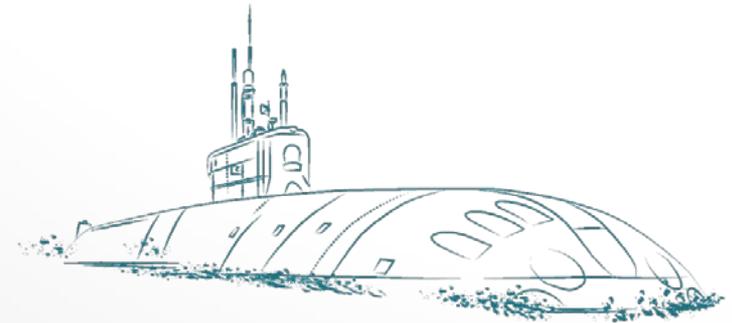


XIV ВСЕРОССИЙСКОЕ СОВЕЩАНИЕ
ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ,
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАН,
17 ИЮНЯ 2024 г., МОСКВА

ЭВОЛЮЦИЯ ГИРОСКОПИИ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.Г. Пешехонов



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ
АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»

СОДЕРЖАНИЕ

Основы гироскопии

Механические гироскопы. Инерциальные навигационные системы

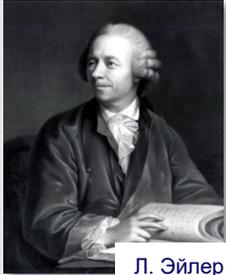
**Волновые оптические гироскопы.
Бесплатформенные инерциальные навигационные системы**

Волновой твердотельный гироскоп

Микромеханические гироскопы и системы управления движением

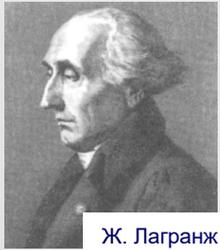
Перспективы гироскопии – атомные гироскопы

ОСНОВЫ ГИРОСКОПИИ



Л. Эйлер

Л. Эйлер вывел кинематические и динамические уравнения вращающегося тела и показал: если на вращающееся тело не действует внешняя сила, то ось его вращения сохраняет направление в абсолютном пространстве (1758 г.).



Ж. Лагранж

Ж. Лагранж нашел решение уравнений Эйлера для случая, когда у твердого тела равны моменты инерции относительно двух главных осей, а центр масс находится выше точки опоры на главной оси и на тело действует сила тяжести.



Л. Фуко

Л. Фуко создал экспериментальный гироскоп, поместив вращающийся ротор в карданов подвес (1852 г.). Предсказал возможность создания трех видов гироскопических приборов:

- свободный гироскоп;
- гироскопический компас;
- гироскопический указатель широты места.

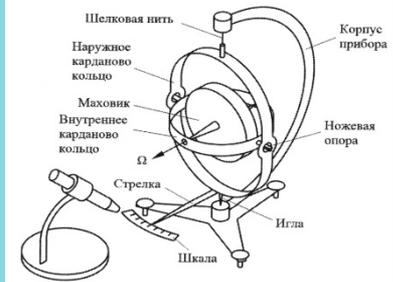


Схема модели гироскопа Л. Фуко

СТАНОВЛЕНИЕ ГИРОСКОПИИ

Теория

- Механика гироскопов – раздел аналитической механики. Учитываются сила тяжести, сила трения, дисбаланс ротора.
- Прецессионная теория гироскопов, учитывающая только собственные кинетические моменты.
- Условия невозмущаемости (М. Шулер) $T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$, $T = 84.4$ мин (период собст. колебаний), R – радиус Земли.
- Теория гиригоризонткомпаса (И. Геккелер).

Технологии

- Приближение центра масс к центру вращения ротора.
- Снижение трения в опоре ротора:
 - В. Сименс – подшипниковая опора,
 - У. Томсон (лорд Кельвин) – жидкостная опора,
 - А. Эйнштейн – «магнитное дутье»,
 - Э. Сперри – аэродинамическая опора.

Первые производители

Г. Аншюц-Кемпфе (Германия), 1908 г., Э. Сперри (США), 1910 г.

НАЧАЛО РАБОТ ПО ГИРОСКОПИИ В РОССИИ (1931 г.)



А.Н. Крылов



Б.В. Булгаков



Е.Л. Николаи



Б.И. Кудревич



Н.Н. Остряков



В.И. Кузнецов

ТЕОРИЯ

- А.Н. Крылов, Ю.А. Крутков «Общая теория гироскопов и некоторых технических их приложений» (1932 г.)
- Б.В. Булгаков «Прикладная теория гироскопов» (1939 г.)
- Е.Л. Николаи. Серия статей о гироскопе в кардановом подвесе (1939–1943 гг.)
- Б.И. Кудревич «Теория и практика гироскопического компаса» в 5 томах (1922–1946 гг.)

ПЕРВЫЕ РАЗРАБОТКИ

(Морская часть завода «Электроприбор»)

1937 г. – упрощенная гировертикаль «Шар»

1938 г. – гироскопический компас «Курс»

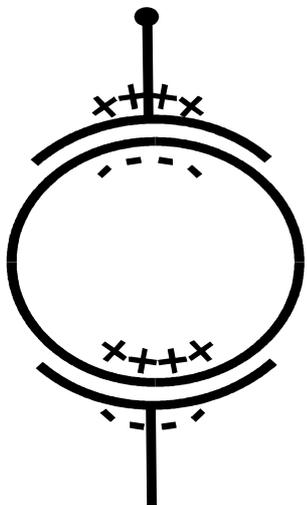
1939 г. – гировертикаль «Газон»



РАЗВИТИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Вид опоры ротора	Начало производства гироскопов	Класс точности (дрейф нуля) град/час	Производятся
Подшипниковая	Первое десятилетие XX века	10^{-1}	–
Аэродинамическая	Второе десятилетие XX века	$3 \cdot 10^{-3}$	–
Гидростатическая	Пятое десятилетие XX века	10^{-3}	+
Электростатическая	Седьмое десятилетие XX века	$<10^{-3}$	+

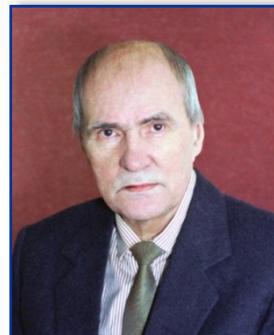
ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП



$$f = \frac{E^2}{8\pi} n$$

$$T \gg \tau$$

$$\tau = L/c$$

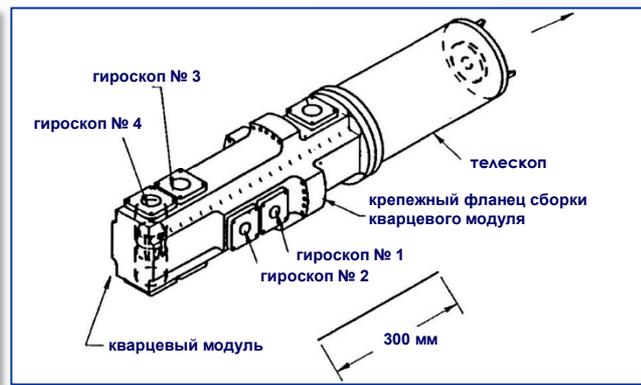
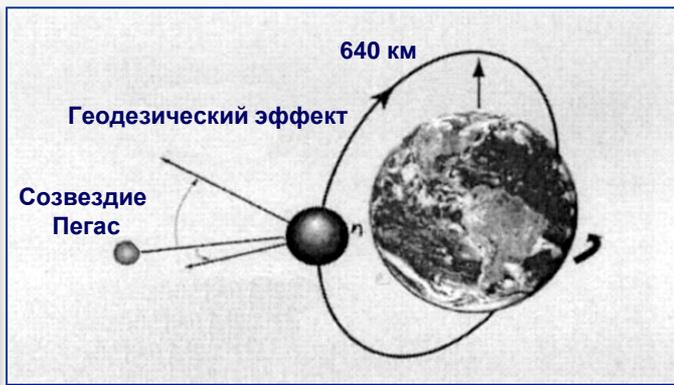
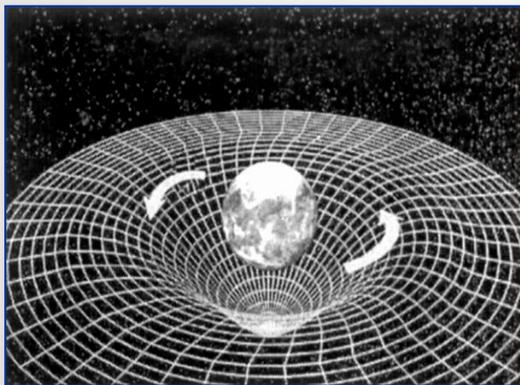


А.С. Анфиногенов
(1930–2003)



В.З. Гусинский
(1940–2020)

Уникальный эксперимент по проверке общей теории относительности с помощью электростатического гироскопа



Доказан геодезический эффект

6,6 угл. с/год

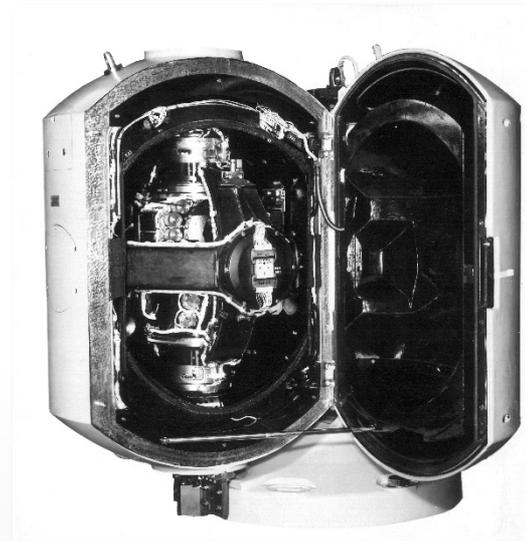
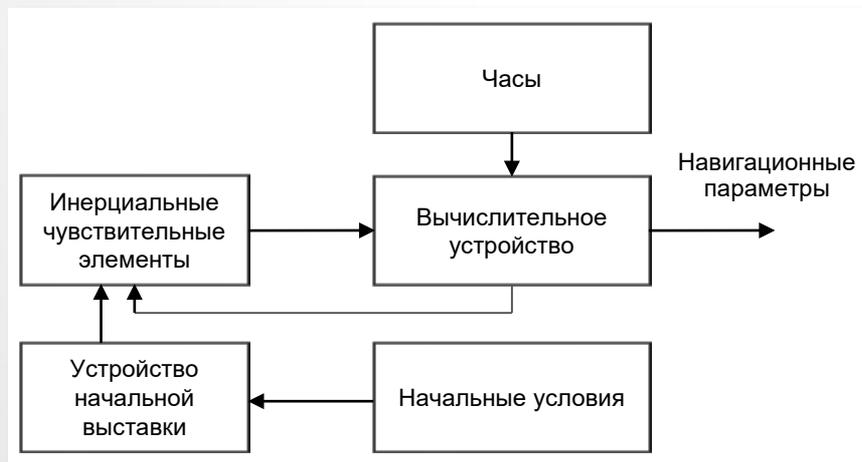
ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Автономное средство навигации, определяющее все навигационные параметры – координаты, курс, линейные составляющие скорости и ускорений, угловые скорости.

Гироскопы обеспечивают стабилизацию в пространстве платформы, на которой установлена триада акселерометров. Двойное интегрирование показаний акселерометров определяет путь, пройденный относительно начальной точки.



