

В. Г. ПЕШЕХОНОВ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрены итоги российских работ в области гироскопических средств навигации и ориентации за последние пятнадцать лет. Анализируется уровень современных разработок и прогнозируется развитие инерциальных технологий на обозримую перспективу.

Введение

Пятнадцать лет назад был опубликован обзор [1], в котором рассматривалось состояние и перспективы развития инерциальных средств навигации в России. Представляется целесообразным проанализировать итоги прошедшего периода, оценить, что удалось, а что предстоит сделать в следующие пятнадцать лет – до конца первой четверти XXI века. Пятнадцатилетний отрезок времени выбран не случайно: опыт показывает, что примерно такой период времени проходит от начала разработки гироскопа до начала серийного выпуска инерциальной системы на его основе.

Обзор, естественно, отражает личную точку зрения автора. Она основывается как на опыте ЦНИИ «Электроприбор», который продолжает активно работать в области инерциальных технологий, так и на базе знаний в этой области, содержащейся в выпусках журнала «Гироскопия и навигация», трудах конференции памяти Н.Н.Острякова, Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, Штутгартского симпозиума по гиротехнологиям (теперь симпозиум Университета г. Карлсруэ), а также в ряде монографий.

В середине девяностых годов в стране доминирующим был процесс совершенствования инерциальных технологий, созданных в предыдущие десятилетия, но уже было понятно, что в новых экономических условиях требуется пересмотр направления работ.

Пешехонов Владимир Григорьевич. Доктор технических наук, профессор, академик РАН, генеральный директор ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Президент Академии навигации и управления движением.

Кратко рекомендации работы [1] сводились к следующему:

- в области гироскопов усилия сосредоточить на развитии волновых оптических гироскопов (лазерного, волоконно-оптического) и волнового твердотельного;
- в области инерциальных систем развивать бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на основе волновых гироскопов (имеющиеся акселерометры обеспечивают создание БИНС и в настоящей статье не рассматриваются);
- в области вычислительных средств и технической электроники перейти на современную элементную базу мирового уровня.

Последняя проблема была критической при поставке гироскопических приборов и систем на экспорт и в сжатые сроки решилась единственно возможным в то время путем – за счет использования импортной элементной базы. Сегодня если и существует задача в этой области, то только в возвращении к российской элементной базе по мере ее совершенствования.

Первые две проблемы, однако, не утратили своей актуальности, так как в достаточном объеме решить их в прошедшие пятнадцать лет не удалось.

Механические гироскопы и инерциальные навигационные системы

Прецизионные гироскопы (случайный дрейф менее 10^{-3} град/ч). Электростатический гироскоп (ЭСГ) был и остается безусловным лидером среди наиболее точных (стабильных) гироскопов. Разработанный в 70-е годы ЭСГ с полым бериллиевым ротором и оптическим списыванием положения ротора обладает большим модернизационным ресурсом, реализация которого обеспечивает эволюционное повышение точностных и эксплуатационных характеристик.

Известно, что точностные характеристики ЭСГ определяются прежде всего степенью отклонения ротора от идеального. В последнее десятилетие исследовались задачи снижения влияния наведенных на ротор зарядов, уменьшения его дисбаланса и несферичности. Стеkanie с ротора заряда, наведенного при взвешивании ротора, является одним из источников нестабильности дрейфа ЭСГ. Задачу уменьшения заряда удалось решить за счет специальной системы электродов подвеса [2]. Снижение дисбаланса ротора было достигнуто благодаря изменению метода взвешивания ротора при балансировке. Интегральная сферичность ротора повышена путем подбора частоты его вращения по критерию минимальной чувствительности дрейфа к изменению положения ротора в камере [3].

Наряду с гироскопами источниками погрешности инерциальной навигационной системы (ИНС) являются элементы гироориентатора – карданов подвес, в котором размещается ЭСГ, и датчики угла на осях кардановых колец. Для снижения этих погрешностей в алгоритм калибровки ИНС введен фильтр Калмана, вектор состояния которого включает наряду с коэффициентами модели дрейфа ЭСГ также и погрешности гироориентатора [4, 5, 6].

В ходе этих исследований был предложен общий подход к использованию избыточной информации при наблюдении двух векторов для повышения точности навигационных определений не только ИНС на ЭСГ, но и в ряде других задач [7].

В работе [1] отмечено, что для поддержания чрезвычайно сложной технологии ЭСГ необходимы новые области применения этого вида гироскопов. Предварительные исследования показали, что такой областью может стать ориентация космических аппаратов (КА). Преимущества ЭСГ в космических применениях очевидны. Во-первых, при прочих равных условиях в космосе точность ЭСГ должна быть выше, чем на Земле, так как уводящий момент, действующий на ротор, пропорционален квадрату напряженности поля подвеса, которая в космосе значительно снижается. Во-вторых, использование позиционных гироскопов взамен датчиков угловой скорости в системе ориентации КА позволяет снять ограничения на динамику углового движения КА, в том числе на развороты относительно орбиты для повышения информативности съемки.

Однако для реализации этих преимуществ было необходимо переработать ЭСГ и инерциальную систему ориентации, радикально снизить массогабаритные характеристики и энергопотребление, обеспечить работу на вращающемся КА.

