

Серия «Квантовый мир»

КВАНТОВАЯ НАВИГАЦИЯ

Принципы, история, применение и будущее



Викрам Сингх

Квантовая навигация

«Автор»

2026

Сингх В.

Квантовая навигация / В. Сингх — «Автор», 2026

Самолеты, суда, автомобили, беспилотные аппараты, энергетические и телекоммуникационные системы используют GNSS не только для определения координат, но и как источник точного времени. Однако у такой зависимости есть очевидная слабость: спутниковый сигнал очень слаб, его можно заглушить, исказить или полностью потерять под водой, под землей, в тоннеле, в помещении или далеко от Земли. Квантовая навигация предлагает другой путь, она может значительно дольше сохранять знание о собственном движении, используя фундаментальные свойства атомов, света и физических полей Земли. В книге рассматриваются атомные акселерометры и гироскопы, интерферометрия волн материи, лазерное охлаждение, атомные часы, квантовые магнитометры и гравиметры, магнитные и гравитационные карты, гибридные инерциальные системы, основные источники ошибок и пути миниатюризации приборов.

© Сингх В., 2026

© Автор, 2026

Содержание

Глава 1. Как объект узнает, где он находится	8
Четыре основные задачи навигации	9
PNT	10
Абсолютная и относительная навигация	11
Абсолютная навигация	11
Относительная навигация	11
Спутниковая навигация	12
Глушение и спуфинг	13
Инерциальная навигация	14
Почему ИНС постепенно «забывает», где находится	15
Навигация по самой Земле	16
Почему одного метода недостаточно	17
Где здесь начинается квантовая навигация	18
Глава 2. Инерциальная навигация и проблема дрейфа	19
Акселерометр: измерение движения без внешних ориентиров	20
Почему акселерометр в покое может показывать ускорение	21
Гироскоп	22
Инерциальный измерительный модуль	23
Двойное интегрирование	24
Насколько быстро растет ошибка	25
Еще опаснее ошибка ориентации	26
Основные источники погрешностей	27
Смещение нуля	27
Масштабный коэффициент	27
Нелинейность	27
Перекрестная чувствительность	27
Температура	27
Старение	27
Шум	27
Механический гироскоп	28
Эффект Саньяка	29
Кольцевой лазерный гироскоп	30
Волоконно-оптический гироскоп	31
MEMS-гироскопы	32
Почему нельзя просто откалибровать ошибку один раз	33
Что значит «навигационный класс»	34
Потребительский уровень	34
Тактический уровень	34
Навигационный уровень	34
Парадокс автономной навигации	35
Глава 3. Квантовая механика, необходимая для навигации	36
Частица или волна?	37
Волна де Бройля	38
Что означает «волна атома»	40
Что такое фаза	41
Интерференция	42

Классический интерферометр	43
Атомный интерферометр	44
Суперпозиция	45
Как лазер разделяет атомную волну	46
Почему используется последовательность	47
От фазы к ускорению	48
Почему время	49
Волна материи как линейка	50
Почему атомы одинаковы	51
Однако атом сам по себе еще не прибор	52
Квантовый шум	53
Что значит «измерить квантовое состояние»	54
Ускорение не единственное, что меняет фазу	55
Классическая и квантовая пробная масса	56
Где же здесь «квантовость»	57
От атома к навигатору	58
Глава 4. Как заставить атомы почти остановиться	59
Температура как движение атомов	60
Абсолютный ноль	61
Зачем квантовому навигатору холодные атомы	62
Свет обладает импульсом	63
Поглощение и испускание фотона	64
Почему нельзя просто направить лазер навстречу атомам	65
Эффект Доплера	66
Оптическая патока	67
Доплеровский предел	68
Сизифово охлаждение	69
Почему одной оптической патоки недостаточно	70
Магнито-оптическая ловушка	71
Как выглядит атомное облако	72
Откуда берутся атомы	73
Почему особенно популярен рубидий	74
Почему нужен вакуум	75
Вакуум — одна из главных инженерных проблем	76
Лазерная система сложнее, чем кажется	77
Репампинг	78
Подготовка квантового состояния	79
Один измерительный цикл	80
Почему атомы приходится отпускать	81
Атомный фонтан	82
Почему квантовый акселерометр пока не микросхема	83
Интегральная фотоника как следующий шаг	84
Можно ли обойтись вообще без лазерного охлаждения	85
От облака атомов к измерительному прибору	86
Глава 5. Атомный интерферометр	87
От оптического интерферометра к атомному	88
Подготовка измерения	89
Внутреннее и внешнее состояние атома	90
Почему часто используются два лазерных луча	91

Первый	92
Разделение волновых пакетов	93
Когерентность	94
Второй	95
Еще один интервал времени	96
Третий	97
Как измеряется число атомов	99
Откуда берется фазовый сдвиг	100
Атомы как инерциальный эталон	101
Формула атомного акселерометра	102
Почему зависимость от	103
Что такое чувствительная ось	104
Измерение земной гравитации	105
Зеркало как часть акселерометра	106
Динамический диапазон	107
Почему нужен классический акселерометр рядом с квантовым	108
Частота измерений	109
Мертвое время	110
Bragg-интерферометрия	111
Large Momentum Transfer	112
Что значит «контраст интерференции»	113
От одного атома к миллионам	114
Почему фаза лазера должна быть стабильной	115
Волновой фронт лазера	116
Что измеряет прибор на самом деле	117
Полный измерительный цикл	118
Этап 1. Загрузка атомов	118
Этап 2. Лазерное охлаждение	118
Этап 3. Захват	118
Этап 4. Подготовка состояния	118
Этап 5. Освобождение	118
Этап 6. Первый	118
Этап 7. Свободная эволюция	118
Этап 8.	118
Этап 9. Вторая свободная эволюция	119
Этап 10. Второй	119
Этап 11. Детектирование	119
Этап 12. Вычисление вероятности	119
Этап 13. Определение фазы	119
Этап 14. Вычисление ускорения	119
Этап 15. Передача данных в навигационный вычислитель	119
Атомный интерферометр как абсолютный эталон	120
Но абсолютный не значит безошибочный	121
От акселерометра к гироскопу	122
Глава 6. Квантовый гироскоп	123
Почему акселерометра недостаточно	124
Что именно измеряет гироскоп	125
Эффект Саньяка	126
Световой интерферометр Саньяка	127

Почему площадь так важна	128
Волны материи вместо света	129
Вектор площади	130
Как создать площадь в атомном интерферометре	131
Сила Кориолиса	132
Формула кориолисовой фазы	133
Как отделить ускорение от вращения	134
Два встречных атомных облака	136
Атомный фонтан как гироскоп	137
Вращение Земли	138
Гироскопас	139
Почему это особенно важно для подводных лодок	140
Измерение трех осей	141
Квантовый IMU	142
Почему гироскоп сложнее акселерометра	143
Температура атомного облака и ошибка вращения	144
Ошибка начального положения	145
Вибрации и вращение	146
Быстрый и медленный гироскоп	147
Почему нельзя просто сделать огромный интерферометр	148
Многопетлевые интерферометры	149
Large Momentum Transfer и гироскоп	150
Кольцевые атомные интерферометры	151
Bose–Einstein condensate	152
Динамический диапазон гироскопа	153
От фазы к угловой скорости	154
Что представляет собой полный квантовый гироскоп	155
Главное преимущество	156
Но атомы не решают проблему времени	157
Глава 7. Атомные часы — третья опора квантовой навигации	158
Почему навигации вообще нужны часы	159
PNT	160
Как GNSS измеряет расстояние	161
Конец ознакомительного фрагмента.	162

Викрам Сингх

Квантовая навигация

Глава 1. Как объект узнает, где он находится



Чтобы понять, зачем вообще понадобилась квантовая навигация, сначала необходимо разобраться, что означает само слово «навигация». На первый взгляд задача кажется простой: система должна сообщить человеку или машине текущие координаты. Однако в действительности координаты — лишь одна из нескольких величин, без которых невозможно управлять движущимся объектом.

