

МИНИАТЮРНЫЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ

ДЛЯ МАЛЫХ СУДОВ И КАТЕРОВ

Объединение инерциальных измерительных модулей (ИИМ) с приемниками глобальных спутниковых навигационных систем (ГСНС) дает возможность использовать недорогие миниатюрные инерциальные датчики низкой точности для создания высокоточных интегрированных систем ориентации и навигации (ИСОН). Разработанные в ЦНИИ "Электроприбор" (С.-Петербург) бескарданные ИИМ отвечают необходимым требованиям по точности, массе, габаритам и стоимости для вхождения в состав миниатюрных ИСОН, предназначенных для гидрографических и других малых судов и катеров.

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Разработка инерциальной навигационной системы обычно включает в себя создание специальных гироскопов и акселерометров. При создании миниатюрных ИСОН в целях ускорения их разработки и снижения расходов использовались сравнительно грубые и недорогие инерциальные датчики отечественных и зарубежных фирм, зарубежные цифровые электронные устройства, отечественные и зарубежные приемники ГСНС. Первой фазой разработки явился выбор инерциальных датчиков. При этом для уточнения и дополнения технических характеристик, объявленных изготовителями, были проведены лабораторные испытания перспективных для использования в ИСОН инерциальных датчиков. Испытывались семь миниатюрных гироскопов четырех различных типов: ENC и ENV GyroStar – пьезокерамические вибрационные датчики угловой скорости; GyroChip – кварцевый вибрационный датчик угловой скорости; РВГ-1 – роторный вибрационный гироскоп, относящийся к динамически настраиваемым датчикам; ВГ910, ВГ941, ВГ951 – волоконно-оптические датчики угловой скорости разомкнутого типа. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

По результатам испытаний были разработаны математические модели ошибок гироскопов. Эти модели использовались для обоснования выбора структуры и параметров проектируемых ИСОН.

При выборе акселерометров использовался аналогичный подход. Характеристики четырех типов акселерометров, объявленные изготовителями, приведены в табл. 2.

Как и для гироскопов, результаты испытаний акселерометров были использованы для составления моделей погрешностей, необходимых при проектировании ИСОН.

Б.Блажнов, Л.Несенюк,
В.Пешехонов, Л.Старосельцев

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ И СЕМЕЙСТВО ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ

На основе выбранных гироскопов и акселерометров разработано четыре типа инерциальных измерительных модулей. Три из них, построенные на динамически настраиваемых и волоконно-оптических гироскопах, используются в ИСОН. Модуль, построенный на микромеханических гироскопах и акселерометрах, предназначен для бескарданного магнитного индукционного компаса.

ИСОН-1 (рис. 1) состоит из ИИМ и бортового микровычислителя. ИИМ содержит два датчика угловой скорости РВГ-1 и три аксе-

Представляем авторов статьи

БЛАЖНОВ Борис Александрович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор" (С.-Петербург). Окончил Ленинградский институт точной механики и оптики. Автор свыше 50 научных работ. Сфера профессиональных интересов – гравиметрические и навигационные приборы и системы.

НЕСЕНЮК Леонид Петрович. Профессор, доктор технических наук, начальник отдела ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". Окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана. Действительный член Академии навигации и управления движением. Автор свыше 100 научных работ. Сфера профессиональных интересов – гравиметрия, инерциальные геодезические и навигационные системы.

ПЕШЕХОНОВ Владимир Григорьевич. Академик РАН, директор ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", президент Академии навигации и управления движением. Окончил Ленинградский политехнический институт. Автор свыше 100 научных работ. Сфера профессиональных интересов – автономная навигация, навигационные системы и комплексы, прецизионное приборостроение.

СТАРΟΣЕЛЫЦЕВ Леонид Петрович. Кандидат технических наук, начальник сектора ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор". Окончил Ленинградский институт точной механики и оптики. Автор свыше 40 научных работ. Сфера профессиональных интересов – бескарданные инерциальные системы ориентации и навигации.

