (i \in I, r \in R_i)$  - моменты начала и окончания наблюдения  $(i, r)$ ,

$I_p$  - подмножество КА, АО которых требует нацеливания на область осмотра,

$x[ir] (i \in I, r \in R_i)$  - оптимизационные переменные (=1, если наблюдение  $(i, r)$  включено в составляемый план, =0 – в противном случае),

$TPN_{r,r+j}^i (i \in I_p, r \in R_i)$  - время, необходимое для перенацеливания с  $r$ -го на  $r+j$  наблюдение для  $i$ -го КА,

$\theta_{ir} (i \in I, r \in R_i)$  - случайная величина, определяющая успешность реализации наблюдения  $(i, r)$  (=1, если наблюдение прошло успешно, =0 – в противном случае); предполагается возможным перед решением задачи планирования расчет вероятностей  $P(\theta_{ir} = 1)$ . При расчете вероятности успешной реализации наблюдения учитывается несколько составляющих: вероятность обнаружения ПМО  $P_{обн}$ , если ПМО оказался в поле обзора АО КА и АО включена; вероятность накрытия  $P_{накр}$  ПМО полосой обзора АО КА, если ПМО находится внутри ОВП ПМО; вероятность того, что ПМО находится внутри ОВП  $P_{ОВП}$ ; вероятность обнаружения ПМО при текущей освещенности места осмотра  $P_{освещ}$ ;

вероятность обнаружения ПМО при текущей метеообстановке в месте осмотра  $P_{\text{метео}}$ . Таким образом,  $P(\theta_{ir} = 1) = P_{\text{обн}} \cdot P_{\text{накр}} \cdot P_{\text{ОВП}} \cdot P_{\text{освещ}} \cdot P_{\text{метео}}$ .

$KSI_{mk}(t)$  ( $m \in M, k \in KF$ ) - коэффициент старения полученной в ЦПОИ информации по  $k$ -ой позиции формуляра  $m$ -го ПМО (является случайной, пилообразного вида, кусочно-линейной функцией времени, изменяющейся на отрезке  $[0,1]$  (0-информация только получена АО КА и одновременно доведена до ЦПОИ, 1-если информация полностью устарела), и зависящей от составленного плана ( $x[ir](i \in I_k, r : m_r = m)$ ); случайный характер этой функции определяется реализацией  $\theta_{ir}(i \in I, r \in R_i)$ ). Соотношения, определяющие  $KSI_{mk}(t)$  имеют следующий вид:

$$KSI_{mk}(t, x[(i, r(m, l_r))], \theta_{ir}(i \in I_k, r : m_r = m)) = \min_{(i,r) \in XU_{mk}(x[(i,r)], \theta_r)} KSI_{mk}^{ir}(t) \quad (1)$$

где  $KSI_{mk}^{ir}(t)$  - составляющая функции старения информации, связанная с успешной реализацией запланированного наблюдения  $(i, r(m, l_r))$ ,

$XU_{mk}$  - множество запланированных и успешно реализованных наблюдений  $k$ -ой позиции формуляра  $m$ -го ПМО;

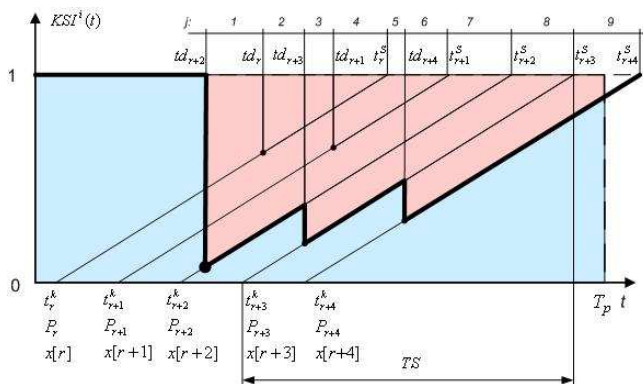
$$KSI_{mk}^{ir}(t) = \begin{cases} 1, \text{если } t < td_{ir}, \\ (t - t_{ir}^k) / TS_k, \text{если } t \geq td_{ir}, (t - t_{ir}^k) < TS_k, \\ 1, \text{если } (t - t_{ir}^k) \geq TS_k. \end{cases} \quad (2)$$

где  $td_{ir}$  - момент доведения до ЦПОИ информации, полученной в наблюдении  $(i, r)$ ;  $TS_k$  - время полного устаревания информации по  $k$ -ой позиции формуляра ПМО. Для различных позиций формуляра  $TS_k$  может быть различным.

