

ваны при синтезе законов управления автопилота самолета-амфибии в режиме посадки на основе полной нелинейной математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Олейников В. А.* Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. – Л.: Изд-во Недра, 1982. – 216 с.
2. *Краснощеченко В.И., Крищенко А.П.* Нелинейные системы: геометрические методы анализа и синтеза. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 520с.
3. *Пищопов В.Х.* Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // МАУ. 2008. – №2.
4. *Колесников А.А., Беляев В.Е., Попов А.Н.* Свойство управляемости нелинейных электроприводов и турбогенераторов // Межвузовский тематический научный сборник: синтез алгоритмов сложных систем. Москва-Таганрог, –1997. – С. 147-179.
5. *Гайдук А.Р.* Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы Жордана // Автоматика и телемеханика. № 7, – 2006. С. 3 – 12.
6. Справочник по теории автоматического регулирования / Под ред. *Красовского А.А.* 1987. – 711с.
7. *Бойчук Л.М.* Структурный синтез автоматических многоуровневых систем функционального управления динамическими объектами. Препринт 74-23. Изд-во института кибернетики АН УССР, Киев, 1974.
8. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 540с.
9. *Isidori A.* Nonlinear control systems. N.Y.: Sprringer-Verlag, 1995.
10. *Балабаев Р.И.* Процедура анализа нелинейных математических моделей самолета амфибии. – Донецк, 2009.
11. *Балабаев Р.И.* Синергетический синтез законов управления гидросамолета в режиме взлета и посадки // 5-я международная конференция «Авиация и космонавтика» МАИ (23-26 октября, 2006г.). Тезисы докладов.
12. *Балабаев Р.И.* Синтез закона управления легким самолетом-амфибией в режиме захода на посадку. Известия ТРТУ. – №9. Специальный выпуск: технические науки. – Таганрог, 2006. – С. 172–173.

УДК 629.7.072.1

В.В. Щербинин, П.П. Кравченко, Н.Ш. Хусаинов

**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ
ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ С
КОРРЕКЦИЕЙ КООРДИНАТ ПО АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
БЛИЖНЕЙ РАДИОНАВИГАЦИИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Введение

Тактико-технические характеристики современных и перспективных летательных аппаратов (ЛА) требуют повышения эффективности решения навигационной задачи, заключающейся в выводе объекта в заданную точку пространства земной поверхности с установленной точностью для решения как военных, так и гражданских задач. В основу функционирования бортового оборудования ЛА закладываются все более совершенные алгоритмы навигации и управления.

В данной работе рассматриваются вопросы проектирования бортовой интегрированной системы навигации и управления (БИСУ) перспективного высокоскоростного ЛА и особенности ее функционирования на завершающем участке траек-

тории движения, когда выполняется коррекция координат ЛА по информации от автоматической системы ближней радионавигации (АСБРН).

Для формирования комплексной оценки точности вывода объекта в заданную точку предлагается использование статистического моделирования процессов, выполняемых в подсистемах БИСУ на завершающем участке полета ЛА.

Формирование облика бортовой интегрированной системы управления и навигации ЛА

На основании анализа комплекса бортового оборудования рассматриваемого ЛА и требований, предъявляемых к точностным характеристикам навигации и наведения, сформирован облик БИСУ, в котором можно выделить 4 базовых подсистемы (рис. 1):