Самолету недостаточно знать, что он находится над определенной точкой земной поверхности. Необходимо знать его высоту, скорость, направление движения, крен, тангаж и курс. Подводной лодке требуется определить не только положение относительно карты, но и глубину, ориентацию корпуса и скорость. Космическому аппарату необходимо знать свое положение и скорость уже не относительно поверхности Земли, а в выбранной пространственной системе координат.

Поэтому современная навигация представляет собой не отдельный прибор, а целую измерительно-вычислительную систему.

Четыре основные задачи навигации

В наиболее общем виде навигационная система должна определять четыре группы параметров:

- положение объекта;**
- скорость его движения;**
- ориентацию в пространстве;**
- точное время.**

Первые три пункта очевидны. Четвертый часто недооценивают, хотя современная навигация практически невозможна без точной шкалы времени.

Положение обычно описывается тремя координатами:

$$x, y, z$$

или географическими параметрами:

- широта;
- долгота;
- высота.

Скорость также является векторной величиной:

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z).$$

Но даже координат и скорости недостаточно. Необходимо знать, как ориентирован сам объект. Для самолета, корабля или беспилотника это обычно описывается тремя углами:

- курс;
- крен;
- тангаж.

Таким образом, навигационный компьютер постоянно решает задачу восстановления состояния движущегося объекта по данным множества датчиков.

PNT

—
Positioning

,
Navigation

and

Timing

В современной технической литературе часто используется термин **PNT — Positioning, Navigation and Timing**, то есть «позиционирование, навигация и синхронизация времени».

Эти три задачи тесно связаны.

Positioning отвечает на вопрос:

Где находится объект?

Navigation отвечает на более широкий вопрос:

Как объект движется и куда он должен двигаться дальше?

Timing обеспечивает единую и чрезвычайно точную шкалу времени.

Последний элемент особенно важен для спутниковых систем. GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou фактически определяют расстояние до спутников посредством измерения времени распространения радиосигнала.

Радиоволны распространяются приблизительно со скоростью света:

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Поэтому ошибка времени всего в одну микросекунду соответствует примерно:

$$3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6} = 300 \text{ м.}$$

Ошибка в одну наносекунду соответствует уже примерно 30 сантиметрам.

Именно поэтому спутники навигационных группировок несут атомные часы.

Позже мы увидим, что атомные часы оказываются важнейшим элементом и автономной квантовой навигации.

Абсолютная и относительная навигация

Все методы определения положения можно условно разделить на две большие группы.

Абсолютная навигация

Система определяет свое положение относительно некоторого внешнего объекта или заранее известной карты.

Примеры:

спутники GNSS;

радиомаяки;

звезды;

карта рельефа;

магнитная карта Земли;

карта гравитационных аномалий.

Внешний ориентир позволяет непосредственно или косвенно определить положение объекта.

Главное преимущество такого метода заключается в том, что ошибка не обязательно накапливается со временем. Получив новое внешнее измерение, система может вновь определить свои координаты.

Однако существует и очевидный недостаток: внешний ориентир должен быть доступен.

Относительная навигация

Здесь система начинает движение из известной точки и затем вычисляет свое новое положение по измеренному перемещению.

Так работает инерциальная навигационная система.

Если известны начальные координаты

$$x_0, y_0, z_0,$$

а затем непрерывно измеряется движение объекта, можно рассчитывать его последующее положение без обращения к спутникам или радиомаякам.

Это дает важнейшее преимущество — **автономность**.

Но появляется другая проблема: любая ошибка измерения постепенно накапливается.

Именно борьба с этим накоплением ошибки стала одной из главных причин развития квантовой навигации.

Спутниковая навигация

Сегодня наиболее известным средством определения координат являются глобальные навигационные спутниковые системы — GNSS.

К ним относятся:

- американская GPS;
- российская ГЛОНАСС;
- европейская Galileo;
- китайская BeiDou.

Принцип их работы в основе довольно прост.

Спутник передает радиосигнал, содержащий информацию о времени передачи и собственном положении. Приемник сравнивает время отправки сигнала с временем его получения и определяет псевдодальность до спутника.

Имея измерения от нескольких спутников, навигационный процессор рассчитывает положение приемника.

GNSS обладает огромными преимуществами:

- глобальным покрытием;
- сравнительно высокой точностью;
- небольшой стоимостью приемников;
- отсутствием накопления инерциальной ошибки.

Поэтому спутниковая навигация проникла практически во все сферы современной жизни.

Однако есть фундаментальная проблема: приемник должен получить чрезвычайно слабый радиосигнал, пришедший с расстояния около двадцати тысяч километров и более.

Такой сигнал можно подавить.

Глушение и спуфинг

Существуют два принципиально разных способа нарушить работу спутниковой навигации.

Первый — **глушение**, или jamming.

В районе приемника создается мощная радиопомеха на используемых GNSS частотах. Сигнал спутника оказывается скрытым под шумом, и приемник перестает определять координаты.

Второй способ значительно опаснее — **спуфинг**.

В этом случае приемнику передается ложный сигнал, похожий на настоящий спутниковый. Если система принимает его за подлинный, она может вычислить неправильные координаты, продолжая считать, что работает нормально.

Для обычного автомобильного навигатора это неприятность.

Для самолета, беспилотника, корабля или управляемого боеприпаса последствия могут быть значительно серьезнее.

Существует и третья проблема: спутникового сигнала может не быть вообще.

Радиосигналы GNSS плохо проникают:

под воду;

глубоко под землю;

внутри тоннелей;

в шахты;

внутри крупных металлических сооружений.

В плотной городской застройке появляются отражения и затенение сигнала.

Таким образом, GNSS — чрезвычайно эффективная технология, но далеко не универсальная.

Инерциальная навигация

Другой путь состоит в том, чтобы вообще ничего не принимать извне.

Для этого объект оснащается инерциальными датчиками:

акселерометрами;

гироскопами.

Акселерометр измеряет ускорение.

Гироскоп определяет вращение и позволяет отслеживать ориентацию системы координат.

Если известно начальное положение, навигационный компьютер может вычислять дальнейшее движение посредством интегрирования показаний датчиков.

Сначала из ускорения определяется изменение скорости:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \int \vec{a}(t), dt.$$

Затем из скорости рассчитывается изменение координат:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \int \vec{v}(t), dt.$$

Для работы такой системе не нужны:

спутники;

радиомаяки;

интернет;

внешняя связь.