Контактный телефон: (812) 238-8144,
e-mail: elprib@online.ru

Таблица 1. Общетехнические и точностные характеристики гироскопов, прошедших испытания

| Характеристика | GyroStar ENC фирмы Murata (Япония) | GyroStar ENV фирмы Murata (Япония) | GyroChip Gc-1-50100 фирмы Systron Donner (США) | РВГ-1 фирмы "Темп-Авиа" (Россия) | ВГ941; ВГ910; ВГ951 фирмы "Физоптика" (Россия) |
|---|--|--|---|--|---|
| Число осей чувствительности | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Электропитание | 5 В, 0,025 Вт | 5 В, 0,075 Вт | 5 В, 0,8 Вт | ±15 В, 3–5 Вт | 5 В; ±12 В, 5 В; 5 В, 1 Вт |
| Габаритные размеры, мм | 22×9×8 | 19×46×38 | ∅50×25 | ∅34×37 | ∅27×58, ∅80×25, ∅150×30 |
| Масса, г | 2,7 | 50 | 100 | 50 | 40; 20; 680 |
| Рабочий диапазон температур, °С | -50...+75 | -30...+80 | -40...+80 | -55...+70 | -30...+70 |
| Срок службы, лет | – | – | 10 | – | 10; 15; 15 |
| Наработка на отказ, тыс. ч | – | – | – | 2 | 10; 15; 20 |
| Диапазон, град/с | 90 | 80 | 50 | 90 | 500; 200; 40 |
| Частотный диапазон, Гц | 50 | 7 | 60 | 45 | 1000; 1000; 100 |
| Скорость дрейфа, град/с | – | 1 (10 мин) | 0,2 (год) 0,004 (100 с) | 0,005 | 0,014; 0,004; 0,0001 |
| Линейность в диапазоне, % | 5 | 0,5 | 0,1 | 0,5 | 0,2 |
| Температурная чувствительность, град/с/°С | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,001 | 0,00003 |
| Чувствительность к линейному ускорению, град/с/g | – | – | 0,03 | 0,01 | – |
| Уровень помех, град/с/√Гц | – | 0,4 | 0,01 | 0,0003 | 0,01; 0,0015; 0,0003 |
| Среднеквадратическая погрешность ориентации, накопленная за 100 с, град | 4,7 | 0,130 | 0,078 | 0,0084 | 0,081; 0,018; 0,0078 |
| Цена, долл. | 60 | 300 | 1500 | 2000 | 1450; 950; 2600 |

лерометра АК-5. Размеры этого прибора 176×120×90 мм, масса 1,7 кг. Поскольку РВГ-1 – один из первых российских гироскопов, пригодных для компактной и сравнительно недорогой ИСОН, разработка систем такого типа и была начата с использованием этого гироскопа. Макет и опытный образец ИИМ с РВГ-1 позволили отладить программное обеспечение ИСОН, отработать методы калибровки бескарданного ИИМ, провести лабораторные, автомобильные и морские испытания. Приобретенный опыт теперь используется при разработке недорогих миниатюрных ИИМ на основе более

Таблица 2. Характеристики акселерометров

| Характеристика | ADXL 05 EM-3 фирмы Analog Devices (США) | QFA 7000 фир- мы Systron Donner (США) | АК-5 фирмы "Темп-Авиа" (Россия) | АК-10 фирмы "Дельфин" (Россия) |
|---------------------------------|---|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Число измерительных осей | 3 | 1 | 1 | 1 |
| Электропитание | 5 В, 0,12 Вт | ±15 В, 0,3 Вт | ±15 В, 0,3 Вт | ±15 В, 0,3 Вт |
| Габаритные размеры, мм | 25,4×25,4×19,05 | ∅25×20 | 27×21×23 | 40×40×25 |
| Масса, г | 50 | 55 | 50 | 50 |
| Рабочий диапазон температур, °С | -40...+85 | -40...+80 | -55...+60 | +70±1 |
| Предел измерений, g | ±5 | от ±1 до ±10 | от ±3 до ±15 | ±2 |
| Частотный диапазон, Гц | 100 | 100 | 100 | 25 |
| Смещение нуля, g | 0,2 | 0,0125 | 0,002 | 0,003 |
| Нестабильность смещения нуля, g | – | – | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁴ |
| Линейность, % | 0,2 | 0,1 | 0,15 | – |
| Уровень помех, g/√Гц | 5·10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁴ | 2·10 ⁻⁴ |
| Цена, долл. | 250 | 2000 | 800 | 800 |



Рис. 1. Опытный образец ИСОН-1

перспективных микромеханических и волоконно-оптических гироскопов. Бортовой вычислитель представляет собой прибор массой 1,5 кг и размерами 140×200×90 мм. Он имеет аналоговые связи с ИИМ и последовательные RS232-порты для передачи данных потребителям и приема данных от ГСНС и от магнитного или гироскопического компаса. Вычислитель содержит четыре печатных платы, выполненных в конструкции РС-104: 16-канальный, 16-разрядный АЦП; микропроцессор Intel с флэш-памятью; плата вторичного электропитания и плата расширителя интерфейса. Последняя в модифицированном варианте может быть заменена платой приемника ГСНС фирм Trimbl или Rockwell.



