

ДУГЛАС МЕЙЕР, МАЙКЛ ЛАРСЕН

ГИРОСКОП НА ЯДЕРНОМ МАГНИТНОМ РЕЗОНАНСЕ ДЛЯ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Представлены основные принципы работы ЯМР-гироскопа, разработанного компанией «Нортроп Грумман». Показано, что по характеристикам он превосходит все существующие МЭМС приборы и приближается к уровню многих волоконно-оптических гироскопов. ЯМР-микробироскоп в надежной компактной конструкции потенциально способен стать высокоэффективным прибором для конечного пользователя.

Введение

Исторически понятие датчика углового движения (гироскопа), использующего явление магнитного резонанса, восходит к пионерской работе Исидора Раби [1] 1938 г. Затем в 1946 г. появилась работа Феликса Блоха и Эдварда Миллса Перселла. В 1952 г. была подана заявка на патент США под названием «Устройство для измерения углового движения» на имя Б.Д. Лити. Патент был выдан в 1955 г. компании General Electric Company [2]; это было одно из первых исследований использования технологии ЯМР для применения в гироскопах. Позднее компании General Precision, TRW, Litton Systems Inc. провели собственные исследования в этой области. Все эти концепции и конструкции имеют нечто общее: они основаны на ларморовской прецессии атома. На рис. 1 показана схема ЯМР-гироскопа, описанного в патенте США, выданном компании Litton Systems в 1979 г. [3].

Мейер Дуглас. Директор по перспективной разработке приборов компании «Нортроп Грумман», отдел передовых концепций и технологий, Вудленд-Хиллз, Калифорния, США.

Ларсен Майкл. Атомный физик компании «Нортроп Грумман», отдел передовых концепций и технологий.

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

Научный редактор перевода д.т.н. Ю.А.Литманович.

Взгляды, изложенные в данной статье, принадлежат авторам и не отражают официальную политику или позицию Министерства обороны Правительства США (*прим. авт.*).

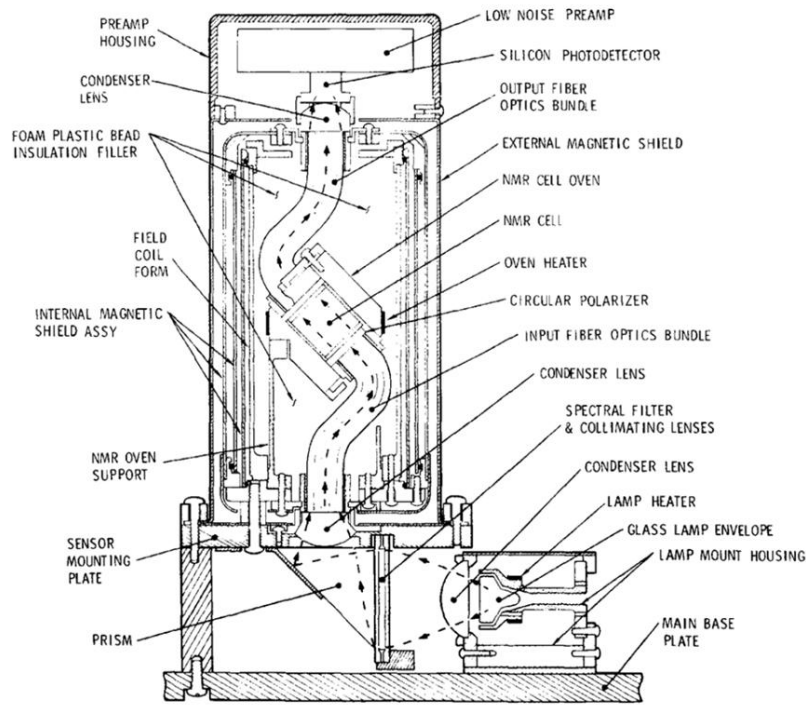


Рис. 1. ЯМР-гироскоп, запатентованный компанией Litton Systems Inc, 1979 г.