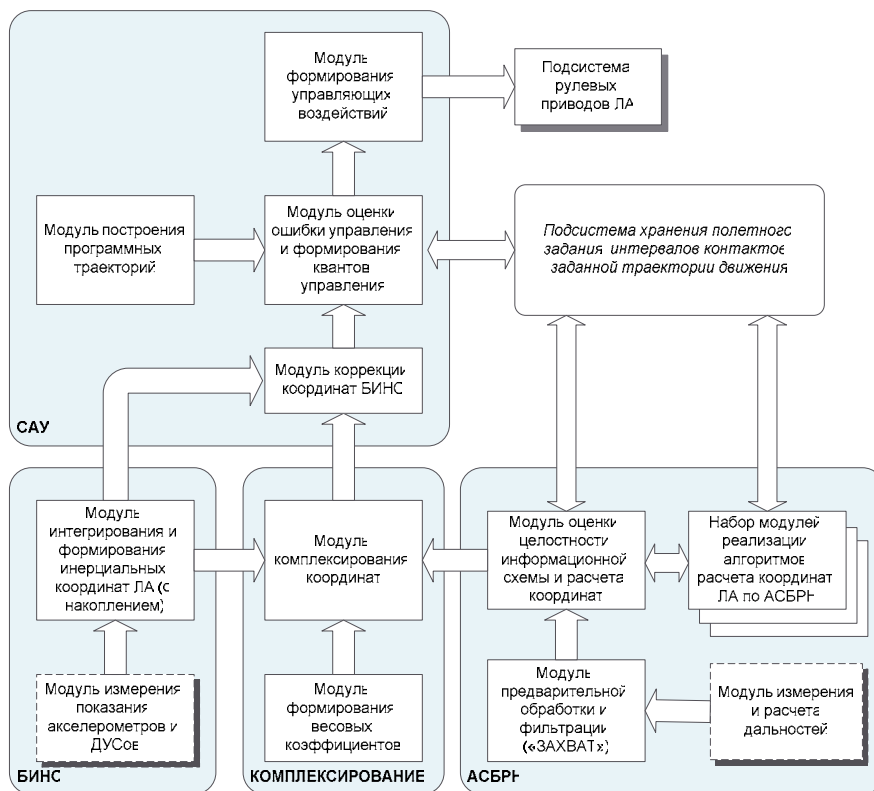


Рис. 1. Структурная схема БИСУ

- ◆ подсистема, реализующая алгоритмы автоматического управления (САУ) ЛА. В качестве математического аппарата при синтезе алгоритмов управления в данной работе использована теория оптимизированных дельта-преобразований второго порядка [1]. Ключевыми модулями подсистемы САУ ЛА являются модули оценки ошибки управления (отклонения от заданной траектории) и формирования управляющих воздействий. В работе реализованы принципы управления с построением программных траекторий (ПТ) [2]. Алгоритмы построения ПТ позволяют повысить качественные характеристики работы алгоритмов управления в экстремальных ситуациях. Модуль коррекции координат бесплатформенной инерциальной

навигационной системы (БИНС) обеспечивает коррекцию на каждом шаге координат местоположения ЛА, формируемых инерциальной системой навигации в соответствии с результатами выполненных коррекций;

- ◆ подсистема, реализующая взаимодействие с автономным искусственным радионавигационным полем и вычисление "моментального" местоположения ЛА (АСБРН) [3]. Измеренные антенным модулем дальности от ЛА до каждого радиомаяка проходят предварительную обработку и фильтрацию и используются для вычисления координат ЛА с автономным контролем целостности системы. Универсальность разработанных алгоритмов функционирования наземной и бортовой частей АСБРН заключается, в частности, в том, что для определения координат ЛА могут быть использованы один или несколько алгоритмов из достаточно широкого набора алгоритмов, различающихся по вычислительной трудоемкости, требованиям к памяти и т.п. и показавших сравнительно высокие характеристики по точности при моделировании в наземной части АСБРН;
- ◆ подсистема, решающая задачи комплексирования координат САУ ЛА, БИНС и АСБРН (КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ) с расчетом весовых коэффициентов по отношениям статистических оценок уровней ошибок различных подсистем;
- ◆ подсистема БИНС на основе интегрирования показаний датчиков угловых скоростей (ДУСов) и акселерометров рассчитывает инерциальные координаты ЛА. Функционирование подсистемы БИНС имитируется путем численного решения дифференциальных уравнений описания движения и внесением ошибок, имитирующих "уход" БИНС.

Рассмотрим более подробно принципы функционирования модулей навигации и управления.