В этом заключается огромное преимущество инерциальной навигации.

Самолет может продолжать полет.

Подводная лодка может оставаться под водой.

Космический аппарат может двигаться далеко от Земли.

Ракета может продолжать наведение при полном подавлении спутниковых сигналов.

Но возникает фундаментальная инженерная проблема.

Почему ИНС постепенно «забывает», где находится

Предположим, что неподвижный акселерометр ошибочно показывает небольшое постоянное ускорение δa .

Навигационный компьютер воспринимает эту ошибку как реальное движение.

Через время t ошибка скорости составит:

$$\delta v = \delta a \cdot t.$$

А ошибка координаты:

$$\delta x = \frac{1}{2} \delta a \cdot t^2.$$

Ошибка ускорения превращается в ошибку скорости, а затем интегрируется еще раз и превращается в ошибку положения.

Поэтому даже очень небольшое постоянное смещение показаний датчика со временем становится значительным.

Аналогичная ситуация возникает с гироскопом.

Если система немного ошибается при определении вертикали или ориентации, часть ускорения свободного падения может начать ошибочно восприниматься как горизонтальное ускорение объекта.

Далее ошибка снова интегрируется.

Таким образом, инерциальная система обладает удивительным сочетанием двух свойств: **она полностью автономна, но постепенно теряет точность.**

Это фундаментальный компромисс классической ИНС.

Навигация по самой Земле

Существует еще один способ отказаться от внешнего радиосигнала.

Земля сама содержит огромное количество навигационной информации.

Ее поверхность неодинакова.

Неодинаково и магнитное поле.

Неодинаково гравитационное поле.

Определенные районы обладают характерным сочетанием физических параметров, которое можно условно назвать их «геофизическим отпечатком».

Если заранее создать карту таких отпечатков, находящийся на борту датчик может измерить локальные параметры и попытаться определить, какой точке карты они соответствуют.

Например, можно использовать:

магнитные аномалии;

гравитационные аномалии;

рельеф;

глубину морского дна;

изображения поверхности.

Так появляется принцип **map matching** — сопоставление текущих измерений с заранее известной картой.

Квантовые магнитометры и квантовые гравиметры особенно интересны именно здесь благодаря чрезвычайно высокой чувствительности.

Получается необычная схема: объект не принимает координаты извне, а определяет свое положение, буквально измеряя физические свойства Земли под собой.

Почему одного метода недостаточно

Идеальной навигационной технологии не существует.

GNSS очень точно определяет абсолютные координаты, но зависит от внешнего слабого радиосигнала.

ИНС полностью автономна и реагирует практически мгновенно, но ее ошибка постепенно возрастает.

Магнитная навигация не требует спутников, однако зависит от качества геомагнитной карты и локальных помех.

Гравитационная навигация использует исключительно стабильное поле Земли, но требует очень чувствительных приборов и подробных карт.

Оптическая навигация способна использовать окружающую обстановку, но зависит от видимости.

Следовательно, наиболее надежная система должна использовать несколько физических принципов одновременно.

Например:

GNSS + ИНС + карта местности + магнитное поле + гравитационное поле.

Если один канал становится недоступным, остальные продолжают работать.

Именно в такую архитектуру постепенно входят квантовые сенсоры.

Где здесь начинается квантовая навигация

Квантовый навигатор не является новым вариантом GPS.

Он не получает от атомов готовые географические координаты.

Атомы используются как исключительно стабильные и воспроизводимые измерительные объекты.

На их основе можно создавать:

квантовые акселерометры;

квантовые гироскопы;

атомные часы;

квантовые магнитометры;

квантовые гравиметры.

Каждый из этих приборов измеряет свою физическую величину.

А уже навигационный компьютер объединяет результаты и определяет положение объекта.

Поэтому правильнее говорить не об одном «квантовом навигаторе», а о появлении нового поколения **квантовых навигационных датчиков**.

Именно это обстоятельство определяет наиболее вероятную архитектуру навигационной системы будущего:

GNSS + классическая ИНС + квантовые датчики + геофизические карты

Квантовая технология здесь не обязательно уничтожает прежние методы. Она дает им новый высокостабильный эталон.

В идеальном случае быстрая классическая ИНС будет непрерывно следить за движением, GNSS — периодически давать абсолютные координаты, а квантовые сенсоры — предотвращать накопление долгосрочного дрейфа и позволять системе сохранять точность при исчезновении внешнего сигнала.

Чтобы понять, насколько это важно, необходимо подробнее рассмотреть слабое место современной автономной навигации — накопление ошибок инерциальной системы.

Этому посвящена следующая глава.

Глава 2. Инерциальная навигация и проблема дрейфа



Инерциальная навигация обладает почти идеальным свойством: после запуска ей не требуется никакой внешний сигнал. Самолет, корабль, подводная лодка или космический аппарат могут определять свое движение, не обращаясь к спутникам, радиомаякам или наземной инфраструктуре.

Но за автономность приходится платить.

Инерциальная система не знает координаты непосредственно. Она восстанавливает их, последовательно измеряя движение объекта. Поэтому любая даже очень малая систематическая ошибка датчиков постепенно превращается сначала в ошибку скорости, затем — в ошибку положения.

Именно проблема дрейфа является одной из главных причин, по которым квантовые датчики представляют такой интерес для навигации.

Акселерометр: измерение движения без внешних ориентиров

Основным датчиком линейного движения является акселерометр.

На первый взгляд кажется, что акселерометр просто измеряет ускорение:

$$a = \frac{dv}{dt}.$$

Однако физически инерциальный акселерометр измеряет не координату и даже не скорость. Он реагирует на так называемую удельную силу, действующую на чувствительную массу внутри прибора.

Простейший механический акселерометр можно представить как небольшую массу, закрепленную внутри корпуса на пружине.

Когда корпус ускоряется, масса вследствие инерции стремится сохранить прежнее состояние движения. Она смещается относительно корпуса. По величине этого смещения можно определить ускорение.

В современных MEMS-акселерометрах вместо массивной механической конструкции используется микроскопическая кремниевая структура. Ее перемещение может измеряться емкостным, пьезорезистивным или другим способом.

Несмотря на огромную разницу размеров, общий принцип остается прежним:

измеряется движение пробной массы относительно корпуса прибора.

В квантовом акселерометре роль такой пробной массы позже возьмут на себя атомы.

Почему акселерометр в покое может показывать ускорение

Здесь возникает важный и на первый взгляд парадоксальный эффект.

Если положить акселерометр на стол, он обычно покажет ускорение приблизительно:

$$g \approx 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Хотя прибор никуда не движется.

Причина заключается в том, что стол не дает прибору свободно падать. На его корпус действует сила опоры.

Если же тот же акселерометр отпустить и позволить ему свободно падать, его показание приблизится к нулю.

Для инерциальной навигации это принципиально важно.

Навигационный компьютер должен знать направление гравитационного поля и ориентацию объекта, чтобы отличить:

- ускорение самого объекта;

- действие гравитации;

- изменение ориентации датчиков.

