

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Н.А.Греков, М.Н.Котов

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: [ocean@mhi2.sevastopol.ua](mailto:ocean@mhi2.sevastopol.ua)

*Сделан анализ существующих интегральных акселерометров и гироскопов, которые затем использовались в инерциальной навигационной системе. Приведены структурные схемы инерциальной навигационной системы и алгоритма обработки первичной навигационной информации. Дана система уравнений и разработана блок-схема программы обработки, которая была реализована в среде Borland C++ Builder 6.0. Приведен набор функциональных возможностей разработанной программы*

В настоящее время в океанографии очень актуальным стала проблема решения задачи определения текущих значений навигационных координат измерительных гидрофизических приборов.

Типовая измерительная система включает в себя измерительный прибор, закрепленный на несущем тросе, простирающемся от носителя (борта судна, поверхностного или подповерхностного буя) до конечного элемента (якоря, груза или измерительного устройства) [1].

Связи, наложенные на элементы этих систем одним или несколькими тросами, допускают перемещения элементов перечисленных систем в ограниченных участках пространства.

Применяемые в океанографических исследованиях измерительные приборы фиксируются относительно несущего троса путем включения в разрыв этого троса или закрепления на кронштейне в стороне от него. Различия конструкций подвески соответствуют изменениям характера связей и числа степеней свободы измерительного прибора относительно несущего троса.

Оценки границ диапазона временных масштабов и скоростей возможных перемещений из имеющихся экспериментальных данных могут быть определены следующим образом. Характерные периоды движения несущих буюв измерительных

систем составляют 1.5, 3.2, 6 и 12 часов, а скорости этих движений лежат в пределах от 0.02 м/с до 0.3 м/с. Высокочастотные движения измерительных приборов позволяют определить нижние пределы диапазона временных масштабов возможных перемещений измерителей величинами порядка единиц секунд. Таким образом диапазон временных масштабов возможных перемещений блока измерителей может быть ограничен пределами  $(10^0 \div 10^5)$  с, а диапазон скоростей – пределами  $(0.02 \div 0.3)$  м/с.

Учитывая тот факт, что габариты и электропотребление измерительного прибора обычно очень ограничены, проектируемая навигационная система должна соответствовать следующим параметрам: быть малогабаритной, малопотребляющей, недорогой.

Оснащение приборов инерциальными навигационными системами призвано обеспечить компенсацию ошибок блока измерителей при его перемещении в толще воды в диапазоне от сантиметров до нескольких тысяч метров, с периодами от нескольких секунд до десятков часов и со скоростями от единиц до сотен сантиметров в секунду.

Проведенный анализ существующих производителей датчиков для инерциальных навигационных систем выявил, что наиболее перспективны для этой цели навигационные системы, построенные с применением поверхностных интегральных акселерометров и гироскопов от компании Analog Devices [2, 3]. Эту систему можно использовать в качестве автономной навигационной системы, которая позволяет обеспечить навигацию даже без применения специальных алгоритмов в течение нескольких десятков минут при сохранении достаточно высокой ее точности.

На рисунке 1 для примера приведены временные интервалы остаточной скорости ухода гироскопов различных типов.

Как и было указано выше, интегральные датчики без учета специфики работы измерительных блоков и без применения специальных алгоритмов имеют весьма высокую скорость ухода от истинного значения. Однако при использовании этих датчиков в качестве узлов автономной навигационной системы с учетом особенностей применяемых измерительных блоков гидрофизических приборов позволяет значительно улучшить характеристики этих навигационных систем.

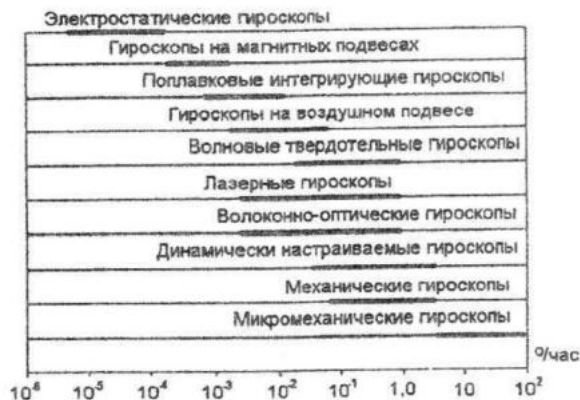


Рис. 1 – Остаточная скорость ухода гироскопов различных типов

На основании сделанных выводов в отделе автоматизации МГИ НАНУ был разработан и изготовлен макет бесплатформенной инерциальной навигационной системы. В качестве чувствительных элементов использовались акселерометры типа ADXL 311 и гироскоп ADXRS 150. Этот прибор позволил измерять ускорение движения объекта измерения в инерциальной системе координат (ИСК) по трем ортогональным осям X, Y и Z, а также определять угловую скорость его вращения в плоскости, нормальной к оси Z. Структурная схема разработанного макета приведена на рисунке 2.