Preamp housing – корпус предусилителя, Condenser lens – конденсорная линза, Foam plastic bead insulation filler – пенопластовый изолирующий наполнитель, Field coil form – каркас электромагнитной катушки, Internal magnetic shield assembly – внутренний магнитный экран, NMR oven support – крепление ЯМР-термокамеры, Sensor mounting plate – плата для монтажа датчиков,

Prism – призма, Low noise preamp – малозумящий предусилитель, Silicon photodetector – кремниевый фотодетектор, Output fiber optics bundle – выходной волоконно-оптический кабель, External magnetic shield – внешний магнитный экран, NMR cell oven – термокамера ЯМР-ячейки, NMR cell – ЯМР-ячейка, Oven heater – нагреватель термокамеры, Circular polarizer – круговой поляризатор, Input fiber optics bundle – входной многожильный волоконно-оптический кабель, Condenser lens – конденсорная линза, Spectral filter and collimating lenses – линза спектрального фильтра и коллиматорная линза, Lamp heater – нагреватель лампы, Glass lamp envelope – стеклянная колба лампы, Lamp mount housing – корпус ножки лампы,

Main base plate – главная плита основы

Принцип работы ЯМР-гироскопа основан на стабильности частоты лармовской прецессии спина ядра при воздействии постоянного магнитного поля. Именно стабильность частоты прецессии делает ее идеальным эталоном, позволяющим измерять изменения угловой ориентации. Гироскоп, основанный на свойствах атома, – это очень маленький и точный прибор, который может стать основой прецизионного инерциального навигационного блока. В принципе для производства гироскопа может быть достаточно всего одного атома. ЯМР-гироскопы нечувствительны к ускорениям (которые влияют на показания других видов гироскопов); к их преимуществам также относятся меньшие затраты на производство. В дальнейшем совершенствование базовых технологий – лазеров, высокоскоростной электроники и микрокорпусирования, – позволит ЯМР-гироскопу демонстрировать лучшие характеристики, чем у инерциальных МЭМС приборов такого же размера. Сравните: ЯМР-гироскоп, запатентованный Litton в 1979 г. имел объем порядка 3000 см^3 , а ЯМР-микрогироскоп, описанный в данной статье, – всего 10 см^3 .

Сначала остановимся на названии явления: ядерный магнитный резонанс. Термин «ядерный» относится к свойствам ядра атома. «Магнитный» относится к поведению атомов в условиях постоянного или модулированного магнитного поля. «Резонанс» относится к управлению атомом в магнитном поле с помощью модуляции, частота которой настроена на характеристическую частоту атома. Для обеспечения ЯМР-взаимодействия атом должен обладать определенными характеристиками. Атомы с нечетным количеством нуклонов характеризуются квантово-механическим свойством, называемым магнитным моментом или магнитным спином. Магнитный момент аналогичен вращающемуся стержневому магниту, поэтому атом с магнитным моментом можно рассматривать как крошечный стержневой магнит с северным и южным полюсами, расположенными на оси вращения атома. Магнитный момент атома или изотопа каждого типа уникален, и поэтому он характеризуется уникальным гиромагнитным отношением – вот базовые принципы нашего гироскопа.

Основные принципы работы прибора

В ЯМР-гироскопе спин-поляризованные атомы используются, как гироскопы вращения, имеющие размеры порядка ангстрема. В первом приближении вращающийся атом можно сравнить с волчком, вращающимся в гравитационном поле Земли. Вращающийся волчок характеризуется определенным моментом количества движения, и под воздействием гравитационного поля Земли он прецессирует вокруг этого поля с определенной частотой (рис. 2, *a*). Из-за постоянно уменьшающейся угловой скорости волчка момент количества его движения не постоянен и частотный спектр представляет собой континуум. Если атом с магнитным моментом, например атом ксенона, находится в постоянном магнитном поле B определенной напряженности, он будет прецессировать с постоянной высокостабильной частотой. На рис. 2, *b* показан вращающийся атом с квантованным моментом количества движения.