Поэтому одного акселерометра для полноценной ИНС недостаточно.

Гироскоп

Вторая важнейшая группа датчиков — гироскопы.

Они позволяют определить изменение ориентации объекта.

Для движущейся платформы необходимо знать ее положение относительно трех осей.

Для самолета обычно используют:

крен — вращение вокруг продольной оси;

тангаж — вращение вокруг поперечной оси;

рыскание — вращение вокруг вертикальной оси.

Гироскоп измеряет угловую скорость:

$$\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z).$$

Интегрируя угловую скорость во времени, можно определить изменение ориентации.

В простейшем одномерном случае:

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \omega(\tau) d\tau.$$

Но и здесь появляется знакомая проблема: вместе с полезным сигналом интегрируется ошибка гироскопа.

Инерциальный измерительный модуль

Обычно акселерометры и гироскопы объединяют в единый блок — **IMU, Inertial Measurement Unit**, инерциальный измерительный модуль.

Типичная IMU содержит:

три акселерометра;

три гироскопа;

иногда три магнитометра;

датчики температуры;

электронные схемы обработки сигналов.

Три акселерометра измеряют движение по трем взаимно перпендикулярным осям.

Три гироскопа определяют вращение вокруг этих осей.

Таким образом, IMU получает шесть основных каналов инерциальной информации.

Однако IMU еще не является полноценной навигационной системой.

Она только производит измерения.

От

IMU

к ИНС

ИНС — инерциальная навигационная система — включает не только датчики, но и вычислитель.

Он должен знать:

исходные координаты;

исходную скорость;

начальную ориентацию объекта.

После этого начинается непрерывный цикл вычислений.

Гироскопы сообщают, как изменяется ориентация объекта.

Навигационный процессор определяет ориентацию осей акселерометров относительно Земли.

Показания акселерометров преобразуются в навигационную систему координат.

Из них исключается гравитационная составляющая.

После этого ускорение интегрируется для получения скорости.

Скорость интегрируется еще раз для получения координат.

Схематично процесс выглядит так:

гироскопы → ориентация,

акселерометры → ускорение → скорость → координаты.

На практике вычисления значительно сложнее: необходимо учитывать вращение Земли, ее форму, изменение силы тяжести, используемую систему координат и движение самой платформы.

Но именно эта цепочка лежит в основе автономной инерциальной навигации.

Двойное интегрирование

Пусть акселерометр измеряет ускорение $a(t)$.
Скорость определяется как:

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(\tau) d\tau.$$

Положение затем вычисляется как:

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v(\tau) d\tau.$$

Если ускорение постоянно, получаем знакомое выражение:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2.$$

Для настоящего движения это полезный результат.

Но теперь предположим, что объект на самом деле не ускоряется, а акселерометр имеет небольшое постоянное смещение нуля:

$$\delta a.$$

Навигационный компьютер не может автоматически отличить его от настоящего ускорения.

Поэтому возникает ложная скорость:

$$\delta v = \delta a, t.$$

А затем ложное перемещение:

$$\delta x = \frac{1}{2} \delta a, t^2.$$

Вот почему даже постоянная крошечная ошибка акселерометра особенно опасна. Она приводит к ошибке координат, растущей пропорционально квадрату времени.

Насколько быстро растет ошибка

Рассмотрим упрощенный мысленный пример.

Пусть смещение акселерометра составляет всего:

$$\delta a = 10^{-4} \text{ м/с}^2.$$

Это лишь около одной стотысячной ускорения свободного падения.

Через одну минуту:

$$t = 60 \text{ с},$$

ошибка положения составит:

$$\delta x = \frac{1}{2} \cdot 10^{-4} \cdot 60^2 \approx 0,18 \text{ м}.$$

Через час:

$$t = 3600 \text{ с},$$

получаем:

$$\delta x = \frac{1}{2} \cdot 10^{-4} \cdot 3600^2 \approx 648 \text{ м}.$$

Через десять часов формальный результат уже составляет десятки километров.

Реальная ИНС значительно сложнее этого примера. В ней действуют различные механизмы коррекции и динамики ошибок, поэтому простая формула не описывает все поведение системы.

Но она показывает главное:

ничтожная ошибка ускорения при длительном интегрировании способна превратиться в огромную ошибку координат.

Еще опаснее ошибка ориентации

Проблема становится серьезнее, если ошибается гироскоп.

Представим, что навигационная система неправильно определила вертикаль всего на небольшой угол $\delta\theta$.

Тогда часть земного ускорения свободного падения будет ошибочно проецироваться на горизонтальную ось.

При малых углах:

$$a_{\text{ош}} \approx g, \delta\theta,$$

где угол выражен в радианах.

Пусть ошибка наклона составляет всего:

$$0,01^\circ.$$

В радианах это приблизительно:

$$1,75 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда ложное горизонтальное ускорение будет:

$$a_{\text{ош}} \approx 9,81 \cdot 1,75 \cdot 10^{-4} \approx 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2.$$

Это уже намного больше ошибки акселерометра из предыдущего примера.

Таким образом, неточный гироскоп косвенно создает ошибку акселерометра.

Поэтому высокоточная навигация требует одновременно очень хороших:

акселерометров;

гироскопов;

алгоритмов обработки.

Основные источники погрешностей

Реальный инерциальный датчик имеет сразу несколько типов ошибок.

Смещение нуля

Даже при отсутствии реального входного воздействия датчик может выдавать ненулевой сигнал.

Это называют **bias**.

Особенно опасно изменение bias со временем.

Масштабный коэффициент

Показания датчика могут быть немного больше или меньше реального значения:

$$a_{\text{изм}} = (1 + k)a.$$

Коэффициент k характеризует ошибку масштаба.

Нелинейность

Связь между реальным воздействием и выходным сигналом не всегда совершенно линейна.

Перекрестная чувствительность

Датчик одной оси может частично реагировать на ускорение или вращение вокруг другой оси.

Температура

Изменение температуры влияет:

на размеры деталей;

параметры электроники;

механические напряжения;

оптические свойства;

характеристики чувствительных элементов.

Поэтому высокоточные ИНС требуют сложной температурной компенсации.

Старение

Характеристики прибора могут постепенно изменяться в течение месяцев и лет.

Шум

Кроме систематических ошибок существуют случайные флуктуации показаний.

Их тоже приходится фильтровать и учитывать статистически.

Механический гироскоп

Исторически высокоточные гироскопы представляли собой быстро вращающийся ротор. Благодаря сохранению момента импульса вращающееся тело стремится сохранять направление своей оси в пространстве.

Такие приборы десятилетиями использовались:

- в авиации;
- на кораблях;
- в ракетах;
- на подводных лодках.

Были созданы чрезвычайно точные гироскопы.

Однако механическая система имеет принципиальные недостатки:

- подшипники;
- трение;
- износ;
- вибрации;
- дисбаланс ротора;
- температурные деформации.

Инженеры поэтому начали искать способы измерять вращение вообще без вращающейся механической детали.

Эффект Саньяка

Одним из важнейших решений стал оптический гироскоп.

Его работа основана на эффекте Саньяка.

Два световых луча распространяются по замкнутому контуру в противоположных направлениях.