Данные, полученные при наблюдении ПМО, вносят вклад в функцию старения информации только после доведения их до ЦПОИ.

На рис. 2. показан пример возможного и достаточно сложного наложения процессов старения информации по определенной позиции формуляра некоторого ПМО, определяемых соотношениями (2), по результатам четырех

запланированных последовательных наблюдений ( $r - r+3$ ) указанного ПМО некоторыми КА, АО которых способна получать информацию по рассматриваемой позиции формуляра.



**Рис. 2. Пример реализации процессов старения информации для нескольких наблюдений ПМО**

На рис. 2 приняты дополнительно следующие обозначения:

- $t_r^k$  - момент завершения  $r$ -го по порядку запланированного наблюдения,
- $P_r$  - вероятность успешного проведения  $r$ -го наблюдения,
- $t_r^S$  - моменты полного устаревания информации по рассматриваемой позиции формуляра ПМО, полученной в  $r$ -ом наблюдении.

Назовем актуальностью информации (АИ) площадь над реализацией кривой старения информации по отдельному ПМО и отдельной позиции формуляра. АИ является интегральной характеристикой процессов старения информации на плановом периоде, характеризующая степень новизны (актуальности) имеющейся в ЦПОИ информации о характеристиках ПМО на всем периоде планирования.

Математическое ожидание (МО) АИ – это средняя взвешенная по вероятностям отдельных наблюдений площадь над реализациями функции старения информации. Под актуальностью информации для отдельного ПМО будем понимать взвешенную по важностям позиций формуляра сумму МО АИ по отдельным позициям формуляра. Под актуальность информации для

совокупности ПМО будем понимать взвешенную по важностям ПМО и важностям позиций формуляра сумму МО АИ по отдельным позициям формуляра и отдельным ПМО. В дальнейшем аббревиатурой «АИ» будем обозначать актуальность информации для совокупности ПМО.

Непосредственно при планировании невозможно связать показатели качества решения ЗС и ЗВИ в АСКМ (МОВАжЗС и МОВАжЗВИ) с переменными, определяющими план. Поэтому в качестве критерия оптимизации задачи планирования предлагается максимум АИ по совокупности ПМО. С использованием введенных обозначений формализованная постановка задачи планирования наблюдений ОВП ПМО может быть записана в следующем виде:

$$\max_{\{x[(ir)]\}} \sum_{m \in M} KV_m \sum_{k \in KF} KVF_k M \left[ \int_0^{T_p} [1 - KSI_{mk}(t, \{x[(i,r(m,l_r))]\}, \theta_{ir}(i \in I_k, m_r = m))] dt \right] \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R_i} x[(i, r, l_r = l)] \leq N1_i, \quad (i \in I, l \in L_i) \quad (4)$$

$$\sum_{r \in R_i} x[(ir)] \leq NS_i, \quad (i \in I) \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R_i} x[(i, r, l_r = l)] D_{ir} \leq T1_i, \quad (i \in I, l \in L_i) \quad (6)$$

$$\sum_{r \in R_i} x[(ir)] D_{ir} \leq TSI_i, \quad (i \in I) \quad (7)$$

$$\sum_{r \in R_{ij}} x[(i, r)] KDP_i D_{ir} \leq V_i, \quad (i \in I, j \in J_i) \quad (8)$$

$$x[(ir + j)] x[(ir)] (t_{ir+1}^h - t_{ir}^k) \geq x[(ir + j)] x[(i, r)] TPN_{r, r+j}^i, \quad (i \in I_p; r, r + j \in R_i) \quad (9)$$

Соотношения (3-9) определяют задачу планирования как комбинаторную нелинейную дискретную задачу стохастического программирования. Стохастический характер задачи определяется зависимостью целевой функции (3) от случайных величин  $\theta_{ir}, (i \in I, r \in R_i)$ . Область допустимых решений имеет детерминированный характер. Неравенства (4, 5) определяют ограничения по числу включений АО КА соответственно на отдельных витках и на всем



плановом периоде (на сутках). Неравенства (6, 7) определяют аналогичные ограничения по времени работы АО КА. Неравенства (8) задают ограничение на объемы бортовых ДЗУ. Неравенства (9) определяют временные ограничения на возможность перенацеливания АО КА с ОВП одного ПМО на ОВП другого ПМО, следующего по определенному в плане порядку наблюдения.

