

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ БИНС ДЛЯ ВЫСОКОМАНЁВРЕННЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2009 Л. В. Водичева¹, Л. Н. Бельский¹, О. И. Маслова¹, Н. А. Лукин²

¹ФГУП “НПО автоматики” им. Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург

²ИМаш УрО РАН, г. Екатеринбург, ФГУП “НПО автоматики” им. Н.А. Семихатова

Приводятся результаты работ по созданию малогабаритной прецизионной бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), работающей в экстремальных условиях. Основное внимание уделяется элементам методологии и технологии проектирования БИНС, которые были созданы как необходимый инструмент разработки. Предлагается новый подход к проектированию вычислителя БИНС, основанный на взаимной оптимизации алгоритмов и процессорных архитектур.

Бесплатформенная инерциальная навигационная система, кватернион, вектор Эйлера, методические и вычислительные погрешности, функционально-ориентированный процессор.

Введение

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) в сравнении с платформенными ИНС имеют преимущества в габаритно-массовых характеристиках, надёжности, прочности, технологичности. Они имеют, как правило, меньшее энергопотребление и время готовности. БИНС не накладывают ограничений на манёвр объекта, и в них значительно эффективней решается задача обеспечения работы системы при отказах измерительных приборов. Всё это создает предпосылки для эффективного использования БИНС в качестве инерциальных каналов навигационных систем различных подвижных объектов, особенно работающих в условиях жёстких механических воздействий.

Практическая реализация БИНС требует решения ряда научно-технических и технологических проблем. К ним относится, в первую очередь, создание датчиков угловой скорости и линейного ускорения, которые должны обеспечить заданную точность измерения в широком диапазоне измеряемых величин и в широком диапазоне частот углового и линейного движения. С этой проблемой связана проблема обеспечения точности начальной выставки и организации калибровки датчиков в штатных условиях.

Вторым ключевым моментом, на котором базируется практическая реализация БИНС, является создание систем обработки информации (СОИ), которые включают алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение. Уход от дорогостоящих электромеханических систем, физически моделирующих навигационный базис, оборачивается более сложными алгоритмами и гораздо более жёсткими требованиями к их реализации, то есть к производительности и точности вычислений в бортовых компьютерах. Разработка таких СОИ требует решения оптимизационных задач практически на каждом этапе.

Приведены результаты, которые представляют собой не только конкретные технические решения, но и элементы теории проектирования. Необходимость в разработке таких методов возникла в процессе создания перспективной малогабаритной прецизионной БИНС для высокоманёвренных подвижных объектов [1]. Суммарный уход моделируемой навигационной системы координат таких БИНС не должен превышать (3σ) 0,1 угл. сек/с (с оценкой возможности достижения 0,03 угл. сек/с); суммарная погрешность, эквивалентная ошибке измерения кажущегося ускорения (3σ), – $3 \cdot 10^{-5}$ g. При этом диапазон измеряемых угловых скоростей

составляет ± 400 °/с; диапазон измеряемых линейных ускорений ± 100 g; частотный спектр углового и линейного движений $0 \div 200$ Гц. К этому добавляется требование сохранения работоспособности в условиях прерывания электропитания.

Предложенные методы оптимального проектирования БИНС представляют собой лишь часть созданной в НПОА и ИМаш УрО РАН технологии и касаются ключевых моментов, связанных с выбором датчиков, разработкой алгоритмов и проектированием вычислительных средств.

Выбор датчиков

Одной из основных проблем, возникающих при разработке БИНС, является выбор чувствительных элементов. Чувствительные элементы должны удовлетворять целому набору требований: по точности, по надёжности, по отказоустойчивости, по условиям эксплуатации, по габаритно-массовым характеристикам, по стоимости. При этом очень важно корректно определить требования к точности. Их завышение может привести к неоправданно высокой стоимости блока чувствительных элементов либо невозможности найти подходящие по точности датчики в классе датчиков, удовлетворяющих требованиям условий эксплуатации и заданным габаритно-массовым характеристикам. Занижение сделает систему непригодной для выполнения основных задач. Задача определения требований к точности становится особенно актуальной, когда разработчиками системы и разработчиками датчиков являются разные организации.

При выработке требований к точности чувствительных элементов разработчиком системы решаются две задачи: выявляются составляющие модели погрешностей, влияние которых необходимо ограничивать, и, исходя из требуемой точности системы, определяются предельно допустимые значения этих составляющих. Для БИНС особую проблему составляют высокочастотные погрешности, которые приводят к накапливающейся ошибке системы. Именно эти погрешности и будут рассмотрены далее.

Один из типов таких погрешностей – ограниченность частотной полосы пропус-

кания датчиков угловой скорости (ДУС), характерная для электромеханических гироскопов, в частности, для роторного вибрационного гироскопа (РВГ), который относится к динамически настраиваемым гироскопам. По своим габаритно-массовым характеристикам, стойкости к механическим нагрузкам, потенциально достижимой точности, степени готовности к промышленному производству РВГ мог бы рассматриваться как ДУС для перспективных БИНС рассматриваемого класса. Однако при оценке возможности его использования необходимо учитывать ограниченность полосы пропускания, приводящую к накапливающейся погрешности определения ориентации при высокочастотных угловых колебаниях объекта. Эта погрешность в литературе рассматривается как один из типов “конических” ошибок [2].

Наиболее явно “конические” ошибки проявляются тогда, когда имеют место гармонические угловые колебания объекта по двум взаимно перпендикулярным осям с одной и той же частотой и с фазой, сдвинутой на $\pi/2$. В этом случае верхняя граница частотного диапазона измерения должна быть значительно выше (на практике в 5-10 раз), чем частота колебаний. В противном случае в предположении, что амплитудно-частотная характеристика ДУС такова, что при $f \leq F$ амплитуда синусоидального входного сигнала не искажается; при $f > F$ эта амплитуда равна нулю по оси, ортогональной осям колебаний; при этом имеет место уход, оценка максимальной скорости которого определяется соотношением [3]:

$$\delta\omega_z = \pi\theta^2 f, \quad (1)$$

где θ, f – соответственно амплитуда и частота угловых колебаний.

