

В. Г. ПЕШЕХОНОВ

ГИРОСКОПИЯ – СПЛАВ НАУКИ И ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ. ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В сжатой форме излагается история развития гироскопии, ее современное состояние и перспективы развития. Статья является вводной для последующих статей данного выпуска журнала. В целом цикл статей представляет общую картину современных гироскопических датчиков (гироскопов и акселерометров), дает возможность оценить области применения и перспективы каждого из них.

Ключевые слова: роторный гироскоп, вибрационный гироскоп, волновой оптический гироскоп, квантовый гироскоп, акселерометр.

Введение

Настоящая статья открывает цикл публикаций в данном выпуске журнала, призванный помочь молодым людям – студентам и молодым специалистам – ориентироваться в сложной, постоянно развивающейся науке гироскопии. Гироскопией принято называть совокупность научных основ, конструкторских решений и специальных технологий создания датчиков параметров движения (гироскопов и акселерометров) и построение на их основе систем навигации и пространственной ориентации.

Статья посвящена краткой истории развития гироскопии, основным идеям и достижениям в этой области, нерешенным вопросам и перспективам развития, т.е. тому, что нужно знать специалистам, приступающим к изучению конкретных гироскопических разработок.

В последующих пяти статьях [1, 2, 3, 4, 5] рассматриваются все виды гироскопов и акселерометров, используемые в настоящее время. Важно, что их подготовили ученые, которым принадлежат выдающиеся достижения в излагаемых ими вопросах.

Пешехонов Владимир Григорьевич. Академик РАН, научный руководитель, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Директор, Институт информационно-навигационных систем Университета ИТМО (С.-Петербург). Президент общественного объединения «Академия навигации и управления движением».

Развитие гироскопии соответствует развитию науки, но происходит с временным лагом, необходимым для создания технологий производства гироскопов и акселерометров с соответствующими характеристиками. Принято различать этапы развития гироскопии, характеризующиеся принципами, на основе которых построена основная часть гироскопов того времени.

Первый этап, уже завершившийся, определяли гироскопы, построенные на принципах механики. Статьи доктора технических наук Ю.А. Литмановича (ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург) о роторных гироскопах [1] и доктора технических наук, профессора В.В. Матвеева (Тульский государственный университет) о вибрационных гироскопах [2] посвящены тем механическим гироскопам, которые в силу своих уникальных свойств продолжают использоваться и развиваться.

Второй этап развития гироскопии, продолжающийся в настоящее время, основывается на достижениях лазерной оптики. Переход от прецизионной гироскопической механики к оптическим технологиям расширил применения и открыл возможность крупносерийного производства гироскопов. Волновой оптической гироскопии посвящена статья доктора технических наук, профессора Ю.В. Филатова (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ») [3].

Перспективы дальнейшего развития гироскопии связаны с достижениями квантовой оптики, которым посвящена статья доктора физико-математических наук, члена-корреспондента Российской академии наук А.К. Вершовского (Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург) [4]. Он рассматривает проблемы создания малогабаритного гироскопа навигационного класса точности на эффекте ядерно-магнитного резонанса и сверхпрецизионного гироскопа на волнах материи (эффект корпускулярно-волнового дуализма).

Наконец, последняя статья кандидата технических наук С.Л. Левина (гатчинский филиал ЦНИИ «Электроприбор», Ленинградская область) посвящена датчику линейного ускорения – акселерометру [5], который начал и в основном продолжает развиваться на основе принципов механики.

Этап I. Механическая гироскопия

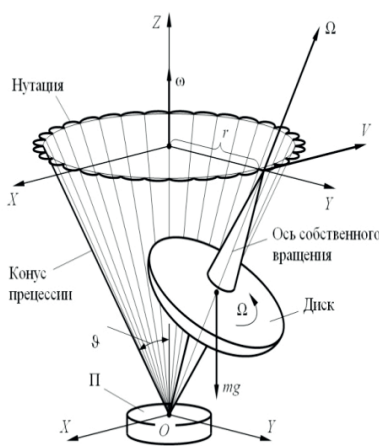
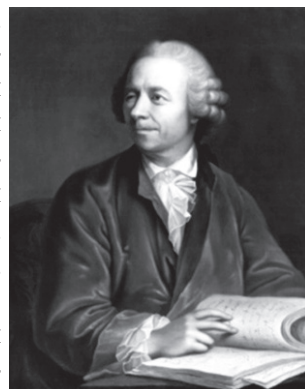


Рис. 1. Движение оси вращения тела по Лагранжу [7]

Первый этап гироскопии начал формироваться в середине XVIII века, когда царицей наук была механика, созданная трудами великих ученых-механиков. О гироскопии еще не помышляли, но именно тогда были заложены ее основы [6].

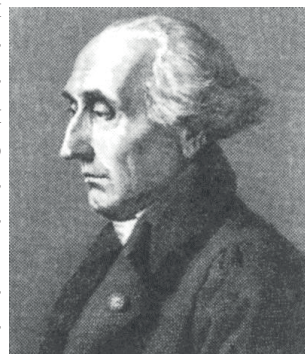
Великий ученый – математик и механик, член Российской академии наук – Леонард Эйлер, изучая проблемы небесной механики и основываясь на выведенных им динамических и кинематических уравнениях, установил: если твердое тело вращается вокруг неподвижной точки, центр масс тела совпадает с этой точкой и моменты всех сил, действующих на тело, равны нулю, то ось вращения тела сохраняет неизменное положение в абсолютном (в сегодняшнем понятии – инерциальном) пространстве (1758 г.).

Французский физик Ж. Лагранж рассмотрел случай, когда тело находится в поле тяжести: оно симметрично относительно оси вращения, центр масс тела лежит на оси вращения, не совпадая с неподвижной точкой (1787 г.). При таких условиях ось вращения тела не сохраняет направление в абсолютном пространстве, а движется по конической траектории (рис. 1). Так было объяснено движение волчка, который более четырех тысяч лет был китайской игрушкой, а стал прообразом механического гироскопа.



Леонард Эйлер

Прошло еще более полувека, и французский ученый Жан Бернар Леон Фуко создал прототип гироскопа (1852 г.). Задачей его эксперимента было измерение суточного вращения Земли, но построенный им прибор – ротор в кардановом подвесе – имел три степени свободы и сохранял ориентацию оси вращения (пусть на короткое время) в инерциальном пространстве¹. Свой прибор Ж.Б.Л. Фуко назвал гироскопом (от греч. *gyros* (γῦρος) – круг, кольцо и *skopeō* (σκοπέω) – смотрю, наблюдаю). Так началось формирование гироскопии, теоретической основой которой стала механика гироскопов.



Жозеф Лагранж

Ж.Б.Л. Фуко предложил три схемы построения гироскопических приборов [6]: свободный гироскоп, гироскопический компас, гироскопический измеритель широты.

В первом случае ротору обеспечиваются три степени свободы, на него не действуют внешние моменты и ось гироскопа сохраняет постоянную ориентацию в инерциальном пространстве (примером может служить электростатический гироскоп, см. стр. 11).

Во втором случае ограничена одна степень свободы: зафиксировано внутреннее кольцо карданова подвеса относительно наружного кольца и ось ротора сходится к плоскости меридиана (о гирокомпасе см. ниже).

В третьем случае одна степень свободы ограничена иным способом: наружное кольцо фиксируется перпендикулярно к плоскости меридиана и ось ротора ориентируется параллельно оси Земли.



Леон Фуко

Потребовалось еще более полувека, пока были созданы гироскопические технологии, обеспечивающие реализацию гироскопических приборов.

Первый гироскопический навигационный прибор – гироскопический компас создал немецкий ученый Г. Аншютц-Кемпфе. Это изобретение основывалось на идеях многих выдающихся людей: У. Томсон (лорд Кельвин) предложил для снижения трения поместить гироскоп в сосуд, плавающий в жидкости; А. Эйнштейн, который тесно сотрудничал и даже дружил с Г. Аншютцем (рис. 2), в частности, выдвинул идею использовать «электромагнитное дутье» для центрирования ротора; крупнейший

¹ Впервые еще в 1802 году немецкий ученый Ф. Боненбергер создал прибор, в котором сферический маховик был помещен в карданов подвес [8]. Один из образцов этого прибора сохранился до наших дней.



Рис. 2. Альберт Эйнштейн и Герман Аншютц-Кемпфе

немецкий промышленник В. Сименс обеспечил развитие технологий до высшего на то время уровня для изготовления деталей и узлов гироскопа; позднее немецкий ученый М. Шулер определил условия невозмущаемости гироскопа при движении основания, а профессор И. Геккелер построил прецессионную теорию гироскопа.

