

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА GPSS

**А.В. Габалин**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: [gabalina@bk.ru](mailto:gabalina@bk.ru)

**Ключевые слова:** информационно-управляющая система, имитационные модели, оптимизация.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы построения имитационных моделей на GPSS для решения задачи проектирования и коррекции структуры распределенных информационно-управляющих систем. Типичными примерами распределенных информационно-управляющих систем являются автоматизированные системы управления летательными аппаратами (АСУ ЛА). В докладе дано описание моделируемой системы. Для экспериментальных исследований процессов функционирования описанной системы разработана имитационная модель. Приводится подробное описание структуры и алгоритмов построенной модели. Предлагаемая в статье модель функционирования информационно-управляющей системы послужила основой для решения ряда задач синтеза и анализа структуры систем рассматриваемого класса.

## 1. Введение

Распределенные информационно-управляющие системы (ИУС) представляют собой рассредоточенные в пространстве многофункциональные взаимосвязанные совокупности стационарных и подвижных элементов с развитыми техническими средствами приема, передачи и обработки информации [1].

Типичными примерами распределенных информационно-управляющих систем являются: автоматизированные системы управления летательными аппаратами (АСУ ЛА), спутниковые системы связи, системы управления оперативными службами и др.

Проблема оптимизации функционирования систем рассматриваемого класса тесно связана с задачами формализованного описания процессов функционирования, процедур сбора, обработки и анализа соответствующих характеристик элементов и их взаимосвязей, влияющих на качество управления системы в целом. В процессе разработки и совершенствования распределенных ИУС возникают сложные задачи оценки эффективности их функционирования (с точки зрения перечисленных и других характеристик) при различных вариантах структурного построения, неблагоприятных воздействиях, изменениях расписания и траекторий движения элементов, возникновения аварийных ситуаций, различных стратегий управления и т.п.

Одним из наиболее удобных средств математического моделирования, применяемых при анализе функционирования систем рассматриваемого класса, являются имитационные модели, которые описывают структуру и поведение системы в

виде программы для ПК и позволяют проводить машинные эксперименты с целью получения необходимых данных о функционировании элементов и системы в целом в течение определенных интервалов времени. В настоящей работе описывается имитационная модель, предназначенная для решения указанных задач в АСУ ЛА и проведения машинных экспериментов.

## 2. Описание моделируемой системы

АСУ ЛА представляет собой сложную, многофункциональную распределенную информационно-управляющую систему, осуществляющую сбор, передачу и обработку информации, поступающей с борта летательного аппарата (ЛА). Она включает в себя стационарные и передвижные пункты приема информации (ППИ), измерительные пункты и станции слежения, распределенные по значительной территории и осуществляющие сбор поступающей телеметрической и другой информации. ППИ размещаются таким образом, чтобы своими зонами радиовидимости (доступности) максимально охватывали территорию, над которой проходит траектории движения ЛА. Для обеспечения наиболее эффективного покрытия зонами радиовидимости передвижные ППИ располагаются в местах, обоснованных специальными расчетами. Типовой ППИ содержит: приемные станции (ПС) телеметрической информации и траекторных измерений; технические средства передачи команд на борт ЛА и приема информации по спутниковой связи; средства управления, баллистических расчетов, оперативной обработки телеметрической информации и службу единого времени.

Информация о режимах функционирования оборудования и аппаратуры, данные о научно-технических экспериментах, проводимых на борту ЛА, принимаются приемными радиотелеметрическими станциями на ППИ и по каналам связи (КС) передаются на соответствующие узлы связи (УС) для дальнейшей обработки. Часть информации может оперативно обрабатываться на ППИ. После обработки информация поступает по каналам связи в центр управления (вычислительный центр (ВЦ)), где она анализируется специалистами, на основании чего они делают заключение о состоянии технических средств ЛА и информационно-управляющей системы и принимают решение об осуществлении тех или иных управляющих воздействий.

Принципиальная схема функционирования АСУ ЛА приведена на рис. 1. Планом полетов определяется количество контролируемых ЛА различных типов, моменты начала полетов, траектории движения ЛА, режимы функционирования передающих устройств, а также состав и объемы телеметрической и другой информации, передаваемой с борта ЛА. Для передачи информации различного типа борт каждого ЛА оборудуется определенным набором передающих устройств (ПРД) со своей циклограммой работы. Циклограмма определяет состав ПРД для ЛА и время их работы на каждом этапе функционирования. Основной информационной характеристикой ПРД является скорость передачи.