На практике использование оценок максимальных ошибок приводит, как правило, к завышенным требованиям к аппаратуре системы. Кроме того, применение чисто аналитических методов для оценки “конических” ошибок в большинстве случаев затруднено. В данном случае метод математического моделирования является незаменимым.

Описание математической модели для исследований влияния частотных характеристик датчиков на точность определения ориентации приведено в работе [4]. Модель ДУС в этих расчётах была представлена динамическим звеном, передаточная функция которого построена на основе амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, снятых экспериментально разработчиками РВГ как произведение колебательного и корректирующего звеньев.

Полоса пропускания по уровню 0,707 (для амплитудно-частотной характеристики) для рассматриваемого датчика составляла 40 Гц, резонансный пик – 1,3. Для датчиков с такими частотными характеристиками угловые колебания объекта даже с малой амплитудой по углу приводят к значительным погрешностям измерения угловой скорости. Эти погрешности имеют колебательный характер со средним значением, равным нулю. Однако при интегрировании кинематических уравнений углового движения они могут привести к ненулевому значению средней скорости ухода моделируемой в БИНС инерциальной системы координат (ИСК).

На рис. 1 приведена зависимость средней скорости ухода моделируемой ИСК от частоты при конических колебаниях с амплитудой 1 угл. град. и 10 угл. мин. В отличие от теоретической (1) эта зависимость имеет нелинейный характер, поскольку для реальных датчиков частотная характеристика не имеет вида ступенчатой функции со значениями 1 и 0, а представляет собой некоторую гладкую функцию, отображающую деградацию качества измерения с ростом частоты входного сигнала.

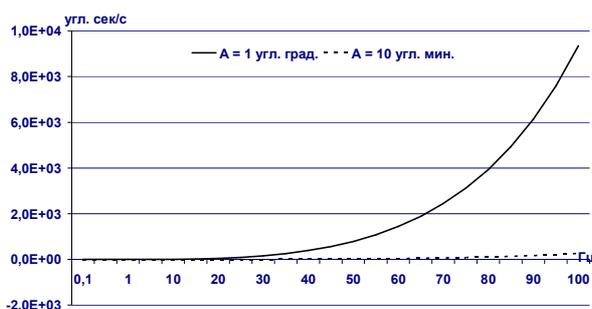


Рис. 1. Уход моделируемой ИСК из-за ограниченной полосы пропускания ДУСА

При конических угловых колебаниях с амплитудой 1 угл. град и частотой 1 Гц уход моделируемой ИСК составит 0,006 угл. сек/с, а при конических колебаниях с амплитудой 10 угл. мин. и частотой 40 Гц уход составит уже около 10,8 угл. сек/с, то есть на два порядка превысит требования к суммарному уходу ИСК – случай “недетектируемого конуса”. Для первого примера оценить аналитически эту погрешность было бы сложно, а для второго аналитическая оценка даёт среднюю скорость ухода, равную 200 угл. сек/с, что в 20 раз выше оценки, полученной с помощью моделирования. Таким образом, частотные характеристики (или, по крайней мере, их числовые параметры) должны регламентироваться при определении требований к датчикам. Отметим, что в современных БИНС предпочтение отдается гироскопам на новых физических принципах, имеющих практически неограниченную полосу пропускания.

Другим источником конических ошибок является квантование выходной информации ДУС по уровню. Средняя скорость ухода ИСК из-за этого фактора также может быть значительной и даже превышать требования к суммарной скорости ухода. Она зависит от цены дискрета (младшего разряда) по уровню выходной информации датчика, характеристик углового движения объекта, а также выбранного алгоритма, основными параметрами которого являются порядок метода численного интегрирования кинематических уравнений и длительность цикла обработки.

На рис. 2 приведены скорости ухода моделируемой ИСК $\delta\omega_{кв}$, обусловленной квантованием по уровню выходной информации ДУС. Эти скорости представлены на рисунке как функции от длительности цикла вычисления параметров ориентации при различных ценах дискрета по уровню выходной информации интегрирующего гироскопа. В качестве параметров ориентации использовался кватернион параметров Родрига-Гамильтона; в качестве метода численного интегрирования кинематических уравнений – классический метод III порядка [5]. Угловое движение моделировалось коническими ко-

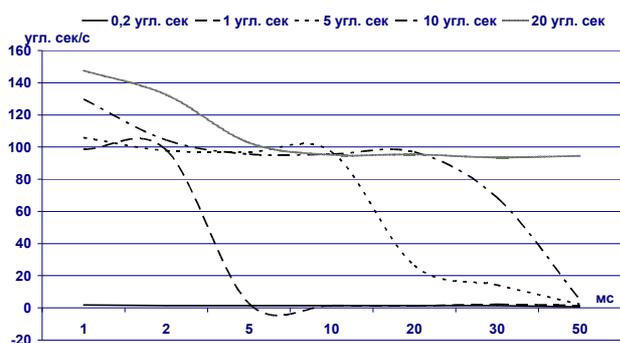


Рис. 2. Зависимость скорости дрейфа $\delta\omega_{кв}$ от длительности цикла

лебаниями с амплитудой 1 угл. град. и частотой 1 Гц. Как видно из рисунка, эта погрешность из-за квантования может на три порядка превышать требуемую суммарную скорость дрейфа. Это происходит в случаях, когда имеют место конические колебания и цена дискрета по уровню соизмерима с измеряемым гироскопом интегралом от угловой скорости за цикл съема. Скорость дрейфа моделируемой ИСК, обусловленная квантованием по уровню, уменьшается с увеличением длительности цикла обработки информации. Однако длительность цикла определяется методическими погрешностями алгоритмов ориентации и, в частности, при заданных амплитудно-частотных характеристиках углового движения должна быть не более 1-2 мс. В этом случае для обеспечения требуемой точности необходимо, чтобы цена младшего разряда выходной информации гироскопа составляла доли угловых секунд. Таким образом, цена дискрета по уровню выходной информации ДУС является важнейшей характеристикой датчика и должна быть определена на самых ранних этапах проектирования БИНС.