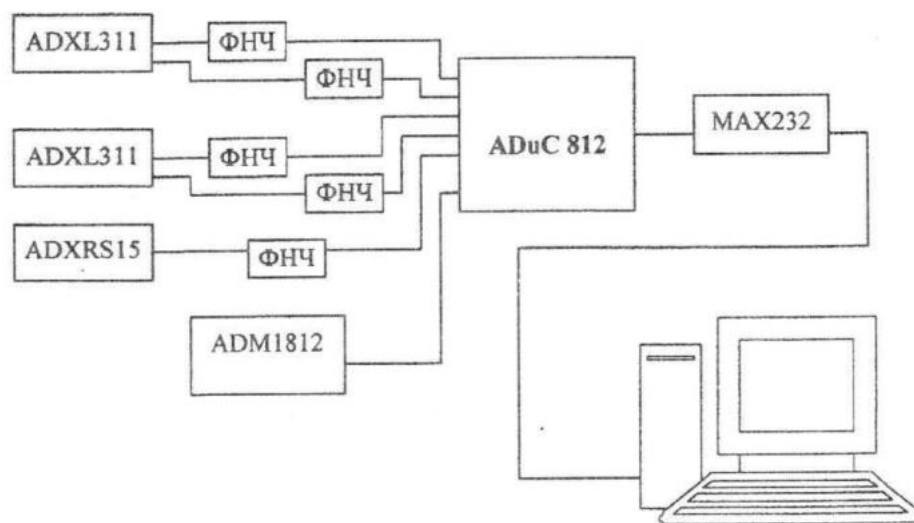


Рис. 2 – Структурная схема инерциальной навигационной системы

В предложенной схеме, как уже указывалось выше, в роли датчиков ускорения выступают два акселерометра ADXL311 фирмы Analog Device, которые позволяют измерять ускорение в диапазоне  $\pm 19.6 \text{ м/с}^2$  каждый по двум осям. Для измерения угловой скорости рационально использовать ADXRS150, с диапазоном измерений  $\pm 150^\circ/\text{с}$ , так как очень маловероятно что измерительный блок будет совершать вращение превышающее данную скорость. Эти три датчика, через низкочастотные фильтры подключены к восьмиканальному АЦП микроконтроллера ADuC812. Пройдя предварительную обработку, данные от этих датчиков в цифровом виде передаются через интерфейс RS232 на персональный

компьютер, где проходит их дальнейшая обработка.

Общий вес изготовленного макета без источника питания составляет порядка 60 г, а потребление не превышает 15 мА.

Для решения навигационной задачи, которая состоит в определении текущих значений навигационных координат объекта, был предложен алгоритм обработки первичной навигационной информации, структурная схема которого представлена на рисунке 3. Он позволяет рассчитать по принятой от прибора информации об ускорении и угловой скорости объекта значения скорости, местоположения и ориентации объекта в навигационной системе координат (НСК).



Рис. 3 – Структурная схема алгоритма обработки первичной навигационной информации

Основной принцип, лежащий в основе этого алгоритма состоит в том, что датчики навигационной системы измеряют кажущееся ускорение (в которое входит ускорение свободного падения  $g$ ). Если дважды его проинтегрировать, то в результате будет получено текущее местоположение.

Так как значения ускорений известны только в некоторые дискретные значения времени, то при реализации этого алгоритма в качестве интеграторов было решено использовать метод численного интегрирования. Выбор конкретного метода основан на результате анализа амплитудных и фазовых характеристик основных операторов численного интегрирования.

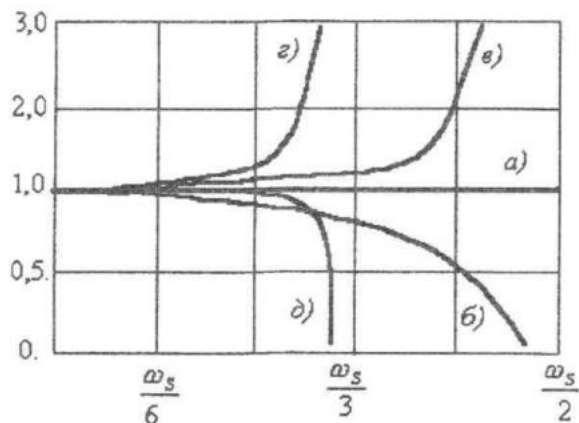


Рис. 4 – Сравнение графиков амплитудных характеристик пяти классических операторов численного интегрирования

- а) Идеальный интегратор
- б) Трапецидальная аппроксимация
- в) Правило Симпсона 1/3
- г) Правило Симпсона 3/4
- д) Правило Веддла

Рассмотренные на рисунке 4 классические операторы численного интегрирования имеют идеальные фазовые характеристики для своих рабочих диапазонов частот, поэтому качество аппроксимации с помощью различных правил можно сравнить, рассматривая только их амплитудные характеристики.

