

А. ЖАНРУА, А. БУВЕ, Ж. РЕМИЛЛЬЕ

## ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В МОРСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

*Простота конструкции ВТГ является следствием применения множества запатентованных инноваций, которые привели к созданию очень компактного гироскопа, включающего небольшое количество компонентов. Упрощенная конструкция и новый автоматический процесс настройки и балансировки являются преимуществом при производстве и снижает чувствительность прибора к механическим воздействиям. В режиме разомкнутого контура (полного угла), дающем очень хорошие показатели масштабных коэффициентов, новая, полностью цифровая электроника обеспечивает точность коэффициента усиления и фазы на уровне, необходимом для гироскопа со смещением нуля 0,01 град/ч. В статье объясняются принятые решения и приводятся результаты испытаний ВТГ производства компании Saget. Представлена архитектура гирогоризонткомпаса BlueNaute™ компании Saget, а также результаты испытаний, в том числе корабельных.*

### Введение

Линейка кориолисовых вибрационных гироскопов (КВГ) продемонстрировала не только хорошую работу и высокую надежность, но также малые габариты и привлекательную стоимость. Успех такого типа гироскопов объясняется главным образом малым количеством компонентов и точным управлением сигналом с помощью современной электроники.

Чтобы добиться высокой эффективности, для КВГ требуются очень хорошие резонаторы, например, из плавленного кварца, применяющиеся в волновых твердотельных гироскопах (ВТГ).

Уже с 1992 г. ВТГ продемонстрировал соответствие требованиям, выдвигаемым бесплатформенной инерциальной навигацией [1], но последние усовершенствования в конструкции, технологии производства и управлении ВТГ, сохраняя простоту КВГ, позволяют первому конкурировать с лазерными или волоконно-оптическими гироскопами, имея гораздо меньший размер.

Действительно, точность гироскопа на уровне 0.001 град/ч с коэффициентом добротности  $Q$ , обеспечиваемая полусферическим резонатором из плавленного кварца размером 20 мм, – это более чем хорошо. Как мы увидим далее, уровень добротности  $Q$  таких резонаторов ограничивается главным образом неточностью регулирования вибрации и остаточной разбалансировкой массы.

### Управление в волновом твердотельном гироскопе

В основном в ВТГ, как в любом другом КВГ, используется резонатор с двумя степенями свободы. При вращении  $\Omega$  кориолисовы силы переводят энергию вращения из одной степени свободы в другую в соответствии с известной системой уравнений:

---

Жанруа Алан. Сажем Дефанс Секюрите (Париж, Франция).

Буве А. Сажем Дефанс Секюрите.

Ремиллье Жорж. Сажем Дефанс Секюрите.

Научный редактор перевода д.т.н. В. Э. Джашитов.

Статья по докладу на XX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

$$\begin{cases} m\ddot{x} + h\dot{x} + kx = 2m\Omega\dot{y} + F_x \\ m\ddot{y} + h\dot{y} + ky = -2m\Omega\dot{x} + F_y \end{cases} \quad (1)$$

Используя уравнения (1), можно определить, как гармонические силы  $F_x$  или  $F_y$ , приложенные к резонатору, влияют на вибрацию. В таблице перечислены типы такого влияния.

#### Влияние гармонических сил на вибрацию

| Гармонические силы     | Синфазно со скоростью вибрации         | Синфазно с вибрационным смещением  |
|------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|
| В направлении вибрации | $F_{11}$ : меняет амплитуду вибрации   | $F_{12}$ : меняет частоту вибрации |
| Ортогонально вибрации  | $F_{21}$ : меняет направление вибрации | $F_{22}$ : меняет форму вибрации   |

Таким образом, управление вибрацией резонатора состоит в создании сил  $F_{11}$  и  $F_{22}$ , обеспечивающих амплитуду и форму вибрации на желаемом уровне.

В режиме замкнутого контура (компенсационном режиме) также требуются силы  $F_{21}$  для уравнивания кориолисовых сил.

Наибольшая из сил  $F_{11}$ ,  $F_{22}$  и  $F_{21}$  определяет параметры цепи электроники и привода. Поскольку абсолютная точность цепи обратно пропорциональна динамике, следует обращать особое внимание на порядок величины каждой из этих сил.