С этой точки зрения для БИНС рассматриваемого класса также наиболее подходящими оказываются гироскопы на новых физических принципах, в частности, лазерный и волоконно-оптический гироскопы. Однако ни тот, ни другой в отличие от классических механических гироскопов не способны сохранять информацию об угловой ориентации объекта в условиях отключения электропитания.

Наиболее перспективным с точки зрения использования в БИНС, требования к которой приведены выше, был признан волновой твердотельный гироскоп (ВТГ). При прочих достоинствах, которыми он обладает наряду с лазерным или волоконно-оптическим гироскопом, он сохраняет информацию при прерывании электропитания. Проведенные исследования показали, что отключение электропитания на несколько секунд может привести лишь к деградации точности вычисления ориентации до единиц угловых градусов, тогда как потеря информации об угловом движении за это время в наихудшем случае может привести к полной потере информации об ориентации объекта.

Создание алгоритмического обеспечения. Вычисление ориентации

Алгоритмическое обеспечение любой БИНС включает:

- 1) алгоритмы коррекции и контроля входной измерительной информации;
- 2) алгоритмы диагностики неисправных измерительных каналов и их комплексирование (при избыточном количестве измерителей);
- 3) алгоритмы вычисления параметров ориентации;
- 4) алгоритмы определения составляющих кажущейся скорости в навигационном базисе;
- 5) алгоритмы навигации (определение истинной скорости, координат и других параметров в соответствии с требованиями);
- 6) алгоритмы начальной выставки и калибровки;
- 7) алгоритмы комплексирования с внешними измерениями (при наличии таковых).

Алгоритмы коррекции, контроля входной информации БИНС и диагностики неисправностей определяются видом информации, поступающей с датчиков БИНС, и математической моделью ошибок датчиков. Алгоритмы начальной выставки и калибровки так же, как и алгоритмы комплексирования с внешними измерениями, составляют специальную задачу инерциальной навигации и требуют отдельного рассмотрения. Алгоритмы навигации в БИНС можно построить аналогично алгоритмам навигации в

платформенных ИНС. Эти алгоритмы для ИНС различного применения достаточно хорошо изучены, их реализация в бортовом вычислителе на современном этапе трудности не представляет.

Наибольшую трудность представляет собой реализация алгоритмов вычисления параметров ориентации и алгоритмов пересчёта составляющих кажущейся скорости из связанного базиса в навигационный (инерциальный). Эти алгоритмы инвариантны к типам датчиков БИНС. Их выбор определяется, прежде всего, видом углового и линейного движения объекта и требованиями к точности БИНС. Остановимся более подробно на вычислении параметров ориентации, реализуемых функциональной подсистемой БИНС – бесплатформенной инерциальной системой ориентации (БИСО). Именно БИСО и определяет, в основном, требования к вычислительным средствам, в частности, требования к частоте обработки и разрядности мантииссы.

В настоящее время проблема разработки алгоритмов интегрирования кинематических уравнений углового движения сводится к проблеме выбора элемента из достаточно большого и неупорядоченного множества алгоритмов, уже описанных в литературе и используемых на практике. Это часто приводит к принятию эвристических научно-технических решений, которые не всегда являются оптимальными. Вопросам построения алгоритмов БИСО и их оптимизации посвящено много работ ([5-7]). Тем не менее, разработчику алгоритмического обеспечения конкретной БИНС не так просто решить, какой алгоритм лучше и не нужно ли разработать свой.

Разработка алгоритмов БИСО начинается с выбора параметров, описывающих угловое положение связанной с подвижным объектом системы координат (ССК) относительно неподвижной в инерциальном пространстве системы координат (ИСК). В современных БИНС наиболее широко используются кватернионы параметров Родрига-Гамильтона, преимущества которых перед другими параметрами очевидны [5]. Кватернион представляет собой четырёхмерный

вектор $\Lambda = (\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)^T$, элементы которого являются функциями параметров Эйлера:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \cos \frac{\varphi}{2}, \quad \lambda_1 = r_1 \sin \frac{\varphi}{2}, \\ \lambda_2 &= r_2 \sin \frac{\varphi}{2}, \quad \lambda_3 = r_3 \sin \frac{\varphi}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где φ – угол истинного поворота, r_x, r_y, r_z – направляющие косинусы оси конечного поворота (одновременно в ССК и ИСК).

Кинематические уравнения для кватернионов имеют вид:

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \Omega, \quad \Lambda(0) = \Lambda_0, \quad (3)$$

где $\Omega = (0, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – кватернион составляющих вектора угловой скорости в ССК, \circ – операция перемножения кватернионов.

Угловая скорость в прецизионных БИНС и БИНС средней точности измеряется, как правило, однократно интегрирующими датчиками угловой скорости [6]. В этом случае входной информацией алгоритмов вычисления параметров ориентации являются составляющие приращения угла кажущегося поворота в осях связанной системы координат за цикл съёма информации с ДУС:

$$\Delta \theta_i^p = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \omega^p dt, \quad p=x,y,z. \quad (4)$$

Цикл съёма информации i может не совпадать с циклом расчёта кватерниона n .

Методы численного интегрирования уравнения (3) основаны на рекуррентной процедуре вычислений

$$\Lambda_n = \Lambda_{n-1} \circ \Gamma_n, \quad \Lambda_0 = \Lambda(0), \quad (5)$$

где Γ_n – кватернион, описывающий поворот ССК за цикл вычисления. Они различаются методами вычисления Γ_n , т.е. методами численного интегрирования уравнения

$$\dot{\Gamma} = \frac{1}{2} \Gamma \circ \Omega, \quad \Gamma(0) = (1, 0, 0, 0)^T \quad (6)$$

на шаге вычисления кватерниона $[t_{n-1}, t_n]$.

При построении известных методов численного интегрирования уравнения (6) наиболее часто используются два подхода: метод последовательных приближений Пикара [8], применяемый непосредственно к уравнению (6), и введение вектора Эйлера (вектора ориентации) в качестве промежуточного параметра.