Были разработаны малогабаритный ЭСГ со сплошным бериллиевым ротором и бесплатформенная инерциальная система ориентации на его основе (БИС-ЭГ). Реализованные в БИС-ЭГ новые конструкторско-технологические решения [8] себя оправдали, и эти системы нашли в последнее десятилетие применение на ряде КА дистанционного зондирования Земли [9].

При этом были решены многие специфические задачи, в том числе задача уточнения коэффициентов модели дрейфа гироскопов в условиях полета КА по данным бортового астродатчика в условиях недостаточной жесткости базы между БИС-ЭГ и астродатчиком [10]. Исследования дальнейших путей повышения точности ориентации привело к предложению [11] о комплексировании информации от двух гироскопических систем, имеющих отличные спектры погрешностей: БИС-ЭГ (малый дрейф при значительной шумовой составляющей) и триады волоконно-оптических гироскопов (значительный дрейф при высоком угловом разрешении).

Актуальной остается задача повышения точности списывания углового положения ротора гироскопа в связанной системе координат в полном телесном угле.

В целом тематика ЭСГ выдержала испытания временем и эволюционно развивается в интересах подводной навигации и космических применений. Мировой опыт показывает, что ресурсы повышения точности ЭСГ велики.

Об этом свидетельствует завершившийся в 2006 г. космический эксперимент по проверке общей теории относительности, проведенный Стенфордским университетом (Калифорния, США) и Национальным космическим агентством США (NASA). Задача эксперимента заключалась в измерении с помощью специального КА Gravity-Probe В деформации пространства-времени вблизи вращающейся Земли. [12]. Успех этого фантастически тонкого эксперимента определялся тем, что на борту КА опорная система координат материализовалась четырьмя криогенными ЭСГ со случайным дрейфом 10^{-11} град/ч. [13]. Очевидно, что в обозримой перспективе ЭСГ останется наиболее точным гироскопом.

Высокоточные механические гироскопы (случайный дрейф порядка 10^{-3} град/ч). К 80-м годам прошлого столетия были разработаны, освоены в производстве и выпускались серийно три вида высокоточных механических гироскопов: с поплавковым (ПГ), аэродинамическим (ШГ) и с магниторезонансным (МСГ) подвесом ротора.

Наиболее широко применялись ПГ. Они использовались в высокоточных гироскопических системах ракетно-космической техники и частично – в авиационных и морских системах. На высокоточных трехстепенных поплавковых гироскопах была построена ИНС стратегических атомных подводных лодок, а на среднеточных двухстепенных ПГ – система гироскопической стабилизации вооружения надводных кораблей [14]. Кроме того, морские ИНС строились на ШГ (многоцелевые атомные подводные лодки) и МСГ (дизель-электрические подводные лодки).

Новые экономические реалии 90-х годов не позволили поддерживать все ранее разработанные гироскопические технологии, а тем более разрабатывать новые. Было необходимо сократить число видов имеющихся в производстве гироскопов и ИНС на их основе. Не сразу, но в новых морских разработках выбор был сделан в пользу двухстепенного ПГ. Трехстепенной ПГ к тому времени необратимо отстал по точности от ЭСГ, а ШГ и МСГ безусловно уступали двухстепенному ПГ по надежности и ресурсу. Однако для того, чтобы заменить ШГ и МСГ на ПГ, необходимо было на порядок поднять точность последнего. Были реализованы следующие новые технические решения: в устройство центрирования поплавковой камеры азимутального гироскопа внедрен радиальный электростатический подвес, пересмотрен технологический процесс стабилизации параметров ПГ в процессе изготовления, применена двухконтурная система термостабилизации (гироскопа и гироориентатора), использована схема автокомпенсации систематической составляющей дрейфа ПГ вращением гиростабилизированной платформы вокруг вертикальной оси, для выработки сигналов коррекции применен фильтр Калмана высокого порядка.

На базе модернизированного ПГ и вновь разработанного центрального гироскопического прибора (ранняя версия использовалась в ИНС на МСГ) была создана система инерциальной навигации и стабилизации (СИНС) «Ладога-М» [15].

Точность СИНС «Ладога-М» оказалась достаточной для решения задач навигации и стабилизации надводных кораблей всех классов – от ракетных и артиллерийских катеров для авианосца. Дополнительное повышение точности выработки навигационных параметров в процессе отработки технологии изготовления ПГ открыло еще одно направление использования СИНС – в навигационных комплексах дизель-электрических подводных лодок взамен ИНС на МСГ.

Серийность производства ПГ была дополнительно увеличена за счет их использования в гиростабилизаторе мобильного (морского и авиационного) гравиметра «Чекан-АМ», предназначенного для геологоразведочных работ на морском шельфе и других применений [16]. Этот гравиметр оказался конкурентоспособным на мировом рынке и выпускается серийно.

В итоге удалось решить задачи высокоточной морской навигации и ста-

билизации и сохранить выпуск ПГ и ИНС на уровне, обеспечивающем экономическую эффективность производства, и прекратить выпуск ШГ, МСГ и систем на их основе.