В 1910 году были завершены морские испытания гироскопа Г. Аншютца, и сразу же начались поставки на флот для замены магнитных компасов, которые на кораблях и судах с металлическим корпусом были подвержены влиянию собственных магнитных полей корабля.

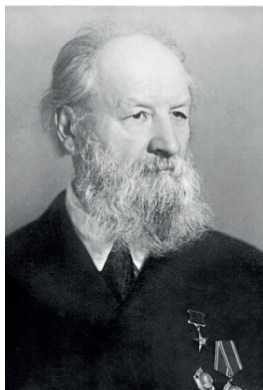
В 1911 году в США Э. Сперри создал гироскоп, частично повторявший конструкцию гироскопа Аншютца (это привело к спору о заимствованиях между ними, арбитром в котором был приглашен А. Эйнштейн). Особенностью гироскопа Сперри было построение гироскопического горизонта с помощью маятника. Эта схема потребовала длительной отработки, но зато впоследствии появился новый прибор – гиروهоризонт (гировертикаль), построитель стабилизированной горизонтальной площадки.

Выше шла речь о работах западных ученых. А что было в России? Со времен Л. Эйлера наука механика активно развивалась и в нашей стране. Достаточно сказать, что после Лагранжа еще один случай решения уравнений Л. Эйлера предложила С.Ф. Ковалевская, а Н.Е. Жуковский дал ему геометрическую интерпретацию [1]. В начале XX века макеты гиростабилизированных транспортных средств, в том числе однорельсового железнодорожного вагона, построил и испытал изобретатель-любитель – чиновник высокого ранга И.П. Шиловский. Но собственных промышленных разработок и производства гироскопов и гироскопических приборов долго не было. Промышленные образцы гироскопов покупались за рубежом. Так, к началу Первой мировой войны российский флот был обеспечен гироскопами фирмы «Сперри».

Положение стало меняться только в конце 20-х годов прошлого века, когда заводу «Электроприбор» было поручено создание и серийное производство систем управления стрельбой корабельной артиллерии. Сложность задачи заключалась в том, что стрельба должна вестись с качающегося корабля, и необходима гироскопическая вертикаль для построения приборного горизонта.



Н.Н. Остряков



А.Н. Крылов



В.И. Кузнецов

Было решено привлечь фирму «Сперри». В 1929 году с ней был заключен договор на поставку корабельной системы управления зенитным огнем «Гудзон» и передачу документации для последующего производства. В состав системы «Гудзон» входила гироскопическая вертикаль, построенная на новейшем, изобретенном только в 1927 году, шаровом гироскопе с газовой опорой стального сферического ротора, имевшем большой потенциал для дальнейшего совершенствования. По причинам, которые невозможно сегодня установить, американские специалисты работу не завершили, и инженерам «Электроприбора» пришлось преодолеть множество трудностей и довести дело до конца.

В «Электроприборе» сформировался творческий коллектив, лидерами которого стали [9]:

- Николай Николаевич Остряков, молодой талантливый инженер, уже доказавший высокий творческий потенциал разработкой следящих систем на переменном токе, он стал первым главным конструктором российских гироскопических приборов;
- Алексей Николаевич Крылов, академик, приглашенный консультант по разработке гироскопических приборов, автор, совместно с членом-корреспондентом Академии наук Ю.А. Крутковым, первой российской монографии по гироскопии «Общая теория гироскопов и некоторых технических их применений» (1932 г.). Под руководством академика А.Н. Крылова сформировалась первая отечественная научная школа гироскопии;
- Виктор Иванович Кузнецов, студентом в 1937 году пришедший в «Электроприбор» на преддипломную практику и через месяц ставший полноценным сотрудником Н.Н. Острякова. Он руководил испытаниями в 1937 г. на крейсере «Киров» первой упрощенной гировертикали «Газон», затем стал ответственным исполнителем разработки гирокомпасов «Курс» (1938 г.) и серийной вертикали «Шар» (1939 г.). В 1940 году ему было поручено организовать в Москве второй гироскопический центр, а после войны он стал создателем российской ракетно-космической гироскопии, членом знаменитого

совета главных конструкторов С.П. Королёва, академиком, дважды Героем Социалистического Труда.

Признанием заслуг «Электроприбора» в создании систем управления огнем кораблей и гироскопической техники стало награждение 57 сотрудников государственными наградами (указ от 29.03.1939 г.).

За научные достижения лауреатами Государственной (в то время Сталинской) премии стали:

А.Н. Крылов – за цикл работ по гироскопическим и магнитным компасам (1941 г.);

С.Ф. Фармаковский – за создание систем управления огнем крейсеров (1942 г.);

А.Э. Автонян, В.М. Грибов, В.А. Дьяконов, Г.М. Клементьев, В.И. Кузнецов, Н.Н. Остряков, В.Н. Третьяков, Г.В. Чехович – за создание гировертикалей систем управления огнем (1943 г.);

М.А. Зерницкий, В.И. Кузнецов, Б.А. Нежданов, А.С. Одинцов, Н.Н. Остряков, Н.П. Пруцков, А.М. Сокол, А.Е. Солоденок, В.П. Терентьев – за создание гироскопических систем (1946 г.).

Инерциальные навигационные системы

Мощный импульс развитию гироскопии придали работы по созданию инерциальных навигационных систем (ИНС). Если гироскопическая система обеспечивает определение одного навигационного параметра – курса, то ИНС решает полную задачу навигации и ориентации, определяя курс, координаты, линейную скорость и ускорение, вертикаль места, углы качки и рыскания. При этом благодаря выполнению условий М. Шулера обеспечивается невозмущенность выходных данных ИНС при маневрировании объекта, на котором ИНС установлена.

Первые заявки на изобретение упрощенных инерциальных систем были поданы в самом начале XX века, в том числе и в России. С течением времени идея инерциальной навигации совершенствовалась и к 20-м годам XX века пришла к современному виду – с помощью гироскопов стабилизируется триада акселерометров, двойное интегрирование показателей которых определяет координаты относительно исходной точки.

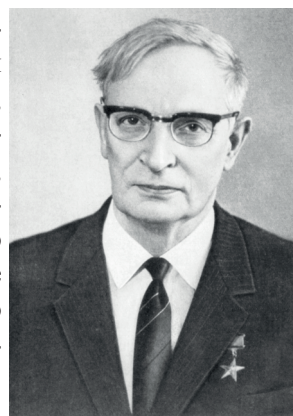
Первый известный опыт реализации пространственной инерциальной системы был осуществлен в 1934 году в Центральном аэрогидродинамическом институте В.С. Ведровым с сотрудниками при изучении состояния штопора самолета и выхода из него. На борту самолета устанавливалась триада акселерометров и триада регистраторов угловой скорости. Измерения регистрировались самописцами, вычисления выполнялись апостериорно командой расчетчиков [6]. Однако дальнейшего развития эти работы не получили.

Впечатляющего успеха инерциальные системы достигли в ракетной технике, обеспечив в годы войны навигацию немецкой баллистической ракеты «Фау-2» (V-2). Именно в ракетной области проявилось достоинство инерциальной техники – автономность, а следовательно, невозможность создать помехи ракетной навигации, и не проявляются свойственные гироскопическим приборам ограничения, связанные с интегрированием кажущихся ускорений. Дело в том, что гироскоп и акселерометр, как и любые измерители, имеют собственную инструментальную погрешность, которая в результате интегрирования порождает нарастающую во времени ошибку в определении координат. Но полет баллистической ракеты продолжается всего порядка получаса, и значительная погрешность не накапливается даже при невысокой точности гироскопов.

Иная ситуация складывается в случае длительной работы ИНС. Например, атомная подводная лодка (АПЛ) может не всплывать из-за энергетике несколько месяцев, но из-за необходимости коррекции накопившейся погрешности навигационных данных приходится всплывать тем чаще, чем больше дрейф гироскопов. Поэтому в 50–80-е годы главная задача морских гироскопистов заключалась в снижении дрейфа гироскопов¹.

¹ В настоящей лекции по этой причине задачи навигации рассматриваются применительно к морским ИНС.

Исследования А.Ю. Ишлинского, в то время лидера ученых страны в области гироскопии и инерциальной навигации (впоследствии академик, Герой Социалистического Труда, директор созданного им Института проблем механики Академии наук – научного центра отечественной гироскопии), показали, что для построения полноценной морской ИНС необходимы гироскопы с дрейфом нуля не более 10^{-3} град/ч. Но в то время наиболее точные гироскопы имели дрейф больше на два порядка. Предстояла грандиозная работа на несколько десятилетий. В условиях холодной войны требовалось приложить максимум усилий для создания высокоточной ИНС.