На ППИ осуществляется прием информации, передаваемой с борта ЛА, с помощью своих ПС, где параллельно информация записывается на внешний носитель и передается в КС. Прием информации на ППИ с борта ЛА, находящегося в полете, определяется зонами видимости ППИ. Таким образом одна и та же информация, передаваемая с борта ЛА, может приниматься одновременно однотипными ПС на тех ППИ, в зоны видимости которых вошел в данный момент ЛА. Поэтому одной из важных задач является формирование «единого носителя информации», который представляет собой запись такой последовательности информационных посылок (ИП), которая наиболее полно и достоверно отображает поток информации, передаваемой с борта ЛА. С этой целью на

ППИ при записи на внешний носитель и передаче в КС информационная посылка дублируется и фрагментируется. Временные характеристики фрагментов определяются зонами видимости ППИ, на ПС которых эти фрагменты принимаются; такое фрагментирование будем называть «горизонтальным». Фрагментирование ИП при передаче в КС, пропускная способность которого ниже скорости передачи, назовем «вертикальным». Количество вертикальных фрагментов определяется отношением скорости передачи с борта ЛА к пропускной способности КС. В центре управления из отдельных фрагментов собирается единый носитель информации, который затем проверяется на полноту и достоверность.

Прием информации, передаваемой с борта ЛА, осуществляется ПС, тип которой соответствует типу ПРД на борту ЛА. В процессе функционирования системы ПС и КС могут находиться в различных состояниях (холодный резерв, набор готовности, рабочее состояние и др.).

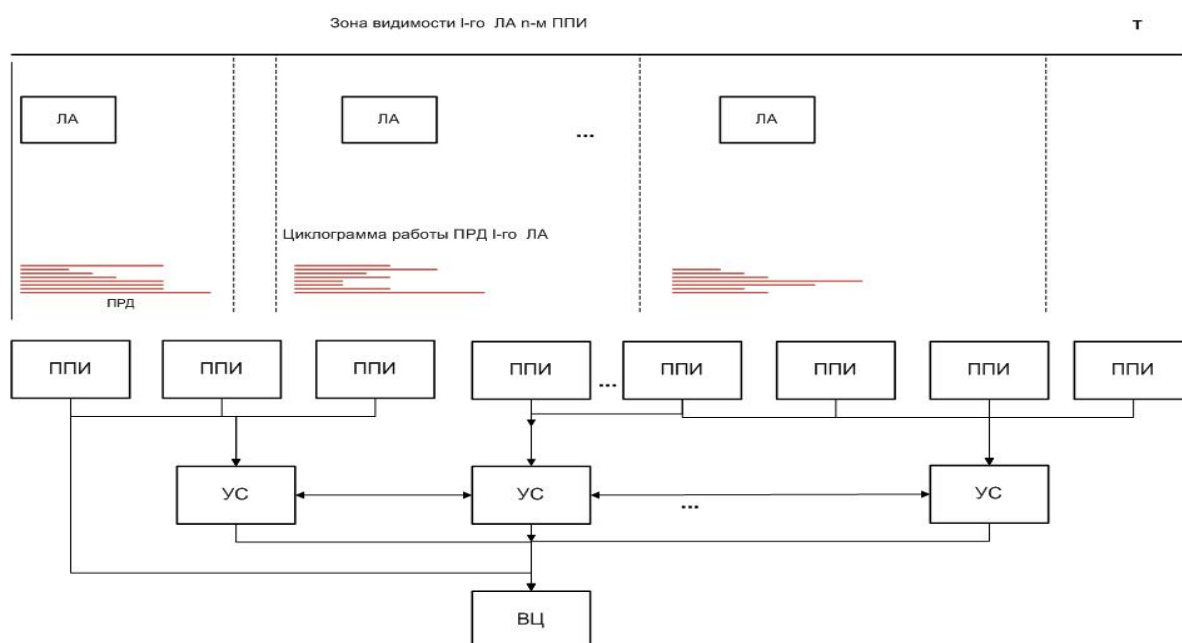


Рис. 1. Схема функционирования АСУ ЛА.

### 3. Построение имитационной модели

Для экспериментальных исследований процессов функционирования описанной системы разработана имитационная модель. Эта модель позволяет получать и оценивать такие функциональные характеристики как степень загрузки технических средств, длительность ожидания ИП в очередях на обслуживание, уровень оперативности передачи и обработки информации, время формирования единого носителя и др. Модель позволяет также оценивать качество функционирования системы в зависимости от расписания полетов, траекторий движения ЛА, степени резервирования технических средств и их характеристик, структуры системы, выхода из строя отдельных элементов и от других параметров.

