

УДК 629.7.05 (076)

В.Н. Лутай, Н.Ш. Хусайнов

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ БОРТОВОГО МОДУЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ РАДИОНАВИГАЦИИ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМОЙ ЭВМ СЕМЕЙСТВА "БАГЕТ" ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ОС2000

Рассматривается бортовая часть автономной системы ближней радионавигации летательного аппарата и ее программная реализация для встраиваемой ЭВМ семейства "Багет", функционирующей под управлением операционной системы реального времени ос2000. Описаны назначение и принципы обработки данных в бортовом модуле АСБРН: блоке фильтрации дальномерных измерений, блоке автономного контроля целостности навигационного поля, блоке расчета координат ЛА. Приведена схема взаимодействия потоков управления в программной реализации на однопроцессорной ЭВМ, а также оценки времени выполнения основных блоков программы для различного количества маяков.

Автономная система ближней радионавигации; фильтрация дальномерных измерений; автономный контроль целостности; ос2000; взаимодействие процессов в системе реального времени.

V.N. Lutay, N.Sh. Khusainov

PROGRAM REALIZATION OF THE AUTONOMOUS LOCAL RADIO NAVIGATION SYSTEM ON-BOARD PART FOR EMBEDDED COMPUTER OF "BAGET" FAMILY OPERATING UNDER OS2000

The structure of on-board part of the Autonomous Local Radio Navigation System for unmanned aircraft and its program realization for embedded computer of "BAGET" family with operating system os2000 are described. The purpose and operation principles of filtration module, RAIM-module, coordinate computing module are discussed. The scheme of management streams in software for single-processor embedded computer is given. Consuming time estimations for program modules execution for various number of radio beacons are obtained.

Autonomous Local Radio Navigation System; filtration of range measurements; receiver autonomous integer monitoring; os2000; process interaction in real-time operating system.

Автономная система ближней радионавигации (АСБРН) предоставляет возможность определения (коррекции) местоположения летательного аппарата (ЛА) по совокупности дальномерных измерений от ЛА до наземных опорных навигационных устройств – радиомаяков (РМ), образующих искусственное навигационное поле с известной геометрической конфигурацией [1]. Ключевым преимуществом АСБРН по сравнению с известными спутниковыми навигационными системами и системами ближней радионавигации является комплексное решение задач обеспечения высокой точности и надежности местоопределения при нарушении целостности навигационного поля (в том числе при множественных отказах радиомаяков), а также высокий темп формирования навигационных определений, необходимый для высокоскоростных ЛА. Дополнительными факторами, обеспечивающими эффективность применения АСБРН для военных и гражданских приложений, являются скрытность функционирования радиомаяков и их активация по сигналу с борта ЛА, низкое энергопотребление в режиме ожидания, простота развертывания и "сворачивания" навигационного поля, низкая стоимость оборудования.

Одной из основных задач при создании автономной системы ближней радионавигации является разработка информационно-алгоритмического (ИАО) обеспечения АСБРН. Состав и решаемые задачи ИАО АСБРН в целом и в частности рассмотрены в работах [1, 2]. В настоящей работе основное внимание уделено вопро-

сам проектирования и программной реализации бортового модуля АСБРН для встраиваемой ЭВМ серии "БАГЕТ-83В", функционирующей под управлением ОС РВ БАГЕТ (ос2000).

Назначение бортового модуля АСБРН – расчет координат на заключительном участке траектории движения ЛА. Вычисления выполняются по совокупности мгновенных измерений дальности между бортовым радиодальномером и радиомаяками с учетом полетного задания (полетных данных), сформированного в наземной части АСБРН и загруженного в бортовой вычислитель перед пуском ЛА. Для повышения точности и надежности местоопределения ЛА бортовой модуль АСБРН реализует также функции предобработки (фильтрации) дальномерных измерений и автономного контроля целостности навигационного поля. Схема потоков информации при обработке в бортовом модуле АСБРН показана на рис. 1.

Рассмотрим принципы обработки информации на каждом из этапов функционирования бортового модуля АСБРН и архитектуру программного приложения для реализации этой обработки на базе встраиваемой ЭВМ семейства "Багет".