- В компенсационном режиме проще всего оценить силу  $F_{21}$ : ее амплитуда по определению равна измеряемой угловой скорости:

$$F_{21} = \Omega. \quad (2)$$

- В аэрокосмических приложениях, например, угловая скорость обычно составляет около 360 град/с,
- Амплитуда гармонической силы  $F_{11}$ , необходимой для удержания амплитуды вибрации, равна  $1/\tau$ , где  $\tau$  – постоянная времени резонатора:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{Q}{\pi \times f}; \\ F_{11} &= \frac{1}{\tau}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, при типичной частоте 10 кГц и коэффициенте добротности 5000, сила  $F_{11}$  также равна 360 град/с. Но для достижения лучшего коэффициента добротности, как у ВТГ ( $10^7$ ), сила  $F_{11}$  должна быть очень маленькой:  $F_{11} = 0,18$  град/с,

Амплитуда силы  $F_{22}$ , необходимой для управления формой вибрации, зависит от рассогласования частот резонатора  $df$ . В простейшем случае амплитуда силы  $F_{22}$  просто равна  $df$

$$F_{22} = df. \quad (4)$$

Для резонатора с рассогласованием частот 1 Гц, амплитуда силы  $F_{22}$  также составляет 360 град/с. Но, учитывая высокое качество прибора, при помощи точной настройки резонатора в процессе его изготовления можно снизить рассогласование частот до 0,5 мГц. В этом случае сила  $F_{22}$  снижается до 0,18 град/с.

Таким образом, использование компенсационного режима управления будет иметь отрицательное влияние на достижение высокой точности, за исключением случаев, когда речь идет о низкочастотных приложениях или о малоэффективных резонаторах с низкой добротностью или сильным рассогласованием частот.

С другой стороны, режим полного угла с высоким коэффициентом добротности и

точно настроенными резонаторами позволяет вырабатывать очень малые силы, следовательно, и погрешности будут малыми. Именно поэтому компания Sagem выбрала этот тип управления для высокоточных приложений.

Более того, если посмотреть на погрешности, обусловленные дрейфом, то в соответствии с таблицей следует абсолютно избегать нежелательных сил  $F_{21}$ , синфазных со скоростью вибрации и ортогональных вибрации.

К сожалению, при приложении сил для управления вибрацией ( $F_{11}$  или  $F_{22}$ ) всегда присутствуют ошибки направления и фазы (возникающие вследствие дефектов электроники и привода), которые приводят к появлению проекции силы  $F_{21}$  и к погрешностям дрейфа.

Поэтому для электроники и приводов точности  $\varepsilon$  чем ниже граница амплитуды гармонических сил типа  $F_{11}$  или  $F_{22}$ , тем меньше погрешности

$$D = \varepsilon \times F_{ij}. \quad (5)$$

Благодаря режиму полного угла погрешности, вызванные цепью электроники и привода, можно удерживать на уровне  $10^{-5}$ . У ВТГ компании Sagem (коэффициент добротности  $10^7$ , рассогласование частот 0,5 МГц), погрешности, вызванные цепью электроники и привода, менее 0,01 град/ч:

- $10^{-5} \times 0,18$  град /с =  $6,5 \cdot 10^{-3}$  °/ч для погрешности, вызванной управлением амплитудой,
- $10^{-5} \times 0,18$  град /с =  $6,5 \cdot 10^{-3}$  °/ч для погрешности, вызванной управлением квадратурой.

### Реальный коэффициент добротности резонатора

Коэффициент добротности зависит от добротности материала и геометрической деформации в данном режиме вибрации. В этом отношении отлично себя зарекомендовали плавленый кварц и эллиптическая деформация экватора ВТГ: они позволяют легко достичь добротности на уровне  $10^7$ , даже после металлизации.

Остаточное давление газа вокруг резонатора – другой известный источник демпфирования, которое действует как паразитный коэффициент добротности параллельно с добротностью резонатора. Использование хорошей герметизации и газопоглотителя позволяет обеспечить необходимый уровень вакуума в течение всего срока службы КВГ.

Тем не менее, если центр масс двигается при вибрации или его крепление находится не точно в узле вибрации, инерционные силы, возникающие в результате взаимодействия резонатора и его опоры, приводят к двум типам трудностей:

- реальный коэффициент добротности резонатора и его стабильность зависит от механических характеристик опоры,
- резонатор становится чувствительным к внешним вибрациям, что приводит к погрешностям дрейфа (при синусоидальной вибрации) или случайному уходу (при случайной вибрации).