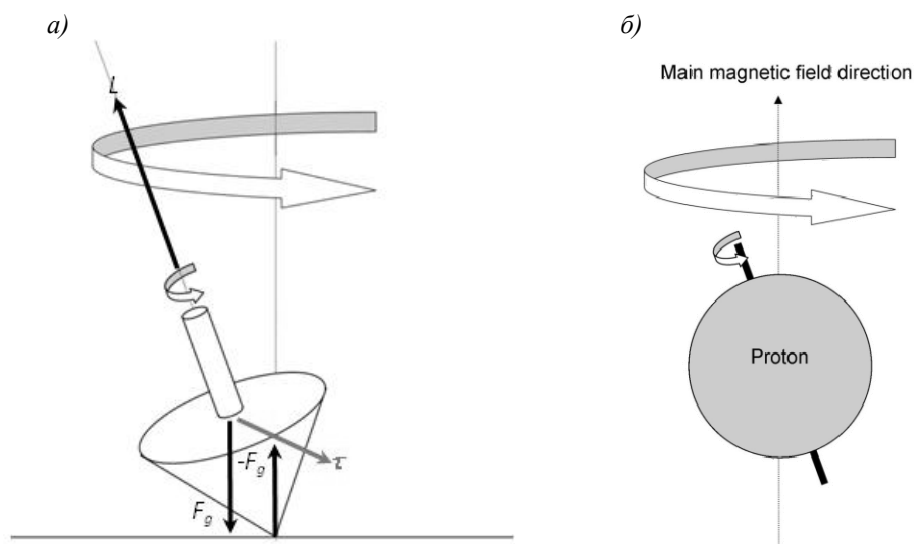


Рис. 2. Сравнение классического и квантованного момента количества движения: (а) классическая механика – неквантованный момент количества движения, тело нестабильно; (б) квантовая механика – квантованный момент количества движения и магнитный момент, тело стабильно. Стрелкой показано направление основного магнитного поля

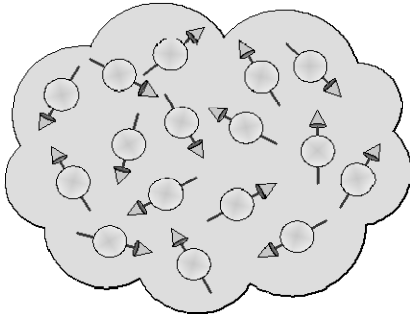


Рис. 3. Газовое облако со случайным распределением атомных магнитных моментов

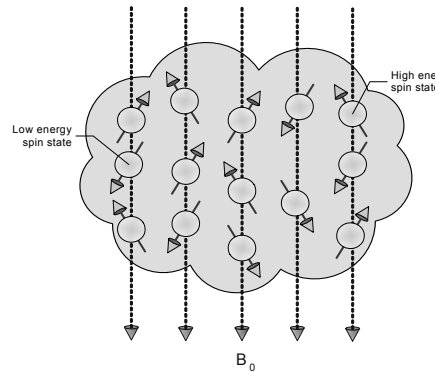


Рис. 4. Газовое облако в присутствии статического магнитного поля, атомы выровнены по линиям поля: Low energy ground state – низкоэнергетическое основное состояние атома. High energy ground state – высокоэнергетическое основное состояние атома

Для общего понимания процесса начнем с описания ячейки с газом, состоящим из атомов с магнитными моментами. В отсутствии внешнего магнитного поля отдельные магнитные моменты не ориентированы и направлены случайным образом (рис. 3). Если поместить газовую ячейку в статическое внешнее магнитное поле, B_0 , магнитные моменты станут более упорядоченными и выстроятся по линиям поля. Но даже после выстраивания моментов по линиям поля по-прежнему есть различия спиновых состояний, связанных со спином ядра каждого атома. Эти состояния – спин, направленный вверх или вниз, – соответствуют высокоэнергетическому или низкоэнергетическому основному состоянию атома. Такое различие в основном состоянии приводит к рассогласованию направлений в статическом магнитном поле, как показано на рис. 4. Дальнейшая ориентация магнитного момента достигается за счет оптической накачки, когда свет распространяется вдоль направления внешнего магнитного поля. Задача состоит в том, чтобы перевести ядерный спин в нужное состояние для создания газа с полностью ориентированными (поляризованными) атомами.

Можно определить простую модель в виде момента количества движения для двух энергетических состояний атома, равного $J = -1/2$ и $J = +1/2$. Если атомы подвергаются воздействию потока фотонов со спиновым квантовым числом $m_s = +1$, как в случае круговой поляризации света, только атомы с состоянием $J = -1/2$ могут поглощать фотоны и переходить в состояние $J = +1/2$. Атомы с состоянием $J = +1/2$ не могут поглощать фотоны, так как при этом не сохранились бы энергия и момент количества движения системы.

После поглощения атомом фотона происходит спонтанное испускание, причем излученный фотон уносит момент количества движения, возвращая атом в основное состояние. После испускания атом может перейти в состояние спина $J = -1/2$ или $J = +1/2$. В первом случае атом может снова поглотить фотон, и цикл повторяется. За счет такого поглощения и испускания фотонов все атомы в конечном итоге приходят к одному состоянию спина – происходит поляризация атомной системы. Таким образом, направление результирующего магнитного момента всей системы M имеет направление, показанное на рис. 5.