А.Ю. Ишлинский

Первые образцы корабельных ИНС были созданы в США и предназначались для подводных лодок и крупных кораблей.

Это были весьма крупногабаритные конструкции, которые невозможно было разместить на ракете или самолете (см. рис. 3). С подобными ИНС в 1958 году две АПЛ США совершили трансокеанические подледные походы (из Тихого океана в Атлантический и встречный маршрут) с прохождением Северного полюса. Нужен был поход к полюсу нашей АПЛ, но разработка морской ИНС была еще далека от завершения.

Теоретически решил проблему А.Ю. Ишлинский. Он показал, что на базе имевшихся тогда гироскопических приборов: пространственного гирокомпаса, гировертикали и гироазимута (хранителя направления) – можно построить невозмущаемую при маневрировании корабля навигационную систему, т.е. придать системе важнейшее свойство инерциальной системы – невозмущаемость [6]. По этой схеме были построены навигационные комплексы АПЛ первого поколения. Ученые и инженеры ЦНИИ «Электроприбор» создали гировертикаль и гироазимут на специально разработанных наиболее точных в то время закрытых шаровых гироскопах (ЗШГ). Навигационный комплекс АПЛ «Сила-Н» в 1962 году обеспечил первый поход к Северному полюсу (рис. 4, а), всеширотный комплекс «Сигма» – второй поход к Северному полюсу в 1963 году, подледный переход северным маршрутом с Северного флота в Тихоокеанский в 1964 году, а в 1966 году – кругосветный поход двух советских АПЛ вокруг мыса

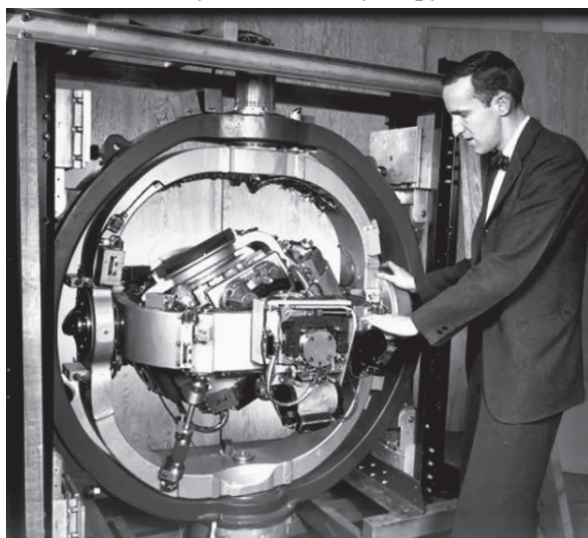


Рис. 3. Первая ИНС

Горн (рис. 4, б). Была решена проблема подводной навигации во всем Мировом океане. На более чем ста АПЛ первого поколения были установлены навигационные комплексы «Электроприбора» «Сила-Н» и «Сигма».

Основные разработчики навигационных комплексов, входящих в них гироскопических систем и закрытого шарового гироскопа стали лауреатами высшей творческой награды страны – Ленинской премии. Все участники первых походов к Северному полюсу получили государственные награды. Орденом был награжден ЦНИИ «Электроприбор».

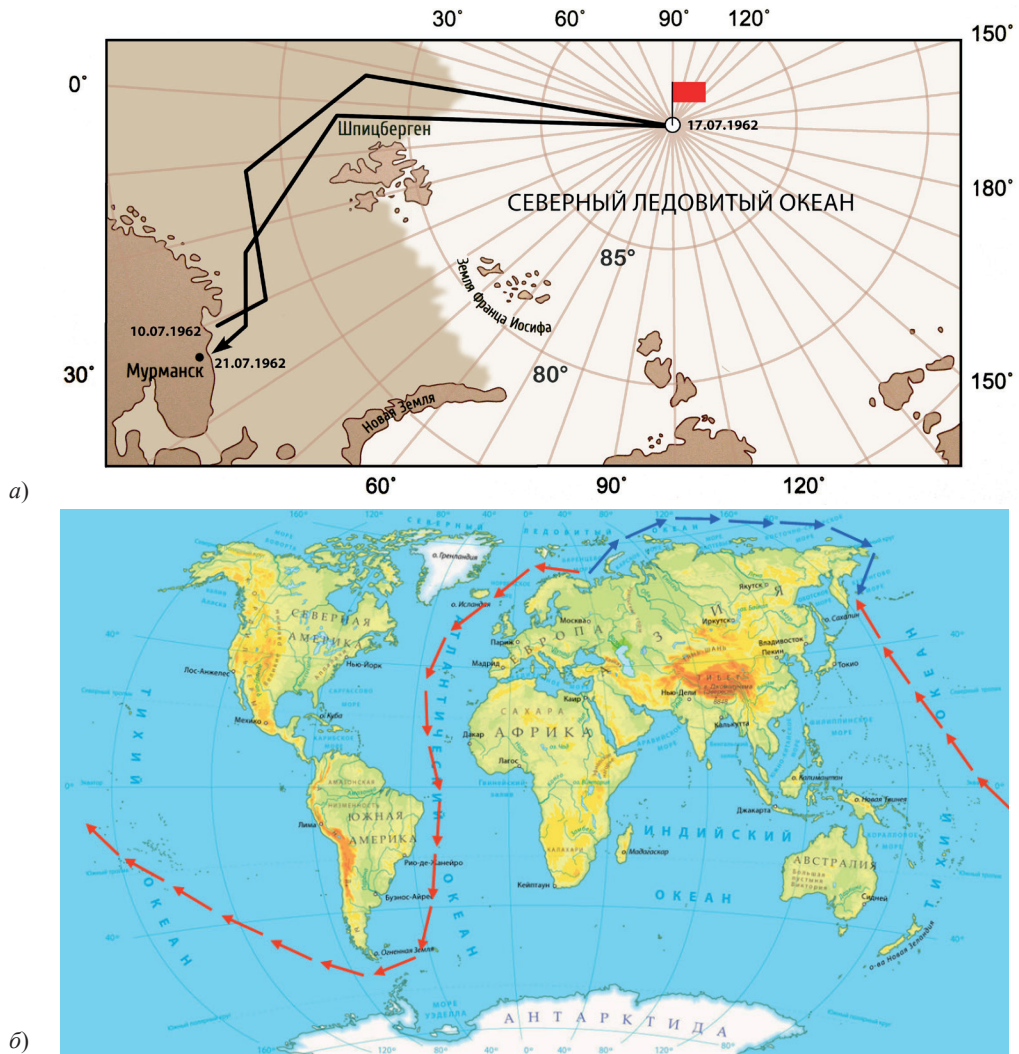


Рис. 4. Первые походы советских АПЛ: а) к Северному полюсу; б) с Северного флота на Тихоокеанский (синие стрелки – переход северным маршрутом; красные стрелки – переход южным маршрутом)

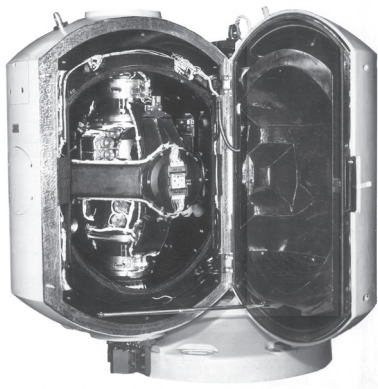


Рис. 5. ИНС «Стрелец» на обращенных шаровых гироскопах

Только для навигационных комплексов второго поколения удалось создать отечественные ИНС. В начале в составе комплекса «Тобол» московского НИИ «Дельфин» была создана ИНС на разработанных для космической техники поплавковых гироскопах, затем – комплекс «Медведица» «Электроприбора» с ИНС «Стрелец» на обращенном шаровом гироскопе (рис. 5). Головные образцы этих комплексов обеспечили походы и длительное подледное маневрирование вблизи полюса. Мне как главному конструктору «Медведицы» довелось участвовать в полярном походе 1980 года, и это было незабываемое событие, одно из самых ярких в жизни [11].

Прецизионная ИНС

Третье поколение навигационных комплексов предназначалось для обеспечения нового стратегического оружия АПЛ. Необходимо было иметь гироскопы с дрейфом на порядок ниже, чем у гироскопов второго поколения, и построить на них прецизионную ИНС. В США с 1956 года и в СССР с 1966-го независимо велась разработка свободных (неуправляемых) гироскопов с электростатическим подвесом ротора (ЭСГ). Электростатический подвес исключает трение в опоре ротора – один из двух факторов, определяющих дрейф роторного гироскопа. Если к этому добавить вакуумирование полости между ротором и статором, то и трение о воздух тоже исключается, и гироскоп месяцами работает на выбеге¹. Проблема дрейфа ЭСГ сводится к уменьшению несовпадения центра вращения ротора с его центром масс, т.е. к технологическим проблемам однородности материала ротора и точности воспроизведения его формы.