Из рассмотренных методов с учетом минимальных вычислительных затрат выбран метод численного интегрирования на основе правила трапецидальной аппроксимации.

Так как созданная бесплатформенная навигационная система определяет ускорение с акселерометров в ИСК, то для перевода значений этого ускорения в НСК необходимо воспользоваться формулами перевода, представленными в общем виде:

$$\begin{cases} x_1 = x_{иск} \cdot \cos(\gamma) + y_1 \cdot \sin(\gamma) \\ y_1 = y_{иск} \cdot \cos(\gamma) - x_1 \cdot \sin(\gamma) \\ z_1 = z_{иск} \cdot \cos(\alpha) + y_1 \cdot \sin(\alpha) \\ x_{нск} = x_1 \cdot \cos(\beta) - z_1 \cdot \sin(\beta) \\ z_{нск} = z_1 \cdot \cos(\beta) + x_1 \cdot \sin(\beta) \\ y_{нск} = y_1 \cdot \cos(\alpha) - z_1 \cdot \sin(\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – углы поворота одноименных осей ИСК от НСК;

$x_{иск}, y_{иск}, z_{иск}$  – значения ускорения по осям X, Y и Z в ИСК;

$x_1, y_1, z_1$  – вспомогательные величины;

$x_{нск}, y_{нск}, z_{нск}$  – значения ускорения по осям X, Y и Z в НСК.