А.Ю. Ишлинский



Основные проблемы:

- необходимы гироскопы класса точности $<10^{-2}$ град/час;
- погрешность выработки координат нарастает во времени;
- сложная механика, ограниченная надежность, высокая стоимость.

ВОЛНОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ

Эффект Саньяка (1913 г.)

Вращение замкнутого контура, по которому распространяется свет в противоположных направлениях, приводит к смещению интерференционной картины.

История создания ЛГ

- идея открытого резонатора (1958 г., А.М. Прохоров),
- создание газового лазера (1960 г., А. Джаван и др.),
- создание кольцевого газового лазера (1962 г., А. Розенталь и др.).

Разность частот встречных волн ($\Delta\omega$) в первом приближении пропорциональна скорости вращения (Ω)

$$\Delta\omega = 2\pi \frac{4S}{\lambda L} \Omega$$

Ω – скорость вращения

S – площадь резонатора

L – периметр резонатора

λ – длина волны излучения кольцевого лазера

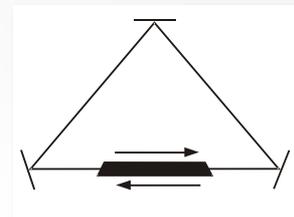
Преимущества ЛГ перед механическими гироскопами:

- отсутствие движущихся частей;
- моноблочная конструкция;
- большой динамический диапазон и малый масштабный коэффициент;
- малое время готовности.

Недостаток ЛГ – явление «захвата» встречных волн.

Способ преодоления – виброподставка, эффект Зеемана.

Класс точности ЛГ – $10^{-1} \dots 10^{-3}$ град/час.

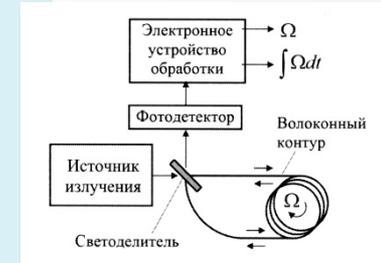


ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП (ВОГ)

- ✓ Реализует эффект Саньяка в многовитковой катушке оптического волокна.
- ✓ Разрабатывается с середины 70-х годов, вначале как дешевый гироскоп низкой точности.
- ✓ Интерференционная картина определяется формулой $I = 2I_0(1 + \cos\varphi)$, при $\omega = 1$ град/час сдвиг фазы $10^{-6} - 10^{-5}$ рад.
- ✓ Замкнутая схема выводит рабочую точку на линейный участок ($\varphi = \frac{\pi}{2}$) – максимальная чувствительность

$$\Delta\varphi = 4\pi \frac{RL}{\lambda c} \Omega$$

R – средний радиус витка, L – длина волокна,
 Ω – угловая скорость, λ – длина волны,
 c – скорость света.



Принципиальная схема ВОГ

Преимущества ВОГ по сравнению с ЛГ:

- при равных габаритах чувствительность выше в N раз (N – число витков);
- источник света находится вне контура – выше надежность;
- отсутствует явление «захвата» – потенциально выше точность;
- основные элементы отработаны и совершенствуются в волоконно-оптических линиях связи.

Недостатки ВОГ по сравнению с ЛГ:

- больше и нестабильнее масштабный коэффициент;
- большая чувствительность к внешним воздействиям (механическим, тепловым, магнитным).

Класс точности – $1 \div 10^{-3}$ град/час (современный), $1 \div 10^{-4}$ град/час (перспективный).

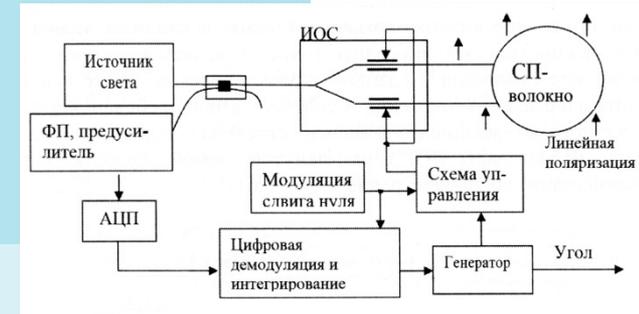


Схема высокоточного ВОГ

БЕСПЛАТФОРМЕННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (БИНС)

Строятся в основном на волновых оптических гироскопах.

В БИНС в отличие от ИНС плоскости горизонта и меридиана строятся не физически, а аналитически.

Преимущества по сравнению с ИНС:

- в 5–12 раз сокращается время готовности;
- на порядок увеличивается время наработки на отказ;
- до 25% сокращается стоимость изготовления и до 75% – стоимость эксплуатации.

В мире переход от ИНС к БИНС произошел в 90-х годах прошлого века.

Выпускаются БИНС:

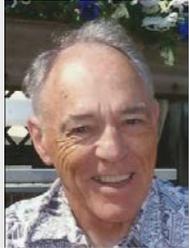
- ✓ низкой точности (дрейф нуля гироскопов $\geq 0,05$ град/час);
- ✓ средней точности (дрейф нуля гироскопов $\sim 0,01$ град/час);
- ✓ высокой точности (дрейф нуля гироскопов $< 0,001$ град/час).

Основные производители: компании США, Франции, России, Китая, Германии.

ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП (ВТГ)



Г. Брайан



Д. Линч

Г. Брайан открыл и экспериментально подтвердил эффект инертности упругих волн во вращающемся осесимметричном теле (1890 г.).

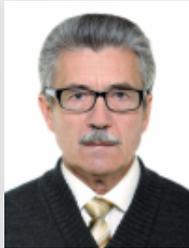
Под действием сил Кориолиса картина стоячих волн во вращающейся полусферической оболочке прецессирует относительно оболочки и инерциального пространства.