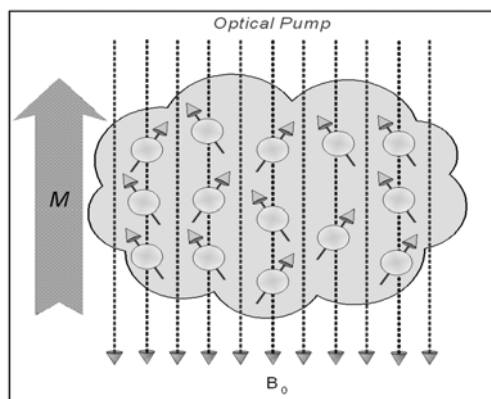


Рис. 5. Оптическая накачка газового облака для выравнивания результирующего магнитного момента, M
Optical pump – оптическая накачка

Поскольку магнитный момент атома вращается, момент будет не идеально совпадать со статическим магнитным полем B_0 , а будет находиться под определенным углом к силовым линиям поля. Это небольшое рассогласование относительно линий поля заставляет атом вращаться вокруг направления B_0 с частотой прецессии (ларморовской частотой) f_L , определяющейся выражением

$$f_L = \gamma B_0 \quad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение для данного атома. Очевидно, что ларморовская частота будет меняться при изменении напряженности поля B_0 .

Под воздействием статического магнитного поля и оптической накачки создается ансамбль атомов с магнитными моментами, направленными в одну сторону, что обеспечивает результирующий магнитный момент системы. При подаче переменного магнитного поля $B_A = B_0 \cos(\omega t)$ перпендикулярно результирующему магнитному моменту происходит его возмущение. Если частота поля B_A равна f_L , это поле заставит M повернуться и прецессировать на ларморовской частоте. Это показано на рис. 6(a), где результирующий магнитный момент в невозмущенной системе ориентирован вертикально (по оси z). При подаче поля B_A в горизонтальной плоскости M также перемещается в горизонтальную плоскость (xy) (рис. 6, б).

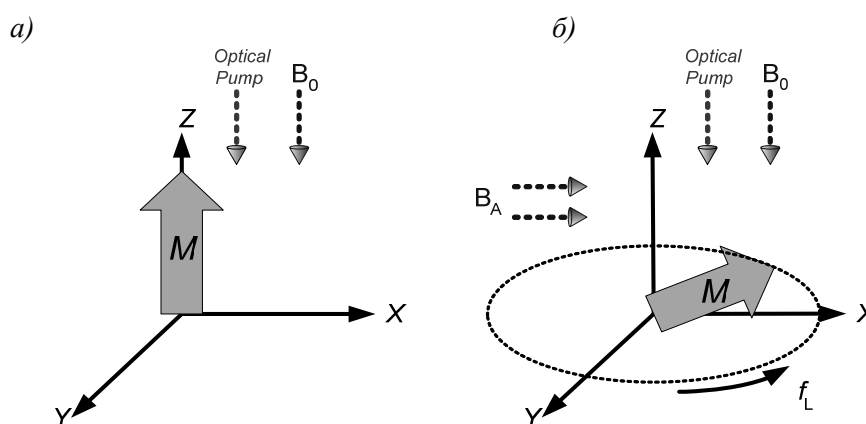


Рис. 6. Прецессия результирующего магнитного момента вокруг оси z вследствие подачи переменного ортогонального магнитного поля

Если такую систему поместить на платформу или транспортное средство и позволить ей поворачиваться вокруг оси z , скорость вращения платформы Ω можно будет определить по уравнению:

$$f_g = \gamma B_0 - \Omega = f_L - \Omega \quad (2)$$

Таким образом, выявляя отличие частоты f_g от ларморовской частоты, можно определить угловую скорость вращения системы.

При переходе от теории к практике нужно уделить внимание нескольким моментам помимо очевидных ограничений по размеру, весу и мощности: как на практике ориентировать и выровнять атомы в ЯМР газовом облаке и как измерить угловую скорость; от каких внешних воздействий, влияющих на полезный сигнал скорости, следует защищать прибор, чтобы он мог использоваться на практике как датчик угловой скорости.