Но на пути создания ЭСГ было много препятствий, начиная с того что электростатический подвес потенциально неустойчив и его несущая способность невысока. Требовалось решить целый ряд проблем, часть из которых встретилась впервые. Ученые, инженеры и технологи «Электроприбора» к концу 70-х годов преодолели основные трудности создания ЭСГ. Об этом будет рассказано в статье доктора технических наук Ю.А. Литмановича [1], участника создания ИНС на ЭСГ. Я же ограничусь констатацией признанных достижений создателей ЭСГ: 130 авторских свидетельств (патентов тогда не было) на оригинальные конструкторские, технологические и метрологические решения, 4 докторские диссертации и 16 кандидатских.

Особо надо отметить решающую роль главного конструктора ЭСГ Анатолия Сергеевича Анфиногенова (1930–2003), твердого в своих взглядах, непреклонно уверенного в достижимости цели, умеющего определять ключевые задачи и поэтапный путь их решения, убеждать в обоснованности своих решений тех, кто участвовал в создании ЭСГ, и тех, от кого зависели организационные решения [10].

Важной была роль главного конструктора ИНС на ЭСГ Валерия Залмановича Гусинского (1939–2020), впервые в стране создавшего вместе со своей молодой командой ИНС геометрического типа, в которой два свободных гироскопа имитируют движение Полярной и экваториальной звезд. В.З. Гусинского отличала редкая способность создавать и «железо», и алгоритмы обработки информации.

По результатам выполненных работ А.С. Анфиногенов и В.З. Гусинский защитили докторские диссертации, стали заслуженными изобретателями РФ, лауреатами Государственной премии и премии имени Н.Н. Острякова (А.С. Анфиногенов – дважды).

Создание ИНС на ЭСГ было решением не только научно-технологической, но и политической проблемы.



А.С. Анфиногенов

В.З. Гусинский

¹ После вывода ротора на штатные обороты приложение сил к нему прекращается, и он вращается по инерции, так как силы трения отсутствуют.

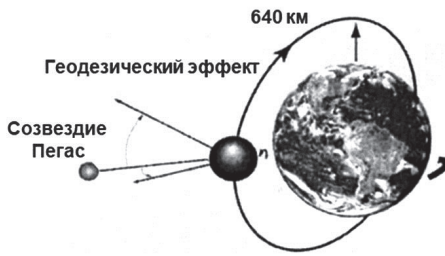


Рис. 6. Космический эксперимент по определению геодезического эффекта, предсказанного общей теорией относительности А. Эйнштейна

В соревновании по стратегическому вооружению СССР – США американский комплекс подводного стратегического оружия АПЛ «Трайидент» был уравновешен российским комплексом, навигацию которого обеспечивала высокоточная ИНС на ЭСГ.

С тех пор уже более 40 лет наша страна – одна из двух мировых лидеров высокоточной подводной навигации.

Уникальные точностные характеристики ЭСГ обеспечили проведение в США космического эксперимента Gravity Probe B по проверке общей теории относительности А. Эйнштейна [12]. С борта космического аппарата (рис. 6) впервые был измерен созданный Землей геодезический эффект деформации континуума «пространство – время», составляющей 6,6 угловых секунд в год!

Этап II. Волновые оптические гироскопы

Развитие механической гироскопии обеспечило перекрытие широкого диапазона точностных характеристик – от подшипниковых гироскопов невысокой точности до прецизионного ЭСГ. Однако системы, в которых они применялись, строились на базе кардановых подвесов, были трудоемки в изготовлении (а следовательно, имели высокую стоимость), сложны в эксплуатации, слишком крупногабаритны для многих применений и производились ограниченными сериями, в основном в составе военной техники.

Требовались гироскопы, технология которых была бы пригодна для крупносерийного производства, более дешевые и имеющие достаточную точность. Возможность построения подобных гироскопов открыли оптические опыты Ж. Саньяка (1913 г.). Ж. Саньяк не думал о гироскопах, он хотел проверить гипотезу о существовании «эфира», в котором, по воззрениям того времени, распространялись световые волны. «Эфира» он не обнаружил, но открыл эффект, позволяющий измерять скорость вращения оптическим методом. Саньяк построил кольцевой интерферометр Фабри–Перо, в котором распространялись встречные оптические волны, и выяснил, что интерференционная картина этих волн смещается пропорционально угловой скорости вращения интерферометра. Однако в то время из-за некогерентности источников оптического излучения реализовать эффект Саньяка для построения датчиков угловой скорости было крайне затруднительно. А. Майкельсону, чтобы измерить угловую скорость вращения Земли (порядка 15 град/ч), пришлось построить интерферометр с периметром 2 км.

Положение радикально изменилось, когда в 1960 году был изобретен газовый лазер. Уже в 1962 году был испытан кольцевой газовый лазер разумных размеров, реализующий эффект Саньяка в виде разности частот встречных волн. Началась эра оптических волновых гироскопов. В течение 60–80-х годов были решены основные вопросы лазерной гироскопии – преодоление



Ж. Саньяк

явления захвата встречных волн, препятствующее измерению малых скоростей, стабилизация периметра кольцевого лазера, высокоточное измерение разницы частот встречных волн. Наша страна стала одной из успешно развивающих лазерную гироскопию. Был создан специализированный московский институт «Полус», включились и традиционные гироскопические институты. Так, «Электроприбор» в конце 60-х – начале 70-х годов разработал оригинальную полумоноблочную¹ конструкцию лазерного гироскопа (ЛГ) и провел его длительные стендовые и морские испытания (рис. 7).



Рис. 7. Моноблочная конструкция трехкоординатного ЛГ

Важнейшим достижением лазерной гироскопии было создание и освоение крупносерийного производства бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на ЛГ.

БИНС строит инерциальную систему координат не механически за счет карданова подвеса, а аналитически с помощью встроенной ЭВМ. К тому времени производительность вычислительных средств была уже достаточной для решения подобных задач. Таким образом, для производства БИНС не требовалась прецизионная металлообработка, отсутствовали подвижные части и связанные с ними трибоскопические эффекты. К достоинствам лазерных БИНС относятся также большой динамический диапазон, малый и стабильный масштабный коэффициент, на два порядка меньшее время готовности из холодного состояния, чем у механической гироскопии.

По массогабаритным параметрам и точностным характеристикам лазерная БИНС удовлетворяла требованиям боевой авиации, где она нашла первые применения. Но на этом корпорация Honeywell (США) не остановилась и убедила корпорацию «Боинг» начать устанавливать БИНС на дальнемагистральные самолеты. Затем БИНС на ЛГ стали использовать в гражданской авиации все самолетостроители мира. Производство БИНС увеличилось на порядок, соответственно, снизилась стоимость. Начался бум лазерных БИНС, и они вытеснили ИНС во всех применениях, кроме прецизионных ИНС на ЭСГ, рассмотренных выше. Точность ИНС на ЭСГ остается недостижимой для лазерных БИНС.

На 12 лет позже ЛГ был создан еще один гироскоп, реализующий принцип Санныка, – волоконно-оптический (ВОГ).

В ВОГ встречные оптические волны распространяются по волокну, резонансный контур ЛГ отсутствует и полезный сигнал имеет вид не разности частот, а разности фаз встречных волн. Первоначально ВОГ рассматривался как датчик угловой скорости невысокой точности (см. рис. 8). Однако, когда потери в оптическом волокне были снижены и стало возможным использовать интерферометр в виде катушки с длиной волокна до нескольких километров и когда при измерении малых скоростей за счет модуляции светового потока вывели рабочую точку на линейный участок характеристики ВОГ (рис. 9), точности ВОГ и ЛГ стали соизмеримы. При этом

¹ Зеркала ЛГ крепятся на монолитной (блочной) ситалловой конструкции, активная газовая смесь находится в одном из плеч кольцевого резонатора. «Электроприбор» не обладал соответствующими технологиями и заказал специализированному предприятию газовую трубку, которая заменила одно плечо резонатора.