Применение метода Пикара непосредственно к уравнению (6) позволяет представить решение этого уравнения в виде ряда

$$\Gamma(t) = 1 + \frac{1}{2} \int_{t_{n-1}}^t \Omega(\tau) d\tau + \frac{1}{4} \int_{t_{n-1}}^t \left(\int_{t_{n-1}}^{\tau} \Omega(\tau_1) d\tau_1 \right) \circ \Omega(\tau) d\tau + \dots, \quad t \in [t_{n-1}, t_n], \quad (7)$$

на основе которого строятся методы численного интегрирования различных порядков

[5]. Интерполируя $\mathcal{G}(t) = \int_{t_{n-1}}^t \Omega(\tau) d\tau$ внутри

шага интегрирования $[t_{n-1}, t_n]$ полиномами, можно получить классические методы соответствующих порядков (модифицированные методы Эйлера), различающиеся формулами

для вычисления $\Gamma_n = (\gamma_{0,n}, \gamma_{1,n}, \gamma_{2,n}, \gamma_{3,n})$.

Эти методы с точностью до величин, порядок малости которых выше порядка малости локальной ошибки соответствующего метода относительно шага вычислений, могут быть получены и на основе использования в промежуточных расчётах вектора Эйлера.

При построении конкретного алгоритма вычисления ориентации на базе метода Пикара необходимо определить порядок метода и длительность цикла съёма и обработки информации. Эти параметры обычно выбираются исходя из обеспечения требуемого уровня методических ошибок. Методические ошибки представляют собой ошибки метода численного интегрирования в предположении идеальной реализации вычислений. Для тестирования алгоритмов используется коническое движение, представляющее собой суперпозицию постоянного вращения и

конических колебаний. При таком движении методические ошибки алгоритмов максимальны [3].

Методические ошибки вычисления кватерниона приводятся к двум составляющим: средней скорости дрейфа (ухода) моделируемой ИСК и ошибке нормы кватерниона, которая физически эквивалентна ошибке масштабного коэффициента трёхосного измерителя линейного ускорения. Для высокодинамичных подвижных объектов наиболее сложно обеспечить требуемую скорость ухода. Причиной этого также являются “конические ошибки”, которые в данном случае возникают из-за погрешности численного интегрирования кинематических уравнений.

На рис. 3 приведена средняя скорость ухода моделируемой ИСК, обусловленная методическими погрешностями алгоритмов (в предположении отсутствия квантования по уровню выходной информации ДУС), в зависимости от длительности цикла обработки для классических методов II, III и IV порядков. Угловое движение моделировалось коническими колебаниями с амплитудой 1 угловой градус и частотой 1 Гц. Как видно из рис. 3, методические ошибки могут быть уменьшены увеличением порядка метода либо уменьшением длительности цикла обработки. При конических колебаниях для обеспечения требуемого уровня ухода необходимо, чтобы при методе третьего порядка частота обработки была в 5-15 раз выше частоты колебаний.

Однако на практике квантование по уровню выходной информации ДУСов не позволяет добиться минимума методической ошибки за счет уменьшения длительности цикла обработки. На рис. 4 приведена средняя скорость ухода моделируемой ИСК, обусловленная двумя факторами: методическими погрешностями алгоритмов и квантованием выходной информации ДУС по уровню для тех же самых алгоритмов и того же углового движения объекта, при которых получены результаты моделирования, представленные на рис. 3. Цена дискрета по уровню принималась равной 0,2 угл. сек. Как видно из рис. 4, даже такая малая цена дискрета значительно ухудшает суммарную точность.

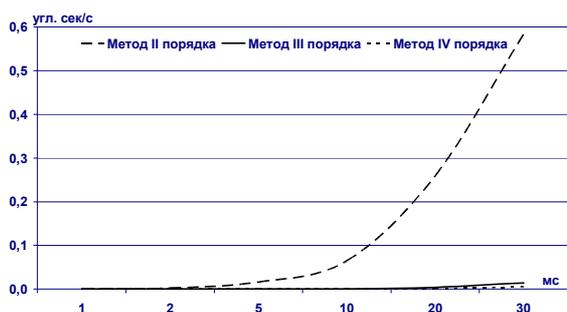


Рис. 3. Скорость ухода из-за методических погрешностей алгоритмов (без учета квантования выходной информации ДУСов)

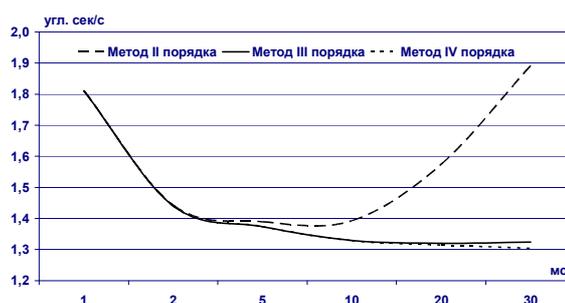


Рис. 4. Скорость ухода из-за методических погрешностей при цене дискрета выходной информации ДУСа 0,2 угл. сек

Задачу минимизации методических ошибок за счёт выбора порядка метода и длительности цикла обработки необходимо рассматривать в условиях ограничений, задаваемых ценой дискрета выходной информации ДУСа по уровню. Кроме того, и увеличение порядка метода, и увеличение частоты обработки информации приводят к увеличению вычислительных ошибок алгоритмов.

Минимизация только методических ошибок без учета особенностей реализации алгоритмов может привести к тому, что возрастёт влияние на точность другого класса погрешностей – вычислительных (погрешности реализации в бортовом вычислителе методов численного интегрирования). Уменьшение вычислительных погрешностей возможно за счёт увеличения длины разрядной сетки для представления чисел и применения более сложных численных методов компьютерной арифметики, то есть за счет увеличения аппаратно-временных затрат.

