

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И ОТРАБОТКИ БИНС

1. Общая постановка задачи

НПОА в течение ряда лет проводит комплекс работ по созданию БИНС различного применения. К настоящему моменту завершена разработка и проводятся стендовые испытания макета БИНС среднего класса точности, имеющего следующие характеристики: скорость ухода моделирующего навигационного базиса на уровне $0.1 \text{ } ^\circ/\text{с}$, суммарная ошибка по ускорению $10\text{e}-4 \text{ g}$, для специальных объектов, работающих в условиях больших угловых скоростей (до 200 о/с), линейных перегрузок (до 100 g) и вибраций (высокочастотных угловых и линейных колебаний) на интервале до 30 мин.

В настоящем докладе рассматриваются принципы построения и состав макета БИНС, а также средства отработочной позиции, обеспечивающей разработку и отработку аппаратного и программного компонентов макетов подобных БИНС.

В части алгоритмов рассматривается реализация только специфических задач БИНС, т.е. задач, связанных с моделированием инерциального базиса: 1) вычисление параметров ориентации; 2) пересчет кажущейся скорости из связанного базиса в навигационный.

Остальная часть навигационной задачи традиционна и решается так же, как для платформенных ИНС. Описываемый макет построен на основе лазерных гироскопов (ЛГ) разработки ПО "Завод Арсенал" (Киев), пьезорезонансных акселерометров и специализированного вычислительного устройства (СВУ) С-9118 разработки НПОА.

2. Алгоритмическое обеспечение макета БИНС

Одной из основных функциональных подсистем БИНС является бесплатформенная инерциальная система ориентации (БИСО). БИСО решает задачу численного интегрирования кинематических уравнений углового движения объекта. Входной информацией для БИСО являются показания датчиков угловой скорости (ЛГ), оси чувствительности которых жестко связаны с корпусом объекта. Выходная информация БИСО представляет собой параметры ориентации связанной с корпусом системы координат относительно инерциальной системы координат.

Из множества параметров, с помощью которых можно описать ориентацию связанного трехгранника относительно инерциального, использование

кватерниона параметров Родрига-Гамильтона представляется наиболее удобным.

Кватернионные уравнения представляют собой систему 4-х линейных дифференциальных уравнений и дополняются одним алгебраическим уравнением связи (нормированием). Параметры Родрига-Гамильтона в сравнении с другими параметрами значительно упрощают алгоритмы численного интегрирования кинематических уравнений и используются в большинстве современных БИНС.

После проведенного анализа методов численного интегрирования для данного типа движения был выбран классический метод 3-го порядка. Для объектов с таким типом движения БИНС имеет большие методические ошибки, не уменьшающиеся при повышении порядка метода, поэтому требуемая точность БИНС может быть достигнута не увеличением порядка метода, а уменьшением шага обработки информации. Для обеспечения требуемой точности вычислений достаточно иметь в СВУ 25-разрядное представление чисел с фиксированной запятой. При этом суммарные методические и вычислительные ошибки будут на порядок меньше инструментальных, как это принято при проектировании систем.

В задаче пересчета скорости использовался метод II порядка.

3. Специализированное вычислительное устройство (СВУ)

Прибор СВУ предназначен для высокоскоростного параллельного выполнения операций векторно-матричной алгебры. Это предопределяет архитектуру СВУ, состоящую из двух основных компонентов - векторного и скалярного процессоров. Векторный процессор представляет собой многопроцессорный спецвычислитель SIMD-типа (Single Instruction Multiple Data). Скалярный процессор представляет собой однопроцессорный спецвычислитель. Такая особенность архитектуры СВУ допускает возможность гибкого программирования алгоритмов БИНС. При этом алгоритмы БИНС, не требующие большого объема вычислений, но состоящие из операций, содержащих условные переходы (блоки контроля счета времени и входной информации), реализуются на скалярном процессоре параллельно с выполнением в векторном процессоре операций векторно-матричной алгебры. Система команд векторного процессора определяется одним потоком команд и несколькими потоками данных (максимально 9 - по числу процессоров в векторном процессоре), обрабатываемыми одновременно. Программирование хода вычислительного процесса позволяет привести алгоритмы БИНС, последовательно выполняемые в универсальной машине (перемножение матриц, кватернионов, умножение матрицы на вектор), к реализации их параллель-

но в векторном процессоре путем адаптации потока данных к архитектуре векторного процессора. При этом при программировании возможно подготовить поток данных, например, принять информацию датчиков, для следующих вычислений на фоне выполнения команд в векторном процессоре.