Оценка местоположения ЛА средствами автоматической системы ближней радионавигации и механизм автономного контроля целостности навигационного поля

В качестве альтернативы использования существующих радионавигационных систем наземного и космического базирования рассматривается автоматическая система ближней радионавигации (АСБРН), которая может использоваться для коррекции координат на завершающем участке траектории движения ЛА. Преимуществами АСБРН являются высокий темп обновления навигационных определений, а также скрытность, автономность, малое время развертывания и низкая стоимость эксплуатации.

Информационной основой для вычисления координат ЛА средствами АСБРН является искусственное навигационное поле на основе опорных радионавигационных устройств – наземных радиомаяков (РМ), которые устанавливаются в районе предполагаемой точки касания ЛА с поверхностью Земли заранее, при этом выполняется их позиционирование и топпривязка в местной или иной системе координат. До получения сигнала активации с борта радиомаяки функционируют в режиме ожидания, что обеспечивает их скрытность и длительное функционирование за счет малого энергопотребления.

В активном режиме бортовой антенный модуль с высоким темпом формирует дальномерные измерения от ЛА до каждого из маяков. На основании полученного вектора измерений и специальных правил расчета, сформированных в наземном модуле АСБРН перед пуском ЛА, бортовой модуль АСБРН определяет местоположение ЛА относительно радиомаяков АСБРН.

На АСБРН могут быть распространены типовые требования, предъявляемые к навигационным системам по размерам области действия, точности определения координат, доступности, целостности и непрерывности обслуживания для конкретных приложений и классов ЛА [3]. К отличительным особенностям функционирования АСБРН, требующим учета при разработке алгоритмов функционирования наземного и бортового навигационных модулей, следует отнести:

- ◆ доступность АСБРН для различных ЛА обеспечивается путем временного разделения доступа к радиомаякам. С учетом числа ЛА, одновременно находящихся в зоне обслуживания радиомаяков, минимальная длительность непрерывного интервала взаимодействия бортового модуля АСБРН ЛА с радиомаяками может составлять порядка единиц секунд, что фактически означает необходимость решения задач расчета координат ЛА, оценки целостности системы, комплексирования БИНС и АСБРН, на основе однократных мгновенных измерений дальностей или последовательности из малого числа измерений;
- ◆ с уменьшением расстояния между ЛА и радиомаяками точность расчета координат ЛА растёт, что необходимо учитывать при взвешенном комплексировании координат, формируемых АСБРН и БИНС;
- ◆ избыточное число наземных радиомаяков в общем случае может повысить точность и надежность навигационных определений, однако точность их позиционирования и топопривязки в зависимости от условий установки может существенно различаться. Поэтому при выборе "наилучшей" подгруппы радиомаяков и алгоритма решения навигационной задачи актуальной является задача учета не только геометрического фактора, но и разброса ошибок исходных данных.

АСБРН включает наземную и бортовую части (модули). Задачей наземной части АСБРН является анализ геометрической конфигурации и ошибок позиционирования радиомаяков, вероятностная оценка точностных характеристик решения навигационной задачи, выработка рекомендаций и правил для расчета координат ЛА в бортовой части АСБРН с учетом возможного нарушения целостности наземной информационной схемы. Функционирование наземного модуля АСБРН осуществляется при наличии достаточных вычислительных и временных ресурсов. Результатами работы наземной части АСБРН являются статистические оценки ошибок навигации в рассматриваемых зонах коррекции, по величине которых может быть принято решение на запуск ЛА и/или использование АСБРН для коррекции координат. В случае принятия положительного решения наземная часть АСБРН генерирует полетное задание.

Задачами бортовой части АСБРН являются автономная оценка целостности наземной информационной схемы, выявление "отказавших" маяков, решение навигационной задачи (с учетом возможных "отказов") и коррекция координат ЛА по результатам решения. Функционирование программного обеспечения бортовой части АСБРН осуществляется в режиме жесткого реального времени в условиях ограниченности вычислительных ресурсов.