Метод, разработанный компанией «Нортроп Грумман» в целях измерения угловой скорости, подразумевает использование оптической накачки для ориентации атомов, оптического детектирования для определения состояния атомов и измерения скорости вращения и формирования выходного сигнала гироскопа. Свет, используемый для накачки системы, имеет круговую поляризацию, а детектирующий свет – линейную. Смесь внутри газовой ячейки ЯМР состоит из щелочного металла и двух изотопов инертных газов: ^{129}Xe и ^{131}Xe . Можно переписать уравнение (1), используя гиромагнитные отношения для двух изотопов ксенона, и получить два следующих уравнения:

$$f_a = \gamma_a B_0, \quad (3)$$

$$f_b = \gamma_b B_0, \quad (4)$$

где индексы a и b обозначают соответственно гиромагнитные отношения для ^{129}Xe и ^{131}Xe . Щелочной металл участвует в оптической накачке системы посредством процесса спин-обмена с инертными газами, ориентируя их магнитные моменты относительно постоянного магнитного поля. Скорость прецессии атомов щелочных металлов примерно в тысячу раз больше, чем у изотопов ксенона. Наблюдая прецессию щелочи, и ее изменения, обусловленные возмущениями магнитного поля прецессией результирующего спина ксенона, можно определить частоту прецессии каждого изотопа ксенона. Гиромагнитные отношения двух изотопов ксенона имеют противоположные знаки; соответственно, моменты этих изотопов прецессируют в противоположных направлениях. Благодаря этому, если корпус гироскопа вращается с некоторой частотой f_g относительно стационарной инерциальной системы отсчета, измеренная частота каждого изотопа будет равна:

$$f'_a = \gamma_a B_0 + f_g, \quad (5)$$

$$f'_b = \gamma_b B_0 - f_g, \quad (6)$$

где f' означает измеренную частоту относительно вращающейся системы координат (корпус гироскопа). Если сложить две измеренные частоты, результат будет независим от вращения корпуса и пропорционален результирующему магнитному полю:

$$f'_T = f'_a + f'_b = B_0(\gamma_a + \gamma_b). \quad (7)$$

Суммарная частота удерживается на постоянном уровне посредством ее фазовой автоподстройки под стабильную внешнюю эталонную частоту. Выход схемы ФАПЧ подается на катушки, которые создают основное магнитное поле; таким образом, замыкается обратная связь. Поскольку основное магнитное поле

удерживается на постоянном уровне относительно внешней эталонной частоты, любой из двух сигналов изотопов ксенона можно использовать для определения вращения корпуса путем сравнения измеренного сигнала изотопа ксенона со вторым стабильным эталонным сигналом, выработанным тем же внешним эталоном частоты, который был использован для стабилизации магнитного поля. При вращении гироскопа относительный фазовый угол между измеренным сигналом ксенона и эталонным сигналом будет меняться в соотношении 1:1 (масштабный коэффициент равен 1). Поэтому выходной сигнал ЯМР-гироскопа эквивалентен углу, а не угловой скорости.

Разработка ЯМР-гироскопа и его характеристики

В настоящее время компания «Нортроп Грумман» находится на четвертом этапе программы разработки ЯМР-гироскопа. В ходе выполнения предыдущих трех этапов был достигнут значительный прогресс в технологии, улучшены характеристики прибора и уменьшены физические размеры блока гироскопа. Уменьшение размера в ходе четырех этапов программы разработки показано на рис. 7. Основное внимание в данном разделе будет уделено блоку, конструируемому на этапе 4, и результатам его испытаний.

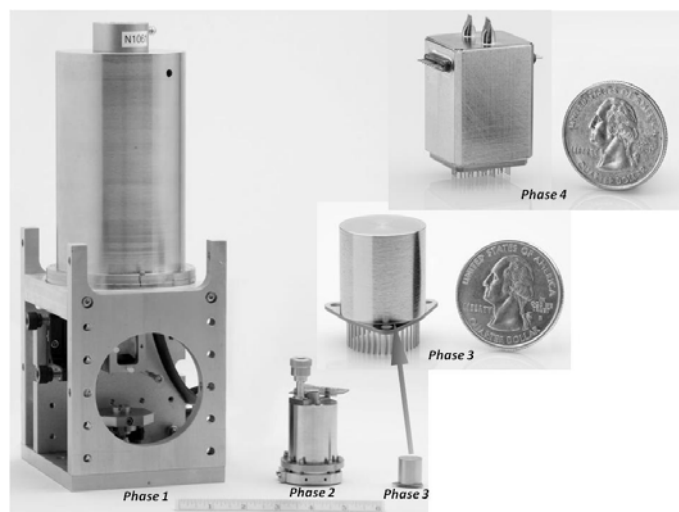


Рис. 7. Изменение размеров ЯМР-микрогироскопа: этап 1 – 3000 см³; этап 2 – 55 см³; этап 3 – 6 см³; этап 4 – 10 см³, герметизированный корпус