Векторный процессор состоит из 3-х процессорных секций, каждая из которых содержит три универсальных 16-разрядных микропроцессора, три умножителя "16x16" и локального ЗУ (ЛЗУ) емкостью 8К x 16. Все алгоритмы БИНС, по сути целиком состоящие из векторно-матричных вычислений, реализуются процессорными секциями. Скалярный процессор - адресная секция (название обусловлено основной выполняемой функцией - формирование адресов ПЗУ и ОЗУ) состоит из ОЗУ емкостью 32К x 16, ЗУ микропрограмм процессорной секции и блока обмена, обеспечивающего обмен СВУ с внешними системами. Адресная секция обеспечивает и координирует работу процессорных секций в цикле вычислений, записывает и считывает информацию из ЛЗУ и ОЗУ, формирует контрольные массивы в ОЗУ при сбоях входной информации с датчиков и массивы информационных параметров для контроля за ходом выполнения программы.

4. Задача отработки БИНС

В БИНС, в отличие от традиционных платформенных ИНС, инерциальные измерители углового движения и кажущейся скорости жестко связаны с корпусом изделия, и инерциальная система координат моделируется не физически, а математически в специализированном вычислительном устройстве. Это приводит к тому, что на отработку БИНС, в сравнении с платформенными ИНС, возлагается ряд дополнительных задач. Для стендовой отработки эти задачи связаны, в 1-ю очередь, с оценкой точностных характеристик БИНС.

Ошибки БИНС можно разделить на следующие классы: 1) ошибки, обусловленные влиянием типичных для всех инерциальных измерителей инструментальных погрешностей (постоянных составляющих "смещений нуля", ошибок масштабных коэффициентов, ошибок углов взаимной привязки осей чувствительности измерителей); 2) ошибки, обусловленные влиянием высокочастотных составляющих инструментальных погрешностей и специфическими характеристиками инерциальных измерителей БИНС; 3) методические ошибки алгоритмов БИНС; 4) ошибки, обусловленные дискретизацией выходной информации датчиков по уровню; 5) вычислительные ошибки БИНС.

Ошибки 1-го класса можно оценить расчетно-теоретическим путем, решая уравнения ошибок на заданных траекториях движения. Значения постоянных составляющих инструментальных погрешностей могут быть оценены

при автономных испытаниях блока датчиков БИНС.

Ошибки 3-го класса (методические ошибки алгоритмов) представляют собой ошибки численных методов интегрирования кинематических уравнений углового движения и пересчета информации о линейном движении из связанного базиса в навигационный. Эти ошибки, а также ошибки 4-го класса, можно оценить с помощью математического моделирования на универсальных ЭВМ. На этом же этапе обрабатываются и алгоритмы БИНС.

Ошибки 2-го и 5-го классов могут быть оценены только на этапе макетирования, который принципиально требует отработочной позиции. Ошибки 2-го класса относятся к так называемым "псевдоконическим" ошибкам и не могут быть оценены при автономных испытаниях датчиков. Высокочастотные ошибки измерений при испытании датчиков в режиме одноосных измерителей осредняются и не дают накапливающейся ошибки. Эти ошибки проявляются при испытаниях в составе системы и при интегрировании кинематических уравнений дают дополнительный "вычислительный уход". При достаточной амплитуде высокочастотного шума этот уход может быть соизмерим с постоянной составляющей инструментального ухода.

Вычислительные ошибки в БИНС требуют тщательной оценки уже на ранних этапах проектирования БИНС. Это связано с высокой частотой решения задач БИНС, приводящей к большому количеству вычислений с ограниченной разрядной сеткой за единицу времени. Расчетно-теоретические оценки вычислительных ошибок должны быть экспериментально подтверждены при работе с макетом реального СВУ в режиме с ПИМ и КД, который может быть реализован на той же отработочной позиции.