Рис. 1. Схема потоков данных при обработке информации в бортовом модуле АСБРН

Фильтрация измерений. В основу работы существующего варианта "многодальномерной" системы положен принцип временного разделения сеансов связи при работе на одной несущей частоте каналов связи "Борт"–"Земля" и "Земля"–"Борт". Наземные ответчики (N радиомаяков) в исходном положении находятся в режиме ожидания и работают на прием. Бортовой запросчик (радиодальномер) начинает работать по команде от аппаратуры АСБРН ЛА. Радиодальномер вырабатывает с заданным периодом повторения посылки радиоимпульсов. Посылка начинается кодовой группой "Старт запроса" (СЗ), далее следуют N одиночных импульсов "Запрос дальности" (ЗД), моменты передачи каждого из которых жест-

ко привязаны к моменту передачи сигнала СЗ. Каждый передаваемый сигнал ЗД адресован конкретному ответчику. Таким образом, каждый из ответчиков отвечает только на "свой" сигнал ЗД. Передаваемый каждым ответчиком сигнал "Ответ дальности" (ОД) включает в себя кодовую группу "Старт ответа" (СО) и одиночный ответный измерительный импульс. По принимаемым сигналам ОД бортовой радиодальномер производит поочередное измерение дальности до каждого из N ответчиков и в той же последовательности отсылает измеренные значения в устройство вторичной обработки по последовательному интерфейсу RS-232.

Фильтрация измерений дальности от РМ предназначена для уменьшения влияния шумов измерений и отсеечения импульсных помех. Программный фильтр осуществляет линейную фильтрацию измерений, поступающих от каждого маяка, с окном от $-M$ до $+M$ отсчетов согласно известным соотношениям для нерекурсивных линейных фильтров на основе метода наименьших квадратов [3].

Каждый фильтр работает в двух режимах: накопления и захвата. В режиме накопления выполняется накопление $(2M+1)$ измерений и первое выходное значение выдается при получении $(2M+1)$ -го входного. После этого фильтр работает в режиме захвата, выдавая отфильтрованное значение сразу после получения входного измерения. Если на вход фильтра поступает отсчет, значение которого значительно отличается от предыдущего и причиной появления которого с большой долей вероятности является импульсная помеха, то он сглаживается. Несколько импульсных помех, попадающих в текущее окно фильтра, могут привести к существенному искажению результата фильтрации. Поэтому в случае, если в окно фильтра попадают недопустимо много импульсных помех (предельное количество является одним из параметров алгоритма фильтрации), они убираются из входной последовательности и фильтр снова переходит в режим накопления.

После получения и обработки одного измерения от всех маяков блок фильтрации формирует два вектора:

- ◆ элементами первого вектора являются отфильтрованные значения дальностей;
- ◆ элементами второго вектора являются флаги "0" или "1" в зависимости от того, находится ли соответствующий фильтр в режиме накопления или захвата. В первом случае соответствующий маяк не может быть использован для дальнейших вычислений. Маяки с флагом, равным 1, рассматриваются как активные.

Проверка целостности навигационного поля. Блок проверки целостности обеспечивает проверку поля радиомаяков с целью выявления возможного изменения их фактических координат по сравнению с полетным заданием. Тот маяк, который изменил координаты своего местоположения, считается отказавшим.

Суть алгоритма в следующем. Из номеров N активных РМ составляются C_N^4 сочетаний. Для каждой из "четверки" РМ выполняется "базовый" алгоритм контроля целостности, основанный на одном из стандартных подходов к обнаружению одиночного отказа среди N измерений (методы MSS, RCM, MCM, LSR) [4]. Основу "базового" алгоритма составляет однократное или многократное решение задачи местопредопределения ЛА для N или $N-1$ измерений (в зависимости от выбранного подхода). Поэтому с вычислительной точки зрения процедура контроля целостности является наиболее трудоемким этапом функционирования бортового модуля АСБРН и существенно зависит от числа "четверок" (т.е. от числа активных РМ).

Обнаружение и изоляция множественных отказов требует специального анализа результатов всех "четверок" на предмет наличия факта отказа в каждой из них. Для разработанного алгоритма такого анализа, подробное описание которого

приведено, в частности, в работе [5], доказаны следующие соотношения между максимальной кратностью обнаруживаемой/исправляемой ошибки q и мощностью навигационного поля N (здесь под N понимается число активных РМ):

$$N \geq 2 * q_{\text{изоляция}} + 3;$$

$$N \geq q_{\text{обнаружение}} + 3.$$

Основным результатом работы данного этапа является вектор идентификаторов рабочих маяков.