Предлагается применить косвенный метод решения задачи планирования, как задачи стохастического программирования. В рассматриваемой задаче необходимо уметь рассчитывать математические ожидания площадей над функциями старения информации по отдельным позициям формуляра различных ПМО ( $\overline{S_k^m} (k \in KF, m \in M)$ ), осуществляя вероятностное осреднение по реализациям случайных величин  $\theta_{ir} (i \in I, r \in R_i)$  при фиксированных значениях оптимизационных переменных  $x[ir] (i \in I, r \in R_i)$ . Такая возможность в данной задаче существует.

$$\overline{S_k^m} = \sum_{j \in J} \overline{S_j} \tag{10}$$

где  $\overline{S_j}$  - средняя площадь на  $j$ -ом участке:

$$\overline{S_j} = \sum_{r \in r_j} P_r x[r] \prod_{\substack{l \in r_j \\ (l > r)}} (1 - P_l x[l]) S_l^j \tag{11}$$

-  $S_r^j (j=0,1,\dots)$  - площадь над процессом старения информации  $KSI^r(t)$  на некотором  $j$ -ом интервале времени  $(t_j^1, t_j^2), t_r^k \leq t_j^i \leq t_r^s$  (рис. 2):

$$S_r^j = ST_r(t_j^1) - ST_r(t_j^2) \tag{12}$$

$$\text{где } ST_r(t) = (t_r^s - t)^2 / 2TS \tag{13}$$

- площадь треугольника над процессом старения информации  $KSI^r(t)$  на интервале  $(t, t_r^s)$ .

Математическое ожидание площади над процессами старения информации  $\overline{S_k^m}$  рассчитано для  $k$ -ой ( $k \in KF$ ) позиции формуляра по  $m$ -ому ( $m \in M$ ) ПМО.

Необходимо просуммировать  $\overline{S_k^m}$  по всем позициям формуляра для всех ПМО с учетом важностей ПМО и позиций формуляра.

$$\overline{S_{сум}} = \sum_{m \in M} \left( KV_m \cdot \sum_{k \in KF} \left( KV F_k \cdot \overline{S_k^m} \right) \right). \quad (14)$$

Таким образом, в задаче (3-9) критерий (3) может быть заменен эквивалентным:

$$\max_{\{x\{(ir)\}} \overline{S_{сум}} \quad (15)$$

Правомерность перехода при решении задачи планирования от показателей критерия эффективности АСКМ (МОВАжЗВИ и МОВАжЗС) к показателю АИ для совокупности ПМО подтверждена проведенными экспериментами. Рассчитаны значения коэффициентов корреляции между МОВАжЗВИ и АИ, и МОВАжЗС и АИ. Полученные большие значения коэффициентов корреляции ( $\tilde{r}_{АИ\_МОВАжЗВИ} = 0,977$  и  $\tilde{r}_{АИ\_МОВАжЗС} = 0,934$ ) указывают на наличие существенной связи между АИ и МОВАжЗВИ, и АИ и МОВАжЗС. Очевидно, что увеличение АИ приводит к увеличению МОВАжЗВИ и МОВАжЗС, а значит максимизация АИ эквивалентна максимизации МОВАжЗВИ и МОВАжЗС.

Алгоритм планирования предлагается формировать на основе метода максимального элемента. Применительно к нашей задаче, суть метода заключается в том, что решение задачи с большим числом переменных сводится к пошаговому изменению оптимизационных переменных, обеспечивающему максимальный прирост целевой функции задачи на каждом шаге.

На каждом шаге в план будут включаться возможности, дающие максимальное приращение АИ, а при исключении возможностей из плана, исключаются возможности, дающие минимальное уменьшение АИ.

Планирование наблюдений осуществляется в 3 этапа.