Если система не вращается, оба проходят одинаковый оптический путь.

Если контур вращается, условия распространения лучей становятся различными.

Возникает фазовый сдвиг, связанный с угловой скоростью системы.

По этому фазовому сдвигу можно измерить вращение без механического ротора.

На этом принципе работают два важнейших типа современных гироскопов:

кольцевой лазерный гироскоп;

волоконно-оптический гироскоп.

Любопытно, что тот же эффект Саньяка позже появится и в квантовых атомных гироскопах.

Разница будет заключаться в том, что интерферировать станут уже не световые лучи, а волны материи.

Кольцевой лазерный гироскоп

RLG — Ring Laser Gyroscope содержит замкнутый оптический резонатор.

В нем два лазерных луча распространяются навстречу друг другу.

При вращении прибора их частоты немного различаются.

По возникающей разности частот определяется угловая скорость.

Кольцевые лазерные гироскопы:

не имеют вращающегося механического ротора;

обладают высокой долговременной стабильностью;

широко применяются в авиационных ИНС.

Но они требуют очень качественной оптики и точной конструкции.

Кроме того, при малых угловых скоростях возникает известная проблема захвата встречных волн, для борьбы с которой применяются специальные инженерные решения.

Волоконно-оптический гироскоп

FOG — Fiber Optic Gyroscope использует длинную катушку оптического волокна.

Свет делится на два луча, которые проходят по волокну в противоположных направлениях.

После нескольких сотен или тысяч витков они снова соединяются.

Вращение катушки вызывает фазовый сдвиг Саньяка.

Большая эффективная длина оптического пути позволяет достичь высокой чувствительности при сравнительно компактных размерах.

Волоконно-оптические гироскопы получили широкое распространение:

на самолетах;

на кораблях;

в беспилотниках;

в промышленных системах;

в геодезическом оборудовании.

MEMS-гироскопы

Еще одним технологическим прорывом стали MEMS-гироскопы.

Вместо света или вращающегося ротора они используют микроскопические вибрирующие структуры.

При вращении прибора возникает сила Кориолиса:

$$\vec{F}_C = 2m(\vec{v} \times \vec{\Omega}).$$

Она вызывает дополнительное движение чувствительного элемента, которое регистрируется электроникой.

Главное преимущество MEMS — размеры и стоимость.

Сегодня микроскопические гироскопы находятся:

в смартфонах;

автомобилях;

беспилотниках;

игровых контроллерах;

роботах.

Однако массовые MEMS-датчики по долговременной стабильности значительно уступают лучшим навигационным гироскопам.

И снова возникает компромисс:

чем меньше, дешевле и проще датчик, тем труднее добиться от него крайне малого дрейфа.

Почему нельзя просто откалибровать ошибку один раз

Может показаться, что проблему bias легко решить.
Достаточно измерить смещение датчика перед запуском и затем вычитать его из показаний.

Так действительно делают.
Но реальный bias не является постоянной величиной.
Он изменяется из-за:
температуры;
вибрации;
напряжения питания;
механических напряжений;
старения;
режима движения.
Например:

$$b = b(t, T, \text{нагрузка}, \dots).$$

Навигационная система должна поэтому не просто хранить поправку, а постоянно оценивать состояние датчика.

Для этого используются математические модели и внешние источники информации.

Как

GNSS

спасает ИНС от дрейфа

Современный самолет обычно не выбирает между GNSS и ИНС.

Он использует обе системы.

ИНС дает:

высокую частоту обновления;

непрерывность;

автономность.

GNSS дает:

абсолютные координаты;

возможность корректировать накопившийся дрейф.

Навигационный компьютер сравнивает результаты двух систем.

Если ИНС начинает постепенно уходить, спутниковые координаты позволяют оценить ошибку и скорректировать ее.

Так появляется интегрированная система:

$$\text{GNSS} + \text{ИНС}.$$

Это значительно надежнее любого метода по отдельности.

Но если спутниковый сигнал исчезает надолго, ИНС снова остается одна.

И часы начинают отсчитывать время до того момента, когда накопившаяся погрешность станет недопустимой.

Что значит «навигационный класс»

Не все инерциальные датчики одинаковы.
Условно можно выделить несколько уровней.

Потребительский уровень

Смартфоны, игровые устройства, бытовая электроника.

Главные требования:

низкая цена;

минимальные размеры;

малое энергопотребление.

Долговременный дрейф сравнительно велик.

Тактический уровень

Беспилотники, наземная техника, часть авиационного оборудования.

Здесь уже требуется значительно лучшая стабильность.

Навигационный уровень

Самолеты, корабли, подводные лодки, высокоточные специализированные системы.

Погрешность датчиков должна быть чрезвычайно мала.

Стоимость таких устройств может отличаться от стоимости бытовой IMU на несколько порядков.

Именно с лучшими датчиками навигационного класса должны конкурировать будущие квантовые сенсоры.

Парадокс автономной навигации

Мы приходим к важному выводу.

Для абсолютной навигационной независимости необходимо не получать информацию извне.

Но если система не получает внешнюю информацию, она теряет возможность регулярно проверять собственные ошибки.

Получается своеобразный парадокс:

чем автономнее система, тем большее значение имеет долговременная стабильность ее внутренних эталонов.

Именно здесь начинается настоящий интерес к атомам.

Механический элемент можно изготовить чрезвычайно точно, но два механических элемента никогда не будут полностью одинаковыми.

Их свойства меняются:

со временем;

с температурой;

от экземпляра к экземпляру.

Атомы одного изотопа устроены иначе.

Атом рубидия сегодня имеет те же фундаментальные свойства, что другой атом того же изотопа.

У него нет:

подшипника;

механического износа;

индивидуально изготовленной пружины;

геометрии, постепенно изменяющейся вследствие старения.

Отсюда возникает соблазнительная инженерная идея:

а что, если вместо изготовленной человеком пробной массы использовать сам атом?

Тогда измерение движения можно связать не с механическими свойствами конкретного изделия, а с фундаментальными свойствами вещества.

Но для этого необходимо научиться управлять атомами настолько точно, чтобы использовать их как измерительный инструмент.

И прежде всего — почти остановить их тепловое движение.

Так мы переходим от классической инерциальной навигации непосредственно к квантовой физике.

Глава 3. Квантовая механика, необходимая для навигации



Квантовая навигация звучит так, будто для ее понимания необходимо сначала освоить всю квантовую механику. На самом деле это не так.

Для понимания принципа атомного акселерометра или гироскопа достаточно нескольких идей:

- частица может обладать волновыми свойствами;
 - квантовое состояние имеет фазу;
 - атом можно перевести в суперпозицию нескольких состояний;
 - разные квантовые траектории способны интерферировать;
 - движение прибора изменяет разность фаз;
 - по этой разности фаз можно восстановить ускорение или вращение.
- Все остальное — чрезвычайно важная, но уже более глубокая физика.

Главная идея квантовой навигации заключается не в том, что атом каким-то загадочным образом «знает координаты».

Он ничего не знает.

Атом используется как исключительно стабильный физический объект, движение которого подчиняется фундаментальным законам природы. Если научиться создавать и сравнивать его квантовые состояния, можно превратить атом в чрезвычайно точный датчик движения.