При разработке алгоритмов функционирования АСБРН рассмотрен и реализован набор различных методов вычисления вектора координат ЛА в трехмерном пространстве по дальномерным измерениям при известной конфигурации опорных радионавигационных устройств. Конечные методы позволяют решать данную задачу при наличии трех радиомаяков (по трем измерениям дальностей при наличии

дополнительной "подсказки" для выбора одного правильного решения из двух, получаемых в ходе решения системы уравнений) или четырех радиомаяков (в этом случае решение будет единственным, если, конечно, система уравнений не является вырожденной). Итерационные методы (в частности, метод наименьших квадратов) позволяет использовать большее количество радиомаяков (случай с избыточной информационной схемой), что, как правило, приводит к повышению точности определения координат ЛА. Методы построения прямой решающей функции (корреляционно-экстремальный и нейросетевой) дают схожие по точности результаты с итерационными алгоритмами, однако характеризуются высокими требованиями к вычислительным ресурсам наземной и/или бортовой вычислительной системы.

В разработанной схеме автономного контроля целостности АСРН реализовано последовательное применение следующих способов оценки и анализа измеренных дальностей от ЛА до РМ.

Первый этап – анализ аппаратного отказа РМ ("работает" / "не работает"). Выполняется на основе оценки факта наличия или отсутствия сигнала от каждого РМ наземной схемы АСРН. Наиболее простой способ анализа работоспособности РМ и контроля целостности системы в целом.

Второй этап – независимый фильтрационный анализ каждой измеренной дальности от ЛА до РМ с целью повышения сглаживания измеренных дальностей (уменьшения влияния шумов измерений) и отсека импульсных помех (процедура "ЗАХВАТ"). Данный подход требует накопления некоторой начальной статистики, поэтому "выдача" первой дальности до РМ происходит с некоторой задержкой (последующие дальности до этого же РМ выдаются без задержки).

Третий этап – проверка дальностей до каждого РМ на попадание в границы пространственного региона, для которого на борту имеется полетное задание.

Четвертый этап – обнаружение и изоляция отказавших РМ, измеренные дальности до которых попадают в область решения, но их использование может привести к существенной ошибке вычисления координат ЛА. Для разработанного и используемого на данном этапе алгоритма автономного контроля целостности в случае конфигурации из четырех радиомаяков минимально необходимое количество N РМ в конфигурации для обнаружения отказов кратности не выше q по приведенному выше алгоритму можно оценить как $N = q + 3$, а минимально необходимое количество N РМ в конфигурации для изоляции отказов кратности не выше q по приведенному выше алгоритму, можно оценить как $N = 2 \cdot q + 3$. Минимально необходимое количество N РМ для изоляции отказа кратности не выше q и обнаружения отказа кратности не выше $(q + 1)$ можно оценить как $N = 2 \cdot q + 4$. В основу алгоритма контроля целостности АСРН при $N > 4$ положена схема переборных подгрупп, состоящих из $P = 4$ радиомаяков и формирование результата контроля на основе совместного анализа полученных ответов для подгрупп.

В общем случае оценка точности определения координат ЛА зависит от большого количества факторов, в числе которых следует, в первую очередь, отметить точность позиционирования и топопривязки радиомаяков, точность измерения дальностей от РМ до ЛА в процессе полета, геометрический фактор конфигурации РМ и взаимного расположения группы РМ и ЛА, степень избыточности информационной схемы, вероятности отказа радиомаяка, используемого математического аппарата вычисления координат. Поэтому наиболее достоверным вариантом анализа конфигурации РМ и формирования оценок точности решения навигационной задачи является статистическое моделирование. Результатом такого моделиро-

вания служат оценки точности определения координат ЛА с использованием АСБРН на завершающем участке траектории.