На первом этапе рассматриваются ресурсные ограничения на витке – количество включений и время работы АО КА, а также ограничения на скорость перенацеливания АО оптического типа.

На каждом шаге планирования в план включается одна возможность, удовлетворяющая двум условиям: а). добавление этой возможности в план приводит к максимальному приращению целевой функции, по сравнению с другими возможностями-кандидатами, б) при добавлении этой возможности в план удовлетворяются рассматриваемые ресурсные ограничения.

По очереди рассматривается каждый КА. Весь временной интервал планирования разбивается на подинтервалы, соответствующие виткам данного КА. По очереди анализируется каждый подинтервал (виток КА). Рассматривается добавление к уже составленной части плана каждой возможности, соответствующей данному витку. Сначала проверяется удовлетворение плана, который может быть получен при включении в него рассматриваемой возможности, ограничениям на витке (время работы на витке и количество включений АО) и ограничению по времени перенацеливания. Если ограничения удовлетворены, то рассчитывается приращение АИ при добавлении возможности в план. Затем выбирается та из возможностей, включение в план которой приводит к максимальному увеличению АИ, и включается в план. После включения одной возможности процесс повторяется с оставшимися на витке возможностями до тех пор, пока ресурсы витка (время работы и количество включений АО) не будут исчерпаны, или пока не будут рассмотрены все возможности данного витка. После этого рассматривается следующий виток.

На втором этапе алгоритма планирования производится «просеивание» полученного на первом этапе плана на соответствие ограничениям по объему бортового ДЗУ КА. Обработка идет отдельно по каждому КА. Временной интервал планирования делится на подинтервалы между сеансами связи КА с НИК. По очереди рассматривается каждый подинтервал. Если на нем зафиксировано превышение ограничения по объему ДЗУ, то ищется возможность, исключение которой из плана приведет к минимальному

уменьшению целевой функции. Эта возможность исключается из плана. Если для полученного плана ограничение опять не выполняется, то ищется еще одна возможность, дающая минимальное уменьшение целевой функции и тоже исключается. Процесс повторяется до тех пор, пока ограничение для данного КА на данном подинтервале не будет выполнено.

На третьем этапе алгоритма полученный рациональный план проверяется на выполнение ресурсных ограничений на сутках – количество включений и время работы. Проверка идет отдельно по каждому КА. Если для некоторого КА выявлено превышение ресурсных ограничений на сутках, то ищется и исключается возможность, приводящая к наименьшему уменьшению целевой функции. Если для нового плана ограничения также не выполняются, то исключается еще одна возможность, приводящая к наименьшему уменьшению целевой функции. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет устранено превышение рассматриваемых ограничений.

Алгоритм планирования наблюдений реализован в отдельном модуле MakePlan. Модуль MakePlan разработан на языке программирования высокого уровня Pascal в среде разработки Borland Delphi 7.0.

**В третьей главе** представлено описание разработанной имитационной модели процессов АСКМ.

Основное назначение имитационной модели (ИМ) рассматриваемой системы – это исследование эффективности применения сформированной задачи планирования и алгоритмов ее решения. Вторым важным назначением созданной ИМ является формирование исходных данных для задачи планирования.

При формализации ИМ АСКМ используется событийный подход. Модель состоит из 11 событий – трех временных и восьми структурных. ИМ реализована в классе непрерывно-дискретных моделей. Для алгоритмической реализации использована комбинация метода модельных событий и метода фиксированного шага.

В ИМ моделируется стохастический процесс движения ПМО, процесс движения КА, процесс обнаружения ПМО АО КА, процесс информационного

взаимодействия КА и ЦПОИ через НИКи, предусмотрена возможность использования СР, происходит расчет ОВП ПМО, обеспечивается процесс планирования работы АО КА.

При разработке имитационной программы применялась система моделирования Modelling, которая является средством визуального проектирования дискретных и непрерывно-дискретных имитационных моделей.

ИМ может функционировать в одном из двух основных режимов:

1. Режим отработки составленного плана. При моделировании в этом режиме реализуются процессы взаимодействия зон обзора АО КА с самими ПМО. При таком режиме функционирования ИМ АО КА включается и выключается согласно плану наблюдений. По результатам моделирования рассчитываются значения конечных показателей эффективности моделируемой системы.