Д. Линч (компания Delco, США) доказал, что эффект существует и при переменной скорости вращения оболочки.

Академики В.Ф. Журавлев и Д.М. Климов обобщили результат при любом законе движения.



Д.М. Климов



В.Ф. Журавлев

$$\vartheta = \vartheta_0 - \kappa \int_0^t \Omega(\tau) d\tau$$

ϑ – угол ориентации стоячей волны;
 κ – масштабный коэффициент резонатора;
 Ω – угловая скорость вращения.

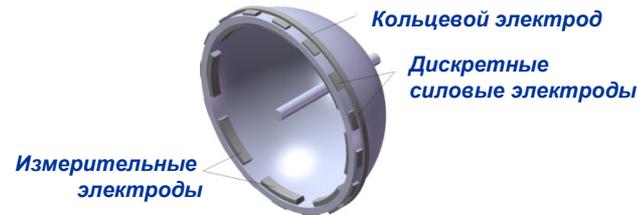


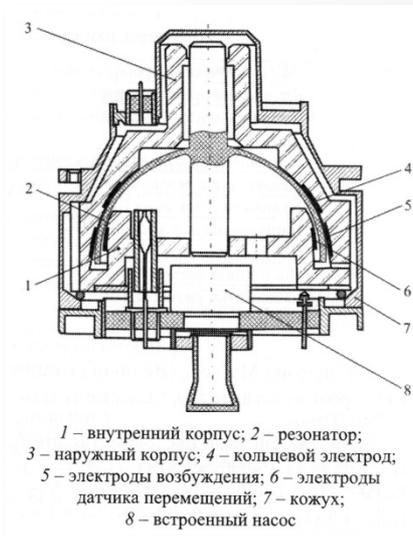
Схема расположения емкостных электродов относительно полусферического резонатора в ВТГ-ИГ

Проблемы технологии:

- необходим резонатор с добротностью $>10^6$;
- погрешность измерения смещения стоячих волн должна быть не более 0,1 мкм.

Первые образцы ВТГ – навигационный класс (компания Delco, США)

- дрейф нуля – 0,01 град/час;
- ударопрочность – 100 g;
- время выхода на режим – 1 с;
- добротность резонатора – $8 \cdot 10^6$;
- диаметр резонатора – 65 мм.



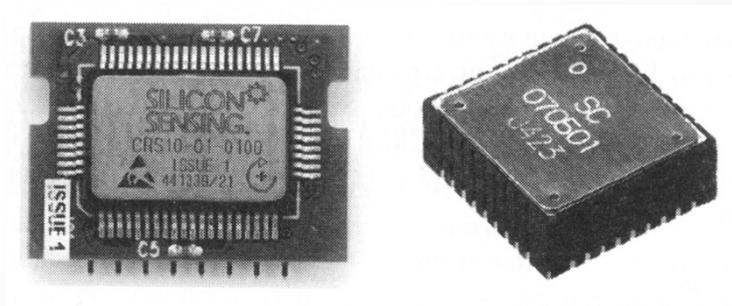
*Конструктивная схема ВТГ
разработки РПКБ*

Высокое значение $SWaP+C$, но благодаря исключительно высокой надежности гироскоп нашел применение в космической технике.

Наработка ВТГ в космосе превысила 30 000 000 часов без отказов.

Первые образцы ВТГ с кольцевым резонатором – тактический класс (Silicon Sensing Systems, Великобритания – Япония)

- дрейф нуля – 0,5 град/с;
- ударопрочность – 100 g;
- габариты:
CRS10 – 23x17x6,8 мм,
CRG20 – 9,5x9,0x3,44 мм.



*Внешний вид цифровых гироскопов
CRS10 и CRG20*

Современные ВТГ – прецизионный класс точности

Разработки Northrop Grumman (США)

	Прибор 130P	Прибор mHRG	Прибор HRG с автокалибровкой
Дрейф нуля (град/час)	0,0005	0,003	0,0005
Случайный дрейф (град/ $\sqrt{\text{час}}$)	0,00002	0,0001	0,0001
Нестабильность масштабного коэффициента (ppm)	1	1	1
Диаметр резонатора (мм)	30	30	30
Ударостойкость (g)	3000	3000	3000
Вибростойкость (g)	18	18	18

В гироскопе mHRG число деталей сокращено с 64 до 5.

Современные ВТГ – прецизионный класс точности (продолжение)

Разработки Safran E&D (Франция)

	Прибор Ragys 20	HRG Crystal™	HRG Crystal™ в БИНС Black-Onix™ Dual Core (режим автокалибровки)
Дрейф нуля (град/час)	0,005	0,0001	0,00001 → 1 мила за 120 часов
Случайный дрейф (град/√час)	0,0002	0,001	0,001
Нестабильность масштабного коэффициента (ppm)	1	2	1
Диаметр резонатора (мм)	30	20	20

Последнее достижение – режим автокалибровки – снижает дрейф нуля на порядок. Основывается на исключительной стабильности гироскопа и способности работать в двух режимах работы – при смене режима меняются знаки погрешности дрейфа нуля.

Ограничение на применение ВТГ:

- ограниченный диапазон измеряемых скоростей,
- высокая стоимость.

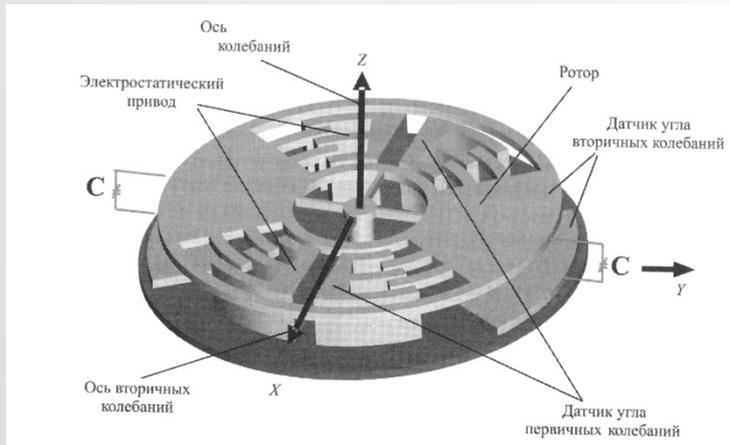
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП (ММГ)

Изобретен в лаборатории имени Ч. Дрейпера (США) в 1984 году.