Рис. 2. Опытный образец ИСОН-2

ИСОН-2 (рис.2) разработана как единый прибор размерами 260×160×90 мм и массой 3,6 кг. Содержит ИИМ и бортовой вычислитель. В ИИМ входят три волоконно-оптических гироскопа ВГ910 и три акселерометра АК-10. Бортовой вычислитель состоит из таких же печатных плат, что и вычислитель ИСОН-1.



Рис. 3. Экспериментальный образец ИСОН-3

ИСОН-3 (рис.3) – также единый прибор, основанный на более точных волоконно-оптических гироскопах ВГ951. В системе использованы те же акселерометры АК-10 и тот же набор плат вычислителя, что и в ИСОН-2. Для повышения точности гироскопов до уровня, необходимого для гироскопа, применено вращение инерциальных датчиков вокруг оси, перпендикулярной к плоскости палубы.

В бескарданном магнитном индукционном компасе (рис.4) использован микромеханический ИИМ, построенный на пьезокерамических гироскопах GyroStar ENC и кремниевых акселерометрах ADXL-05. Вычислитель на основе микроконтроллера SAK-C167 фирмы Siemens и 10-разряд-



Рис. 4. Опытный образец бескарданного магнитного индукционного компаса

ного АЦП выполняет все операции вычисления и передачи потребителю значений магнитного курса и углов качки.

Программное обеспечение реального времени для ИСОН-1 и ИСОН-2 позволяет принимать и обрабатывать данные ИИМ, приемника ГСНС, магнитного или гироскопического компаса, а также выработать и передавать выходные данные потребителю. Разработаны специальные программы реального времени для лабораторных и автомобильных испытаний. Они обеспечивают регистрацию исходных измерений, индикацию условий приема данных ГСНС, отображение графиков маршрута, а также расхождения между инерциальными и спутниковыми данными и т.п. Последующая обработка результатов испытаний и цифровое моделирование алгоритмов системы проводились с помощью средств пакетов MATLAB или MATCAD.

Для написания прикладных программ использовались средства Borland C++, которые благодаря стандарту ANSI могут быть перенесены на другую вычислительную базу без значительных изменений.

Алгоритмы комплексирования инерциальных и спутниковых данных могут быть определены как слабосвязанные. Однако этот недостаток имеет и положительный аспект — он позволяет использовать любой тип приемника с выходом в стандарте NMEA без изменений в аппаратуре или программном обеспечении.

В ИСОН-1 и ИСОН-2 применен стационарный декомпозированный фильтр, который в перспективе будет заменен фильтром Калмана. В основе этого фильтра — два идентичных независимых контура северного и восточного каналов гиравертикали, корректируемые от доплеровского спутникового канала измерения скорости. Первые и вторые интегралы горизонтальных ускорений используются вместе с данными спутникового приемника для определения скорости и координат интегрированной системы. Поскольку точность используемых гироскопов недостаточна для определения направления меридиана, значение курса вырабатывается в отдельном стационарном фильтре, использующем данные ИИМ и спутниковой системы или компаса. Когда внешняя информация по курсу недоступна, азимутальное направление хранится с точностью 0,2 град/мин. Отдельный стационарный фильтр используется также для определения вертикальной скорости и вертикальных перемещений. Все стационарные фильтры не выше 3-го порядка.

Алгоритмы ИСОН-3 реализуют свойства гироскопа, используя эффект автокомпенсации погрешностей гироскопов за счет вращения ИИМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Макетный и опытный образцы ИСОН-1 испытывались в лаборатории и на автомобиле. Опытный образец прошел также испытания на корабле береговой охраны и успешно использовался для измерения вертикальных перемещений, углов качки и рыскания на борту гидрографического судна в процессе выполнения промерных работ.

Уже завершены лабораторные и проводятся морские испытания опытного образца ИСОН-2. Начаты лабораторные испытания недавно изготовленного экспериментального образца ИСОН-3. Также завершены лабораторные испытания микромеханического ИИМ в составе магнитного индукционного компаса. Морские испытания планируются на ближайшее полугодие.

Лабораторные испытания и исследования проводились на испытательных стендах трех типов: двухосном наклонно-поворотном, предназначенном для начальной калибровки ИИМ, трехосном динамическом, обеспечивающем моделирование качки и рыскания, и на динамическом стенде вертикальных перемещений, имитирующем вертикальную качку судна.