2. Второй режим функционирования ИМ – это режим баллистического прогноза и подготовки данных для алгоритма планирования. При формировании исходных данных для планирования реализуется процесс взаимодействия зон осмотра АО КА с прогнозируемыми положениями ОВП ПМО. В результате определяются и рассчитываются необходимые для планирования характеристики отдельных наблюдений и формируется полный массив возможностей осмотров на период планирования.

ИМ может работать и в комбинированных режимах. Например, в режиме многосуточного планирования. Для обеспечения функционирования модели в таком режиме была решена задача стыковки суточных планов. Решение заключается в учете при планировании возможностей с переходящими на следующие сутки моментами времени доведения данных до ЦПОИ и определении начальных состояний процессов старения информации с учетом этих возможностей при планировании наблюдений на следующие сутки.

Для ИМ АСКМ разработан графический интерфейс, предоставляющий возможности по вводу и корректировке исходных данных, запуску и управлению процессом моделирования. Разработаны формы визуализации процесса

моделирования, текстового вывода результатов моделирования, графического отображения результатов моделирования.

**В четвертой** главе приведены результаты исследований эффективности процесса планирования с использованием вычислительных экспериментов с разработанными программными реализациями решения задачи планирования и соответствующими имитационными экспериментами на ИМ АСКМ.

В результате проведенных исследований показано адекватное соответствие формализованной постановки задачи планирования конечным целям эффективного функционирования АСКМ. Показана чувствительность формируемого плана к таким важным исходным параметрам планирования, как: количество КА, участвующих в планировании, величинам ресурсных ограничений, качеству прогнозирования ОВП ПМО на плановом периоде, применению СР. Проведены эксперименты по сравнению результатов работы эвристического алгоритма планирования с результатами работы алгоритма полного перебора и эксперименты по оценке быстродействия предложенного алгоритма планирования наблюдений. Сделаны выводы о высокой результативности и высоком быстродействии алгоритма планирования наблюдений.

Проведено исследование реализуемости плана в зависимости от степени стохастичности процесса движения ПМО, качества прогнозирования ОВП ПМО, удаленности наблюдений от начала периода планирования. Сделан вывод о целесообразности реализации в дальнейшем процесса оперативной динамической корректировки первоначально составленного плана с учетом поступающей в ЦПОИ информации о результатах наблюдений ПМО.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Осуществлена постановка актуальной задачи планирования наблюдений в АСКМ ПМО и разработана формализованная постановка задачи планирования, как задачи стохастического программирования, учитывающая важные с точки зрения функционирования системы факторы.

2. Предложен косвенный метод решения задачи планирования наблюдений, позволивший свести задачу стохастического программирования к детерминированной оптимизационной задаче, что существенно уменьшает вычислительную сложность алгоритма формирования плана наблюдений ОВП ПМО.

На основе метода максимального элемента и в соответствии с формализованной постановкой разработан алгоритм решения задачи планирования наблюдений, который обладает высокой вычислительной эффективностью.

3. Разработана ИМ АСКМ, отображающая основные процессы функционирования моделируемой системы. ИМ позволяет исследовать эффективность алгоритмов планирования наблюдений, а также подготовить исходные данные для их работы.

4. Проведенные вычислительные и имитационные эксперименты по анализу эффективности процессов планирования позволяют сделать выводы

- о соответствии формализованной постановки задачи планирования конечным целям функционирования АСКМ;
- о чувствительности решения задачи к изменению важных параметров и характеристик системы;
- о высоком быстродействии и эффективности по сравнению с методом полного перебора сформированного алгоритма планирования;
- о реализуемости составленного плана в зависимости от удаленности возможностей наблюдений от начала интервала планирования и необходимости в дальнейшем разработки алгоритмов корректировки суточных планов с учетом поступающей в результате реализации плана информации о наблюдениях ПМО.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Хахулин Г.Ф., Новиков С.А., Посадский А.И., Ескин В.И. Задача планирования наблюдений подвижных морских объектов в системе

космического мониторинга. // Вестник Московского авиационного института. – 2007, Т. 14, № 3. – С. 125-130.