Можно оценить паразитный коэффициент добротности  $Q_{dm}$  вследствие разбалансировки массы  $dm$  в присутствии паразитной моды:

- энергия, содержащаяся в неуравновешенной массе  $dm$ , пропорциональна энергии модальной массы  $m$  резонатора

$$dE = E \times \frac{dm}{m}, \quad (6)$$

- энергия, рассеиваемая (dissipated) в паразитном резонаторе, связана с пульсацией  $\omega_2$  и коэффициентом добротности  $Q_2$  данной моды, где  $\omega_1$  – пульсация номинальной моды

$$E' = dE \times \left( \tan^{-1} \frac{\omega_1 \times \omega_2}{Q_2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \right). \quad (7)$$

Паразитный коэффициент добротности  $Q_{dm}$  равен

$$\frac{1}{Q_{dm}} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \frac{E'}{E} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \frac{dm}{m} \times \left( \tan^{-1} \frac{\omega_1 \times \omega_2}{Q_2(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \right). \quad (8)$$

При дефекте разбалансировки  $dm/m \cdot 10^{-3}$  и в присутствии паразитной моды опоры с частотой 1 кГц и добротностью 10, паразитный коэффициент добротности резонатора, колеблющегося на частоте 10 кГц, равен

$$\frac{1}{Q_{dm}} = 1,6 \times 10^{-6}$$

Если номинальный коэффициент добротности равен  $10^7$ , реальный глобальный коэффициент добротности  $Q_g$  приобретает следующее значение:

$$\frac{1}{Q_g} = \frac{1}{Q} + \frac{1}{Q_{dm}} \approx \frac{1}{Q_{dm}}. \quad (9)$$

В соответствии с (3), сила  $F_{11}$ , необходимая для сохранения амплитуды вибрации, увеличивается до 2,88 град/с, а погрешность вырастает до 0,1 град/ч вместо  $6,5 \cdot 10^{-3}$  град/ч.

Этот момент объясняет, насколько важен процесс балансировки для стабильной высокоэффективной работы КВГ.

### Чувствительность к внешней вибрации

Механизм возбуждения вибраций строится по обратному принципу: дефекты массы резонатора приводят к движению центра масс при вибрации и к инерционным силам и моментам, прилагаемым к основанию гироскопа для возбуждения внешних мод. С другой стороны, те же дефекты массы позволяют прилагать внешние силы к резонатору. Это приводит к погрешности дрейфа (при синусоидальной вибрации) или случайному уходу (при случайной вибрации) [3].

Так же, как и в случае, описанном в предыдущем разделе, здесь требуется очень хорошо изолированный резонатор, который можно получить путем очень точной балансировки.

### Балансировка волнового твердотельного гироскопа

Задача состоит в разработке полностью автоматического процесса, обеспечивающего балансировку 6 степеней свободы резонатора и настройку рассогласования частот.

Процесс продолжается несколько часов и позволяет выбрать уровень эффективности работы прибора, соответствующий данному приложению.

На рис. (1) показано схождение процесса: от начальных дефектов разбалансировки до дефектов менее  $10^{-6}$  для 6 степеней свободы и для рассогласования частот, где

- F1, 2, 3 – линейные разбалансировки,

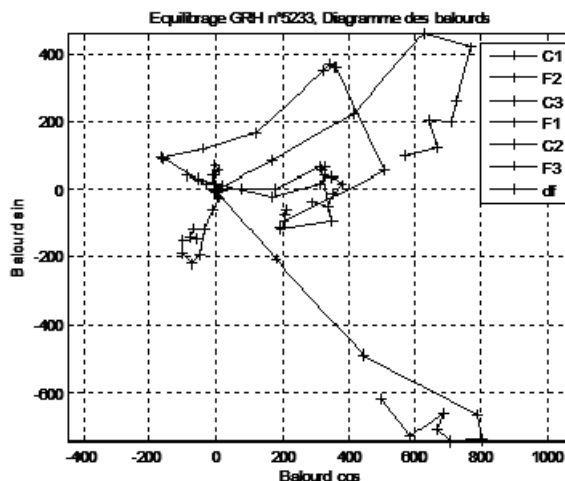


Рис. 1. Схождение при процессе балансировки  
По вертикальной оси: дисбаланс синуса, по горизонтальной – дисбаланс косинуса

- C1, 2, 3 – вращательные разбалансировки,
- $df$  – рассогласование частот.

При нормальном режиме работы этот процесс приводит к рассогласованию частот менее 0,5 мГц, коэффициенту добротности лучше  $10^7$  при любой опоре и к чувствительности к внешним вибрациям менее 0,01 град/ч вне зависимости от механических воздействий, которым подвергается объект.