Механические гироскопы средней точности ($10^{-1} - 10^{-2}$ град/ч). Этот класс механических гироскопов представлен прежде всего динамически настраиваемым гироскопом (ДНГ), который до недавнего времени был основным чувствительным элементом авиационных, морских и наземных систем курсоуказания и ориентации. Однако в последние годы область применения ДНГ сужается вследствие появления более экономически эффективных (в том числе и из-за большего ресурса) волновых гироскопов.

Впрочем в некоторых применениях позиции ДНГ сохраняются. Примером могут служить инклинометрические приборы, где существуют жесткие ограничения на габариты гироскопа и необходимо обеспечить его работу в большом диапазоне температур, магнитных полей и механических воздействий. В этом отношении ДНГ пока не имеет реальных конкурентов и разработка инклинометров на базе ДНГ продолжается [17].

Следует отметить, что за последнее десятилетие достигнуты серьезные успехи в развитии теории и техники инклинометрических систем:

- разработаны новые схемы и алгоритмы малогабаритных бесплатформенных инклинометров, работающих в режиме точечного компасирования в произвольно ориентированных скважинах;
- разработана и внедрена новая схема гироскопического инклинометра, осуществляющего высокопроизводительную непрерывную съемку скважин произвольной ориентации в процессе движения вдоль ствола скважины.

В последние годы началась разработка еще одного среднеточного механического гироскопа – вибрационного гироскопа с металлическим резонатором. Очевидным достоинством этого гироскопа является простота конструкции, но оценить его параметры пока затруднительно, так как еще продолжают испытания [18].

Волновые оптические гироскопы и бесплатформенные инерциальные системы

Волновые оптические гироскопы, реализующие эффект Саньяка, обладают рядом преимуществ перед механическими гироскопами. Они работают в широком диапазоне угловых скоростей и ускорений, обладают высокой разрешающей способностью, инвариантны к ориентации оси чувствительности относительно вектора силы тяжести, т.е. наилучшим образом подходят для построения БИНС.

Среди волновых гироскопов наибольшее распространение получили лазерные гироскопы (ЛГ) класса точности $10^{-3} - 10^{-2}$ град/ч. Сегодня это самый распространенный в мире высокоточный гироскоп. Только для гражданской и военной авиации ежегодно выпускаются тысячи БИНС на ЛГ.

Как и ЭСГ, ЛГ нашел применение в фундаментальных исследованиях – в области геодинамики. Для этой цели созданы уникальные прецизионные ЛГ, измеряющие скорость вращения Земли с относительной погрешностью

$2 \cdot 10^{-8}$ [19]. Правда, габариты и чувствительность к вибрационным возмущениям этого ЛГ столь велики, что его невозможно использовать на подвижных объектах.

К сожалению, нашу страну бум развития ЛГ обошел стороной. Возникшее еще в восьмидесятые годы технологическое отставание в этой области углубилось в девяностые годы из-за недостаточного финансирования и устаревшего оборудования. Максимум, что удалось сделать, это наладить выпуск небольшими партиями среднеточных ЛГ и БИНС. Однако работы низкой интенсивности по совершенствованию ЛГ продолжались.

В последние годы отмечается рост публикаций, посвященных исследованию вопросов зависимости погрешности ЛГ от факторов, определяющих ширину зоны захвата, прогнозированию срока службы ЛГ [20], его эксплуатационной надежности [21], методам настройки резонатора ЛГ [22]. Есть основание ожидать, что в ближайшие годы будет освоена современная технология ЛГ и начнется серийный выпуск ЛГ класса точности 10^{-2} град/ч.

Устойчиво развиваются разработки ЛГ с круговой поляризацией встречных волн и управлением режимом их генерации на основе магнитооптического эффекта Зеемана. Зеемановский ЛГ обладает существенными эксплуатационными преимуществами перед классическим ЛГ с вибрационной подставкой, но значительно уступает по точности, и поэтому область его применения достаточно узкая. Для повышения точности зеемановского ЛГ необходимо уменьшить их чувствительность к пространственно-временным вариациям внешних магнитных полей. Ведутся исследования по использованию квазичетырехчастотного режима, уменьшающего это влияние [23].

Задержка в развитии технологии ЛГ стимулировала интерес к другому виду волновых гироскопов – волоконно-оптическому (ВОГ), также основанному на эффекте Саньяка, но реализующего его в интерферометрической схеме. Потенциальное преимущество ВОГ по сравнению с ЛГ – большую величину масштабного коэффициента за счет большой длины волокна, компактно уложенного в катушке со встречной намоткой – долго не удавалось реализовать из-за значительных потерь в волокне.

Радикального снижения потери добились разработчики волоконно-оптических линий связи. Для той же цели были разработаны эффективные источники света и оптоэлектронные преобразователи. Таким образом, без усилий со стороны разработчиков гироскопов была создана технологическая база для создания ВОГ. Первой в стране промышленный выпуск ВОГ начала фирма «Физоптика» [24], разработавшая серию ВОГ разомкнутого типа, вначале с ограниченной длиной волоконной линии и дрейфом порядка 10 град/ч, а затем с увеличенной длиной и дрейфом порядка 1 град/ч. Этот проект оказался чрезвычайно удачным, и был создан продукт, востребованный не только в стране, но и в мире. В частности, ЦНИИ «Электроприбор» разработал на базе ВОГ «Физоптики» измерители вертикальных перемещений, гировертикали, гироазимутгоризонты и транспортные курсоуказатели, которые выпускаются мелкими сериями последние десять лет (рис. 1). При этом точность, необходимая для выработки курса, была достигнута с помощью автокомпенсации дрейфа ВОГ путем его вращения вокруг вертикальной оси [25, 26].