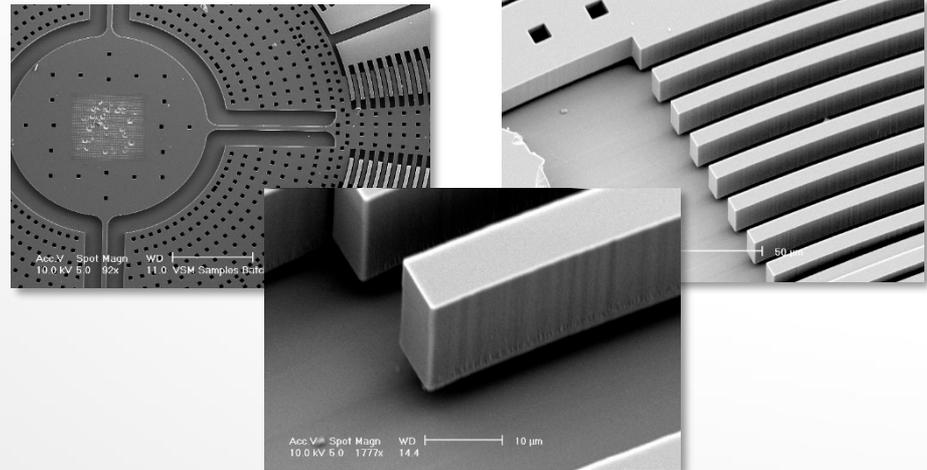
Построен на базе технологий микроэлектроники.

Принцип действия – вибрационный гироскоп, в котором энергия вынужденных (первичных) колебаний инерциального тела на упругом подвесе при вращении преобразуется под действием сил Кориолиса в энергию вторичных колебаний.

Впервые по критерию SWaP+C гироскоп пригоден для массового производства.



Функциональная схема ММГ ротационного типа



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ММГ

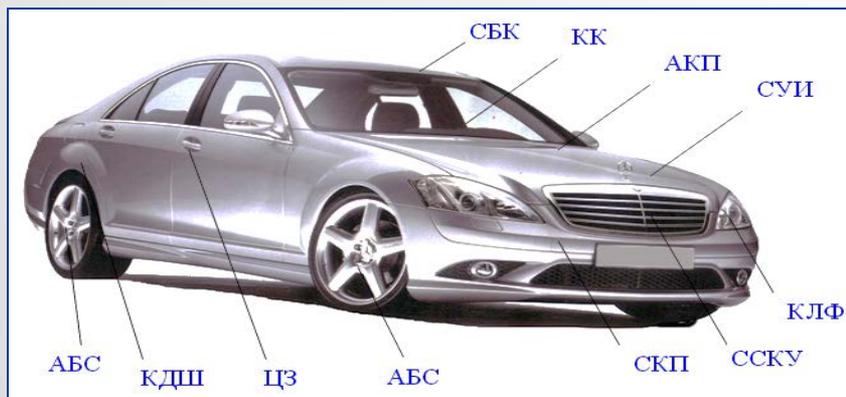
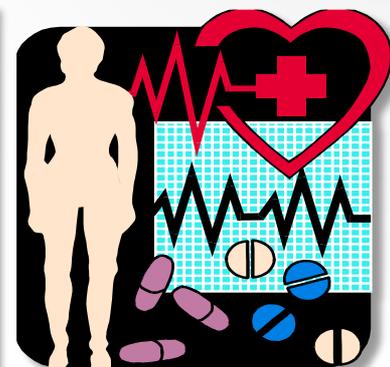
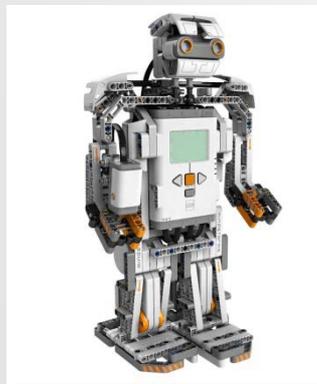
Диапазон измеряемых скоростей (град/с)	$10^2 \dots 10^3$
Дрейф нуля (град/час)	$10^2 \dots 10^{-1}$
Случайный дрейф (град/ $\sqrt{\text{час}}$)	$1 \dots 10^{-2}$
Нестабильность масштабного коэффициента (ppm)	$10^2 \dots 10^3$