Полученные в результате такого процесса резонаторы обладают очень стабильными характеристиками, и в режиме полного угла для них требуются очень слабые управляющие силы, что дает меньшую чувствительность к дефектам приводов или электроники, а также к тепловым возмущениям окружающей среды.

### Конструкция волнового твердотельного гироскопа компании Sagem

Очевидно, что при использовании режима полного угла и усовершенствованного процесса балансировки можно добиться отличной работы прибора, сохраняя размер резонатора на уровне 20 мм.

Компания Sagem применила имеющийся опыт в изготовлении 20 мм резонаторов и сконцентрировала свои усилия в основном на разработке корпуса для упрощения производства.

В частности, в ВТГ производства Sagem реализованы запатентованный плоский электрод и «колонная» модель резонатора [4], а также используется микроэлектронный керамический корпус, который, не налагая ограничений на резонатор, выполняет следующие задачи:

- сохранение ориентации резонатора,
- связь электродов «электрододержателя» с бесконтактной электроникой,
- внедрение «бесконтактной электроники»,
- связь с гироскопом,
- поддержание нужного уровня вакуума.

На рис. 2 показана архитектура новой запатентованной конструкции.

Перечислим основные упомянутые конструкторские решения, принятые компанией Sagem при разработке высокоэффективного ВТГ:

- полусферический резонатор диаметром 20 мм (см. рис. 3), подходящий для естественно низкого рассогласования частот, слабых дефектов разбалансировки и обеспечивающий управление вибрацией в режиме полного угла,
- дополнительный процесс точной настройки и балансировки резонатора,
- $Q \approx 10^7$ ,  $F \approx 7,5$  кГц, что обеспечивает  $1/\tau \approx 500$  град/ч благодаря применению резонатора из плавленого кварца,
- $df \approx 0,5 \times 10^{-3}$  Гц или 650 °/ч благодаря использованию специальной настройки резонатора,
- приводы и электроника: динамический диапазон до 10000 град/ч, погрешности менее  $10^{-6}$ ,
- управление вибрациями в режиме полного угла, обеспечивающее очень точный масштабный коэффициент,
- запатентованная конструкция электродов для возбуждения вибраций, кардинально упрощающая структуру гироскопа, а также прецизионное управление.

При таких параметрах погрешности, вызванные управлением вибрациями, составляют:

- менее  $500^\circ/\text{ч} \times 10^{-5} = 0,005^\circ/\text{ч}$  при управлении амплитудой вибраций,
- менее  $650^\circ/\text{ч} \times 10^{-5} = 0,0065^\circ/\text{ч}$  при управлении формой вибраций,
- погрешность масштабного коэффициента практически отсутствует из-за применения режима полного угла.

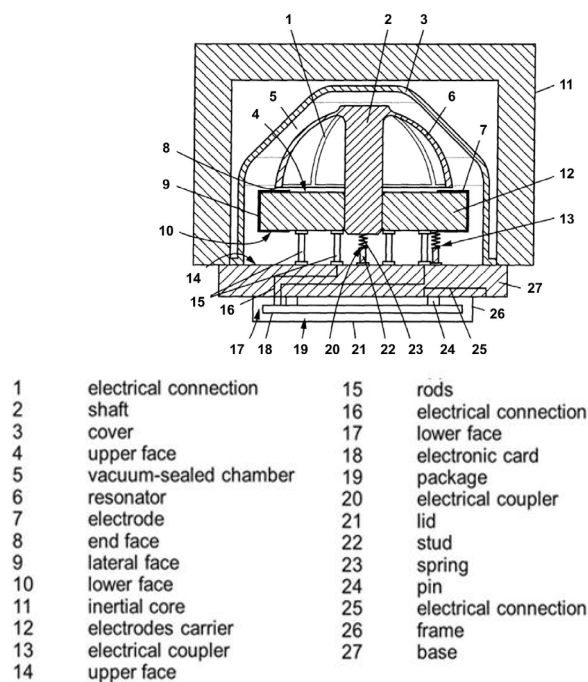


Рис. 2. Новый запатентованный ВТГ производства Sagem:

1–электрическое соединение, 2–вал, 3–крышка, 4–верхняя сторона, 5–герметичная камера, 6–резонатор, 7–электрод, 8–торцевая сторона, 9–боковая сторона, 10–нижняя сторона, 11–инерциальный блок, 12–электрододержатель, 13–электрический соединитель, 14–верхняя сторона, 15–стержни, 16–электрическое соединение, 17–нижняя сторона, 18–электронная карта, 19–корпус, 20–электрический соединитель, 21–заслонка, 22–шпилька, 23–пружина, 24–штырь, 25–электрическое соединение, 26–рамка, 27–основа