Ключевая задача – создание БИНС – не может быть решена на базе ВОГ разомкнутого типа. Необходимы гироскопы со случайным дрейфом 10^{-2} град/ч и менее. Мировой опыт показывает, что подобные ВОГ должны строиться по более сложной схеме с замкнутой обратной связью. В настоящее время разработку высокоточных ВОГ ведут Пермская научно-производственная приборостроительная компания [27], зеленоградская компания «Оптолинк» [28] и ЦНИИ «Электроприбор» совместно с СПбГУ-ИТМО. Сравнительные испытания экспериментальных образцов ВОГ показали [29], что погрешность всех трех ВОГ примерно одинакова и лежит в пределах 10^{-2} град/ч. при 100-секундном осреднении. Проведенные одновременно и по той же методике испытания триады ВОГ (шифр IMU-120) одной из ведущих в этой области фирм мира IXSEA дало такой же результат.

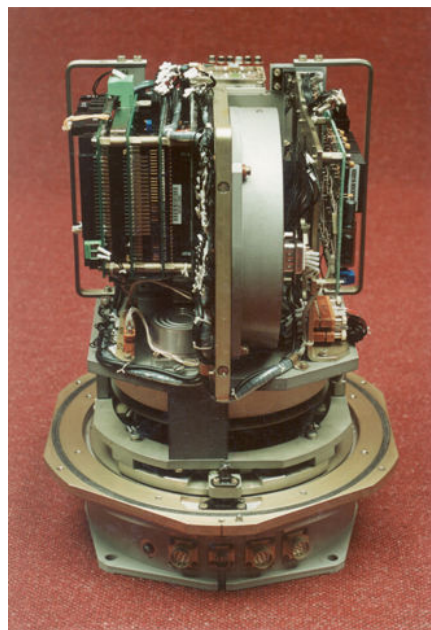


Рис. 1. Гироазимутгоризонткомпас «Омега» для морских судов

Дальнейшие работы по созданию высокоточного ВОГ идут по пути снижения влияния на его характеристики внешних воздействий – изменений температуры окружающей среды, магнитного поля, вибраций и т.д. ВОГ особо чувствителен к температурным воздействиям. Наиболее неблагоприятны для него нестационарные радиальные температурные перепады в цилиндрической волоконной катушке [30]. Для снижения негативного влияния изменений температуры используется квадрупольная намотка волокна на катушку, тепловая модель и активная термостабилизация катушки. Реализация этих мер обеспечила стабильность дрейфа ВОГ на уровне 10^{-2} град/ч в диапазоне температур 15–35°C. Это позволило приступить к экспериментальной отработке среднеточной БИНС для надводных кораблей. Следует ожидать завершения разработки, постановки на производство и начала поставок корабельной БИНС в течение ближайших двух лет. Отработка среднеточной авиационной БИНС, которая должна работать в значительно более широком диапазоне температур, потребует большего времени, равно как и создание высокоточной БИНС (класс точности 10^{-3} град/ч), необходимой для навигационных комплексов подводных лодок и ряда других применений. Но то, что эти БИНС будут разработаны, сомнений не вызывает.

Если сопоставить этот прогноз развития БИНС на ЛГ, то можно сделать вывод, что БИНС на обоих типах оптических гироскопов появятся в нашей стране практически одновременно, а не с разницей более десяти лет, как это произошло за рубежом. Такое положение дел открывает для БИНС на ВОГ в нашей стране более широкие возможности, чем они имеют на зарубежных рынках, где долгие годы был представлен только ЛГ.

Волновой твердотельный гироскоп

Исследование и разработки волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) ведутся более тридцати лет. Интерес к нему вызван уникальным сочетанием свойств: простота конструкции, высокая потенциальная точность, практически неограниченный технический ресурс, небольшие габаритные размеры и энергопотребление.

Разработку ВТГ в восьмидесятые годы начал ряд ведущих гироскопических фирм страны. Были исследованы теория ВТГ [31], основы его проектирования [32] и технологии [33]. В девяностые годы появились первые экспериментальные образцы, однако стадия их исследований затянулась и не завершена до настоящего времени [34]. Не преодолены технологические трудности, прежде всего материаловедческого характера.

Тем временем в США фирма Litton (входит в корпорацию «Нортроп Грумман») начала промышленный выпуск ВТГ, который нашел ограниченное применение в космической аппаратуре, а также в инклинометрах [35]. Интересно отметить, что в этой разработке использованы некоторые достижения отечественных ученых [36].

В сложившейся ситуации трудно прогнозировать широкое применение ВТГ.