Измеренные в процессе калибровки ИИМ значения масштабных коэффициентов инерциальных датчиков и рассогласований их измерительных осей заносятся в память бортового вычислителя. С учетом точности гироскопов и акселерометров, используемых в ИИМ, выбран наклонно-поворотный стенд, погрешность которого не превышает 10". Качающийся трехосный стенд обеспечивает различные режимы колебаний: отдельно бортовую, килевую качку, рыскание с амплитудой до 20° и периодом от 4 до 12 с, а также комбинацию этих колебаний по двум или трем осям одновременно. Значения углов поворота стенда измеряются и регистрируются с погрешностью менее 1' для последующего сравнения с выходными данными испытуемой системы ориентации.

На рис.5 представлены типичные кривые ошибок измерения углов бортовой и килевой качки. Помимо низкочастотной и высокочастотной погрешности случайного характера, кривые показывают динамические искажения измеряемого угла качки. Эти искажения — результат ограничения полосы пропускания датчиков частотой среза приблизительно 30–40 Гц. Полное значение ошибки измерения углов качки во всех испытаниях не превышало 0,2°, а угловая скорость дрейфа в азимуте отличалась от значения, измеренного на неподвижном основании, не более чем на 0,1 град/мин.

Рис.5. Погрешности определения углов бортовой ($\Delta\Theta$) и килевой ($\Delta\Psi$) качки

Стенд вертикальных перемещений позволяет проводить испытания карданных гироскопических стабилизаторов массой свыше 100 кг, предназначенных для морских инерциальных и гравиметрических систем. Он обеспечивает колебательное вертикальное движение с амплитудой до 2 м и периодом от 11 до 160 с. Точность измерения и регистрации вертикального перемещения приблизительно 0,5 мм достигается благодаря специальной электронно-оптической системе.

Типичные ошибки измерения вертикальных перемещений показаны на рис.6. На графике видны две составляющие ошибки. Первая близка к гармонической кривой того же периода, что и вертикальное движение. Это результат динамических искажений измерений, обусловленных стационарным фильтром в цепи сигнала вертикального акселерометра. Вторая имеет случайную природу и вызвана нестабильностью вертикального акселерометра.

Предварительные расчеты и экспериментальные уточнения структуры и параметров фильтра обеспечили величину ошибки не более 10 см для колебательного движения с амплитудой 1,6 м и периодом менее 20 с.

Автономные испытания микромеханического ИИМ так же, как и его испытания в составе магнитного компаса, подтвердили приемлемую точность измерения углов качки (ошибка в пределах 0,5°). Испытания показали также, что использование гироскопических данных позволяет сгладить шумы индукционного компаса (рис.7).

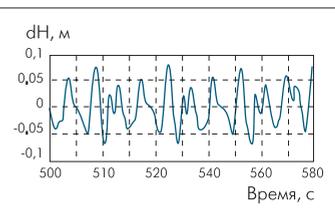
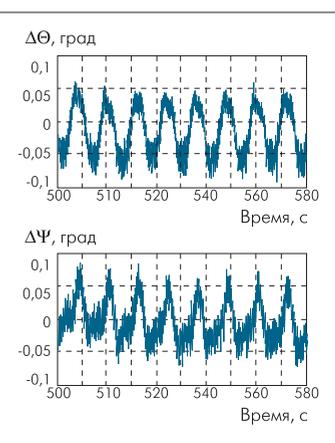


Рис.6. Погрешность определения вертикальных перемещений

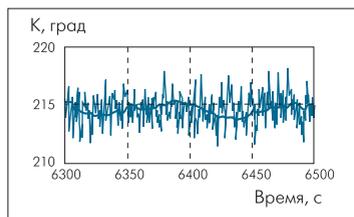


Рис.7. Погрешности определения магнитного курса (K, град): зашумленная кривая – ошибки на выходе индукционного компаса, сглаженная кривая – ошибки после комплексирования магнитных и гироскопических измерений

Ashtech GG-24. Его погрешность позиционирования не превышала 20 м в 95% пунктов, а на участках маршрута вдали от строений и деревьев ошибка не превышала 5 м. Это близко к точности ГСНС после отмены искусственного зашумления в мае 2000 г. Результаты испытаний позволили сделать некоторые заключения, существенные для программного обеспечения интегрированных систем. Было замечено, что обычно доплеровский канал ГСНС оказывался более устойчивым к помехам, чем дальномерные. По этой причине в контурах гировертикали использовалась коррекция от ГСНС по скорости, а не по месту.