Рис. 3. 20-мм резонатор ВТГ производства Sagem

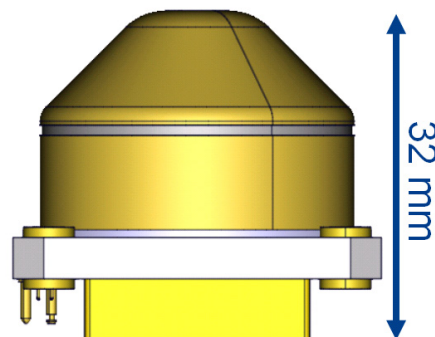


Рис. 4. Высокоточный ВТГ Sagem

Применение этих решений позволило создать маленький гироскоп объемом  $48 \text{ см}^3$  и массой менее 50 г (рис. 4). Такой гироскоп можно использовать в очень миниатюрных и высококачественных инерциальных измерительных модулях, подходящих для большого выбора приложений в ориентации и навигации.

Более того, в зависимости от времени балансировки и класса точности управления можно обеспечить разное качество работы при использовании того же оборудования, от 1 град/ч до нескольких тысячных градуса в час.

## Результаты испытаний волнового твердотельного гироскопа компании Sagem

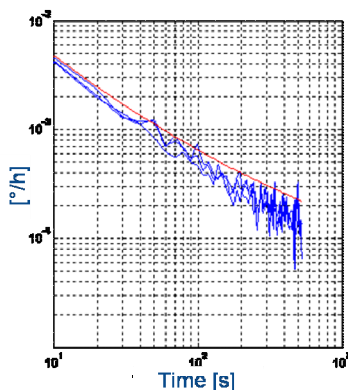


Рис. 5. Вариация Аллана  
ВТГ Sagem  
ния эффекта старения:

Одно из самых значимых достижений – параметр дрейфа – хорошо представлено в виде вариации Аллана на рис. 5.

Благодаря низкому уровню шума и случайного ухода по углу, менее чем через 10 секунд можно производить измерения угловой скорости с точностью до 0,01 град/ч.

Что касается исследований дрейфа, программа анализа старения, примененная на шести ВТГ в течение полугода, подтвердила, что выбранные конструкторские решения обеспечивают хорошую повторяемость результатов в широком температурном диапазоне.

На рис.6 показаны остаточные погрешности дрейфа, полученные на разных этапах программы изучения

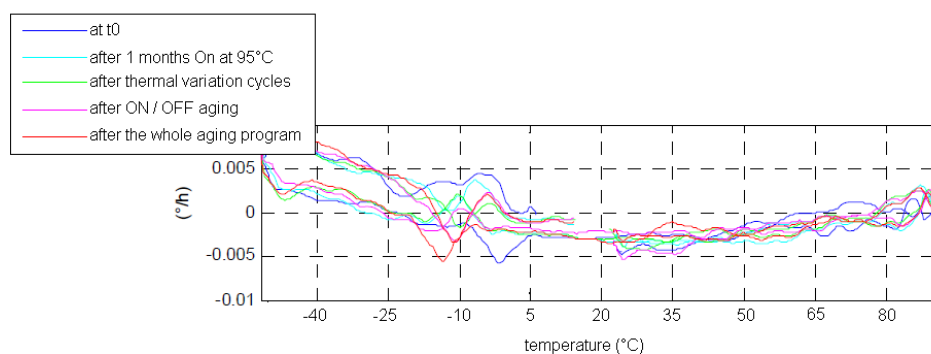


Рис. 6. Проверка повторяемости смещения нуля ВТГ Sagem

*Врезка:*

- при  $t_0$
- через 1 месяц при 95°C
- после циклов изменения температуры
- после старения «ВКЛ-ВЫКЛ»
- после всей программы изучения старения

Таким образом, достигнуты следующие показатели работы ВТГ Sagem:

- повторяемость смещения нуля: лучше 0,01 град/ч,
- погрешность масштабного коэффициента: менее  $5 \times 10^{-6}$ ,
- случайный уход – менее  $10^{-4}$  град/√ч.

Эти показатели, полученные за последние несколько лет, убедили специалистов Sagem в целесообразности применения описываемой технологии.