В настоящей работе предусматривается наличие в системе нескольких ЛА, а также учет задержек при переключении ПС с ЛА на ЛА, что влечет за собой существенное усложнение алгоритмов функционирования. В этих условиях более удобным и эффек-

тивным является использование в качестве инструментального средства моделирования языка GPSS [2]. На выбор языка моделирования повлияли также следующие положения: задача повторяется при различных исходных данных и модель должна быть концептуально более выразительной; информационные посылки движутся в сетях и описываются компонентами сети и связанными с ними очередями; средняя продолжительность событий относительно невелика и для задания системного времени целесообразно применять метод фиксированных временных интервалов.

Предлагаемая модель состоит из моделей отдельных функциональных блоков системы. В ней описываются и анализируются процессы функционирования: передатчиков, находящихся на борту ЛА; приемных станций различных типов, находящихся на ППИ; каналов связи от приемных станций до узлов связи, от приемных станций до центра управления, от узлов связи до центра управления и между узлами связи; центра управления. Рассмотрим более подробно модели функциональных блоков, соответствующие перечисленным элементам системы (ЛА, ПС, КС и др.).

Исходя из программы полетов, в блоке ЛА (ПРД) «выполняются» следующие действия: создаются генераторы информационных сообщений для всех ПРД каждого ЛА; определяется время появления каждого ЛА в пределах действия системы; разбиваются на «горизонтальные» фрагменты сгенерированные сообщения; создаются и объединяются в группы «горизонтальные» фрагменты – дубли для всех ППИ, в зоне видимости которых находится ЛА; отправляются на ПС (ППИ) «горизонтальные» фрагменты. В блоке ПС (ППИ) сначала определяется номер принимающей ПС. Как только «горизонтальный» фрагмент попадает на ПС, всем фрагментам из его группы понижается приоритет обработки (с целью равномерного распределения числа дублей фрагментов). Далее фрагмент «задерживается» на ПС на время обработки, после чего происходит сравнение скоростей ПРД и КС. Если скорость ПРД меньше или равна скорости КС, то «горизонтальный» фрагмент передается в КС целиком. В противном случае он делится на «вертикальные» фрагменты (пакеты), которые последовательно устанавливаются в очередь к КС. Число таких пакетов определяется соотношением скоростей ПРД и КС. Когда очередь подходит, пакет попадает непосредственно на обработку в КС. Время обработки в КС определяется как произведение «длины» пакета на отношение скорости ПРД к скорости КС. В блоках КС1 и КС2 (каналы связи с разными скоростями передач) определяется номер необходимого КС и номер очереди пакета на обработку, осуществляется задержка пакета на время обработки, определяется следующий функциональный блок в технологической цепочке обработки пакета и пакет передается этому блоку (УС или ВЦ). В УС пакет может поступить либо от ПС, либо от другого УС. И в том и в другом случае в блоке УС определяется номер необходимого УС (то есть того, который должен принять поступающую информацию) и на этом УС пакет задерживается на время обработки. Следует отметить, что количество обрабатываемых на УС пакетов не ограничивается и поэтому очередь к УС не учитывается в модели. Последним функциональным блоком модели является центр управления, представляющий собой специализированный вычислительный центр (ВЦ). Также как и УС, ВЦ может одновременно обрабатывать неограниченное число пакетов, то есть очереди к ВЦ не возникает. Задержка во времени на обработке в ВЦ состоит из двух частей: первая - произведение длины пакета на отношение производительности ПРД к производительности ВЦ, вторая - константа, отражающая время переключения обработки с пакета одного ПРД на пакет другого (следует отметить, что для УС и ВЦ при необходимости могут быть использованы более детальные модели их функционирования).

После обработки поступившей информации на ВЦ формируются выходные статистические матрицы, предназначенные для анализа качества функционирования системы и выработки управляющих воздействий. Для всех ПРД каждого ЛА

определяется: количество исходных пакетов; количество пакетов, обработанных на ВЦ; количество избыточных пакетов и пакетов-дублей для каждого горизонтального фрагмента; анализируется полнота приема информации, загрузка технических средств приема, передачи и обработки, размеры очередей и т.п. После окончания работы модели собранная статистическая информация для удобства пользователя выводится на экран дисплея и на печать в виде соответствующих таблиц и гистограмм.

В качестве примера рассмотрим систему, отрабатывающую программу испытаний для двух одновременно стартующих ЛА и содержащую восемь ППИ (с различным числом ПС по типам), два УС, один ВЦ и семнадцать многониточных КС. На каждом из стартующих ЛА установлено по девять ПРД. Циклограммы работы ПРД для обоих ЛА совпадают.