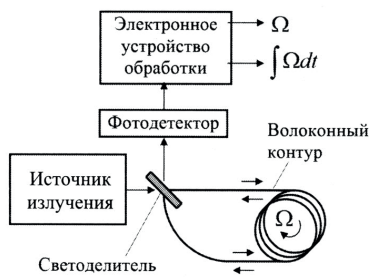


Рис. 8. Схема ВОГ невысокой точности

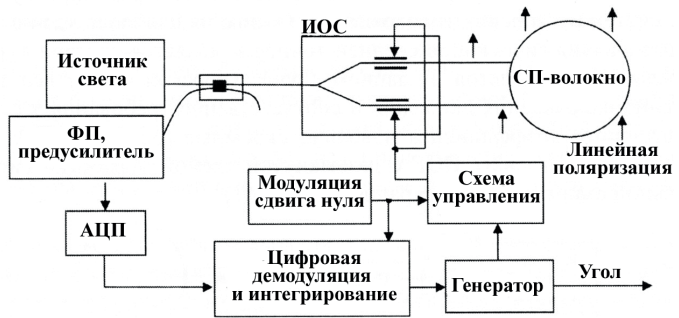


Рис. 9. Схема ВОГ навигационной точности

за счет большого числа витков при одинаковых габаритных размерах эффективная площадь ВОГ на три-четыре порядка превосходит эффективную площадь ЛГ. Соответственно, чувствительность ВОГ значительно выше чувствительности ЛГ.

ВОГ также превосходит ЛГ по надежности. В ЛГ, как правило, входит механическое устройство, обеспечивающее путем вибраций вывод ЛГ из полосы захвата. В ВОГ механические устройства отсутствуют. Вторым фактором, ограничивающим надежность ЛГ, является то, что газоразрядный активный элемент встроен в одно из плеч резонатора, тогда как в ВОГ источник излучения находится вне контура (см. рис. 8, 9).

Сказанное не означает, что ЛГ недостаточно надежен. В этом отношении он полностью удовлетворяет потребителей. Повышенная наработка на отказ ВОГ важна для применений с длинным рабочим циклом, например в морских системах, в которых рабочий цикл может составлять месяцы и даже годы.

В нашей стране в силу известных политико-экономических событий конца 80–90-х годов разработки новых гироскопов прервались, государство в минимальных объемах только поддерживало эксплуатацию ранее созданной техники. В результате достигнутый к 80-м годам паритет с США в развитии волновых оптических гироскопов был потерян. Только в начале нового столетия сложились условия, в которых отдельные организации смогли возобновить разработки волновой оптической гироскопии.

Используя ранее созданный задел по ЛГ, разработчики этого гироскопа модернизировали конструкции, восстановили производственную базу и приступили к серийному производству. По ВОГ навигационной точности подобного задела не было, но бурно развивавшаяся волоконно-оптическая связь обеспечила производство волокна и большинства оптических элементов и устройств, входящих в ВОГ. В результате отечественные ЛГ и ВОГ навигационной точности были созданы почти одновременно и производятся в сопоставимых количествах.

Однако к этому времени доминирующее положение заняла спутниковая навигация. Были введены в строй глобальные спутниковые навигационные системы, обеспечивающие определение координат с точностью до единиц метров (а в перспективе — дециметров) в любой точке на земной поверхности и околоземном пространстве, в любое время суток и года, практически в любых метеоусловиях. Были созданы глобальные системы ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), BeiDou (Китай) и Galileo (Европа), а также ряд локальных систем (Япония, Индия и прочие). Принципиальной осо-

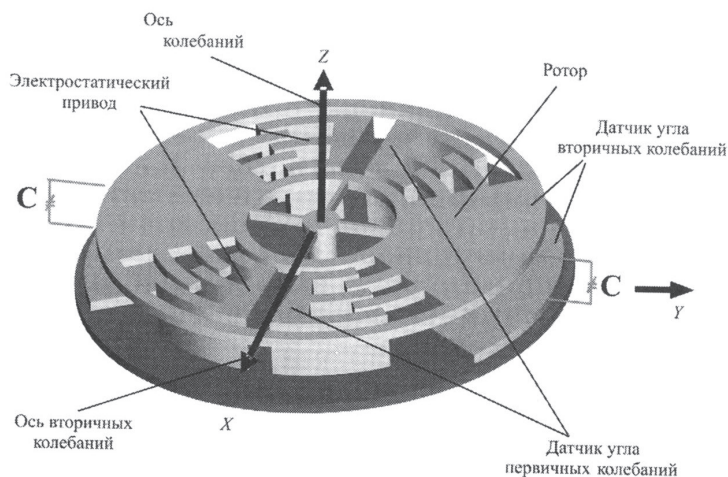


Рис. 10. Принципиальная схема ММГ

бенностью глобальных спутниковых навигационных систем для потребителя стали уникальная точность, сверхминиатюрность аппаратуры потребителя, позволяющая встраивать ее в любой гаджет, малое энергопотребление, практически мгновенное определение координат и скорости, дешевизна аппаратуры потребителя.

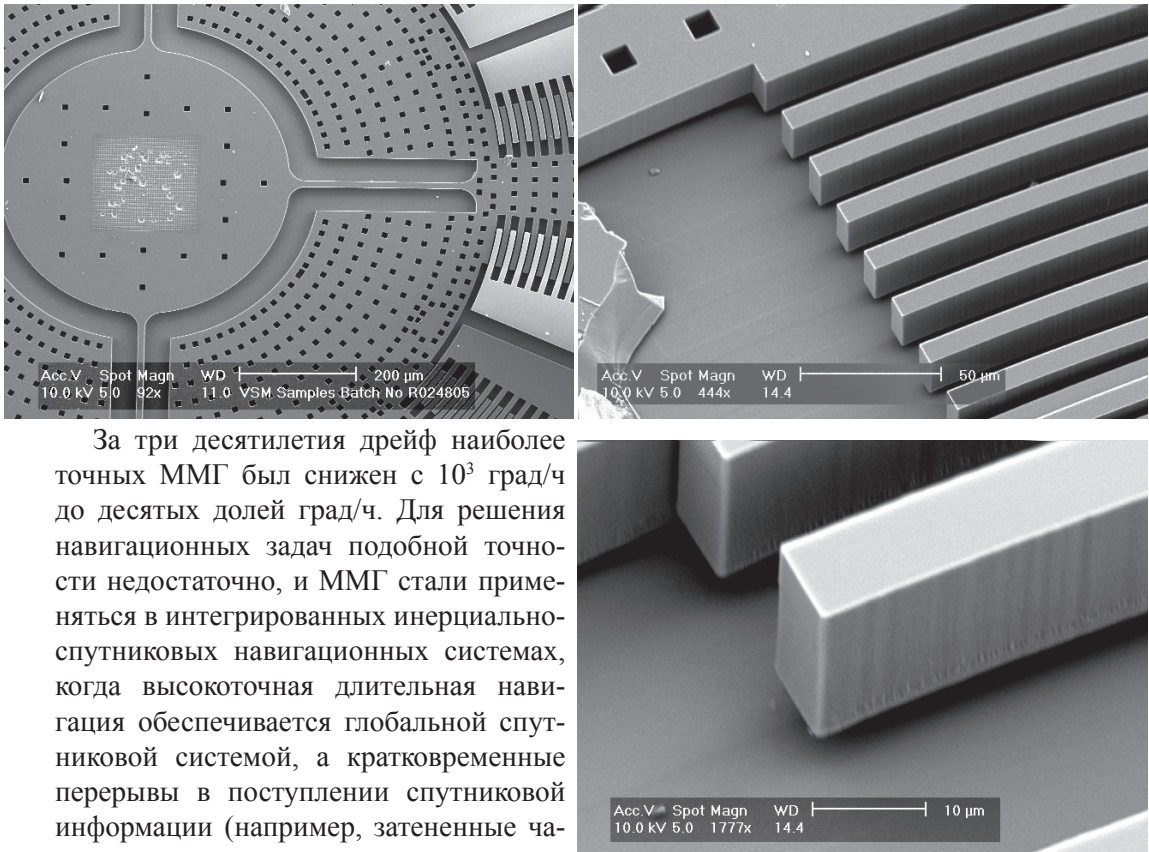
Гироскопическая навигация сохранила монопольное положение только в областях, где спутниковый сигнал не может распространяться: под водой, под землей, в глубоких каньонах, на улицах с высокими зданиями.

При этом в тени оставалась важная особенность спутниковой навигации. Она неавтономна, т.е. потребляет информацию от искусственно созданных человеком источников. Спутниковый сигнал слаб (на земной поверхности его мощность не превышает 10^{-16} Вт), его нетрудно заглушить и в него легко вмешаться (спуфинг). В последние годы это стало очевидным, и вновь возрос интерес к автономным методам навигации, в том числе гироскопическим.