Применение в навигации – интегрированные инерциально-спутниковые системы



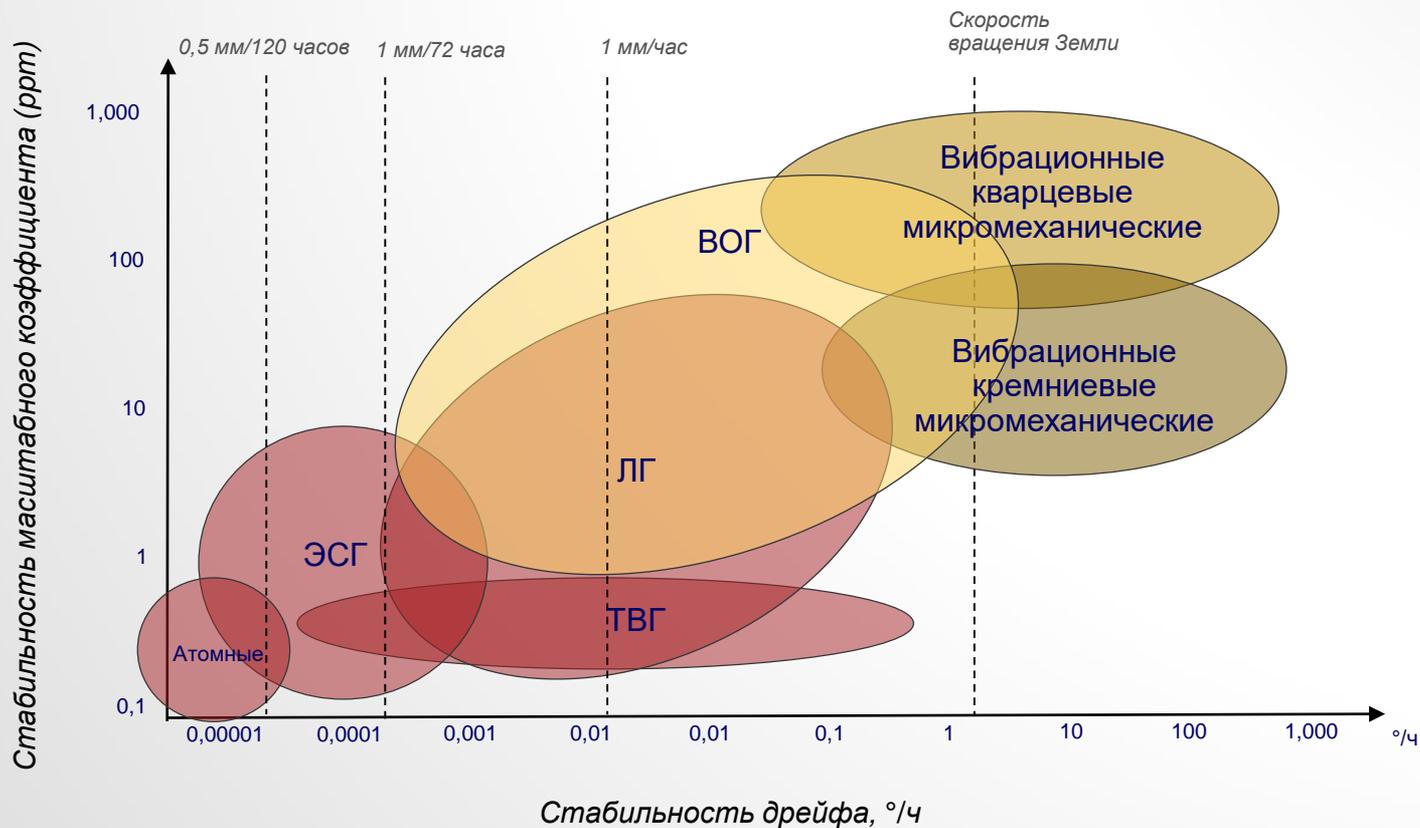
*При дрейфе нуля 10^{-1} град/час
среднеквадратичная погрешность определения
плановых координат составляет 10-15 м
при времени автономной работы 60 с.*

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

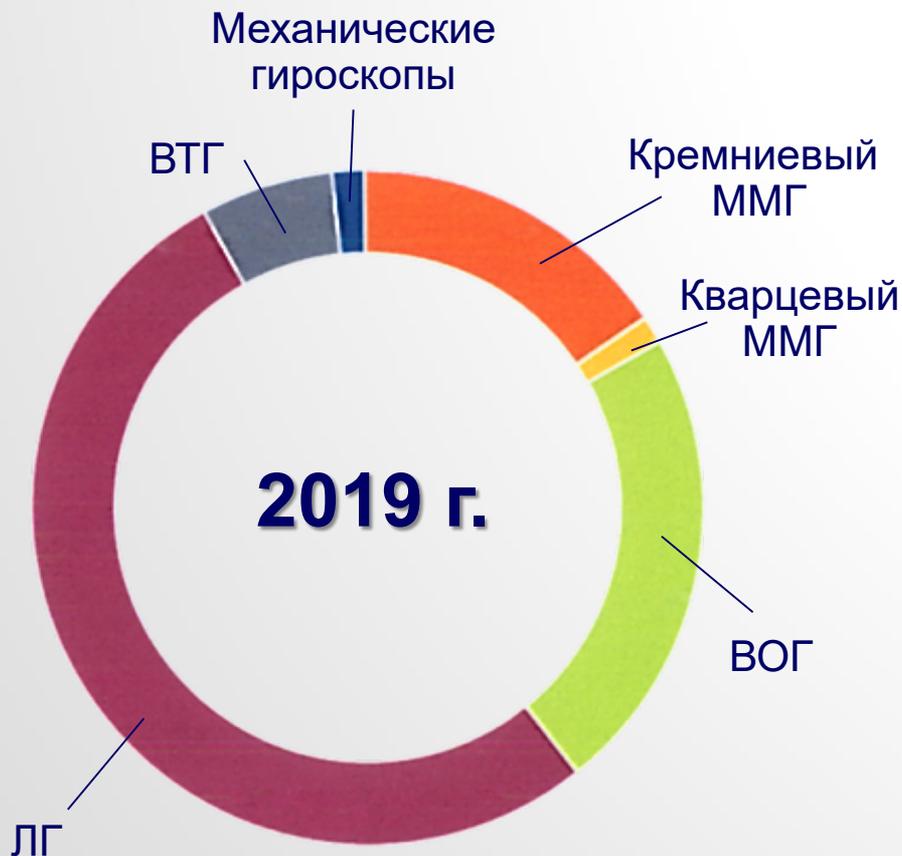


Системы	Аббревиатура	Сенсоры
Система круиз контроля	СКК	3
Автоматическая коробка передач	АКП	9
Система блокировки крыши	СБК	7
Антиблокировочная система колес	АБС	4
Центральный замок	ЦЗ	3
Корректор луча фар	КЛФ	6
Система управления инжектором	СУИ	11
Климат контроль	КК	13
Контроль давления шин	КДШ	13
Система стабилизации курсовой устойчивости	ССКУ	14
Система контроля парковки	СКП	12
Всего		85