Подсистема цифрового управления движением ЛА на завершающем участке траектории

Синтез алгоритмов управления движением ЛА на завершающем участке траектории выполнен на основе теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка с использованием модели движения одного из перспективных высокоскоростных ЛА.

Блок-схема модели системы автоматического цифрового управления ЛА может быть представлена в виде, приведенном на рис. 2.

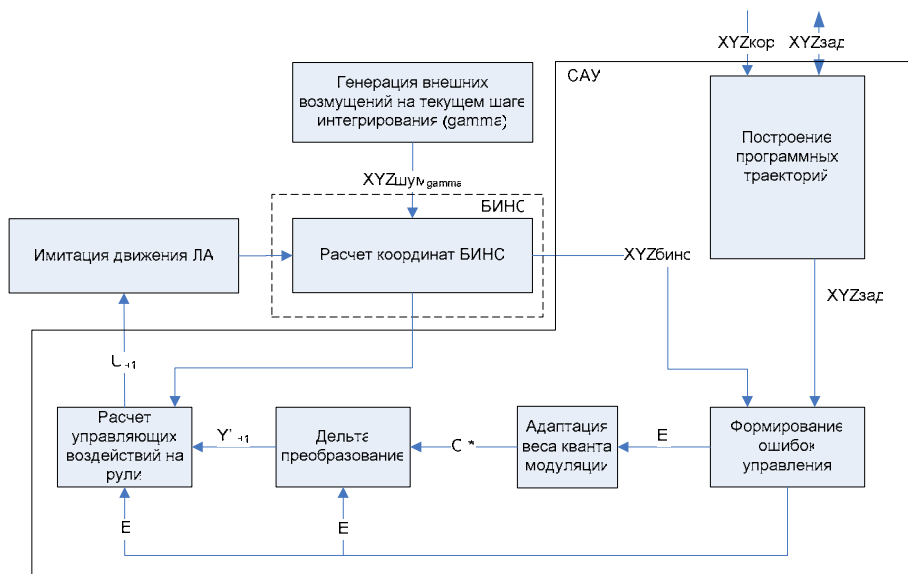


Рис. 2. Укрупненная блок-схема подсистемы цифрового управления ЛА

Подсистема САУ состоит из 3 независимых каналов управления: по тангажу (высоте), рысканию (направлению) и крену.

На рис. 2 использованы следующие обозначения: $XYZ_{зад,i}$ – заданная точка траектории движения ЛА на i -м шаге моделирования; E_i – вектор ошибки управления; c^*_i – вектор-параметр Д-преобразования, применяемый для адаптации веса кванта модуляции Y^*_{i+1} и в значительной мере определяющий уровень управляющих воздействий на рулевые приводы ЛА ($U_{i+1,\sigma}$) для следующего шага [4].

- ◆ Комплексование координат БИНС и АСБРН для использования в системе автоматического управления (САУ) ЛА наряду с очевидными преимуществами по точности позиционирования ЛА, характеризуется следующими особенностями, которые должны учитываться при решении задачи управления:
 - ◆ скачкообразное изменение ошибок координат ЛА в пространстве является сильным внешним возмущающим фактором, который оказывает влияние на качественные характеристики алгоритма управления;
 - ◆ для решения задачи обеспечения касания ЛА с поверхностью в заданной точке приземления с предельно высокой точностью необходимо исполь-

зование либо алгоритмов компенсации возмущающего воздействия и возврата ЛА на исходную траекторию движения, либо методов формирования новых программных траекторий (ПТ), форма и управление на которых может отличаться от исходной траектории, но конечная точка будет совпадать с заданной точкой приземления;

- ◆ поскольку для обеспечения максимальной точности решения навигационной задачи и минимизации влияния ошибок автономной БИНС на участке движения после коррекции точка (или точки) коррекции должны располагаться как можно ближе к точке приземления, компенсация возмущения при движении ЛА должна осуществляться за минимальное время;
- ◆ формирование интенсивных управляющих воздействия для возврата ЛА на исходную заданную траекторию движения при больших отклонениях от нее может потребовать значительных энергетических ресурсов, ограниченных на пассивном участке траектории движения.