В результате испытаний были получены траектории автомобильного движения в районе городского парка (рис.8 и 9). На графиках можно видеть, что помехи, вызванные деревьями вдоль пути, приводили к значительным флюктуациям в координатах ГСНС, которые повлияли также на инерциальную систему. При счислении пути по данным доплеровского канала ГСНС влияние помех на выходные данные оказалось значительно меньшим. Отмечалось также, что возмущения интегрированной системы во время маневрирования определялись в основном запаздыванием в выходных данных ГСНС.

С учетом этих наблюдений были доработаны алгоритмы комплексирования инерциальных и спутниковых данных. После доработки программ допустимый перерыв приема спутниковых данных при ограничении ошибки позиционирования величиной 50 м составил 150 с.

Помимо кварцевых гироскопов GyroChip исследовался также разработанный той же фирмой ИИМ MotionPack, который содержит три гироскопа GyroChip и три кварцевых акселерометра QFA-7000. Исследования ИИМ MotionPack на автомобиле были проведены с теми же компьютером и программным обеспечением, ко-

Автомобильные испытания экспериментального и опытного образцов ИСОН-1 проводились в 1996-1998 гг. Их цель – проверка точности системы в различных режимах движения автомобиля и исследование влияния затенения антенны, многолучевости, реконфигурации видимого созвездия и т.д. на выходные данные интегрированной системы. В испытаниях использовался универсальный приемник ГЛОНАСС

торые использовались для ИСОН-1. Результаты испытаний показали, что точность интегрированной системы, построенной на основе ИИМ MotionPack, не выше, чем точность ИСОН-1 и ИСОН-2.

Морские испытания ИСОН-1 на борту гидрографических судов “Николай Матусевич” и “Профессор Штокман” и сторожевого корабля “Выборг” подтвердили точностные характеристики системы при измерении углов качки и рыскания, а также параметров вертикальной качки: погрешность измерения углов – в пределах $0,2^\circ$, вертикальных перемещений – в пределах 0,1 м.

Важно отметить, что системы ИСОН-1 и ИСОН-2 не обладают гироскопическими свойствами и не могут автономно определять направление на Северный полюс. Поэтому в них необходимо использовать данные от магнитного компаса или гирокомпаса. При движении возможно использование значения путевого угла от приемника ГСНС вместо значения истинного курса. В этом случае необходимо иметь в виду, что расхождение между значениями истинного курса и путевого угла может достигать 10° в зависимости от ветра, течения и скорости судна.

Для придания системе ИСОН-3 свойств гирокомпаса в ней использованы более точные гироскопы ВГ951 и применена модуляция сигналов гироскопов путем вращения ИИМ вокруг оси, перпендикулярной к плоскости палубы. Моделирование на ЭВМ с учетом погрешностей гироскопов и акселерометров, полученных в процессе испытаний этих датчиков, а также результаты первых испытаний экспериментального образца ИСОН-3 показали возможность достижения точности курсоуказания лучше $0,4^\circ/\cos\varphi$ (где φ – географическая широта нахождения гирокомпаса).

В заключение следует отметить, что разработанное семейство миниатюрных недорогих ИСОН может использоваться на малых судах и катерах, которые нуждаются в такого рода приборах, но не использовали их до сих пор из-за высокой цены и больших размеров традиционных устройств.

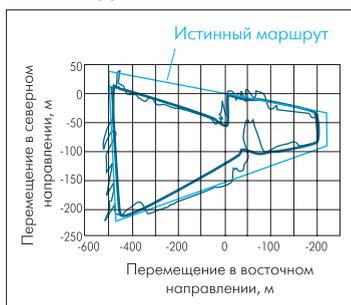


Рис.8. Траектории автомобильного движения, построенные по позиционным измерениям ГСНС (тонкая сплошная линия) и по данным инерциальной системы, корректируемой по позиционным измерениям ГСНС (жирная сплошная линия)

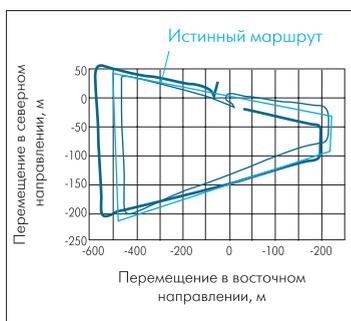


Рис.9. Траектории, построенные по данным автономной инерциальной системы (жирная сплошная линия) и по данным инерциальной системы, корректируемой по доплеровскому каналу ГСНС (тонкая сплошная линия)