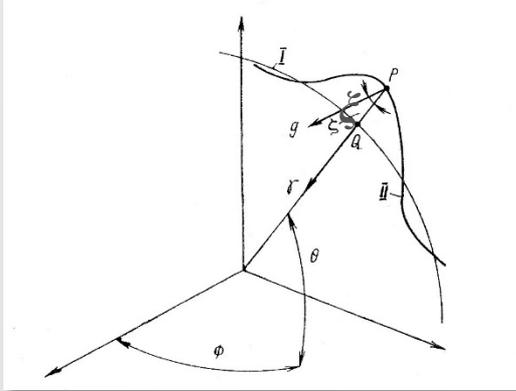
ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ ГИРОСКОПОВ



МИРОВОЙ РЫНОК ГИРОСКОПОВ



ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА ВЫСОКОТОЧНОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ



Среднее значение УОЛ по Мировому океану – 5 угл. с ($\Delta \leq 150$ м)
 Слабо аномальное поле – УОЛ до 15 угл. с ($\Delta \leq 450$ м)
 Сильно аномальное поле – УОЛ до 1 угл. минуты ($\Delta \leq 1852$ м)

*I – референц-эллипсоид, II – геоид, g – сила тяжести (нормаль к геоиду),
 γ – нормаль к референц-эллипсоиду, ξ – уклонение отвесной линии,
 ζ – превышение геоида над референц-эллипсоидом*

Методы определения УОЛ

Гравиметрический метод

$$\xi = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \Delta g Q(\psi) \cos A d\psi dA, \quad \eta = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \Delta g Q(\psi) \sin A d\psi dA$$

Астрономо-геодезический метод $\xi = \varphi - B, \quad \eta = (\lambda - L) \cos B$

Градиентометрический метод $\xi = \xi_0 - 1/\gamma(T_{xy}\Delta x + T_{yx}\Delta y + T_{xz}\Delta z), \quad \eta = \eta_0 - 1/\gamma(T_{xy}\Delta x + T_{yy}\Delta y + T_{xz}\Delta z)$

ξ, η – составляющие УОЛ в плоскости меридиана и в плоскости вертикала; B, L – геодезические широта и долгота; ξ – высота квазигеоида;
 φ, λ – астрономические широта и долгота; T_x, T_y – компоненты вторых производных геопотенциала; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – приращения координат объекта;
 $Q(\psi)$ – функция Венинг-Мейнеса; ψ – сферическое расстояние от исследуемой точки до текущей точки; Δ – геодезический азимут направления на текущую точку; Δg – аномалия силы тяжести.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ – АТОМНЫЕ ГИРОСКОПЫ

Гироскоп на базе ядерно-магнитного резонанса (ЯМГ) –
аналог механического гироскопа на атомном уровне.

Гироскоп на волнах материи
(на волнах де Бройля, холодных атомах) –
аналог волнового оптического гироскопа на атомном уровне.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЯМГ

В мире

- Патенты США в 1952 году (General Electric), 1979 г. (Litton).
- Первый образец имел объем 3000 см³.
- Современный образец – 10 см³ (Northrop Grumman), дрейф нуля – 0,02 град/час, случайный дрейф – 0,001 град/ $\sqrt{\text{час}}$.



Изменение размеров ЯМГ-гироскопа :
этап 1 – 3000 см³; этап 2 – 55 см³;
этап 3 – 6 см³; этап 4 – 10 см³, герметизированный корпус.

В России

- Начаты в 60-е годы по инициативе академика А.Ю. Ишлинского: НИИ прикладной механики, МЭНИИ, МГУ (НИИЯФ). Последовательно изучались датчики на поляризованных водных растворах, изотопах ртути. Ртутный вариант МГУ обеспечил случайный дрейф 0,004 град/ $\sqrt{\text{час}}$ (2003 г.).
- 2017 г. – начало работ ЦНИИ «Электроприбор». Датчик на изотопах газа Хе обеспечил дрейф нуля 0,05 град/час.

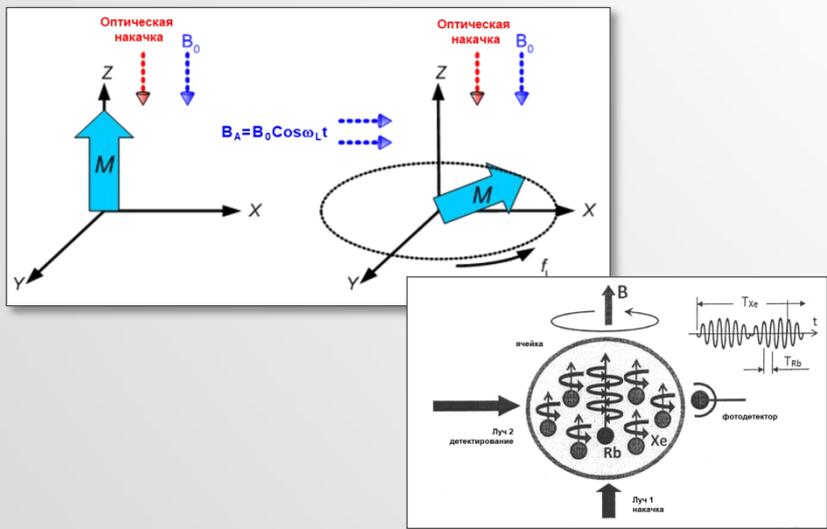
КОНСТРУКЦИЯ ЯМГ

Кварцевая сферическая ячейка, заполненная газовым облаком из изотопов ^{129}Xe и ^{131}Xe и атомов щелочного металла Cs.