Таким образом, используя опыт стендовой отработки традиционных систем и учитывая специфику БИНС, можно выделить следующие задачи отработки БИНС: 1) отработка схемотехнических решений СВУ для БИНС; 2) отработка схемотехнических решений блока предварительной обработки информации БИНС; 3) разработка и отработка комплекта микропрограмм БИНС, оценка вычислительных ошибок; 4) стыковка инерциального измерительного блока (ИИБ), блока ПОИ и СВУ БИНС и отработка взаимодействия компонентов БИНС; 5) оценка точности БИНС при статических испытаниях; 6) оценка точности БИНС при динамических испытаниях.

Разработка и отработка различных типов БИНС имеют много общего. Поэтому целесообразно проводить разработку БИНС на предприятии одним коллективом разработчиков и иметь унифицированную отработочную позицию, адаптируемую к различным этапам создания БИНС и различным типам БИНС.

5. Средства отработки

Разработка штатного ПО СВУ выполнена с использованием настраиваемого макроассемблера и предварительно отработано на математической модели прибора. (Математической моделью является программа на языке ассемблера универсальной ЭВМ, текст которой получен после обработки макрогенератором текста исходной программы СВУ. Трансляция, построение и выполнение программы-модели выполняется на универсальной ЭВМ обычным образом.)

Требуемая отработка макета БИИС как с реальными датчиками, так и с программой имитации выполняется на единой отработочной позиции (ЕОП), которая создавалась как средство отработки аппаратно-программных компонент разрабатываемых СВУ и систем на их основе.

В основу требований к ЕОП были положены следующие основные принципы: 1) ЕОП должна обеспечивать отработку СВУ любой архитектуры, что требует наличия в ее составе, наряду с универсальной частью, средства настройки на обрабатываемые устройства; 2) ЕОП должна предоставлять средства для каждого этапа отработки СВУ (архитектуры, схемных решений, микропрограмм, программ и системы в целом).

Очевидно, что реализация перечисленных требований возможна при наличии в составе отработочной позиции управляющей вычислительной машины (УВМ), к которой подключаются обрабатываемые устройства. В качестве такой УВМ была выбрана IBM PC модели не ниже AT.

Первым этапом создания ЕОП является разработка аппаратно-программных средств системы ИНТЕР++. В ее основу положена разработка унифицированного интерфейса и языка отработки, обеспечивающих взаимодействие УВМ с объектом контроля (ОК), т.е. с обрабатываемым СВУ.

При разработке унифицированного интерфейса были учтены следующие требования: 1) возможность подключения значительного числа ОК, представляющих собой как обрабатываемые модули СВУ, так и устройства имитации внешней среды, используемые на этапе отработки системы; 2) возможность прерывания УВМ от ОК.

Аппаратная составляющая технологического интерфейса реализуется контроллером интерфейса ИНТЕР++. Контроллер собран на плате стандартного конструктива IBM PC и подключается к ее системному интерфейсу. Подключаемые к УВМ ОК либо сразу разрабатываются со схемными решениями, реализующими операции унифицированного интерфейса (как правило, это устройства имитации внешней среды), либо для них разрабатываются специальные адаптеры. Учитывая, что основные схемы управления интер-

файсом содержит контроллер, эти адаптеры малы по объему и не представляют какой-либо сложности для разработки.

При разработке языка обработки ИНТЕР++ преследовалась цель его использования для обработки СБУ как в интерактивном режиме, так и под управлением программ. Являясь предельно простыми, средства языка позволяют составлять достаточно сложные программы, обеспечивающие не только простую загрузку, выгрузку, тестирование ОК, но и моделирование работы отсутствующих модулей обрабатываемой системы.

Разработанный интерпретирующий транслятор языка обработки поддерживает строковые и числовые переменные, обеспечивая арифметические и логические операции с последними, и включает 5 типов команд: 1) команды управления работой транслятора; 2) команды настройки на конфигурацию обрабатываемого устройства; 3) базовые команды обмена с обрабатываемым устройством; 4) команды работы с двоичными файлами; 5) макрокоманды.

В составе программного комплекса ИНТЕР++ две подсистемы, оформленные в виде независимых процессов: а) подсистема непосредственного доступа к ОК. Используется для установки и контроля состояний ОК при их обработке; б) подсистема исполнения команд языка обработки. Обеспечивает функции редактирования и исполнения команд языка обработки.

Структура программного обеспечения первой очереди системы обработки ИНТЕР++



В последнем случае выполняет передачу на вход интерпретирующего транслятора либо отдельных команд, либо их последовательностей.