Таким образом, выбор алгоритма без учёта особенностей его реализации может не дать желаемого результата. Поэтому был разработан метод, позволяющий выбрать оптимальное соотношение длительности шага интегрирования кинематических уравнений и длины разрядной сетки процессора при заданных требованиях к уровню суммарной погрешности, при известных амплитудно-частотных характеристиках углового движения объекта и при выбранном методе численного интегрирования [9]. Рис. 5 и 6 на-

глядно иллюстрируют этот метод для алгоритма III порядка. В качестве оценок вычислительного и методического дрейфа использованы средние значения скорости дрейфа моделируемой ИСК на классе критических угловых движений.

На рис. 5 приведена зависимость суммарной (методической и вычислительной) ошибки при вычислениях с 40 разрядами. Как видно из рисунка, эта зависимость имеет явно выраженный минимум. При увеличении числа разрядов этот минимум сдвигается в сторону уменьшения длительности цикла. На рис. 6 приведена минимальная суммарная ошибка в зависимости от длительности цикла и соответствующее ей количество разрядов. При вычислениях с 48 разрядами минимальная ошибка составляет 0,01 угл. сек/с. Если исходить из того, что ошибки обработки информации должны быть на порядок меньше инструментальных, для прецизионных БИНС этого явно недостаточно.

Заметно (на 2-3 порядка) снизить вычислительные погрешности при том же уровне методических позволяет использование в качестве промежуточных параметров ориентации вектора Эйлера. Этот приём широко используется как в теоретических исследованиях, так и на практике. Взаимное угловое положение двух произвольных систем координат может быть описано единственным поворотом вокруг некоторой оси. Вектор Эйлера и представляет собой трёхмерный вектор, описывающий этот поворот:

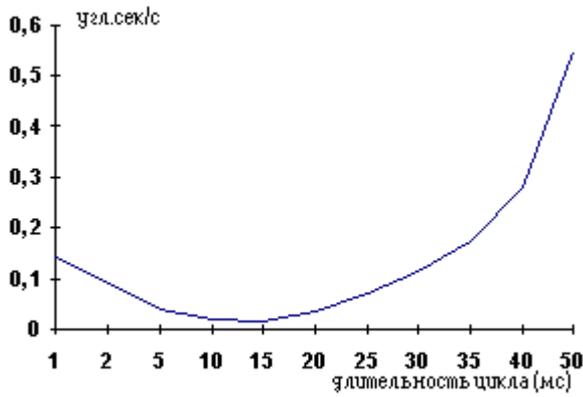


Рис. 5. Зависимость суммарной ошибки от длительности цикла

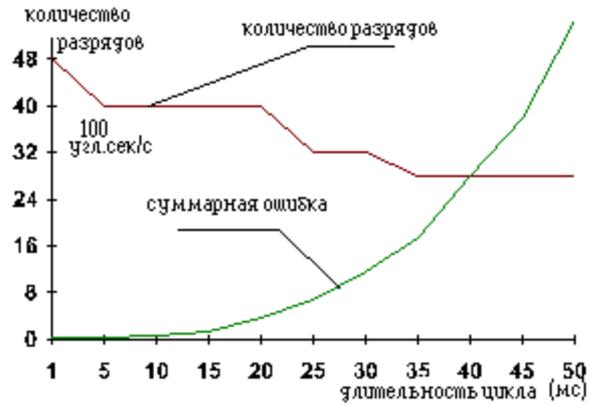


Рис. 6. Минимальная суммарная ошибка и соответствующее ей число разрядов

$$\begin{aligned} \vec{\varphi} &= (\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)^T, \\ \varphi_p &= r_p \cdot \varphi, \quad p=x,y,z, \\ \varphi^2 &= \varphi_x^2 + \varphi_y^2 + \varphi_z^2, \end{aligned} \quad (8)$$

где φ – величина угла поворота; r_x, r_y, r_z – направляющие косинусы оси поворота в обеих системах координат.

Кинематическое уравнение для вектора Эйлера имеет вид [5]:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{\varphi}} &= \vec{\omega} + \frac{1}{2} \vec{\varphi} \times \vec{\omega} + \frac{1}{\varphi^2} \left(1 - \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{\sin \varphi}{1 - \cos \varphi}\right) \vec{\varphi} \times (\vec{\varphi} \times \vec{\omega}), \\ \vec{\varphi}(0) &= \vec{\varphi}_0. \end{aligned} \quad (9)$$

Это уравнение решается внутри шага вычисления кватерниона с более мелким шагом. Затем с помощью соотношений (2) вычисляется кватернион. Множество синтезируемых таким образом алгоритмов даже при фиксированном порядке точности, который определяется представлением погрешности на шаге интегрирования степенью от величины шага, существенно возрастает и требует упорядочения.

Известная из литературы оптимизация алгоритмов сводится, чаще всего, к минимизации методических ошибок на заданном классе угловых движений. Поэтому полученные таким образом алгоритмы не являются универсальными и значительно теряют в точности при переходе к произвольному угловому движению. Важные с точки зрения практической реализации попытки миними-

зировать вычислительные затраты сводятся к уменьшению количества операций на шаге вычислений, а процедура оптимизации – к перебору алгоритмов [7]. В связи с этим разработан другой подход, основанный на совместной оптимизации алгоритмов и архитектур бортового вычислителя, реализующего задачи БИНС. Он позволяет описать множество алгоритмов вычисления ориентации, использующих кватернион в качестве хранителя инерциального базиса, формальными параметрами и упростить процедуру выбора алгоритма [10]. Это множество включает и описанные выше алгоритмы вычисления кватерниона, полученные непосредственным применением метода последовательных приближений Пикара к уравнению (3).