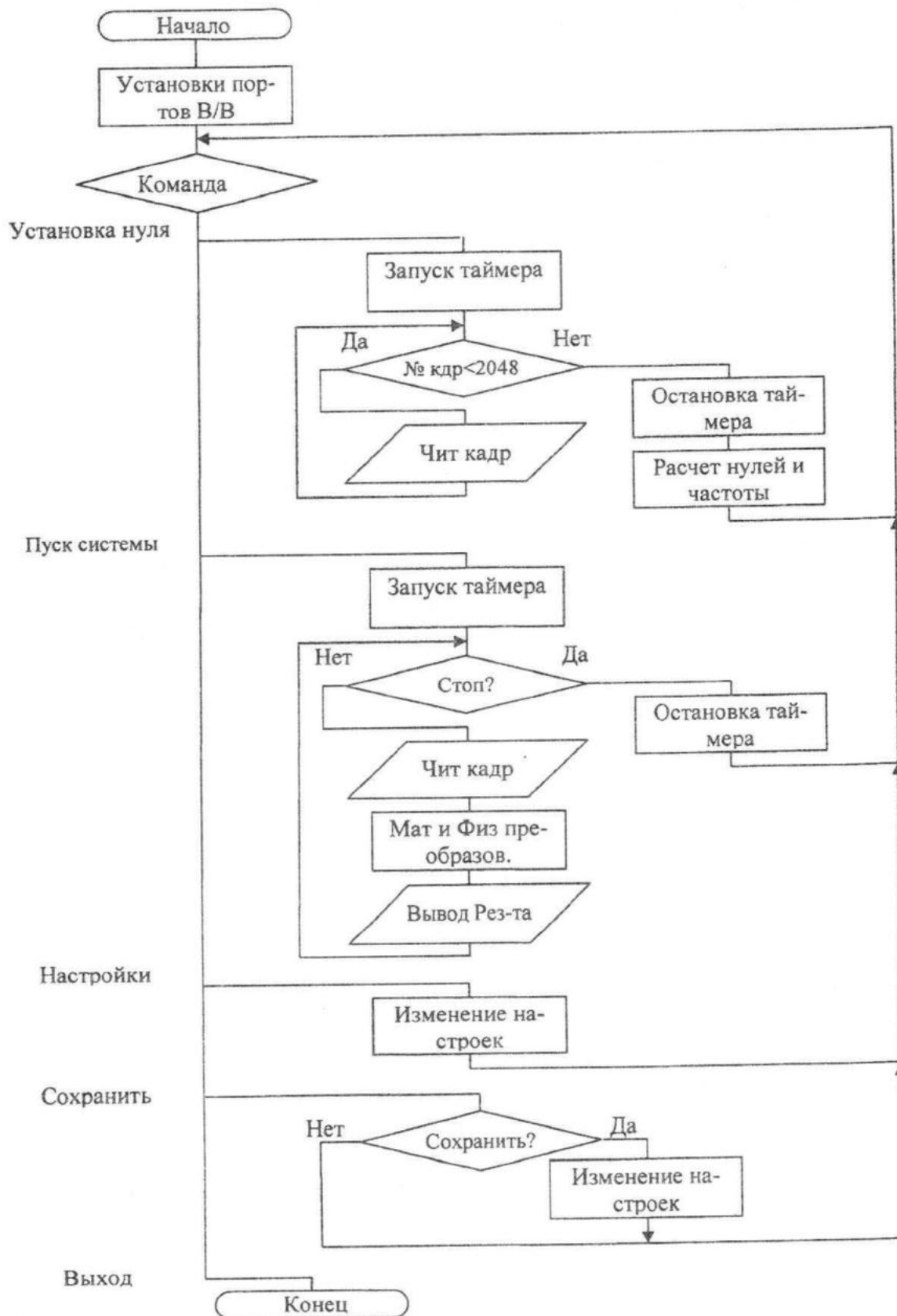


Рис. 6 – Блок-схема программы обработки данных инерциальной навигационной системы

Эта система уравнений записана для общего случая, когда объект свободно движется и вращается в пространстве. Но рассматриваемая система ограничена в перемещении в пространстве тросом и имеет возможность вращения только в горизон-

тальной плоскости. Рисунок 5 иллюстрирует пересчет координат из ИСК в НСК с учетом вращения рассматриваемого блока измерителей только в одной горизонтальной плоскости.

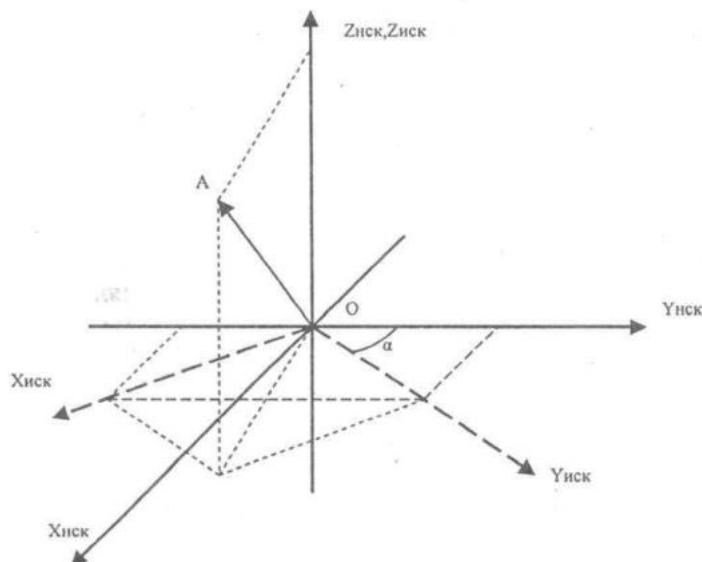


Рис. 5 – Схематическое изображение пересчета вектора ускорения A при повороте ИСК на угол  $\alpha$  относительно НСК

Таким образом, система уравнений (1) может быть сведена к следующему частному виду:

$$\begin{cases} x_{иск} = x_{иск} \cdot \cos(\gamma) + y_1 \cdot \sin(\gamma) \\ y_{иск} = y_{иск} \cdot \cos(\gamma) - x_1 \cdot \sin(\gamma) \\ z_{иск} = z_{иск} \end{cases} \quad (2)$$

Используя систему уравнений (2), а также предложенный алгоритм обработки данных измерений, структурная схема которого представлена на рисунке 3, была составлена блок-схема программы обработки данных бесплатформенной инерциальной навигационной системы, которая изображена на рисунке 6.

Разработанный в среде Borland C++ Builder 6.0 пакет программного обеспечения в соответствии с блок-схемой включает в себя следующий набор функций:

- регистрацию измерительных данных в виде исходной кодовой последовательности, поступающей с датчиков;
- отображение в графическом виде исходной и конечной навигационной инфор-

мации с возможностью изменения масштабов представления этой информации;

- обработка данных, приведение их к другим величинам (угол, отклонение, ускорение, скорость, положение объекта);
- сохранение результатов в файл;
- функции графического и цифрового просмотра записанных данных.

Разработанный макет навигационной системы и программное обеспечение прошли предварительные испытания в опытном бассейне кафедры океанотехники СевНТУ г. Севастополя.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ремчуков В.И. Натурные исследования переносных движений измерителей океанических течений и оценки их влияния на результаты измерений. 1986, – 176 с.
- 2 Ultracompact  $\pm 2$  g Dual-Axis Accelerometer ADXL311. – Analog Devices, 2003.
- 3 Власенко А. Интегральные гироскопы IMEMS – датчики угловой скорости фирмы Analog Device // Электронные компоненты, 2003, № 2. – С. 57–59.