Информационные сообщения, посланные ПРД с бортов ЛА, принимаются на ППИ с помощью специальным образом проиндексированных ПС четырех типов. Индекс типовой ПС состоит из двух цифр: первая указывает номер ППИ, на котором расположена ПС, вторая – тип ПС.

Многониточные КС обеспечивают передачу информации между ППИ и УС, ППИ и ВЦ, УС и ВЦ, а также между УС. Каждый многониточный КС включает от 1 до 9 параллельных КС. В зависимости от того, какие элементы распределенной ИУС соединяет КС, он имеет различную индексацию: КС «ППИ – УС» – первая цифра индекса указывает номер ППИ, к которому подключен данный КС, а вторая цифра – всегда «6»; КС «ППИ – ВЦ» – первая цифра индекса указывает номер ППИ, а вторая – всегда «7»; КС «УС – ВЦ» – первая цифра указывает номер УС, а вторая – всегда «8»; КС «УС – УС» имеет индекс «20».

Предполагается, что пропускная способность УС и ВЦ не ограничена. Зоны видимости ППИ в исходной системе одинаковы для обоих ЛА.

В процессе проведения имитационных экспериментов изменялись как топологическая структура исходной системы, так и технические характеристики ЛА (длительность циклограмм работы ПРД) и самой системы (зоны видимости ППИ). Основными тактико-техническими характеристиками функционирования системы, полученными с помощью имитационной модели в этих экспериментах ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ), являлись суммарное время формирования единого носителя информации ( $T_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ) и полнота приема информации по каждому ЛА ( $\sigma_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ). Так, моделирование работы системы сбора и обработки информации с исходной структурой в эксперименте  $i=1$  показало полноту формирования единого носителя информации ( $\sigma_1 = 100\%$ ), которая обеспечилась полным охватом обеих траекторий ЛА и достаточным составом ПС и КС.

В эксперименте  $i=2$  структура системы отличалась от исходной тем, что зона видимости ППИ8 для обоих ЛА стала равной 0, то есть этот ППИ оказался отключенным на время отработки программы испытаний. В результате появились потери в приеме информации ( $\sigma_2 < 100\%$ ) из-за отключения ППИ8, единственного, охватывающего один из участков траектории. Снижение времени  $T_2$  ( $T_2 < T_4$ ) вызвано экономией времени, требовавшегося ранее на отработку этого участка.

В эксперименте  $i=3$  отключены все ПС 1-го типа на ППИЗ (ПС31) и многониточный КС56. Тем самым априори задавалось недостаточное для обеспечения полноты формирования единого носителя количество ПС и КС, хотя зоны видимости ППИ и охватывали полностью траектории движения ЛА.  $T_3$  стало меньше  $T_2$ . Уменьшилась и степень дублирования информации, посланной с ПРД1, ПРД2 и ПРД3 обоих ЛА, по сравнению с ее значением в эксперименте 1. Кроме того, оказался непринятым ряд фрагментов от ЛА2 ( $\sigma_1 < \sigma_2 < 100\%$ ). Снижение времени  $T_2$  вызвано экономией времени, которое затрачивалось в эксперименте 2 на обработку потерянной в эксперимен-

те 3 информации с ПРД 4, 5, 9. Уменьшение степени дублирования вызвано отключением ПС31, которая ранее дублировала прием информации с ЛА1 и ЛА2. Потеря информации, переданной с ЛА2, произошла из-за занятости на начальном участке траектории всех ПС приемом информации с ЛА1. При этом увеличилась загрузка устройств системы, поскольку ранее обрабатываемая информация на ПС31 и КС56 перераспределилась по остальным элементам системы.

В эксперименте  $i = 4$  в исходную структуру системы были внесены следующие изменения: зоны видимости ППИ и продолжительность работы ПРД для ЛА1 стали вдвое уже и вдвое короче соответственно. В результате по сравнению с экспериментом 2 вдвое уменьшилась и длительность фрагментов сообщений с ЛА1, а степень дублирования информации, поступающей от ЛА2, сохранилась. Сокращение времени в эксперименте 4 ( $T_4 < T_5$ ) вызвано уменьшением длительности циклограмм работы ПРД и сужением зон видимости ППИ для ЛА1 ( $\sigma_4 = 100\%$ ).