Этот подход и разработанные методики оптимизации были использованы для определения базового алгоритма, обеспечивающего минимальную суммарную погрешность обработки информации при заданных амплитудно-частотных характеристиках углового движения. Этим алгоритмом оказался алгоритм Сэведжа [3]:

$$\begin{aligned} \vec{\varphi}_i &= \vec{\varphi}_{i-1} + \Delta \vec{\vartheta}_i + \frac{1}{2} (\vec{\vartheta}_{i-1} + \frac{1}{6} \Delta \vec{\vartheta}_{i-1}) \times \Delta \vec{\vartheta}_i, \\ \vec{\vartheta}_0 &= 0, \quad \vec{\varphi}_0 = 0, \quad i = 1, 2 \dots I, \quad \vec{\varphi}_n = \vec{\varphi}_I, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta \vec{\vartheta}_i = (\Delta \vartheta_i^x, \Delta \vartheta_i^y, \Delta \vartheta_i^z)^T$; $\vec{\vartheta}_i = \sum_{k=1}^i \Delta \vec{\vartheta}_k$; i – шаг вычисления вектора Эйлера внутри шага вычисления кватерниона n .

Варьируя параметрами алгоритма Сэведжа, можно эффективно уменьшать методические и вычислительные погрешности. Этот алгоритм наряду с базовым алгоритмом вычисления кажущейся скорости послужил основой для разработки алгоритмической смеси эталонной задачи при проектировании архитектуры функционально-ориентированного процессора, созданного для реализации алгоритмов БИНС.

Функционально-ориентированный процессор

Функционально-ориентированный процессор (ФОП) является одним из ключевых компонентов СОИ. Существующий уровень микроэлектроники позволяет создавать необходимые вычислительные средства полностью в виде СБИС. Ограничения и специфика интегральной технологии требуют оптимизации, основанной на взаимном учете особенностей алгоритмов и средств их реализации.

Под эффективным вычислителем для БИНС будем понимать наиболее экономичный при заданном быстродействии или наиболее быстродействующий при заданных затратах.

На первом этапе находятся оценки пространственного (аппаратного) L_h и временного L_t компонентов сложности базовых алгоритмов БИНС, под которыми понимается соответственно число элементов в предполагаемой схеме, реализующей алгоритм, и задержка при прохождении информации в схеме от момента начала поступления входных данных до момента появления на выходах схемы последних битов выходных данных [10]. Анализ этих оценок позволяет выявить пути оптимизации сложности вычислений в базовых алгоритмах и даёт основу для целенаправленного выбора архитектур ФОП.

Далее определяются базовые вычислительные процедуры, исчерпывающим образом представляющие алгоритмы БИНС; разрабатываются принципы построения архитектур процессорных элементов (ПЭ), эффективно реализующих базовые вычислительные процедуры, и принципы построения специализированных процессоров, состоящих

из совокупности ПЭ и эффективно реализующих уже алгоритмы БИНС [11]. Наиболее часто используемой в алгоритмах является

операция вида $f = \sum_{j=1}^J \prod_{i=1}^I a_{i,j}$. На основе

функционально-стоимостного анализа возможных архитектур ПЭ выяснено, что одной из наиболее рациональных является архитектура, основанная на однократном и параллельном выполнении сложения и умножения и имеющая четырёхпортовую оперативную память.

Затем рассматриваются принципы оптимального распараллеливания вычислений в алгоритмах БИНС. Использовано представление алгоритмов Сэведжа в виде графов с максимальной ярусно-параллельной формой с последующим их ДН-синтезом [12]. Синтез, в свою очередь, основан на направленном изменении ширины и высоты графа и на взвешивании его вершин оценками временной и аппаратной сложности в базисе схем из функциональных элементов СБИС. Оказалось, что алгоритмы БИНС имеют значительный внутренний параллелизм, наиболее эффективно использующийся на архитектурах с числом ПЭ, кратным трём.

Архитектура ФОП на базе вышеописанного процессорного ядра приведена на рис. 7. На рисунке КВВ – каналы ввода/вывода; РОН – регистры общего назначения; АЛУ – арифметико-логическое устройство; УМН – умножитель; КОММ – коммутатор; МПУУ – микропрограммное устройство управления. Для этой архитектуры была разработана функционально-логическая схема процессорного элемента, на базе которой проведена полномасштабная разработка экспериментального образца ФОП.

Блоки ФОП работают под управлением отдельных полей одной микрокоманды, поэтому возможна их параллельная работа. Кроме того, 4-адресный блок РОН позволяет параллельно вести запись/чтение информации по шинам данных. В архитектуре ФОП реализовано отдельное управление всеми блоками в рамках одной микрокоманды, поэтому её разрядность сравнительно невелика, она равна 112 битам. Почти все арифме-

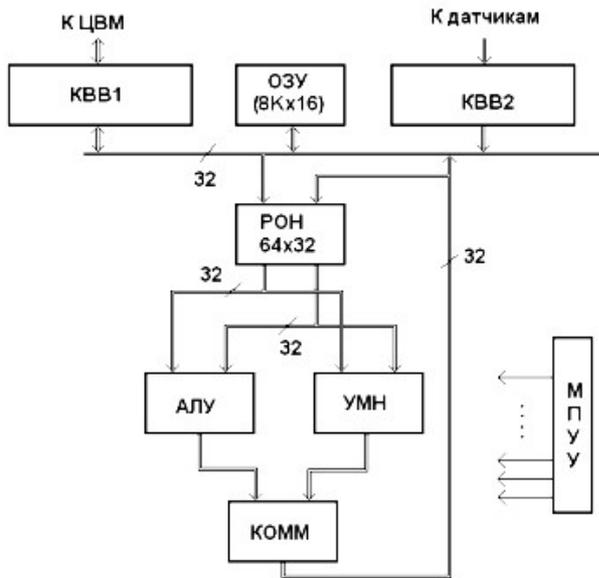


Рис. 7. Архитектура ФОП

тические операции выполняются за 1-2 такта, что позволяет отнести архитектуру описываемого ФОП к классу RISC.

Проведён сравнительный анализ архитектуры разработанного ФОП с архитектурами современных процессоров, использование которых в разрабатываемых отечественных БИНС либо уже началось, либо предполагается. Критерием такого сравнения явилось время реализации алгоритмов БИНС, которое является аналогом временной сложности L_t на уровне алгоритмов в целом. При этом было учтено, что различие в физическом времени вычислений обусловлено, в первую очередь, различием в тактовой частоте процессоров, что не даёт возможности корректно сравнивать различные архитектуры. Для оценки эффективности архитектур время решения задачи измерялось не в физических единицах (секундах), а в условных (тактах). Соответственно этому производительность, представляющую собой величину, обратно пропорциональную времени решения задачи, целесообразно назвать для физического времени аппаратной производительностью R_{hard} ; для условного времени – архитектурной производительностью и измерять её в величинах, обратных количеству условных тактов $[1/\tau]$.