### Использование макетов инерциальных навигационных систем

Следующим шагом проверки способности ВТГ справляться со сложнейшими требованиями аэрокосмических и наземных условий стало применение макетов инерциальных навигационных систем. Макеты были построены на основе существующих ИНС с лазерными гироскопами производства Sagem. За счет компактности ВТГ стало еще более удобно устанавливать инерциальный блок с тремя независимыми ВТГ и тремя инерциальными акселерометрами (рис. 7), а также электронную плату в существующую архитектуру (рис. 8).



Рис. 7. Инерциальный блок с ВТГ

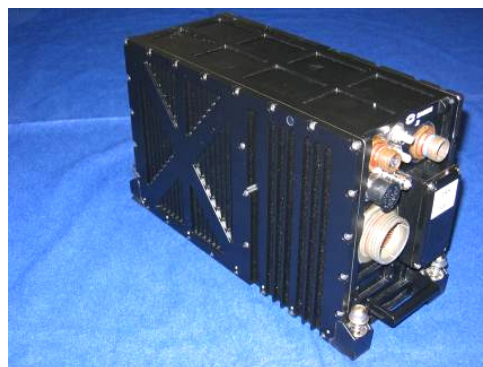


Рис. 8. ИНС на ВТГ

Таким образом, эти макеты очень близки к рабочему оборудованию в части как аппаратуры, так и функциональности и интерфейса. Испытания ИНС показали хорошую робастность и возможность работы на борту гражданских или военных самолетов:

- температурный диапазон от  $-40$  до  $60^{\circ}\text{C}$  (кратковременно – до  $95^{\circ}\text{C}$ ),
- механические вибрации: уровень встроенной инерциально-спутниковой навигационной системы,
- ударные воздействия:  $20\text{ g}$  в течение  $9\text{ ms}$  (пилообразные колебания).

Программа выставки гироскопов была адаптирована для лучшего использования преимуществ низкого случайного ухода и среднего дрейфа. В результате гироскоп работает так же хорошо, как и приборы гораздо большего размера.

После выставки гироскопа рассчитываются автономное инерциальное решение и спутниково-инерциальное решение (по коду GPS C/A).

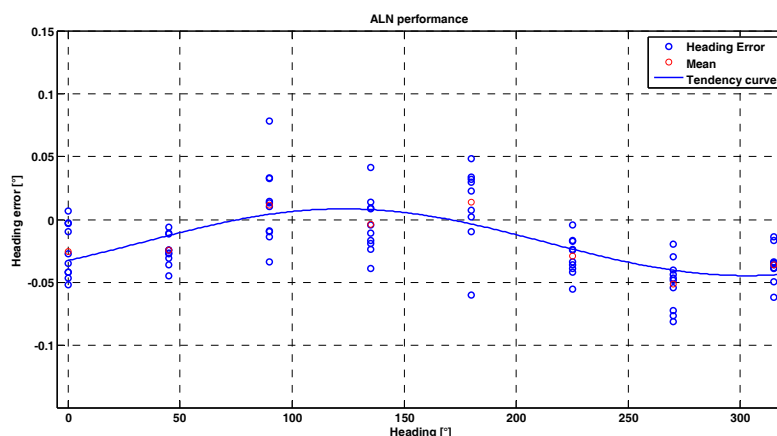


Рис. 9. Точность определения курса макетами ИНС на ВТГ

Вверху: Выставка

Вертикальная ось: Погрешность определения курса ( $^{\circ}$ )

Горизонтальная ось внизу: Курс ( $^{\circ}$ )

Врезка: Погрешность определения курса. Среднее. Кривая тенденции

Макеты были установлены и испытаны в лабораторных условиях, на наземном транспортном средстве и на самолете.

Ниже представлены типичные результаты. Все испытания проводились недалеко от Парижа (на широте около  $49^{\circ}$ ).

Выставка: при испытаниях задавалось восемь значений курса, после каждого изменения курса проводилось 10 выставок по 5 минут. На рис. 9 показаны результаты испытаний. Среднеквадратическое значение, полученное при испытаниях – около  $0,6\text{ мрад}$  после 5 минут.

Автономный инерциальный режим: испытания проводились на самолете. После двухчасовых полетов в автономном инерциальном режиме, среднеквадратическая погрешность продольной скорости составила 0,37 м/с, а круговое вероятное отклонение местоположения CEP50 – 0,31 мор. миль/ч (рис. 10).