Микроминиатюрные механические гироскопы и инерциальные измерительные модули

В середине восьмидесятих годов за рубежом были начаты интенсивные поиски путей создания микроминиатюрных, дешевых, пригодных для крупносерийного производства гироскопов. Во Франции фирма Sagem разработала гироскоп с четырьмя вибрирующими кварцевыми стержнями, который в дальнейшем стала выпускать крупными сериями. В США Лаборатория им. Ч. Дрейпера развила другое направление – микромеханических вибрационных гироскопов [37], которые сегодня выпускаются миллионами штук фирмами ряда стран. Класс точности этих приборов 0,01–0,1 град/с.

В России исследования микромеханических гироскопов (ММГ) начались в конце девяностых годов [38, 39, 40, 41]. Вскоре появилось первое учебное пособие для студентов [42]. Разработки микромеханических гироскопов достаточно быстро привели к созданию экспериментальных (макетных) образцов [43, 44] указанного выше класса точности.

Для освоения промышленного выпуска ММГ необходимо решить широкий круг задач:

- освоить технологию изготовления микромеханической части гироскопа с характерными размерами менее 10 мкм, соотношением размеров 1:100, зазорами в конструкции 2 мкм, точностью изготовления лучше 0,1 мкм, шероховатостью поверхности менее 0,02 мкм;
- обеспечить измерение емкости между вибраторами и основанием величиной порядка 1 пФ с погрешностью измерения не более 10^{-4} пФ;
- создать и непрерывно поддерживать вакуум не хуже 10^{-3} мм рт.ст. в объеме, где размещается микромеханическая часть;
- спроектировать и изготовить специализированную большую интеграль-

ную микросхему, размещаемую в корпусе объемом менее 1 см^3 вместе с микромеханической частью.

К моменту начала разработки ММГ в России подобный набор технологий отсутствовал, и это остановило ряд организаций, начавших исследовать проблему ММГ. Те, кто довел эту работу до экспериментальных образцов, пошли двумя альтернативными путями. Один путь предполагал доработку имевшихся в стране технологий и оборудования и основывался в значительной степени на искусстве технологов. Другой – изначально ориентировался на имеющиеся в мире технологии с последующим переносом их в Россию. Именно по этому пути пошел ЦНИИ «Электроприбор», разработавший свой ММГ R-R типа и привлекший в качестве изготовителя французскую специализированную фирму Tronics Microsystems [43]. Даже этой фирме потребовалось значительное время, чтобы освоить весь комплекс технологий по изготовлению ММГ, но когда процесс освоения завершился, изготовление образцов ММГ в необходимых количествах перестало быть проблемой.

В мировой практике микромеханические датчики параметров движения получили широкое применение в разнообразных системах управления движением гражданского (от автомобилей, до управляемых игрушек) и военного назначения [45, 46]. Эта тематика не рассматривается в рамках данной статьи. Однако в последние годы работы по повышению точности ММГ привели к созданию образцов навигационной точности (лучше 15 град/ч). В литературе появились сведения о том, что фирма Thales в сотрудничестве с фирмой Tronics Microsystems получила опытные образцы ММГ с нестабильностью нуля в пуске (по вариации Аллана) на уровне $0,1 \text{ град/ч}$ [47]. Вскоре были получены опытные образцы ММГ российской разработки того же класса точности [48].

Вибрационный минигироскоп, при изготовлении которого используются стандартные технологии микроэлектромеханических систем, разработала фирма «Айсенс» (Москва). Разработка включает гироскоп «АИСТ-100» и ИНС «АИСТ-320» на его основе. Стабильность нуля гироскопа в пуске при осреднении 10–100 с составила $2,5 \text{ град/ч}$ [49].

О еще более высоких точностных характеристиках сообщалось группой норвежских авторов, разработавших на базе MEMS технологий ММГ SAR-500, построенный по схеме «бабочка» из двух идентичных вибрационных систем. Заявленные характеристики гироскопа: стабильность нуля в пуске $0,04 \text{ град/ч}$ при ширине полосы 100 Гц и диапазоне измеряемых угловых скоростей $\pm 500 \text{ град/с}$ [50].

Эти достижения позволяют рассчитывать, что ММГ потеснят низкоточные механические и оптические волновые гироскопы. Основное применение они найдут в интегрированных системах навигации (ИСН), где точностные характеристики обеспечиваются спутниковой навигационной системой (СНС), а инерциальный измерительный модуль (ИИМ) используется для сглаживания шумов СНС и хранения навигационных данных в случае кратковременных перерывов спутниковой информации. При этом использование ММГ впервые открыло возможность построения ИИМ эквивалентных аппаратуре потребителей СНС по массогабаритным характеристикам, энергопотреблению и стоимости.

Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации

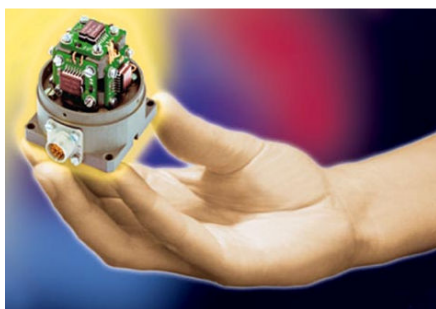


Рис. 2. Интегрированная навигационная система, разработанная ЦНИИ «Электроприбор»

Уже первые опыты в конце девяностых – начале двухтысячных годов показали высокую эффективность ИСН. Первоначально в составе ИСН использовались ИИМ на доступной в тот период элементной базе (ДНГ и малогабаритные ВОГ) и GPS приемники. Обработка информации велась тоже по простейшей – слабо связанной схеме. Подобная конструкция не обеспечивала адекватных массогабаритных характеристик и стоимости составных частей ИСН, но имела вполне

удовлетворительные точностные характеристики и нашла применение. Затем, когда появились ММГ зарубежного производства, были сконструированы миниатюрные ИИМ (рис. 2) и началась отработка миниатюрных ИСН. Впоследствии в ряде случаев импортные ММГ были заменены на экспериментальные отечественные, а GPS приемники – на аппаратуру потребителей ГЛОНАСС.