Исследование архитектур микропроцессоров носило экспериментальный характер, и основным методом исследований явилось программирование алгоритмов на реальных образцах процессоров либо на их программных эмуляторах. Методика и результаты этих исследований описаны в [13]. В качестве исследуемых, кроме разработанного ФОП (FOP 1843), были выбраны распространённые архитектуры, используемые для реализации алгоритмов БИНС:

- архитектура MIPS-32, в качестве реального образца которой взят микропроцессор 1B812, использующийся как центральный бортовой процессор в отечественной бортовой ЦВМ “Багет-83”;

- архитектура сигнального процессора NM6403, использующая в своем составе два процессорных ядра. Исследование эффективности данной архитектуры было произведено на реальном микропроцессоре 1879BM1;

- гарвардская архитектура сигнального процессора с отдельными магистралями команд/данных. Одним из наиболее известных в мире представителей такой архитектуры является 1867BM3 (аналог TMS320C30).

На рис. 8 приведены результаты оценки архитектурной производительности перечисленных микропроцессоров. Как видно из рисунка, максимальной архитектурной производительностью обладает FOP 1843. При равенстве тактовых частот рассмотренных процессоров этот ФОП кроме архитектурной имел бы и максимальную аппаратную производительность.

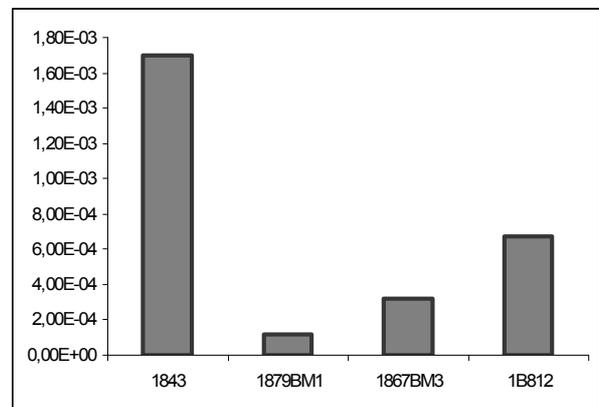


Рис. 8. Архитектурная производительность исследованных процессоров

Заключение

Проектирование малогабаритной прецизионной БИНС, работающей в жёстких механических условиях, требует системного подхода и оптимизации, направленной на реализацию взаимоисключающих требований: высокой точности, малых габаритов и приемлемой стоимости как на уровне БИНС в целом, так и при разработке и выборе её компонентов. При задании технических требований к датчикам необходимо регламентировать не только основные точностные характеристики, но и те характеристики, которые в определённых условиях эксплуатации могут приводить к накапливающимся погрешностям, в частности, амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики датчиков. На разработку и оптимизацию алгоритмов существенные ограничения накладывает вид выходной информации датчиков: квантование информации по уровню может привести к ошибке, существенно превышающей как остальные ошибки обработки информации, так и остальные инструментальные погрешности измерительных приборов. Вычислитель обеспечивает максимальную производительность либо минимальные аппаратные затраты, если его разработка основана на совместной оптимизации алгоритмов и архитектур.

Предложенные подходы и методы позволяют разрешить эти проблемы и найти оптимальные решения для любой БИНС. Их эффективность была подтверждена как на этапе математического моделирования, так и в процессе экспериментальной отработки, в частности, в составе аппаратно-программного имитатора БИНС, в котором был использован реальный функционально-ориентированный процессор для БИНС.

Работа поддержана Программой Президиума РАН №2 “Интеллектуальные информационные технологии, математическое моделирование, системный анализ и автоматизация” (Направление 3. Вычислительные технологии и системы).

Библиографический список

1. Belsky, L., Vodicheva, L., Maslova, O., Lookin, N., Ponomarev, Ig., Tolstikhina, L., Filimonov, A., Busygin, A. A Small Size Precise

SINS for High Maneuvering Moving Vehicles: Optimal Design and Practical Results // The 10th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 26-28, 2003.

2. Craig, R G. Dynamically tuned gyros in Strapdown systems. AGARD Conference on Inertial Navigation Computes and Systems. Florence, Italy, October 1972.

3. Savage, P G. Strapdown System Performance Analysis / Advances in Navigation Sensors and Integrating Technology. RTO Lecture Series 232 (2004), St Petersburg. Russia. May, 2004.

4. Vodicheva, L., Maslova, O. Estimation of AHRS Errors Caused by Sensor Bandwidth / / The 15th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 26-28, 2008.

5. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. - М.: Наука, 1973. – 320 с.

6. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. - М.: Наука, 1992 – 280 с.

7. Панов А.П. Математические основы теории инерциальной ориентации. - Киев: Наукова думка, 1995. – 280 с.

8. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. /Пер. с немецкого. - М.: Наука, 1971 – 576 с.

9. Vodicheva, L., Maslova, O. Computational Errors of Strapdown Inertial Navigation Systems, The 2nd Saint Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation, Part II, May 24-25, 1995.

10. Vodicheva, L, Lukin, N. Formalized AHRS Algorithm Representation As a SINS CAD Unit, The 3rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Part II, May 28-29, 1996.

11. Лукин Н.А. Функционально-ориентированные процессоры для реализации алгоритмов БИНС// Гиропскопия и навигация. – 2001. – № 2 (33).

12. Лукин Н.А. Функционально-ориентированные процессоры для систем реального времени: основные понятия, история

развития, элементы теории проектирования // Высокпроизводительные вычислительные системы. Материалы Четвертой молодежной школы. – Таганрог, Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – С. 98 – 124.