В процессе управления движением ЛА с использованием коррекции координат могут быть построены программные траектории двух типов:

- ◆ программная траектория первого типа – строится в момент коррекции координат ЛА по информации от АСБРН;
- ◆ программная траектория второго типа – строится в момент пересечения касательной к графику ошибки и линии визирования цели в соответствующей плоскости управления при выполнении некоторых дополнительных условий, накладываемых на соотношения знаков приращения ошибки и ошибки.

В момент построения программной траектории ошибка управления по данному направлению сбрасывается в "0".

По каждой из двух плоскостей управления этот анализ (и построение ПТ) выполняется независимо. Переход на ПТ может являться основанием для уменьшения интенсивности управляющих воздействий с целью повышения точности управления. Количество новых построенных ПТ определяется количеством выполненных коррекций.

Для обеспечения плавности переходных процессов во время отработки новой программной траектории запрещается введение новых координат коррекции в контур САУ ЛА.

Проектирование схемы взаимодействия подсистем БИСУ

Проектирование схемы взаимодействия подсистем БИСУ связано с определением приоритетов, порядка вызова и длительности выполнения вычислительных процессов, реализующих (моделирующих) функции подсистем БИСУ.

В качестве основных процессов на схеме взаимодействия (рис. 3) можно выделить (в порядке убывания приоритета):

- ◆ процесс имитации движения ЛА и расчета инерциальных координат ЛА по информации от ДУСов и акселерометров. Считывание показаний с датчиков и их интегрирование выполняется модулем интегрирования и формирования координат с некоторым постоянным шагом (порядка 100 Гц для широкого спектра современных ИНС) в режиме жесткого реального времени. В программной модели БИСУ функционирование датчиков угловых скоростей и акселерометры имитируются путем численного решения дифференциальных уравнений, описывающих движение ЛА в пространстве, при этом шаг интегрирования составляет 1 мс. Для имита-

ции "ухода" БИНС в программной модели в инерциальные координаты, получаемые на каждом шаге интегрирования, вводится случайная ошибка. Знак ошибки генерируется однократно для всего "пролета", а величина ошибки представляет собой случайную величину с разбросом (сигмой), который соответствует уровню точности БИНС;