Вычисление координат ЛА. Задача определения местоположения ЛА относительно заданной (на земной поверхности) точки посредством дальномерной АСБРН основана на решении системы уравнений вида [6]:

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = D_i^2.$$

Здесь x, y, z – координаты ЛА, а x_i, y_i, z_i – координаты i -го радиомаяка в выбранной локальной системе координат с центром в заданной точке приземления ЛА; D_i – дальность до i -го радиомаяка.

Наиболее распространенные подходы к решению данной системы уравнений, основанные на итерационных и конечных математических алгоритмах, детально рассмотрены в работах [7, 8]. Принятие решения о выборе конкретного алгоритма и используемой подгруппы радиомаяков осуществляется в бортовом модуле АСБРН на основе загруженного в вычислитель дерева отказов, обеспечивающего поиск оптимальной пары <алгоритм решения, подгруппа РМ> в данной области траектории и для заданного множества активных радиомаяков. Точностные и надежностные оценки разработанных алгоритмов функционирования АСБРН приведены в работе [9].

Разработка программного обеспечения для бортового вычислителя АСБРН. Все программы, составляющие бортовую часть АСБРН, реализованы на языке С и предназначены для функционирования под управлением операционной системы ОС РВ Багет (ос2000). Эта система реального времени ориентирована на использование в программно-аппаратных комплексах, работающих в режиме жесткого реального времени. Операционная система соответствует стандарту для мобильных операционных систем POSIX [10].

Бортовая часть АСБРН реализована на однопроцессорной ЭВМ в виде двух потоков управления: корневого и порожденного (рис. 2). В корневой поток включены блоки проверки целостности и вычисления координат. В порожденном потоке выполняется прием данных от РМ и их фильтрация. Потоки взаимодействуют через общие переменные, в которые порожденный поток помещает вектор отфильтрованных значений и вектор флагов и из которых корневой поток их читает. Блокировка общих переменных выполняется с помощью мьютекса.

Синхронизация потоков производится посредством семафора, причем порожденный поток имеет более высокий приоритет. Вследствие этого не происходит потери измерений, возможных в том случае, когда общее время вычислений координат, включая контроль целостности в корневом потоке, превышает промежуток времени между измерениями, поступающими от маяков: корневой поток приостанавливается, запускается порожденный поток, и отфильтрованные данные записываются в буфер порожденного потока с тем, чтобы после использования общих переменных в корневом потоке, заменить значения последних на новые.

Такой порядок взаимодействия потоков несущественно замедляет вычисление координат, так как время фильтрации на порядок меньше времени выполнения этапа контроля целостности. Длительности выполнения полного цикла обработки данных от получения дальномерных измерений до выдачи координат ЛА в бортовую систему управления ЛА для ЭВМ "Багет-83М" составили от 0,01 с (для

$N=4$) до 0,05 с (для $N=8$), что даже без оптимизации программного кода позволяет говорить о существенно более высоком темпе выдачи навигационных определений по сравнению с известными оценками для спутниковых навигационных систем (порядка 1 с).