Как уже говорилось, в гироскопе используется два ядерных изотопа, ¹²⁹Xe и ¹³¹Xe. Использование двух изотопов в сочетании с качественным магнитным экранированием и применением специальной электроники, реализующей обратные связи, позволяет создавать стабильные магнитные поля, необходимые для работы гироскопа. Смесь ксенона и щелочи находится в стеклянной ячейке кубической формы, содержащейся при постоянной температуре. Состояние спина электрона щелочного атома управляется оптической накачкой, осуществляемой поверхностно-излучающим лазером с вертикальным резонатором (VCSEL - vertical cavity surface-emitting laser). За счет спин-обмена между щелочью и ксеноном происходит спиновая поляризация двух изотопов ксенона. Щелочные атомы также используются в качестве магнитометра для детектирова-

ния прецессии изотопов ксенона. Прецессия спина щелочных атомов детектируется с помощью второго VCSEL лазера методом фарадеевского вращения плоскости поляризации.

Изготовление и наполнение газовой ячейки – один из наиболее критических моментов, влияющих на характеристики гироскопа. По этой причине были проведены теоретические и экспериментальные исследования для определения оптимальной газовой смеси для наполнения каждой ячейки, а также для разработки оптимальной методики подготовки и наполнения ячеек. Система наполнения ячеек была значительно усовершенствована: теперь в ней обеспечивается лучший контроль и повторяемость состава газовой смеси. Чистота стенок ячейки, оптическая прозрачность и геометрия поверхностей также были значительно улучшены. Эти изменения привели к увеличению времени когерентности прецессии ксенона и повышению уровня спиновой поляризации как щелочных атомов, так и ксенона. К настоящему моменту достигнута продолжительность жизни обоих изотопов ксенона более 26 с в кубической ячейке с внутренним размером 2 мм и более 22 с в ячейке размером 1 мм. На рис. 8 показана 2-мм газовая ячейка и держатель ячейки ЯМР-гироскопа.

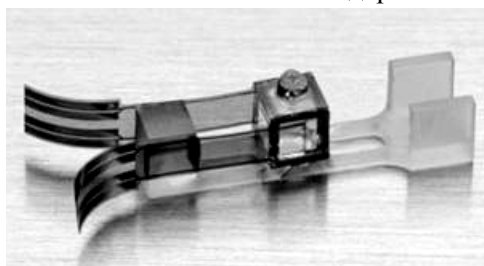


Рис. 8. Газовая ячейка ЯМР-гироскопа размером 2 мм

Физический блок, разработанный к четвертому этапу программы, имеет объем 10 см^3 – при его разработке мы учли все уроки, полученные на предыдущих этапах разработки. Ожидаемые характеристики работы блока – нестабильность смещения нуля $0,01 \text{ град/ч}$ и случайный уход по углу $0,001 \text{ град}/\sqrt{\text{ч}}$.

Разработанный корпус герметичен, имеет встроенные газопоглотители для поддержания вакуума, обеспечивает улучшенную защиту слабого сигнала от внешних помех, а значит, и лучшее отношение сигнал-шум, лучшие возможности контроля температуры ячейки, подачу увеличенной оптической мощности к ячейке и фотодетекторам за счет более мощных источников лазерного излучения и увеличенной оптической эффективности, отличается жесткостью и механической надежностью конструкции.

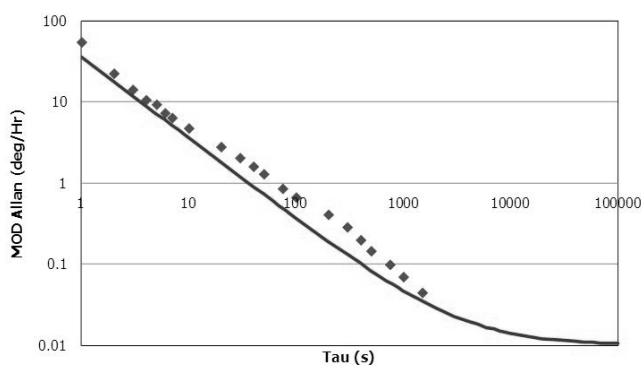


Рис. 9. График вариации Аллана для ЯМР-гироскопа

Также на этапе 4 значительные улучшения были произведены в части электронных компонентов. На третьем этапе важной проблемой было ограничение полосы пропускания гироскопа. Ширина полосы пропускания электроники бы-