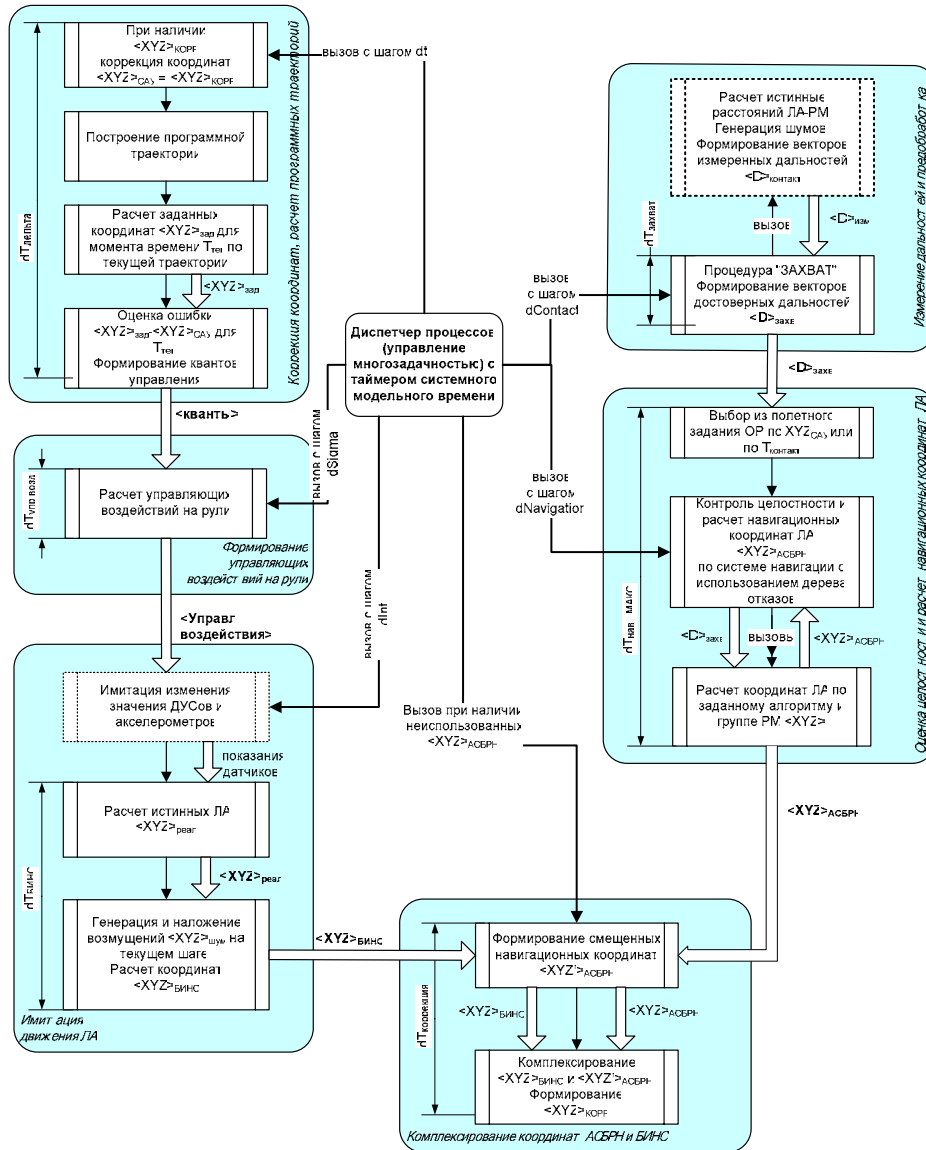


Рис. 3. Схема взаимодействия подсистем и процессов в модели БИСУ

- ♦ измерение дальностей и их предварительная обработка процедурой "ЗАХВАТ" в подсистеме АСБРН. При имитации работы модуля измерения дальностей от ЛА до радиомаяков используется модель генератора дальностей и генератора искажений измерений дальностей. Интервал между очередным измерением дальности по каждому РМ определяется кон-

структивными особенностями антенного модуля и составляет порядка 70 мс, измерения по всем маякам выполняются синхронно и (с учетом некоторых допущений, которыми на данном этапе можно пренебречь) одновременно в режиме жесткого реального времени. Таким образом, кортеж из N дальностей (где N – количество маяков в конфигурации) выдается на вход процедуре "ЗАХВАТ" каждые 70 мс. Случаю, когда антенный блок не смог сформировать измерение дальности, соответствует особое (фиксированное, заранее predetermined) выдаваемое значение;

- ◆ формирование воздействий на рули управления в рамках САУ ЛА. Процесс является процессом жесткого реального времени, вызывается с постоянным временным шагом порядка 0,2 сек;
- ◆ коррекция координат, построение программных траекторий, оценка ошибки управления. Процедуры, реализуемые в данном процессе, представляют собой "верхний" логический уровень управления и коррекции ЛА. Процесс является процессом жесткого реального времени, вызывается с постоянным временным шагом;
- ◆ расчет "навигационных" координат ЛА в подсистеме АСБРН по информации о дальностях от ЛА группы радиомаяков. Вызов модуля оценки целостности информационной схема и расчета координат ЛА носит асинхронный (нерегулярный) характер и осуществляется при наличии "неиспользованных" дальностей с выхода процедуры "ЗАХВАТ". Расчет координат ЛА (вместе с оценкой целостности информационной схемы) не является процессом жесткого реального времени и может прерываться рассмотренными выше процессами. Длительность расчета навигационных координат на борту ЛА существенно зависит от количества радиомаяков, заданного алгоритма расчета, наличия отказов радиомаяков. Поэтому в рамках программной модели длительность выполнения данного процесса характеризуется только верхней границей времени;
- ◆ комплексирование координат. Вызов соответствующего модуля также носит асинхронный (нерегулярный) характер, выполняется только при наличии "неиспользованного" выхода с АСБРН. Процесс может прерываться другими, более приоритетными процессами, имеет прогнозируемое с высокой точностью время выполнения и имеет малую (по сравнению с другими процессами) трудоемкость.