Интенсивное развитие отечественной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС открыло новые возможности развития ИСН. В частности, стало возможным построение сильносвязанной ИНС, в которой в отличие от слабосвязанной ИСН совместно обрабатываются не координаты и скорости, вырабатываемые составными частями ИСН, а дальности (квазидальности) и доплеровские сдвиги.



Рис. 3. Испытания сильносвязанной интегрированной навигационной системы

Преимущества сильносвязанной системы известны. Она работоспособна, когда число наблюдаемых спутников меньше четырех – минимально необходимого для навигационного определения по СНС. Что это дает на практике, иллюстрирует рис. 3, где сравнены навигационные данные, полученные при движении автомобиля, непосредственно от аппаратуры потребителя

СНС и от сильносвязанной ИСН. Пока автомобиль движется по набережной, по мосту и вблизи него, где наблюдается значительное число спутников, эти данные совпадают. Но на улицах даже при частичном затенении домами ошибка СНС возрастают на порядок, тогда как погрешность ИСН остается в разумных пределах.

К настоящему времени этап исследования ИСН можно считать законченным. Серийный выпуск ИСН зависит прежде всего от потребителей. Ими могут быть любые производители транспортных средств различного назначения и даже отдельные пешеходы. В замкнутых объемах, где недоступны сигналы СНС, навигационные системы могут строиться на базе микромеханических ИИМ, одометров и локальных радиомаячков.

Заключение

В прошедшее пятнадцатилетие российским разработчикам удалось полностью уйти от неэффективной элементной базы вычислительной техники и автоматики. Сохранена и развивается уникальная технология ЭСГ – единственного прецизионного гироскопа. Полностью отказаться от высокоточных механических гироскопов пока не получилось, но число их уменьшилось до одного – поплавкового.

Не удалось наладить серийный выпуск высокоточных волновых гироскопов, конкурентоспособных на мировом рынке. Однако серийно выпускаются среднеточные лазерные и волоконно-оптические гироскопы и бесплатформенные системы на их основе и завершаются разработки высокоточных волновых оптических гироскопов и БИНС.

Появились первые отечественные экспериментальные образцы микромеханических гироскопов, но технологии их производства не освоены и требуют существенных вложений.

Замедленное освоение современных инерциальных технологий определяется прежде всего отсутствием адекватного спроса на новую отечественную гироскопическую технику. В последние годы в связи с переходом российской промышленности на выпуск продукции нового поколения такой спрос начал формироваться.

В связи с этим в области инерциальных технологий будет завершена структурная перестройка и продуктовый ряд будет следующим:

- механические гироскопы будут применяться только в прецизионных ИНС, выпускаемых мелкими сериями по традиционным технологиям;
- высокоточные и среднеточные БИНС будут строиться на оптических волновых гироскопах и выпускаться крупными сериями;
- микромеханические гироскопы станут массовым продуктом, предназначенным для систем управления движением и интегрированных навигационных систем.

Необходимый для этого научно-технический потенциал имеется. Развитие технологической базы целесообразно вести двумя путями. Производство ВОГ может быть обеспечено имеющимися технологиями. Производство высокоточных лазерных гироскопов так же, как и микромеханических быстрее

можно освоить с привлечением зарубежных технологий.