Гироскописты смогли предложить два новых вида гироскопов. Первый из них был создан в середине 80-х годов в лаборатории Ч. Дрейпера в США и соответствовал аппаратуре потребителей глобальных спутниковых систем по крайней мере по двум параметрам – сверхмалым массогабаритным характеристикам и потребляемой электроэнергии.

Этот гироскоп, названный микромеханическим (ММГ), относится к классу кориолисовых вибрационных гироскопов, в которых энергия вынужденных колебаний массы на упругом подвесе при воздействии на ММГ угловой скорости преобразуется под действием сил Кориолиса во вторичные колебания, пропорциональные угловой скорости (рис. 10).

Технология ММГ и микромеханических акселерометров (ММА) заимствована из микроэлектроники с той существенной разницей, что выполняется операция глубокого травления для формирования инерционной массы. Как и изделия микроэлектроники, ММГ является сверхминиатюрным прибором с размерами вибрационной части порядка 1 мм (рис. 11) и дополнительной большой микросхемой, обеспечивающей преобразование сигналов, управление и электропитание микромеханической части. Технология микроэлектроники впервые обеспечивает низкую стоимость ММГ и ММА и возможность массового производства.



За три десятилетия дрейф наиболее точных ММГ был снижен с 10^3 град/ч до десятых долей град/ч. Для решения навигационных задач подобной точности недостаточно, и ММГ стали применяться в интегрированных инерциально-спутниковых навигационных системах, когда высокоточная длительная навигация обеспечивается глобальной спутниковой системой, а кратковременные перерывы в поступлении спутниковой информации (например, затененные части спутников зданиями при проезде по улицам) восполняются ММГ (рис. 12, а). Последовательно разрабатывались слабосвязанные/сильносвязанные/тесно связанные интегрированные системы, при которых ММГ без существенной потери точно-

Рис. 11. Элементы микромеханического гироскопа

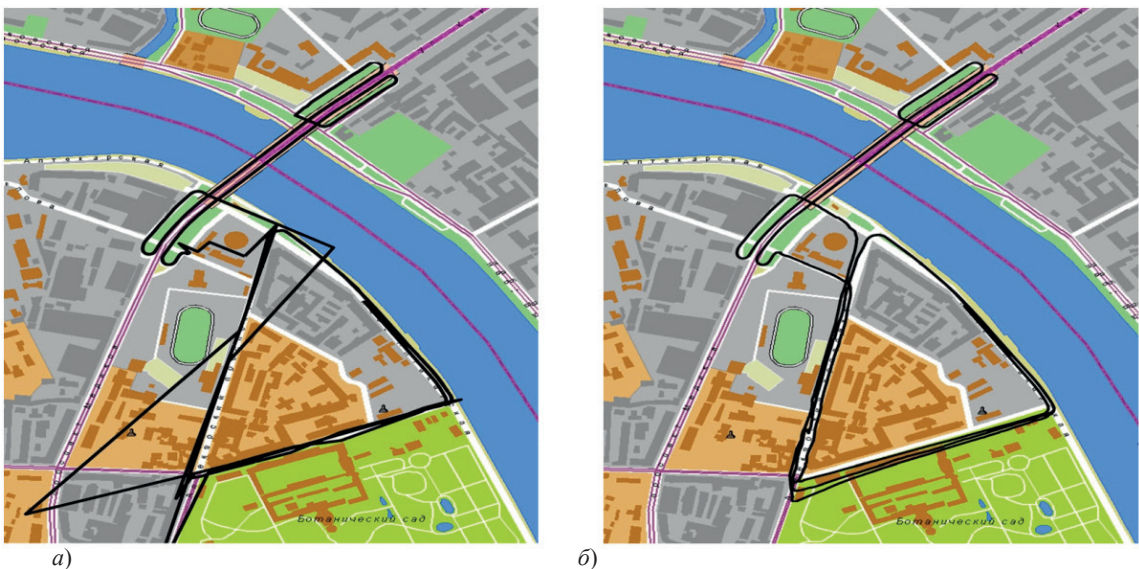


Рис. 12. Погрешности определения координат в городской застройке:
а) спутниковые определения; б) определения по инерциально-спутниковой схеме



В.Ф. Журавлёв



Д.М. Климов

сти компенсирует пропадание спутникового сигнала на время от единиц до десятков секунд (рис. 12, б).

Значительно более широкое применение ММГ нашли в системах управления движением. Классическим примером являются автотранспортные средства, на колесах которых устанавливаются ММГ антиблокировочной системы, а в мешках безопасности – микроакселерометры (ММА) для сигнализации об ударе. Благодаря подобным применениям впервые было востребовано массовое производство ММГ и ММА.

Второй новый вид гироскопов – волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) – основан на эффекте инертных свойств упругих волн, возбужденных в виде радиальных колебаний в осесимметричных телах. Этот эффект был открыт Г. Брайаном еще в 1890 году и только почти через век привел к созданию ВТГ. Большой вклад в теорию ВТГ внесли российские академики В.Ф. Журавлёв и Д.М. Климов. В настоящее время производятся два класса ВТГ – низкой точности с цилиндрическим металлическим резонатором и высокой точности с высокодобротным кварцевым резонатором типа «рюмки».

Для создания высокоточного ВТГ потребовалось решить сложные материаловедческие проблемы, обеспечивающие добротность резонатора не менее 10^6 , и создать прецизионную электронику для измерения смещения стоячих волн с погрешностью не более 0,1 мкм. Сложная технология высокоточного ВТГ определила его высокую стоимость, превосходящую стоимость ЛГ и ВОГ соответствующей точности. Несмотря на значительно меньшие габариты ВТГ, чем у волновых оптических гироскопов, это обстоятельство, а также меньший диапазон измеряемых скоростей пока ограничивает применение ВТГ.

Важным достоинством ВТГ является большой рабочий ресурс. Это качество в совокупности с малыми массогабаритными характеристиками определило применение ВТГ в космической аппаратуре США, где стоимость гироскопической техники не столь важна. К настоящему времени ВТГ США наработали в космосе более 30 млн часов.

Значительно позже высокоточный ВТГ был создан во Франции. Низкоточный ВТГ с металлическим резонатором производится в ряде стран.

Успехи в развитии новых видов гироскопов определяются в России прежде всего поддержкой государства. В 90-е и нулевые годы она была невелика, и невелики были успехи в этой работе. Долгое время оставалась нерешенной проблема глубокого травления при изготовлении ММГ и только сейчас решается проблема создания большой микросхемы для этого гироскопа.

Положение с ВТГ значительно лучше. Уже многие годы серийно производятся ВТГ с металлическим резонатором и среднеточные кварцевые ВТГ. Но возможности совершенствования этого гироскопа далеко не исчерпаны и работы по ВТГ продолжаются.

Таким образом, хотя в современной гироскопии доминируют волновые оптические гироскопы, нашлось место и для новых механических гироскопов.

Подводя итоги современного этапа развития гироскопии, отметим, что оптические волновые гироскопы обеспечили радикальное увеличение применения гироскопов в решении задач навигации и стабилизации, микромеханические гироскопы открыли новые возможности использования гироскопических датчиков в системах управления движением различного назначения. С учетом прецизионных ЭСГ и ММГ дрейф современной гироскопической техники перекрывает диапазон в шесть десятичных порядков.

Структура современной гироскопии представлена фирмой YOLE на рис. 13. Видно, что доминируют (по объему продаж) волновые гироскопы. Такое же положение ожидается в обозримом будущем. При этом доли ВОГ, ММГ и ВТГ с течением времени немного нарастают, а доли ЛГ и механических гироскопов немного сокращаются.