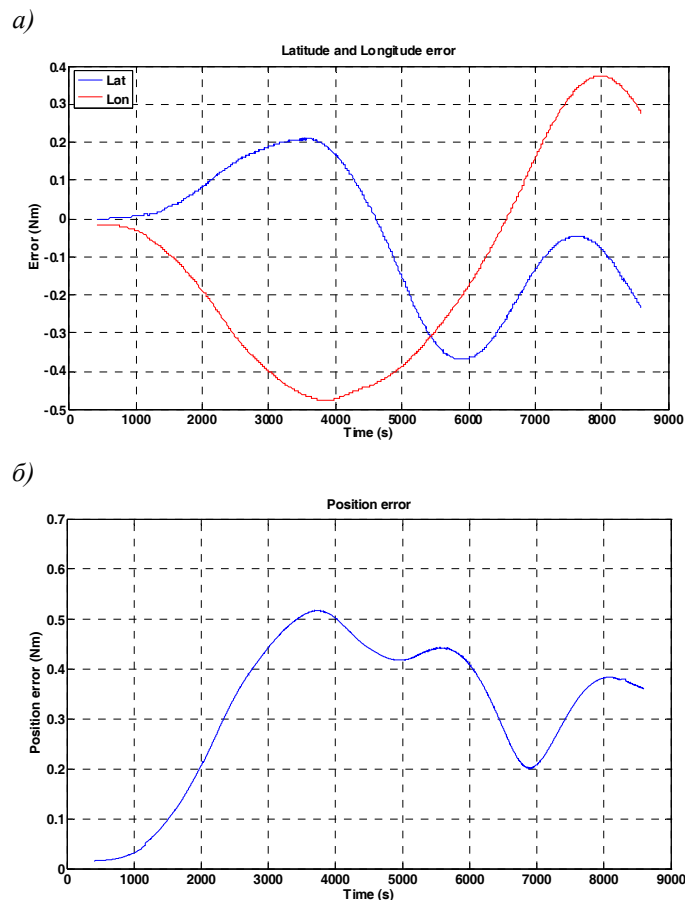


Рис. 10. Результаты летных испытаний навигационной системы: погрешность широты и долготы (а), погрешность местоположения (б)

### Применение ВТГ в морском приборостроении

В морской навигации ВТГ может применяться в следующих устройствах:

- компасы (спецификации МГО),
- гиригоризонткомпасы разных классов точности,
- инерциальные навигационные системы разных классов точности.

Применение конструкторских решений, разработанных компанией Sagem для ВТГ, привело к созданию очень простого, маленького, легкого, высоконадежного гироскопа, не требующего специального обслуживания. Эти качества хорошо адаптированы к морским приложениям, где чрезвычайно большое значение имеет долгий срок службы без необходимости техобслуживания. Более того, как видно из предыдущих разделов, качество работы ВТГ можно улучшить до высочайшего уровня в зависимости от времени, выделяемого на балансировку, и от класса точности управления.

ВТГ с такими характеристиками можно объединить с соответствующим типом акселерометра в оптимальной конфигурации и использовать в различных приложениях. В частности, при объединении с качественным МЭМС акселерометром новый ВТГ Sagem создает высокоэффективный блок для компаса или гиригоризонткомпаса. По такому принципу и построена линия продукции BlueNaute™.

### Компас и гиригоризонткомпас BlueNaute™

Относительно низкая динамика морских приложений в сравнении с аэрокосмическими или наземными дает возможность применять МЭМС акселерометры. Эта возможность была использована в миниатюрном инерциальном измерительном блоке (рис. 11) и в изделии BlueNaute™ (рис. 12).

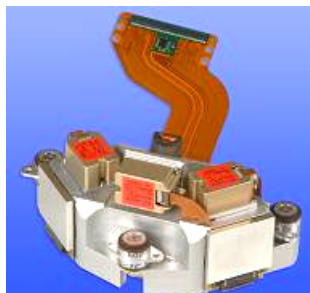


Рис. 11. Блок с ВТГ и МЭМС для BlueNaute™



Рис. 12. Компас/гиригоризонткомпас BlueNaute™

### Результаты испытаний BlueNaute™

Компас BlueNaute™ прошел полную серию испытаний в лаборатории и в море, чтобы подтвердить соответствие существующим стандартам (МГО) и оценить робастность и стабильность характеристик.

Лабораторные испытания включали все классические и тепловые проверки, а также весьма показательный динамический тест с помощью гексапода (шести-стержневой конструкции), имитирующего 6 степеней свободы (рис. 13).