Рассмотренные в статье принципы построения бортовой интегрированной системы управления и навигации, а также алгоритмы функционирования отдельных подсистем БИСУ реализованы в рамках программной модели бортового информационно-алгоритмического обеспечения, которые представляют собой часть программного комплекса моделирования решения задачи навигации и наведения для перспективных ЛА. Проведенные с использованием данного программного комплекса эксперименты подтвердили работоспособность и эффективность предложенных подходов и позволили сформировать рекомендации и правила по их применению для различных вариантов исходных данных при решении задач навигации, наведения и посадки высокоскоростных маневренных ЛА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кравченко П.П.* Основы теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка. Цифровое управление, сжатие и параллельная обработка информации: Монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008.

2. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск / *Б.Г.Гурский, М.А.Люцанов, Э.П.Спирин*: Под ред. В.Л.Солунина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001.
3. *Щербинин В.В., Кравченко П.П., Хусаинов Н.Ш.* Методология разработки информационно-алгоритмического обеспечения перспективных систем посадки на малооборудованные и необорудованные аэродромы по информации от автономной системы ближней радионавигации // *Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск "Интеллектуальные САПР"*. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2006. – № 2.
4. *Кравченко П.П., Хусаинов Н.Ш.* Синтез алгоритмов системы управления летательного аппарата на основе теории оптимизированных дельта-преобразований второго порядка // *Известия ТРТУ. Специальный выпуск "Материалы XLIX научно-технической и научно-методической конференций профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ТРТУ"*. – № 1(36). – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – С.66-71.

УДК 62 – 501.462

А.Р. Гайдук

К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА ИНВАРИАНТНЫХ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Введение

Задача управления многомерными объектами была поставлена в тридцатых годах прошлого века И.Н. Вознесенским [1], как задача автономного (независимого) регулирования нескольких выходных переменных. Практически в то же время Г.В. Щипановым была сформулирована задача синтеза инвариантных к внешним воздействиям систем управления [2]. Этим задачам посвящены многочисленные публикации [3 – 9], поскольку с практической точки зрения целесообразно придавать системам управления сложными объектами свойство инвариантности.

Основная сложность решения задачи синтеза многомерных систем автоматического управления (МСАУ) связана с их многомерностью, т.е. наличием нескольких переменных, каждой из которых необходимо управлять либо независимо, либо согласованно. Если синтезируется инвариантная к внешним воздействиям МСАУ, то задача осложняется условиями разрешимости задачи синтеза инвариантных САУ [8].

Анализ известных решений задачи синтеза МСАУ приводит к выводу, что указанные сложности обусловлены использованием обратных связей и для обеспечения требуемых вход-выходных соотношений, и для придания устойчивости. В то же время известно, что для автономного или связного управления и инвариантности необходимы определённые значения передаточных нулей, а для устойчивости – соответствующие значения полюсов системы.

В работе [7] было предложено разделить средства решения этих задач: для обеспечения автономности или связности использовать управление по воздействиям (прямые связи), а для устойчивости – обратные связи. Разработанный на основе этого подхода метод является полностью аналитическим и позволяет построить устойчивую, автономную или связную систему, и придать ей требуемое качество в переходном и в установившемся режиме.

Ниже излагается метод синтеза инвариантных к воздействиям МСАУ, минимального порядка, в которых используются обратные связи по управляемым переменным и прямые связи по измеряемым воздействиям.