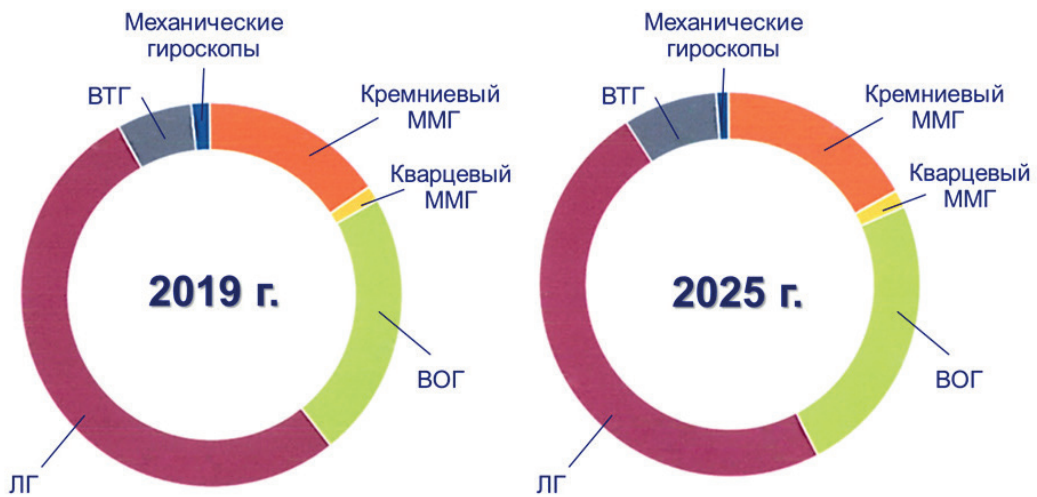


Рис. 13. Объем продаж гироскопов

В заключение данного раздела отметим, что принцип построения второго чувствительного гироскопического элемента – акселерометра не претерпел принципиальных изменений. Линейные ускорения измеряются смещением пробной массы (или при неподвижной массе – величиной усилия, удерживающего массу). Точностные характеристики акселерометра, требуемые для построения первых ИНС, были достигнуты еще до начала разработки ИНС.

Для создания БИНС потребовались акселерометры с существенно увеличенным диапазоном измеряемых ускорений, что тоже не составило проблемы.

Более сложной оказалась разработка акселерометра для гравитационного градиентометра космического применения. Потребовалось повысить точность на четыре десятичных порядка. Эту проблему удалось решить с использованием акселерометра с электростатическим подвесом пробного тела.

Всем видам используемых в настоящее время акселерометров посвящена статья кандидата технических наук С.Л. Левина [5], руководителя разработки гироскопической техники гатчинского филиала ЦНИИ «Электроприбор».

Этап III. Квантовые гироскопы

Логика развития навигационных систем ставит новые задачи перед разработчиками гироскопов. Необходимы гироскопы, по габаритам и эксплуатационным характеристикам близкие к микромеханическим, но навигационного класса точности. Остро необходимы гироскопические системы, сохраняющие точность, близкую к точности спутниковой навигации на достаточно длительных интервалах времени.

В рамках существующих технологий гироскопии удовлетворить эти требования невозможно. Нужны принципиально новые решения. Современная квантовая физика открывает в этом отношении определенные возможности, но предстоят годы труда, чтобы эти возможности стали реальностью. Сегодня гироскописты находятся еще в самом начале многообещающего пути.

Исследования ведутся в двух направлениях:

- гироскоп на эффекте ядерно-магнитного резонанса (ЯМР-гироскоп);
- гироскоп на волнах материи (иные названия – гироскоп на волнах де Бройля, гироскоп на холодных атомах).

Кратко, не вдаваясь в детали квантовой физики, рассмотрим принцип действия, современное состояние и ожидаемые перспективы этих исследований и разработок. Физике и элементам технологии квантовых гироскопов посвящена статья члена-корреспондента РАН Антона Константиновича Вершовского [4], ведущего ученого страны в этой области.

Гироскопы на эффекте ЯМР

Первые публикации по ЯМР вышли в США в 1946 году, в нашей стране – спустя несколько лет. К разработке ЯМР-гироскопа приступили десять лет спустя. По рекомендации академика А.Ю. Ишлинского этой тематикой стал заниматься уральский филиал НИИ-944 (главный конструктор института – академик В.И. Кузнецов). С течением времени к работе подключился физический факультет Московского государственного университета (затем Институт ядерной физики МГУ), Уральский и Ленинградский политехнические институты, Государственный оптический институт. Первоначально работы велись с жидким рабочим веществом, затем с парами ртути. Были получены первые результаты (дрейф 0,1-1 град/час), но габариты прибора были слишком велики для гироскопической техники [14]. В 80-х годах прошлого века, когда начался бурный рост волновой оптической гироскопии, разработки ЯМР-гироскопа у нас и за рубежом были приостановлены.

Однако исследования эффекта ЯМР продолжались, и в качестве рабочего вещества стали использовать инертные (благородные) газы. В начале 2000-х годов фирма Litton (позднее вошедшая в корпорацию Northrop Grumman) возобновила исследования и разработки ЯМР-гироскопа. Эти работы увенчались успехом. К 2013 году был создан прототип малогабаритного ЯМР-гироскопа, испытания которого подтвердили возможность снижения дрейфа до 10^{-2} град/час [15].

Кратко описать принципы построения ЯМР-гироскопа можно следующим образом. Миниатюрная (размерами порядка 2 мм) стеклянная ячейка заполняется рабочим веществом – изотопами инертного (благородного) газа ксенона (^{129}Xe и ^{131}Xe).

Кроме того, в ячейку вносятся вспомогательные вещества – пары щелочного металла цезия (Cs), азот (N_2) и водород (H_2).

К колбочке прикладывается постоянное магнитное поле, под действием которого выстраиваются магнитные моменты атомов рабочего вещества, образуя ось чувствительности гироскопа. Приложение переменного магнитного поля, ортогонального постоянному полю, порождает прецессию спинов атомов подобно прецессии механического гироскопа в гравитационном поле. Частота прецессии (частота Лармора) соответствует частоте перехода между двумя соседними энергетическими уровнями атомов рабочего вещества, т.е. индивидуальна для каждого вещества. ЯМР возникает, когда частота магнитного поля совпадает с ларморовской частотой.

Передача момента импульса обеспечивается оптической лазерной накачкой, но прямая лазерная накачка ядер ксенона невозможна и осуществляется через атомы цезия, которые передают момент импульса ядрам ксенона в результате столкновений (спин-обменная накачка). Молекулярный азот выполняет функцию буферного газа, водород обеспечивает увеличение времени релаксации.

К источнику оптической накачки предъявляются специфические требования: малые габариты, работа на одной моде, небольшой уровень собственных шумов излучения. Этим требованиям наилучшим образом удовлетворяет полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором (VCSEL). Такой же лазер используется для регистрации показаний ЯМР-гироскопа.

В инерциальной системе координат частота Лармора не зависит от угловой скорости движения ЯМР-гироскопа, поэтому, измеряя частоту прецессии спинов, складывающуюся из частоты Лармора и частоты вращения, и зная величину магнитного поля, можно определить угловую скорость вращения платформы, на которой установлен ЯМР-гироскоп. В терминах гироскопии ЯМР-гироскоп является датчиком угловой скорости.

Прототип ЯМР-гироскопа, созданный корпорацией Northrop Grumman, соответствует среднему навигационному классу точности (дрейф нуля – 0,02 град/час, случайный дрейф – 0,005 град/ $\sqrt{\text{час}}$). Масштабный коэффициент – 0,9986, стабильность масштабного коэффициента – 4 ppm. Диапазон измеряемых скоростей вращения – 3500 град/с. Объем – 10 см³ [15].

Несколько позже разработку ЯМР-гироскопа возобновили в России и Китае. Инициатором и интегратором разработки российского гироскопа стал ЦНИИ «Электроприбор». К настоящему времени решены задачи создания ячейки требуемых размеров и заполнения ее, многослойного пермаллового магнитного экрана, стабилизации температуры. Разработаны экспериментальные образцы VCSEL-лазера и ведутся работы по изготовлению промышленных образцов.

Исследован изотопический эффект и предложены решения, обеспечивающие снижение на два порядка обусловленной им погрешности гироскопа [16], исследуются проблемы повышения точности измерения магнитного поля, появления его флуктуаций внутри ячейки, сокращения времени готовности гироскопа. Эти и другие проблемы делают разработку ЯМР-гироскопа сложной, но интересной работой.

Гироскоп на волнах материи

Этот гироскоп еще не существует, но уже имеются серьезные предпосылки для его создания. В основе гироскопа на волнах материи (ГВМ) лежит принцип кор-

пускулярно-волнового дуализма, в соответствии с которым любым микрочастицам, в том числе и атому, свойственны характеристики не только частицы, но и волны. Корпускулярно-волновой дуализм был открыт в начале XX века М. Планком и А. Эйнштейном для фотонов. Луи де Бройль в 1924 году распространил его на все частицы материи.



Луи де Бройль

Волновые свойства частиц открывают новую возможность реализации эффекта Саньяка и построения на этой основе прецизионного гироскопа. Если создать атомный интерферометр Маха–Цендера путем направления в него потока атомов, то при вращении интерферометра скорость атомов в его плечах будет меняться, соответственно, это приведет к изменению длины волны де Бройля и породит сдвиг фаз в плечах интерферометра (рис. 14).