Частица или волна?

В классической физике различие между частицей и волной кажется очевидным.

Камень — частица.

Звуковая волна — волна.

Пуля летит по определенной траектории.

Волна распространяется в пространстве, огибает препятствия и способна интерферировать с другой волной.

Квантовая механика разрушила это привычное разделение.

Фотон может проявлять свойства частицы и одновременно демонстрировать интерференцию.

Электрон, который мы привыкли считать частицей, также способен создавать интерференционную картину.

То же относится и к атомам.

Атом рубидия имеет массу и при столкновении с поверхностью ведет себя как частица.

Но при соответствующих условиях его движение можно описывать волной материи.

Именно это свойство используется в атомной интерферометрии.

Волна де Бройля

В 1924 году французский физик Луи де Бройль предложил революционную идею: если свет, считавшийся волной, способен проявлять свойства частицы, то, возможно, и частицы вещества обладают волновыми свойствами.

Он связал длину волны частицы с ее импульсом:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

где:

λ

— длина волны де Бройля;

h

— постоянная Планка;

p

— импульс частицы.

Для нерелятивистской частицы:

$$p = mv$$

поэтому:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Отсюда следует важный вывод.

Чем больше масса и скорость объекта, тем меньше его длина волны.

Для автомобиля, самолета или человека волна де Бройля настолько мала, что обнаружить связанные с ней квантовые эффекты практически невозможно.

Для атома ситуация совершенно иная.

А если атом еще и сильно замедлить, его импульс уменьшается, а длина волны де Бройля увеличивается.

Именно поэтому в квантовых датчиках атомы охлаждают до чрезвычайно низких температур.

Не потому, что квантовая механика перестает работать при комнатной температуре. Она работает всегда.

Но тепловое движение атомов при высокой температуре слишком интенсивно и хаотично. После охлаждения становится значительно легче сформировать хорошо контролируемое атомное облако и наблюдать интерференцию волн материи.

Что означает «волна атома»

Здесь важно избежать слишком буквального представления.

Атом не превращается в размазанную в пространстве каплю вещества.

В квантовой механике состояние частицы описывается волновой функцией:

$$\psi(\mathbf{r}, t)$$

Сама волновая функция непосредственно не является измеряемой физической величиной.

Но квадрат ее модуля связан с вероятностью обнаружения частицы:

$$P(\mathbf{r}, t) \propto |\psi(\mathbf{r}, t)|^2$$

Поэтому квантовая волна описывает не обычное распределение вещества, а возможные результаты измерения.

Для квантовой навигации особенно важно другое свойство волновой функции — **фаза**.

Условно квантовое состояние можно представить как:

$$\psi = Ae^{i\phi}$$

где:

$$A$$

характеризует амплитуду;

$$\phi$$

— фазу.

Именно изменение ϕ в разных частях атомного интерферометра в конечном счете становится источником навигационной информации.

Что такое фаза

Представим обычную синусоидальную волну:

$$y = A \sin(\omega t + \phi)$$

Две волны могут иметь одинаковую частоту и одинаковую амплитуду, но при этом находиться в разных фазах.

Если вершины одной волны совпадают с вершинами другой, они усиливают друг друга.

Если вершина одной совпадает с впадиной другой, происходит ослабление.

Разность фаз можно записать как:

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$$

Именно она определяет результат интерференции.

Это одна из важнейших идей всей книги.

Квантовый акселерометр в конечном счете измеряет не «смещение атома линейкой».

Он измеряет изменение фазы квантовой волны.

Интерференция

Возьмем две волны ψ_1 и ψ_2 .

Если они накладываются друг на друга, итоговое состояние определяется их суммой:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

Но измеряемая вероятность зависит от:

$$|\psi_1 + \psi_2|^2$$

После раскрытия выражения появляется дополнительный интерференционный член.

Именно поэтому вероятности двух путей нельзя просто сложить как независимые классические события.

Результат зависит от разности фаз.

Если:

$$\Delta\phi = 0$$

волны усиливают друг друга.

Если:

$$\Delta\phi = \pi$$

они максимально ослабляют друг друга.

Для промежуточных значений получается промежуточный результат.

Так квантовый интерферометр превращает чрезвычайно небольшое изменение фазы в измеряемое изменение числа атомов, обнаруживаемых в определенном состоянии.

Классический интерферометр

Чтобы понять атомный интерферометр, удобно сначала вспомнить оптический.

Пусть световой луч падает на светоделитель.

Свет разделяется на два пути.

Один луч проходит по первой траектории.

Другой — по второй.

Затем зеркала снова направляют их к одному месту, где они объединяются.

Если длины оптических путей немного отличаются, волны приходят с различными фазами.

Возникает интерференция.

По изменению интерференционной картины можно определить чрезвычайно малую разность расстояний.

Так работают многие высокоточные оптические приборы.

Атомный интерферометр использует почти ту же идею.

Но вместо двух световых лучей по разным траекториям движутся две компоненты волны материи.

Атомный интерферометр

Упрощенно его работу можно представить в три этапа.

Сначала атомное облако готовят к измерению.

Затем специальный лазерный импульс выполняет роль светоделителя.

Квантовое состояние атома разделяется на две компоненты, которым соответствуют различные импульсы и поэтому различные траектории движения.

Через некоторое время второй лазерный импульс изменяет их движение, подобно зеркалу.

Наконец третий импульс снова объединяет два пути.

Схематично:

разделение → разные пути → объединение

За время движения каждая компонента квантового состояния накапливает свою фазу.

Если прибор находится в покое и условия идеально одинаковы, между фазами существует определенное соотношение.

Если прибор ускоряется или вращается, соотношение изменяется.

Изменяется и результат интерференции.

Именно это изменение измеряет прибор.

Суперпозиция

Одна из наиболее известных идей квантовой механики — суперпозиция.

Если для системы возможны состояния $|1\rangle$ и $|2\rangle$, то квантовая механика допускает состояние вида:

$$|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle$$

Это и есть суперпозиция.

Для атомного интерферометра особенно важно, что атом можно подготовить в суперпозиции состояний с различными импульсами.

Условно:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|p_1\rangle + |p_2\rangle)$$

После такого воздействия две компоненты начинают двигаться по различным траекториям.

Говорить, что «атом буквально раскалывается пополам», было бы неправильно.

Сам атом при последующем измерении обнаруживается как единый объект.

Разделяется его квантовое состояние.

Именно эта суперпозиция позволяет создать интерферометр волн материи.

Как лазер разделяет атомную волну

Возникает естественный вопрос: каким образом свет способен играть роль светоделителя для атома?

Фотон обладает импульсом:

$$p_{\gamma} = \hbar k$$

где:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

а k — волновое число света.

Когда атом взаимодействует с лазерным излучением, ему можно передать строго определенный импульс.

В атомных интерферометрах часто используются два лазерных поля, организующие двухфотонный процесс.

В результате атом может изменить:

внутреннее энергетическое состояние;

внешний импульс.

Таким образом, один компонент квантового состояния получает дополнительный импульс, а другой — нет.

После этого их пространственные траектории начинают расходиться.