В последние годы определенный интерес вызывают поиски новых видов гироскопов. Правда, только в одном случае этот интерес был вызван конкретной новой задачей – создания суперточной гироскопической системы для научного эксперимента Gravity Probe-B [12]. Созданный в рамках этой работы криогенный гироскоп предназначен исключительно для космических применений. Другие обсуждаемые виды гироскопов (интерферометрические на волнах материи, с использованием бозе-эйнштейновского конденсата, на сверхтекучем гелии) пока находятся в зоне интересов небольших академических исследовательских групп [51].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Ключевые задачи современной автономной навигации // Гироскопия и навигация. - 1996. - № 1 (12). - С.48-55.
2. **Анфиногенов А.С., Дряпак О.Г., Парфенов О.И., Сумароков В.В.** Потенциал ротора электростатического гироскопа при различных структурах подвеса // Гироскопия и навигация. - 2003. № 3 (42). - С.37-40.
3. **Гусинский В.З., Парфенов О.И.** Об одном способе повышения точности электростатического гироскопа // Гироскопия и навигация. - 2004. - № 4 (47). - С.67.
4. **Гусинский В.З., Лесючевский В.М., Столбов А.Л.** Автоматизированная калибровка инструментальных погрешностей прецизионной инерциальной навигационной системы на электростатических гироскопах // Гироскопия и навигация. - 2000. - № 4 (31). - С. 59.
5. **Гусинский В.З., Лесючевский В.М., Столбов А.Л.** Автоматическая калибровка списывающих устройств гироскопизатора карданной инерциальной системы на неуправляемых гироскопах // Гироскопия и навигация. - 2000. - № 1 (28). - С. 16-23.
6. **Аленькин И.В., Гусинский В.З., Литманович Ю.А., А.А.Столбов.** Методика калибровки геометрической погрешности кардановых подвесов инерциальной навигационной системы на неуправляемых гироскопах // Гироскопия и навигация. - 2004. - № 4 (47). - С.76-77.
7. **V.Z.Gusinsky, Y.A.Litmanovich.** Use of Redundant Information in Attitude Determination from Two Vector Observations // Symposium Gyro Technology 2006, Stuttgart, Germany, p.13.0.
8. **С.С.Гуревич, В.З.Гусинский, Б.Е.Ландау и др.** Система ориентации космических аппаратов на базе бескарданных электростатических гироскопов со сплошным ротором // Сборник докладов VIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. - СПб.:ЦНИИ «Электроприбор», 2001. - С.52-59.
9. **Г.П.Аншаков, В.Г.Пешехонов, Б.Е.Ландау, Л.П.Несенюк.** Автономная система ориентации для спутника дистанционного зондирования Земли//Труды Международного семинара ИФАК «Аэрокосмическое наведение, навигация и системы управления полетом», Самара, 30 июня - 2 июля 2009 г.
10. **Г.И.Емельянцева, Б.Е.Ландау, С.Л.Левин, Романенко С.Г.** Калибровка инерциальной системы ориентации на электростатических гироскопах по данным астровизирующего устройства в условиях космического аппарата // Гироскопия и навигация. 2005. - № 2 (49). - С. 69-78.
11. **В.З.Гусинский, Ю.А.Литманович.** Повышение точности угловой ориентации космического аппарата путем совместной обработки данных электростатических и волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2003. - № 4 (43). - С.50-58.
12. **Paul S. Wesson and Mark Anderson.** The Gravity Probe B Bailout // IEEE Spectrum/The Gravity Probe B Bailout, 02.04.2009.
13. **Everitt C.W.F.** A Superconducting Gyroscope to test Einstein General Theory of Relativity // Proceedings of the society of Photo-Optical Instrumentation Engineers August 1978, p.175-178.
14. **Берман З.М., Зельдович С.М., Окон И.М., Ривкин С.С.** Определение параметров качки корабля с учетом его деформаций, Л., ЦНИИ «Румб», 1989.
15. **Берман З.М., Канушин В.М., Миронов Ю.В., Мохов В.П., Шарыгин Б.Л.** Система инерциальной навигации и стабилизации «Ладога-М»: результаты разработки и испытаний // Гироскопия и навигация. -2002. - № 4 (39). - С.29-38.
16. **Блажнов Б.А., Элинсон Л.С., Несенюк Л.П., Пешехонов В.Г.** Морские и авиационные гиросtabilизированные гравиметры, разрабатываемые в ЦНИИ «Электроприбор». Сбор-

- ник трудов I Санкт-Петербургской конференции по гироскопической технике ЦНИИ «Электроприбор», 1994. - С.114-121.
17. **Биндер Я.И., Лысенко А.С., Падерина Т.В., Федорович А.Н.** Об использовании различных схем гироинклинометров для непрерывной съемки скважин различной ориентации // Гироскопия и навигация. 2010. - № 4 (71). - С. 53-72.
 18. **Чиковани В.В., Яценко Ю.А., Миколишин И.Т.** Результаты испытаний кориолисового вибрационного гироскопа с металлическим резонатором на чувствительность к вибрации и удару.
 19. **Великосельцев А., Шрайбер У., Ключель Т., Вайгат С., Грэм Р.** Интерферометрия Саньяка для определения вращения Земли в геодезии и сейсмологии // Гироскопия и навигация. - 2008. - № 3 (62). - С. 37-45.
 20. **Молчанов А.В., Осетров И.В., Чиркин М.В.** Проблемы качества в технологии лазерного гироскопа // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. - С.207-209.
 21. **Молчанов А.В., Морозов Д.А., Осетров И.В., Чиркин М.В.** Эксплуатационная надежность кольцевых лазеров, используемых в БИНС // XI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2004. - С.147-149.
 22. **Чиркин М.В., Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Морозов Д.А., Захаров М.А.** Цифровая обработка сигналов кольцевого лазера при оценке характеристик лазерного гироскопа // XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: «Электроприбор», 2010. - С.53-55.
 23. **Винокуров Ю.А., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г., Колбас Ю.Ю., Назаренко М.М., Тихменев Н.В.** Трехосный зеемановский ЛГ повышенной точности // XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2008. - С.116-120.
 24. **www.fizoptika.ru**
 25. **Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П.** и др. Гирогоризонткомпас на волоконно-оптических гироскопах с вращением блока чувствительных элементов // VIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. - С.30-34.
 26. **Адамов И.И., Усков А.В., Шарыгин Б.Л.** Измеритель деформаций корабля // Труды научно-технической конференции НПО «Агат», Москва, 2002. - С.86.
 27. **http://www.ppk.perm.ru**
 28. **Колеватов А.П.** и др. Волоконно-оптический гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания // Гироскопия и навигация. - 2010. - № 3 (70). - С.49-60.
 29. **www.optolink.ru**
 30. **Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Дейнека Б., Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П.** Трехосный волоконно-оптический гироскоп для морских навигационных систем. Гироскопия и навигация. - 2009. - № 3 (66). - С.3-9.
 31. **Джашитов В.Э., Панкратов В.М.** Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. ЦНИИ «Электроприбор», 2005.
 32. **Журавлев В.Ф., Климов Д.М.** Волновой твердотельный гироскоп. - М.: Наука, 1985.
 33. **Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В.** Проектирование волнового твердотельного гироскопа. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1998.
 34. **Лукин Б.С.** Физико-химические основы разработчик полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. - М. Изд-во МАИ, 2005.
 35. **Джанджгава Г.И., Бахонин К.А., Виноградов Г.М., Требухов А.В.** Бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе твердотельного волнового гироскопа // Гироскопия и навигация. - 2008. - № 1 (60). - С. 22-32.
 36. **Линч Д., Мэттьюз А., Вартин Т.** Перенесение технологии создания датчиков, используемых в космических системах, в разработки, предназначенные для бурения нефтяных скважин // Гироскопия и навигация. - 1998. - № 4 (23). - С. 132-141.
 37. **Журавлев В.Ф., Линч Д.Д.** Электрическая модель волнового твердотельного гироскопа // Известия РАН. Механика твердого тела. - 1995. - № 5. - С. 12.
 38. **Бабур Н., Шмидт Дж.** Направления развития инерциальных датчиков // Гироскопия и навигация. - 2000. - № 1(28). - С. 3-15.
 39. **Доронин В.П., Новиков Л.З., Харламов С.А.** Основные проблемы создание миниатюрного инерциального измерительного прибора на базе микромеханических чувствительных элементов // Гироскопия и навигация. - 1996. - № 4 (15). - С.55.