ла увеличена в 1400 раз, что привело к увеличению полосы частот гироскопа до половины угловой скорости в соответствии с теоремой о выборке Найквиста – Шеннона. Полученная в результате полоса частот гироскопа в 44 раза больше, чем на этапе 3, и превышает уровень, заданный при конструировании, – 300 Гц. Несколько контуров стабилизации и управления были добавлены в электронную схему гироскопа, что значительно улучшает работу системы и долговременную стабильность смещения нуля.

Результаты испытаний ЯМР-гироскопа очень обнадеживают: его параметры приближаются к навигационному классу. На рис. 9 в виде вариации Алана показаны результаты предварительных испытаний: случайный уход по углу составляет 0,001 град/√ч, нестабильность смещения нуля – около 0,01 град/ч. Если взять срез данных за три часа, дрейф гироскопа составил менее 0,05 град/ч, приближаясь к значению 0,02 град/ч, как показано на рис. 10.

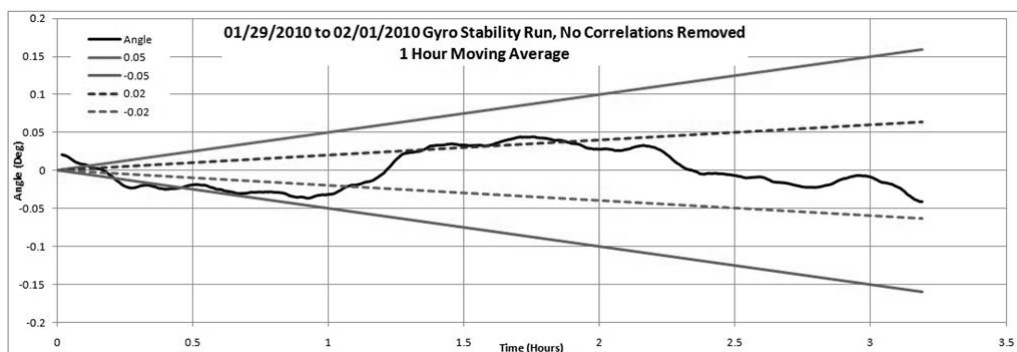


Рис. 10. Дрейф нуля ЯМР-гироскопа

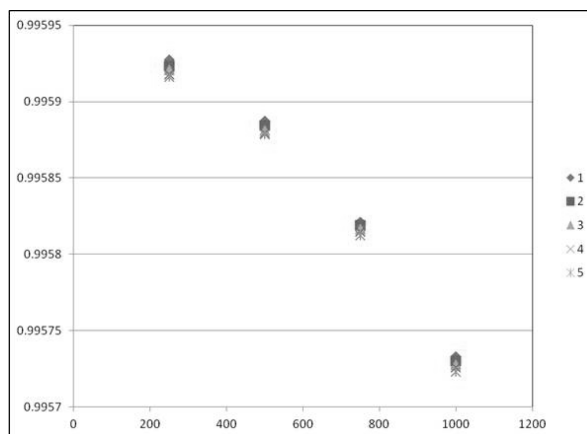


Рис. 11. Зависимость стабильности масштабного коэффициента ЯМР-гироскопа от скорости

При испытании измерялись скорости вращения до 2500 град/с, причем это ограничение было обусловлено не свойствами ЯМР-гироскопа, а испытательным оборудованием. Будущие испытания гироскопов будут производиться с более высокими скоростями. Дополнительно проведено испытание стабильности масштабного коэффициента, которое показало результат менее $5 \cdot 10^{-6}$, как показано на рис. 11. В начале разработки ЯМР-гироскопов возник вопрос о возможности в достаточной мере подавлять внешние магнитные поля, т.к. их воздействие приведет к появлению шума/помех в выходном сигнале гироскопа.

В ходе разработки была достигнута способность подавления магнитных полей более $> 3 \times 10^9$.