Позже лазерными импульсами их снова можно направить друг к другу.

Получается управляемый интерферометр без механического светоделителя и зеркал.

Их роль выполняет свет.

Почему используется последовательность

$$\pi/2 - \pi - \pi/2$$

В квантовой навигации часто встречается последовательность:

$$\frac{\pi}{2} - \pi - \frac{\pi}{2}$$

Эти обозначения относятся не к геометрическим углам движения атома, а к действию лазерных импульсов на его квантовое состояние.

Первый $\pi/2$ -импульс создает приблизительно равную суперпозицию двух состояний. Он выполняет роль светоделителя.

Следующий π -импульс меняет состояния местами и действует подобно зеркалу.

Последний $\pi/2$ -импульс снова смешивает состояния.

После этого интерференция превращает накопившуюся разность фаз в различную вероятность обнаружения атома в одном из двух конечных состояний.

И эту вероятность уже можно измерить обычной электроникой и оптикой.

Так чрезвычайно необычный квантовый процесс преобразуется в вполне обычный измеряемый сигнал.

От фазы к ускорению

Теперь появляется связь с навигацией.

Если прибор испытывает ускорение a , положение лазерной системы относительно свободно движущихся атомов изменяется.

В простейшей конфигурации фазовый сдвиг имеет вид:

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} a T^2$$

где:

$$\Delta\Phi$$

— измеренная разность фаз;

$$k_{\text{eff}}$$

— эффективный волновой вектор лазерного взаимодействия;

$$a$$

— ускорение;

$$T$$

— время между импульсами.

Следовательно:

$$a = \frac{\Delta\Phi}{k_{\text{eff}} T^2}$$

Получается удивительный результат.

Мы измеряем вероятность перехода атомов между квантовыми состояниями.

Из нее определяем фазу.

Из фазы вычисляем ускорение.

А затем навигационный компьютер интегрирует ускорение и получает скорость и координаты.

Цепочка выглядит так:

$$\text{атомы} \rightarrow \text{интерференция} \rightarrow \Delta\Phi \rightarrow a \rightarrow v \rightarrow x$$

Вот где квантовая механика непосредственно входит в навигационную систему.

Почему время

T

так важно

В формуле:

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} a T^2$$

чувствительность растет как квадрат времени T .

Если увеличить время между лазерными импульсами в два раза, фазовый эффект ускорения увеличится приблизительно в четыре раза.

Это чрезвычайно выгодно.

Но именно здесь начинается один из главных инженерных конфликтов квантовой навигации.

Для высокого значения T атомам требуется достаточно долго свободно двигаться.

Значит:

нужна достаточно большая измерительная область;

необходимо хорошее вакуумирование;

атомное облако не должно столкнуться со стенками;

установка должна сохранять стабильность;

движение платформы не должно разрушить измерение.

Поэтому невероятно чувствительный лабораторный атомный интерферометр сравнительно легко построить на неподвижном фундаменте.

Создать такой же прибор для самолета, корабля или автомобиля значительно сложнее.

Высокая чувствительность оказывается одновременно достоинством и проблемой.

Волна материи как линейка

Полезно провести аналогию.

Обычная линейка сравнивает неизвестную длину с расстоянием между нанесенными на нее делениями.

Оптический интерферометр использует в качестве своеобразной линейки длину волны света.

А атомный интерферометр использует фазу волны материи и взаимодействие атома с лазерным полем.

Поэтому квантовые датчики можно рассматривать как приборы, в которых сама природа предоставляет измерительную шкалу.

Но это не означает автоматического отсутствия ошибок.

Реальный прибор зависит от:

качества лазеров;

магнитных полей;

температуры;

формы волнового фронта света;

вибраций;

точности управляющей электроники;

подготовки атомного облака.

Фундаментальный эталон может быть чрезвычайно стабильным.

Инженерная система вокруг него — нет.

Именно эту разницу важно помнить при обсуждении преимуществ квантовых датчиков.

Почему атомы одинаковы

У механического акселерометра существует чувствительная масса.

Даже если изготовить два прибора по одному чертежу, микроскопические различия неизбежны.

Немного отличаются:

размеры;

масса;

жесткость подвеса;

внутренние напряжения;

температура;

состояние поверхности.

У атомов ситуация принципиально иная.

Все атомы одного изотопа имеют одинаковую фундаментальную структуру.

Например, атомы одного и того же изотопа рубидия обладают одинаковыми:

массой покоя;

энергетическими уровнями;

частотами соответствующих переходов;

квантовыми характеристиками.

Именно поэтому атомы используются не только в квантовых акселерометрах, но и в атомных часах.

Человеку не требуется изготовить идеально одинаковые эталоны.

Природа уже предоставляет их.

Однако атом сам по себе еще не прибор

Здесь возникает важная граница между физикой и инженерией.

Можно иметь идеальный атом и плохой датчик.

Для работы квантового навигатора необходимо:

получить атомы нужного элемента;

создать высокий вакуум;

охладить атомное облако;

подготовить требуемое внутреннее квантовое состояние;

сформировать стабильные лазерные частоты;

точно управлять моментами лазерных импульсов;

защитить установку от магнитных воздействий;

учитывать вибрации;

зарегистрировать конечные состояния атомов;

вычислить фазу;

превратить ее в ускорение или угловую скорость;

передать результат навигационному процессору.

Следовательно, выражение «квантовый датчик использует фундаментальные свойства атомов» совершенно справедливо.

Но из него не следует, что датчик автоматически является идеальным.

Основная инженерная борьба происходит вокруг атома.

Квантовый шум

Даже совершенно идеальный квантовый прибор не обязан выдавать абсолютно одинаковый результат при каждом измерении.

Квантовая механика изначально имеет вероятностный характер.

Предположим, после интерферометра вероятность обнаружить атом в определенном состоянии составляет P .

Если измеряется конечное число атомов N , количество зарегистрированных атомов будет статистически флуктуировать.

Чем больше атомов участвует в измерении, тем точнее можно определить вероятность и фазу.

В простейшем случае статистическая неопределенность уменьшается приблизительно как:

$$\frac{1}{\sqrt{N}}$$

Таким образом, квантовый датчик имеет собственный фундаментальный источник шума.

Это не дефект прибора.

Это часть природы квантового измерения.

Но во многих реальных установках технические шумы пока значительно важнее фундаментального квантового предела.

Что значит «измерить квантовое состояние»

После последнего лазерного импульса необходимо узнать, в каком состоянии оказались атомы.

Обычно применяется оптическое считывание.

На атомное облако направляют лазер определенной частоты.

Атомы в одном состоянии взаимодействуют с ним иначе, чем атомы в другом.

По интенсивности флуоресценции или поглощения можно определить количество атомов в каждом состоянии.

Пусть измерены числа атомов N_1 и N_2 .

Тогда из отношения:

$$P = \frac{N_2}{N_1 + N_2}$$

получают вероятность перехода.

Она имеет интерференционную зависимость от фазы, которую в упрощенном виде можно представить как:

$$P = \frac{1}{2} [1 + C \cos(\Delta\Phi)]$$

где C характеризует контраст интерференции.