13. Лукин Н.А., Водичева Л.В., Пономарев И.Г. Принципы оптимального проектирования БИНС: функционально-стоимостной анализ реализации алгоритмов// Гироскопия и навигация. – 2005. – № 4 (51).

References

1. Belsky, L., Vodicheva, L., Maslova, O., Lookin, N., Ponomarev, Ig., Tolstikhina, L., Filimonov, A., Busygin, A. A Small Size Precise SINS for High Maneuvering Moving Vehicles: Optimal Design and Practical Results // The 10th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 26-28, 2003.

2. Craig, R G. Dynamically tuned gyros in Strapdown systems. AGARD Conference on Inertial Navigation Computes and Systems. Florence, Italy, October 1972.

3. Savage, P G. Strapdown System Performance Analysis / Advances in Navigation Sensors and Integrating Technology. RTO Lecture Series 232 (2004), St Petersburg. Russia. May, 2004.

4. Vodicheva, L., Maslova, O. Estimation of AHRS Errors Caused by Sensor Bandwidth // The 15th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, May 26-28, 2008.

5. Branetz V., Shmyglevsky Ig. Use of Quaternions in Rigid Body Problems. M.: Science, 1973. – 320 p. (in Russian).

6. Branetz V., Shmyglevsky Ig. Strapped-down Inertial Navigation Systems (Introduction to the theory). M.: Science, 1992 – 280 p. (in Russian).

7. Panov A. Mathematical Fundamentals of Inertial Orientation Theory. Kiev: Naukova Dumka, 1995. – 280 p (in Russian).

8. Kamke E. Reference Book on Ordinary Differential Equations. Translated from German. M.: Science, 1971 – 576 p. (in Russian).

9. Vodicheva, L., Maslova, O. Computational Errors of Strapdown Inertial Navigation Systems, The 2nd Saint Petersburg International Conference on Gyroscopic Technology and Navigation, Part II, May 24-25, 1995.

10. Vodicheva, L, Lukin, N. Formalized AHRS Algorithm Representation As a SINS CAD Unit, The 3rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Part II, May 28-29, 1996.

11. Lukin N. Functional-Oriented Processors for Realizing SINS Algorithms// Gyroscopy and Navigation. – 2001. – № 2 (33) (in Russian).

12. Lookin, N. Functional-oriented processors for real-time systems: main categories, history, elements of design theory. // High-performance computer systems // Proceedings of the IVth science school. – Taganrog, TTI Publishers, 2007. – 98 – 124 pp. (in Russian).

13. Lukin N., Vodicheva L., Ponomarev Ig. A Miniature Precise SINS for High Maneuvering Moving Vehicles: Cost Efficiency Analysis for Algorithm // Gyroscopy and Navigation. – 2005. – № 4 (51).

OPTIMAL DESIGNING OF PRECISION SMALL-SIZE NON-PLATFORM INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS FOR HIGHLY MANOEUVRABLE MOVING OBJECTS

© 2009 L. V. Vodicheva¹, L. N. Belsky¹, O. I. Maslova¹, N. A. Lukin²

¹Federal State Unitary Enterprise Science-and-Production Association of Automation named after N. A. Semikhatov, Yekaterinburg

²Institute of Machine Science, Ural department of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Federal State Unitary Enterprise Science-and-Production Association of Automation named after N. A. Semikhatov

The paper presents the results of work on creating a small-size precision non-platform inertial navigation system (NINS) operating under extreme conditions. Special attention is given to elements of methodology and

process of designing NINS that were created as a necessary development tool. A new approach to designing NINS calculator is proposed, based on mutual optimization of algorithms and processor architectures.

Non-platform inertial navigation system, quaternion, Euler vector, methodical and computational errors, function-oriented processor.

Информация об авторах

Водичева Лариса Валентиновна, старший научный сотрудник, ФГУП “НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова”. Область научных интересов: алгоритмы инерциальных навигационных систем, бесплатформенные инерциальные навигационные системы, начальная выставка и калибровка ИНС. E-mail: lvodicheva@yandex.ru.

Бельский Лев Николаевич, кандидат технических наук, заместитель директора по ракетно-космической технике, ФГУП “НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова”. Область научных интересов: системы управления, наведения и навигации, инерциальные навигационные системы, начальная выставка и калибровка ИНС.

Маслова Ольга Ивановна, ведущий инженер-программист, ФГУП “НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова”. Область научных интересов: алгоритмы бесплатформенных инерциальных навигационных систем, алгоритмы начальной выставки и калибровки ИНС.

Лукин Николай Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт машиноведения Уральского отделения РАН. Область научных интересов: функционально-ориентированные процессоры, параллельные вычисления, сверхбольшие интегральные схемы, компьютерная арифметика, сложность вычислений. E-mail: nicklookin@mail.ru.

Voditcheva, Larisa Valentinovna, senior researcher, Federal State Unitary Enterprise Science-and-Production Association of Automation named after N. A. Semikhatov. Area of research: algorithms of inertial navigation systems, non-platform inertial navigation system, initial adjustment and calibration of INSs. E-mail: lvodicheva@yandex.ru.

Belsky, Lev Nikolayevitch, deputy director on space-rocket engineering, candidate of technical science, Federal State Unitary Enterprise Science-and-Production Association of Automation named after N. A. Semikhatov. Area of research: systems of control, guidance and navigation, inertial navigation systems, initial adjustment and calibration of INSs. E-mail: lvodicheva@yandex.ru.

Maslova, Olga Ivanovna, leading programming engineer, Federal State Unitary Enterprise Science-and-Production Association of Automation named after N. A. Semikhatov. Area of research: algorithms of non-platform inertial navigation systems, algorithms of initial adjustment and calibration of INSs. E-mail: lvodicheva@yandex.ru.

Lukin, Nikolay Alexeyevitch, head of laboratory, candidate of technical science, senior researcher, Institute of Machine Science, Ural department of the Russian Academy of Sciences. Area of research: function-oriented processors, parallel computations, very large-scale integrated circuits, computer arithmetic, complexity of computations. E-mail: nicklookin@mail.ru.