Хаотически движущиеся в газовом облаке атомы выстраиваются под действием постоянного магнитного поля. Оптическая накачка обеспечит выравнивание магнитного момента. Ортогональное переменное магнитное поле, настроенное на ларморовскую частоту прецессии, обеспечит прецессию спинов атомов.

Измерение изменения частоты прецессии по сравнению с ларморовской при вращении датчика регистрируется вторым лазером:

$$\omega_L = \gamma B,$$
$$\Omega = \gamma B + \omega$$



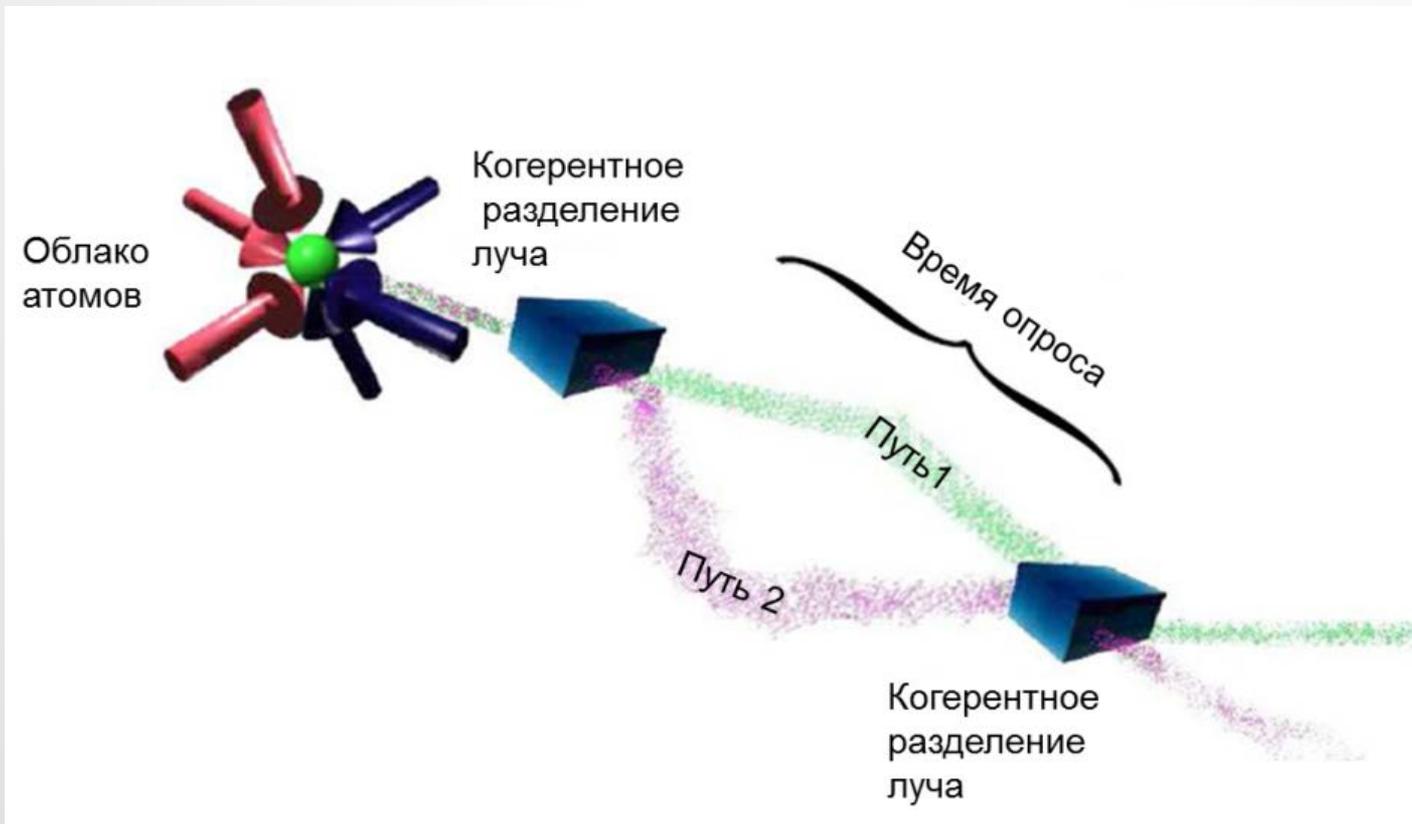
Достоинство:

- малые габариты в сочетании с дрейфом не хуже 0,01 град/час,
- отсутствие влияния механических воздействий.

Проблема:

- высокая стоимость,
- время готовности (порядка 3 часов).

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ГИРОСКОПА НА ВОЛНАХ МАТЕРИИ



ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ГИРОСКОПА НА ВОЛНАХ МАТЕРИИ

А. Эйнштейн и М. Планк открыли корпускулярно-волновой дуализм для фотонов.
Де Бройль обобщил корпускулярно-волновой дуализм на материальные частицы.

Длина волны (волны де Бройля) $\lambda_M = \frac{h}{P}$

Сдвиг фаз между встречными волнами в интерферометре $\Delta\Phi_M = 8\pi \frac{S}{\lambda_M v} \Omega$

Сдвиг фаз между встречными волнами в оптическом интерферометре $\Delta\Phi_0 = 8\pi \frac{S}{\lambda_0 c}$

$$\frac{\Delta\Phi_M}{\Delta\Phi_0} = \frac{mc^2}{h\nu} \sim 10^9 \div 10^{11}$$

m – масса частицы
 c – скорость света
 ν – частота фотона
 h – постоянная Планка

В принципе можно получить гироскоп с дрейфом 2-5 метров за час.

***БЛАГОДАРЮ
ЗА ВНИМАНИЕ!***