2. Новиков С.А., Втулкина П.С., Хахулин Г.Ф. Разработка имитационной модели автоматизированной системы космического мониторинга подвижных морских объектов. // Проектирование, конструирование и производство авиационной техники. Под ред. проф. Комарова Ю.Ю. – М.: МАИ, 2005. – С. 89-94.

3. Втулкина П.С., Новиков С.А., Монахов С.В., Хахулин Г.Ф. Разработка имитационной модели возмущенного движения космического аппарата для решения задач наземного комплекса управления. // 4-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2005». Тезисы докладов. – М.: МАИ, 2005. – С. 58.

4. Новиков С.А., Втулкина П.С., Монахов С.В., Хахулин Г.Ф. Разработка имитационной модели автоматизированной системы космического мониторинга подвижных морских объектов. // 4-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2005». Тезисы докладов. – М.: МАИ, 2005. – С. 59.

5. Новиков С.А. Решение задачи выбора параметров космической группировки системы спутникового наблюдения. // Труды XIV Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». – Алушта, 2005. – С. 220.

6. Новиков С.А. Моделирование движения морских объектов наблюдения в имитационной модели системы спутникового наблюдения. // 13-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2006». Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2006. – С. 168.

7. Новиков С.А., Хахулин Г.Ф. Задача планирования осмотра морской поверхности для системы спутникового наблюдения. // Труды XV Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». – Алушта, 2006. – С. 272.



8. Хахулин Г.Ф., Новиков С.А., Ескин В.И., Посадский А.И., Рыцарева А.С. Динамический процесс планирования космического мониторинга подвижных морских объектов и оценка его эффективности. // Труды XVI Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». – Алушта, 2007.
9. Новиков С.А. Исследование эффективности алгоритмов планирования работы автоматизированной системы космического мониторинга подвижных морских объектов. // Труды Российско-Китайской международной конференции по проектированию аэрокосмической техники. – М.: Издательский дом «ИНФОРМИЗДАТ», 2007. – С. 106-111.
10. Создание программного обеспечения имитационной модели системы спутникового наблюдения для системы МШ-33 : отчет о НИР №30110-03020 / Московский авиационный институт ; рук. Хахулин Г.Ф. ; исполн.: Новиков С.А. [и др.]. – М.: МАИ. 2005.
11. КП для моделирования функционирования взаимосвязанных космических систем для планирования заявок на осмотр заданных районов : отчет о НИР / Московский авиационный институт ; рук. Хахулин Г.Ф. ; исполн.: Новиков С.А. [и др.]. – М.: МАИ. 2006.
12. «Разработка моделей процессов в ЦСОИ в части алгоритмов функционирования взаимодействующих космических систем, формирования заявок на осмотр» (шифр – «МШ-33 - МАИ»). Этап 1: Разработка алгоритмов моделей ЦСОИ в части функционирования взаимодействующих космических систем, формирования заявок на осмотр : отчет о части ОКР, тема N 32490-03020 / Московский авиационный институт ; рук. Хахулин Г.Ф. ; исполн.: Новиков С.А. [и др.]. – М.: МАИ. 2007.
13. Программное обеспечение модели функционирования взаимодействующих космических систем, формирования заявок на осмотр (этап 2) : отчет о части ОКР, тема N 33640-03020 / Московский авиационный институт ; рук. Хахулин Г.Ф. ; исполн.: Новиков С.А. [и др.]. – М.: МАИ. 2007.

14. Разработка и проектирование орбитальной группировки космических аппаратов в рамках создания системы глобального мониторинга земной поверхности. Ведомственная научная программа “Развитие научного потенциала высшей школы”. Подпрограмма 3: «Развитие инфраструктуры научно-технической и инновационной деятельности высшей школы и развитие ее кадрового потенциала». Раздел: «Развитие системы научно-исследовательской работы молодых преподавателей и научных сотрудников, аспирантов и студентов»; рук. Хахулин Г.Ф. – М.: МАИ. 2005.

15. Разработка рекомендаций по моделированию систем управления, навигационных приборных комплексов и электроэнергетических систем летательных аппаратов : отчет о НИР «Создание основ теории и моделирование систем управления, навигационных приборных комплексов и электроэнергетических систем летательных аппаратов», тема № 1.6.01 ; рук. Постников В.А. – М.: МАИ. 2005. Государственная регистрация N 01200110876.