39. Лестев А.М., Попова И.В. Современное состояние теории и практических результатов разработки микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. - 1998. - № 3 (22). - С.81-93.
40. Будкин В.Л., Паршин В.А., Прозоров С.В., Соломатин А.К., Соловьев В.М. Разработка кремниевых датчиков первичной информации для систем навигации и управления // Гироскопия и навигация. - 1998. - № 3(22). - С.94-101.
41. Северов Л.А., Пономарев В.К., Парфенов А.И., Несенюк Л.П., Кучерков С.Г. Микро-механические гироскопы - новый класс чувствительных элементов. Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Приборы и приборные системы», Тула, 2001.
42. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие. Тул.гос.университет, Тула, 2002.
43. Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Кучерков С.Г., Евстифеев М.И., Некрасов Я.А., Ренар С., Пфлюгер П., Пизелла К., Коле Ж. Результаты разработки микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. - 2005. - № 3. - С. 44-51.
44. Попова И.В., Лестев А.М., Семенов А.А., Иванов В.А., Ракитенский О.И., Бурцев В.А. Капсулированные микромеханические гироскопы и акселерометры для цифровых систем навигации и управления/// Сборник материалов XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2008.
45. Barbour N., Connelly J., Gilmore J., Greff P., Kourepenis A., Weinberg M. Micro-electromechanical and systems development at Draper Laboratory //3rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Part I. - SPb., CSRI "Elektroprigor", 1996. - С. 3.
46. Гай Э. Наводящиеся снаряды с инерциальной навигационной системой на микромеханических датчиках, интегрированной с GPS // Навигация и гироскопия. - 1998. - № 3 (22). - С. 72-80.
47. Chaument B., Le-Vezzier B., Rongeot C., Bouyat S. A new Silicon Tuning Fork Gyroscopes for Aerospace Applications // Symposium Gyro Technology, Universität, Karlsruhe, 2009.
48. Пешехонов В.Г., Некрасов Я.А., Пфлюгер П., Кергерис Ц., Хаддара Х., Эльсайед А. Результаты испытаний микромеханического гироскопа RR-типа // Гироскопия и навигация. - № 1 (72), 2011. - С.
49. Мезенцев А.П., Фролов Е.Н., Клишкин М.Ю., Мезенцев О.А. Среднеточная ИНС «АИСТ-320» с кориолисовым вибрационным гироскопом «АИСТ-100». Идеология и результаты разработки, производства и испытаний // Гироскопия и навигация. - 2007. - № 3 (58). - С. 3-19.
50. Blixhaven B., Lapadatu D., Holm R., Kvisterfy T. SAR-500-A novel high-precision gyroscope Symposium Gyro Technology. Karlsruhe, Germany, 2010.
51. Кробка Н.И. Квантовая механика: гироскопы на волнах де Бройля и квантовых свойствах сверхтекучей жидкости. Тенденция развития и состояние разработок. // Гироскопия и навигация. - 2009. - № 3 (66). - С. 36-55.

Abstract. The article presents an overview of the research and development of gyroscopic technologies in Russia in the past 15 years. The current status and prospects for advancement of inertial technologies in future are analyzed.

Материал поступил 31.01.11