Направления дальнейшего развития системы обработки INTER++ определены требованиями сформулированными для ЕОП. Задачи, решение которых необходимо для реализации этих требований, известны и достаточно проработаны.

Средства обработки архитектуры СВУ.

Включают следующие подсистемы: 1) подсистему моделирования архитектуры СВУ, включающую средства ее описания; 2) подсистему ввода и редактирования архитектуры СВУ.

При этом драйвер подсистемы моделирования, поддерживающий на входе программный интерфейс нижнего уровня, обеспечивает один и тот же подход к отработке СВУ, как на уровне архитектуры, так и на уровне реальной аппаратуры (за исключением фактора времени).

Настраиваемый транслятор микроассемблера СВУ.

Под микроассемблером здесь понимается язык программирования в микрокомандах, широко используемый при программировании СВУ. Настройка транслятора должна осуществляться в двух уровнях: на систему микрокоманд СВУ и на их символическое написание, приемлемое программистом. Аналогичный подход реализует существующая система обработки микропрограмм, но при этом настраиваемый транслятор и эффективный макрогенератор являются различными продуктами.

Настраиваемый транслятор мета-ассемблера СВУ.

Необходимость разработки промежуточного языка определена необходимостью увязки двух взаимоисключающих требований. Со стороны языка высокого уровня предъявляется требование жесткого определения режимов адресации и набора инструкций СВУ. С другой стороны предъявляется требование к возможности настройки на заданную архитектуру СВУ. Настройка транслятора мета-ассемблера, реализующего эти требования, заключается в написании макроопределений, описывающих соответствие инструкций и макрокоманд промежуточного языка последовательностям команд или микрокоманд СВУ.

Транслятор с языка высокого уровня СВУ.

Характер разрабатываемого языка высокого уровня определяется характером использования СВУ, т.е. требует лишь вычислительного приложения. Транслятор должен осуществлять перевод исходных программ в программы на языке мета-ассемблера. Настройка транслятора должна включать разработку библиотечных процедур, обеспечивающих доступ к

оригинальным средствам СВУ, включая распараллеливание вычислений.

Построитель программного комплекса СВУ.

Загрузчик программного комплекса СВУ.

Отладчик программного комплекса СВУ.

Обработка систем на основе СВУ.

Обработка систем на основе СВУ предполагает одновременную работу средств обработки программ и средств управления устройствами имитации внешней среды. Функции средств управления заключаются в периодической подкачке данных в устройства имитации или непосредственно в СВУ. Здесь важным требованием является обеспечение работы комплекса в реальном времени.

Работа отработочной позиции в реальном времени обеспечивается как аппаратными, так и программными средствами. Известное аппаратное средство решения этой задачи – применение наладочных запоминающих устройств (НЗУ), которые в этом случае подключаются к УВМ через технологический интерфейс ИНТЕР++. При этом требуется аппаратная настройка только в части подключения НЗУ к каналам ввода данных в СВУ. Средства языка ИНТЕР++ обеспечивают все требования в части управления комплексной отработочной позицией, но не реализуют работу в реальном времени, т.к. интерпретатор не позволяет достичь высокой скорости. Решением этой задачи является разработка компилирующего транслятора, преобразующего программу с языка ИНТЕР++ непосредственно в программу, выполняемую на УВМ.

6. Результаты разработки и отработки макета БИНС

К настоящему моменту проведены: 1) выбор алгоритмов из созданного банка с помощью математического моделирования; 2) отработка и оценка точности выбранных алгоритмов; 3) разработка бортовых программ и их автономная и комплексная отладка с помощью средств ЕОП (объем штатного ПО составил более 2000 операторов при времени на отработку – около 30 рабочих дней); 4) автономная настройка СВУ и его стыковка с блоком датчиков; 5) оценка методических и вычислительных ошибок системы, получен результат по ошибке, эквивалентной скорости ухода моделируемого инерциального базиса, 0.01 "/с, что соответствует заданным требованиям; 6) статические испытания макета в целом. При тарировке лазерного гироскопа в одном запуске суммарная погрешность БИНС, эквивалентная уходу, не превышает 0.1 "/с.

В дальнейшем планируется проведение динамических испытаний.

Структура программного обеспечения системы обработки ИНТЕР++ в объеме, обеспечивающем все требования к ЕОП.