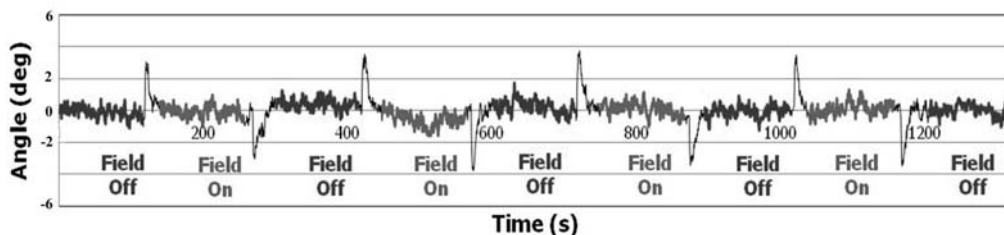


Рис. 12. Подавление магнитного поля; остаточный угловой дрейф как функция времени при воздействии поля 1 Гаусс, подавление более 3×10^9

На рис. 12 показано остаточное влияние магнитных полей как функция дрейфа угла и времени при воздействии внешнего поля 1 Гаусс. Зубцы на графике показывают моменты подачи и отключения поля. Для сравнения, неэкранированные системы без обратной связи при воздействии такого же магнитного поля продемонстрировали бы смещение нуля на уровне более 423,00 град/с.

Заключение

В статье описаны основы технологии ядерного магнитного резонанса, применение этой технологии для измерения вращения, разработка ЯМР-гироскопа и результаты его испытаний. Последние показывают, что смещение нуля на уровне 0,01 град/ч, случайный уход по углу 0,001 град/ $\sqrt{ч}$, и диапазон измеряемой скорости вращения более 2500 град/с достижимы в данной схеме. Кроме того, сам физический принцип измерения скорости делает гироскоп нечувствительным к вибрациям, что обеспечивает ему уникальное преимущество над МЭМС приборами.

Хотя нам предстоит еще много работы по разработке гироскопа и дальнейшему интегрированию в трехосный инерциальный измерительный блок с шестью степенями свободы, уже сейчас понятно, что ЯМР-технология способна обеспечивать параметры навигационного класса в малом форм-факторе. Как указано в статье, физический объем блока составляет 10 см³; на его основе мы разработали концепцию инерциального измерительного блока объемом около 300 см³ и энергопотреблением около 5 Вт. Достижение такого размера и энергопотребления – значительный шаг вперед в разработке современных инерциальных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rabi, I.I., Zacharias, J.R., Millman, S., Kusch, P.** A New Method of Measuring Nuclear Magnetic Moment, *Physical Review*. 53 (4), 318-327 (1938).
2. **Leete, B.D.** assigned to General Electric Company, U.S. Patent 2,720,625, October 11, 1955.
3. **Grover, B.C., Kanegsberg E., Mark, J.G., Meyer, R.L.**, assigned to Litton Systems, Inc. U.S. Patent 4,157,495, June 5, 1979.

Abstract. Since its discovery by Isidor Rabi in 1938 and his subsequent Nobel Prize in physics in 1944, scientists have been using nuclear magnetic resonance (NMR) technologies as a tool in analytic chemistry, biochemistry, and the study of atomic interactions. In 1952 General Electric proposed that a gyro could be made based on

NMR technology, in particular the concept of using the intrinsic quantum property of spin was of interest, specifically the stability of a quantized angular momentum of a nucleus when subjected to a stable magnetic field.

From roughly 1952 to 1980 several groups worked on the concept and development of an NMR based gyro, with some being more successful than others. While the fundamentals of the technology were understood and the concept demonstrated, the enabling technologies required to develop a compact, robust design that would operate outside of the controlled laboratory environment were not available.

For the past several years Northrop Grumman has been investigating and developing a NMR-Gyro. Owing to the advancement in enabling technologies a small robust gyro package can now be produced. The current micro-NMRG design is housed in a 10 cubic centimeter package and has been tested over a limited environment. Projected size estimate for a 6 degree-of-freedom inertial measurement unit is on the order of 300cc with a power draw of a few watts.

Initial testing of the unit has shown a performance level better than any MEMS device currently available as well as approaching the performance of many fiber optic gyros. The micro-NMR-Gyro has the potential to provide the end user a high-performance device in a small robust package.

Presented in this paper is a summary of the basic principles of operation and performance testing results of the hardware to date.

Key words: Navigation, Inertial Instrument, NMR, Nuclear Magnetic Resonance, Nuclear Magnetic Resonance Gyro