Рис. 13. Компас BlueNaute™, испытание на гексапode

При морских испытаниях в качестве эталона использовалась система SIGMA40 (рис. 14).

Погрешности курса, наблюдаемые в течение 2 месяцев испытаний BlueNaute™ составили менее  $0,1^\circ \times$  секанс широты (рис. 15).

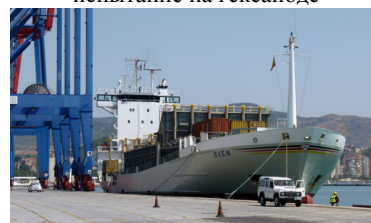


Рис. 14. Морские испытания

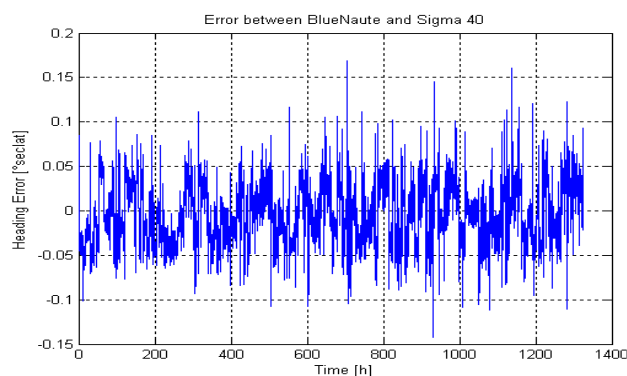


Рис. 15. Точность выработки курса за 1300 ч при морских испытаниях.  
Вверху: Разность показаний BlueNaute и Sigma 40  
Погрешность курса

### Заключение

После 15 лет исследований компания Sagem закончила разработку компактного волнового твердотельного гироскопа. В этом датчике реализованы все конструкторские задачи: он является простым, маленьким, легким, исключительно робастным и высоконадежным прибором. Допускает возможности адаптации и достижения беспрецедентной точности.

Прототипы инерциальных навигационных систем на основе ВТГ были разработаны и тщательно испытаны нашими промышленными партнерами, французскими вооруженными силами и НАТО. Тесты подтвердили совместимость ВТГ с большим количеством приложений – от коммерческих до военных, от космических до морских.

Производством ВТГ займется специальная новая фабрика под названием «Кориолис». Чтобы удовлетворить спрос рынков, где не работают сегодняшние лидеры (системы SIGMA на основе лазерных гироскопов) производительность фабрики будет постоянно расти. Первый пример – BlueNaute™, компас/гироскоп на основе ВТГ, не требующий специального обслуживания, прекрасно дополняет морские системы SIGMA40 и SIGMA40XP.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Foloppe Y., Rosellini L.**, HRG and North Finding, Proceedings of the Gyro Technology Symposium, Germany 2010, pp15-1-15-19.
2. **Rozelle D.M.**, The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets. Proc.19th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2009, pp1157-1178.
3. **Beitia J., Caron J.M., Paredes V.**, Quapason: a low vibration sensitivity vibrating rate gyro, Proceedings of the Gyro technology Symposium, Germany 2008, pp 4.1-4.11.
4. **Jeanroy A., Leger P.**, HRG flat electrodes, Patent US 6474161.

**Abstract.** Sagem improvements made in the design, the process and in the control of the HRG help to reach high performances while keeping the intrinsic simplicity of the Coriolis Vibrating Gyros family. Therefore it allows the HRG to challenge the Sagnac Effect Gyros for Strap-Down inertial navigation.

The simplicity derives from many patented innovations which lead to a very compact gyro with a very low number of components. The manufacturing takes advantage of this simplified design and of a new automatic tuning and balancing process which reduces sensitivities to mechanical environment. While using a Whole Angle mode of control which allows for a very good scale factor, a new full digital electronics provides gain and phase accuracy at the level needed by the 0,01°/h class of bias performance. The paper explains these choices and presents the results obtained by the Sagem HRG during tests. Thanks to these characteristics, new applications are developed, especially when compactness, low consumption, reliability and maintenance free long term performances are needed as it is the case with Marine Gyrocompass or Marine Attitude and Heading Reference Systems. An automatic calibration during operation, using the ability of the Sagem HRG to change the direction of the vibration while in Whole Angle mode, allows for maintaining the long term performance during all the life of the system. The architecture of the Sagem marine AHRS Blue Naute is presented and many test results are given, including those obtained on marine vessel.

**Key words:** Control, Gyroscope, CVG, HRG, MEMS