В эксперименте  $i = 5$  изменению подверглись технические характеристики исходной системы: для обоих ЛА вдвое сужены и вдвое уменьшены соответственно зоны видимости ППИ и продолжительности циклограмм работы ПРД, а также отключен ППИ8. Состав и число ПС и КС – исходные. Система в данном эксперименте отличалась от системы, проанализированной в эксперименте 2, техническими характеристиками. В результате для ЛА1 выявлена необходимость подключения дополнительных ППИ, охватывающих один из заключительных участков траектории. Фрагменты сообщений, поступившие с ЛА2, уменьшились вдвое. Время формирования единого носителя информации  $T_5$  сократилось еще больше ( $T_5 < T_4$ ) благодаря изменению технических характеристик ЛА1 (сокращение вдвое длительности циклограмм работы ПРД) и, как следствие, из-за уменьшения времени приема и обработки информации на ППИ. Подключение дополнительных ППИ необходимо, так как в эксперименте 5, как и в эксперименте 2, не оказалось ППИ, который охватывал бы последний участок траектории ЛА1. Вследствие уменьшения длительности циклограмм работы ПРД на ЛА1, информационные фрагменты, поступившие с этого ЛА, также уменьшились. Отметим, что значительного изменения загрузок и очередей у элементов системы по сравнению с аналогичными показателями в эксперименте 2 не произошло, поскольку состав ПС и КС не изменялся.

Предлагаемая в статье модель функционирования информационно-управляющей системы служит основой для решения ряда задач синтеза и анализа структуры систем рассматриваемого класса. Например, для решения задачи выбора и оптимальной корректировки составов ПС, ППИ и КС, обеспечивающих заданную полноту приема и передачи информации, формализуемой в виде:  $F(S) \rightarrow \text{opt}, Q(S \cup S1) \geq Q_{\sim}$ , где  $S$  – исходная структура системы,  $S1$  – дополнительный состав ПС и КС,  $Q(S \cup S1)$  – степень полноты приема и передачи информации на скорректируемой структуре; или задачи идентификации и оптимальной развязки «узких мест», то есть оптимальной коррекции  $S$ , обеспечивающей выполнение алгоритмически заданного ограничения  $T_{\text{зад}}$  на длительность обработки программы испытаний  $T(S \cup S1)$ :  $F(S) \rightarrow \text{opt}, T(S \cup S1) \leq T_{\text{зад}}$ .

Наряду с тактико-техническими оценками качества функционирования рассматриваемой системы, разработанная имитационная модель позволяет получать оценки ряда экономических характеристик качества таких, как амортизационные отчисления (зависят от общего времени отработки программы  $T(S)$ ), эксплуатационные расходы (зависят от загрузки технических средств), а также установить удельную стоимость сеанса связи и т.д.

## 4. Заключение

Перечисленные задачи синтеза и анализа необходимо решать комплексно, для чего в Институте проблем управления разработан комплекс взаимосвязанных оптимизационных и имитационных моделей анализа и синтеза структуры распределенных информационно-управляющих систем с соответствующим программно-алгоритмическим и информационным обеспечением, ориентированным на активный диалог с пользователем.

Исходные данные (шаблоны), различные варианты режимов и настроек экспериментов выполнены в виде таблиц.

Программы создания и работы с базой данных, выбора характеристик и режимов моделирования и исходных данных через различные меню, настройки имитационных моделей, графического отображения результатов выполнены в среде языка Pascal.

Исходная имитационная модель написана на GPSS. Система моделирования работает с уже готовой имитационной программой при различных вариантах исходных данных.

Комплекс моделей внедрен при проектировании ряда систем [2-5], в том числе при оптимизации функционирования и развития структуры космодрома «Байконур».

## Список литературы

1. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Филиппов В.А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1985.
2. Габалин А.В. Вопросы оптимизации структуры распределенных систем обработки информации // Прикладная информатика. 2007. № 6. С. 44-52.
3. Габалин А.В. Проведение машинных экспериментов в системе имитационного моделирования УСМ // Материалы 4-й всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2009. Сборник докладов. Санкт-Петербург, 2009. С. 233-235.
4. Габалин А.В., Разбегин В.П. Вопросы оптимизации структуры и функционирования Workflow-систем // Научно-практическая конференция «Реинжиниринг бизнес-процессов на основе современных информационных технологий. Системы управления знаниями» РБП-СУЗ-2013. Материалы конференции. МЭСИ, Москва 2013. С. 40.
5. Габалин А.В. Применение математического моделирования при проектировании информационно-управляющих систем // Тезисы научной сессии НИЯУ МИФИ. Секция «Информационно-телекоммуникационные системы». МИФИ, Москва, 2013. Т. 3 С. 10.