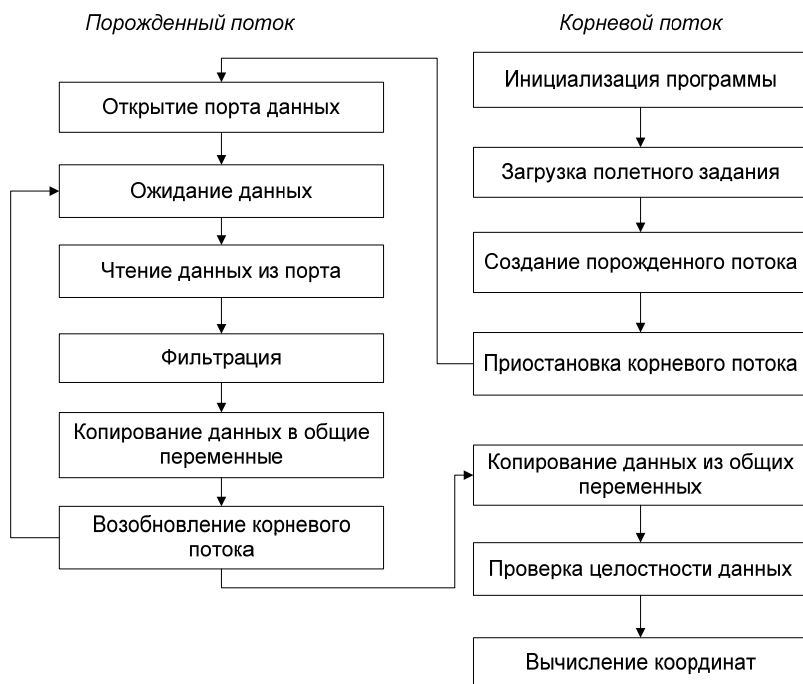


Рис. 2. Схема взаимодействия потоков управления в программной реализации бортовой части АСБРН

Программная реализация алгоритмов функционирования бортового модуля АСБРН для ЭВМ семейства "Багет-83М" позволили обеспечить получение ожидаемых точностных и надежностных характеристик местоопределения ЛА при существенно более высоком темпе выдачи навигационных определений по сравнению с используемыми в настоящее время системами глобальной навигации. Полученные результаты наиболее актуальны для использования с целью коррекции координат перспективных высокоскоростных ЛА на заключительном участке траектории движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хусаинов Н.Ш. Принципы построения информационно-алгоритмического обеспечения перспективных систем определения местоположения ЛА по информации от автономной системы ближней радионавигации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2007. – № 2 (77). – С. 130-135.
2. Хусаинов Н.Ш. Алгоритмы и программная модель бортовой интегрированной системы управления и навигации летательного аппарата с коррекцией координат на завершающем участке траектории // Вопросы оборонной техники. Сер. 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. – 2010. – Вып. 1 (242)–2 (243). – С. 60-63.
3. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
4. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 2998. – 400 с.

5. Хусаинов Н.Ш., Щербинин В.В. Вопросы разработки информационно-алгоритмического обеспечения автоматической системы ближней радионавигации для перспективных высокоскоростных летательных аппаратов // Сборник докладов XV Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" (RLNC*2009) в 3-х т. – Т. 3. Воронеж, 14-16 апреля 2009 г. – Воронеж: НПФ "САКВОЕЕ" ООО, 2009. – С. 1427-1423.
6. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 272 с.
7. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные система / Под ред. В.С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
8. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Математические задачи дальномерной навигации. – М.: Физматлит, 2007. – 272 с.
9. Хусаинов Н.Ш., Кравченко П.П., Щербинин В.В., Шаповалов В.А. Анализ составляющих ошибки навигации и наведения летательного аппарата, использующего для коррекции движения автономную систему ближней радионавигации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 55-59.
10. Операционная система ос2000 URL: <http://www.niisi.ru/intro1.htm> (дата обращения: 29.03.2012).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Лутай Владимир Николаевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vlutay@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371746; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Хусаинов Наиль Шавкятovich – e-mail: KhussainovNSh@mopevm.tsure.ru; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Lutay Vladimir Nikolaevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: vlutay@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371746; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Khussainov Nail' Shavkyatovich – e-mail: KhussainovNSh@mopevm.tsure.ru; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.51

А.А. Сытник, С.Ю. Протасов, К.Н. Ключка

ПРИБЛИЖЕННЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ АНАЛИЗА ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассматриваются вопросы применения операционных методов для анализа линейных динамических систем с переменными параметрами. В своем большинстве они относятся к классу так называемых систем с медленно меняющимися параметрами, у которых коэффициенты дифференциального уравнения несут существенно изменяют свои значения за время эффективной длительности импульсной переходной функции. Этот класс задач также свидетельствует о важности разработки аналитических и численных эффективных методов решения, особенно посредством получения такой исчерпывающей характеристики системы, как импульсная переходная функция. Предложенные операционные способы дают возможность получения аналитического представления решения дифференциальных уравнений и систем с переменными коэффициентами, а также есть одним из вариантов получения импульсной переходной функции.

Дифференциальное уравнение; интегральное уравнение Вольтерра; импульсная переходная функция; преобразование Лапласа.