В интерферометре атомы и, следовательно, волны движутся с гораздо меньшей скоростью, чем световые волны в оптическом интерферометре, поэтому время опроса в атомном интерферометре значительно больше, чем в оптическом, соответственно, выше и чувствительность гироскопа, построенного на волнах атома. Новые возможности еще большего снижения скорости волн атома в интерферометре открыло лазерное охлаждение атомов (Нобелевская премия по физике 1997 г.): если лазерное излучение направить навстречу атомам, то атомы будут охлаждаться и замедляться. В результате охлаждения до сотен микрокельвинов (мК) замедление атомов по сравнению со скоростью света (а значит, и чувствительность атомного интерферометра по сравнению с оптическим) может составить 10^{11} раз при одинаковых площадях интерферометров и соотношениях «сигнал–шум». Реальный выигрыш будет на порядки меньше, но и при этом открывается уникальный путь создания прецизионной системы, причем не только гироскопической, но и гравиметрической.

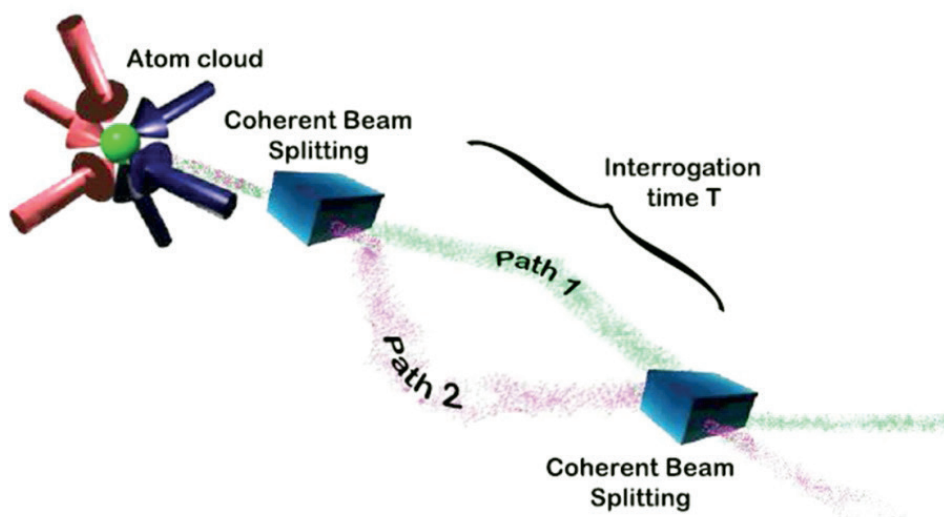


Рис. 14. Интерферометр Маха–Цендера для потока атомов

На этом пути, однако, предстоит преодолеть серьезные трудности. Не рассматривая проблему по существу, ограничимся перечислением ее основных составляющих:

- выбор материала для формирования потока атомов;
- формирование однородного пакета атомов;
- охлаждение атомов до мК;
- построение атомного интерферометра, принципиально отличающегося от оптического;
- выделение в выходном сигнале полезной составляющей и устранение погрешности измерений, обусловленной осреднением выходного сигнала гироскопа при изменении ориентации системы координат относительно навигационной системы.

Проблемы дополнительно осложняются тем, что гироскописты не знают квантовой физики. Частично эту проблему применительно к ГВМ решают публикации [17, 18].

Сегодня работы ведутся в физических лабораториях, по всему миру работают более 30 научных групп, но уже возникают вопросы гироскопического плана, и гироскопистам пора подключаться к изучению этого сложного, необычного, но весьма перспективного направления.

Заключение

За почти двухвековую историю гироскопия прошла большой путь. Основываясь на достижениях фундаментальной науки, создав уникальные технологии, ученые-гироскописты решили многие проблемы автономной навигации, пространственной стабилизации и управления движением.

Современные гироскопы перекрывают весь диапазон требуемых точностей – шесть десятичных порядков. Края этого диапазона обеспечивают электромеханические гироскопы. Электростатический гироскоп имеет максимальную точность и производится малыми сериями, микромеханический гироскоп низкой точности освоен в массовом производстве. Центральную часть диапазона точностей занимают волновые оптические гироскопы (лазерный и волоконно-оптический) и твердотельный волновой гироскоп, которые преимущественно применяются в бесплатформенных инерциальных навигационных системах. Совершенствование этих гироскопов продолжается.

Новые амбициозные задачи гироскопии заключаются в создании гироскопов, приближающихся по основным характеристикам к аппаратуре потребителей спутниковой навигационной информации, но обладающих важным достоинством по сравнению с ней – автономностью.

Для решения проблемы исследуются возможности квантовой гироскопии. До создания прототипов малогабаритных гироскопов навигационной точности доведены исследования эффекта ядерно-магнитного резонанса. Пути построения сверхпрецизионного гироскопа на основе эффекта корпускулярно-волнового дуализма еще исследуются в физических лабораториях.

В целом поле деятельности в современной гироскопии обширно и содержит задачи разного уровня сложности – от инженерных до научно-поисковых.

Благодарности

Автор благодарен А.К. Вершовскому, Ю.А. Литмановичу и Д.О. Тарановскому за полезные советы и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литманович Ю.А. Роторные гироскопы // Гироскопия и навигация. 2026. Т. 34. №2 (133). С. 24–42. EDN HWKQID.
2. Матвеев В.В. Вибрационные гироскопы // Гироскопия и навигация. 2026. Т. 34. №2 (133). С. 43–68. EDN KJVYKK.
3. Филатов Ю.В. Оптические гироскопы // Гироскопия и навигация. 2026. Т. 34. №2 (133). С. 69–96. EDN NRKNWC
4. Вершовский А.К. Гироскопы на принципах квантовой оптики // Гироскопия и навигация. 2026. Т. 34. №2 (133). С. 87–127. EDN UATXCO
5. Левин С.Л. Навигационные акселерометры: опыт разработки / Гироскопия и навигация. 2026. Т. 34. №2 (133). С. 128–150. EDN XGDXM.
6. Ишлинский А.Ю. Механика, идеи, задачи, приложения. М.: Наука, 1985. 624 с.
7. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. 316 с.
8. Вагнер И., Зорг Х. Машина Боненбергера // Гироскопия и навигация. 2008. №1(60). С. 107–114.
9. Пешехонов В.Г. Лидеры отечественной гироскопии // Гироскопия и навигация. 2013. №3 (82). С.139–154.
10. История создания электростатического гироскопа. Памяти главного конструктора А.С. Анфиногенова. Сборник статей. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. 202 с.
11. Пешехонов В.Г. Навигационное обеспечение полярных походов подводных лодок // Гироскопия и навигация. 2022. №2. (117). С. 95–106.
12. Everitt, C.W. et al., Gravitational Probe B Final Results of Space Experiment to Test General Relativity, *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106. Published May 31.
13. Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Грязин Д.Г., Некрасов Я.А., Евстифеев М.И., Блажнов Б.А., Аксененко В.Д., Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний // Гироскопия и навигация. 2008. №3(62). С. 3–12.
14. Умарходжаев Р.М., Павлов Ю.В., Васильев А.Н. История разработки гироскопа на основе ядерного магнитного резонанса в России в 1980–2000 годах // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №3 (100). С. 3–27. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.1.003-027.
15. Уокер Т.Д., Ларсен М.С. ЯМР-гироскопы со спин-обменной накачкой // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №1 (100). С. 28–34.
16. Петров В.И. Минимизация изотопического сдвига в балансной схеме датчика вращения на магнитном резонансе в ядрах ксенона. Дисс. ... кт.н. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2025.
17. Буйе Ф. Столетие эффекта Саньяка и его применений: от электромагнитных волн до волн материи // Гироскопия и навигация. 2013. №4 (83). С. 3–13.
18. Воронов А.С., Ривкин Б.С. Гироскоп на волнах де Бройля. Просто о сложном // Гироскопия и навигация. 2021. №2 (113). С. 126–139. DOI 10.17285/0869-7035.0067.

Peshekhonov, V.G. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

Gyroscopy as a Fusion of Science and Hi-Tech: History, Modern State and Prospects, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2026, vol. 34, no. 2 (133), pp. 3–23.

Abstract. The article briefly describes the history of gyroscopy, its current state and potential development. It is an introductory article for the rest of works published in this issue of the journal. In general, the series of articles presents an overall picture of modern gyroscopic sensors (gyroscopes and accelerometers), and provides an opportunity to assess their applications and prospects.

Key words: rotary gyroscope, vibratory gyroscope, optical wave gyroscope, quantum gyroscope, accelerometer.

Материал поступил 20.04.2026