Таким образом, фотодетектор становится последним звеном цепи, превращающей квантовую фазу в электрический сигнал.

Ускорение не единственное, что меняет фазу

Атомный интерферометр чрезвычайно чувствителен не только к линейному ускорению.

На фазу могут воздействовать:

гравитация;

вращение;

магнитное поле;

электрическое поле;

изменение лазерной частоты;

вибрации;

движение оптических элементов.

Это означает, что один и тот же фундаментальный принцип можно использовать для различных квантовых датчиков.

Так появляются:

атомные акселерометры;

атомные гироскопы;

квантовые гравиметры;

некоторые виды магнитометров.

Но существует и обратная сторона.

Если прибор должен измерять ускорение, влияние остальных факторов становится помехой.

Поэтому большая часть сложности настоящего квантового сенсора заключается в способности отделить интересующий эффект от всех остальных.

Классическая и квантовая пробная масса

Теперь можно провести главное сравнение.

В классическом акселерометре:

пробная масса — механический элемент.

В атомном акселерометре:

пробная масса — атомное облако.

В классическом приборе положение массы относительно корпуса измеряется электрически или оптически.

В квантовом приборе движение атомов определяется по интерференционной фазе.

Это не просто замена большого механизма маленькими частицами.

Изменяется сам способ измерения.

Механический прибор измеряет деформацию или перемещение изготовленной конструкции.

Атомный прибор сравнивает фазы квантовых состояний.

Именно поэтому долговременная стабильность атомных систем потенциально оказывается столь привлекательной.

Где же здесь «квантовость»

Термин «квантовая технология» иногда используется настолько широко, что начинает терять смысл.

В случае атомной интерферометрической навигации квантовая природа технологии совершенно конкретна.

Используются волны материи:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Используется суперпозиция квантовых состояний:

$$|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle$$

Используется интерференция:

$$|\psi_1 + \psi_2|^2$$

Используются:

квантовые переходы атома;

обмен дискретным импульсом с фотонами;

измерение населенности квантовых состояний.

Без этих явлений атомный интерферометр работать не может.

Поэтому здесь слово «квантовый» не является рекламным термином.

Квантовая механика непосредственно представляет собой измерительный механизм прибора.

От атома к навигатору

Теперь можно увидеть всю цепочку.

Сначала атомы охлаждаются, чтобы их движение стало хорошо контролируемым.

Затем лазеры формируют суперпозицию.

Компоненты квантового состояния проходят по различным траекториям.

В течение этого времени они накапливают фазу.

Ускорение или вращение изменяет разность фаз.

Последний лазерный импульс заставляет траектории интерферировать.

По количеству атомов в конечных состояниях определяется фазовый сдвиг.

Из него вычисляется физическая величина.

Для акселерометра:

$$\Delta\Phi \rightarrow a$$

Для гироскопа:

$$\Delta\Phi \rightarrow \Omega$$

Навигационный компьютер получает уже обычные численные данные.

На этом уровне ему практически безразлично, каким способом измерено ускорение — механическим, оптическим или квантовым.

Так происходит соединение двух миров:

квантовая физика → датчик → классический компьютер → координаты

Именно это делает квантовую навигацию инженерной технологией, а не только красивым лабораторным экспериментом.

Но для того чтобы атомная интерференция стала достаточно точной, необходимо решить одну практическую задачу: заставить огромное количество атомов двигаться значительно медленнее, чем они движутся при комнатной температуре.

Для этого используется один из самых удивительных инструментов современной атомной физики — лазерный свет.

Следующая глава посвящена тому, как свет может охлаждать вещество почти до абсолютного нуля.

Глава 4. Как заставить атомы почти остановиться



Атомный интерферометр использует атомы как пробные массы и одновременно как волны материи. Но существует очевидная проблема: при обычной температуре атомы вовсе не стоят на месте.

Они непрерывно и хаотично движутся, сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Скорости отдельных атомов могут составлять сотни метров в секунду.

Для атомной интерферометрии такое движение крайне неудобно.

Нам необходимо:

собрать атомы в небольшом объеме;

уменьшить разброс их скоростей;

подготовить определенное квантовое состояние;

удержать облако достаточно долго;

затем отпустить атомы и выполнить интерферометрическое измерение.

Именно поэтому одной из ключевых технологий квантовой навигации стало **лазерное охлаждение**.

На первый взгляд идея кажется парадоксальной.

Лазер ассоциируется с нагревом материала.

Но правильно настроенный лазер способен не разгонять атомы, а тормозить их.

Температура как движение атомов

В повседневной жизни температура воспринимается как степень нагретости предмета.

На микроскопическом уровне она тесно связана с хаотическим движением частиц.

Чем выше температура газа, тем больше средняя кинетическая энергия атомов.

Для идеального одноатомного газа средняя энергия поступательного движения определяется выражением:

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

где:

$$k_B$$

— постоянная Больцмана;

$$T$$

— абсолютная температура.

Кинетическая энергия отдельного атома равна:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Поэтому снижение температуры означает уменьшение характерных скоростей атомов.

При комнатной температуре атомы рубидия движутся со скоростями порядка сотен метров в секунду.

При температурах в несколько микрокельвин характерное движение становится несравнимо медленнее.

Именно такое облако уже можно использовать как управляемую квантовую пробную массу.

Абсолютный ноль

Температурная шкала Кельвина начинается с абсолютного нуля:

$$T = 0 \text{ K}$$

что соответствует:

$$-273,15^{\circ}\text{C}$$

Абсолютный ноль нельзя достичь конечным числом физических операций.
Но современные методы позволяют приблизиться к нему чрезвычайно близко.

В атомной физике обычными стали температуры:

милликельвины;

микрокельвины;

нанокельвины.

Микрокельвин составляет:

$$1 \mu\text{K} = 10^{-6} \text{ K}$$

Нанокельвин:

$$1 \text{ nK} = 10^{-9} \text{ K}$$

Это температуры, практически не встречающиеся естественным образом в окружающей нас среде.

Но важно понимать: охлаждается не вся установка.

Вакуумная камера, лазеры и электроника могут находиться примерно при комнатной температуре.

До микрокельвинов охлаждается сравнительно небольшое облако атомов внутри вакуумной системы.

Зачем квантовому навигатору холодные атомы

Можно задать естественный вопрос: почему вообще нельзя использовать горячие атомы? Квантовая механика ведь действует при любой температуре.

Действительно, действует.

Проблема заключается не в исчезновении квантовых свойств, а в контроле движения.

Если атомы обладают большим разбросом скоростей, то:

они быстро покидают область измерения;

разные атомы проходят различные траектории;

доплеровские сдвиги сильно различаются;

уменьшается время взаимодействия с лазерами;

интерференционный сигнал размывается;

становится труднее точно определить фазу.

Холодное атомное облако гораздо более однородно.

Можно сказать, что охлаждение уменьшает «скоростной шум» исходной пробной массы.

Кроме того, из формулы де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

видно, что при уменьшении скорости v увеличивается характерная длина волны материи.

Это облегчает проведение интерференционных экспериментов.

Свет обладает импульсом

Ключ к лазерному охлаждению заключается в том, что свет способен передавать импульс. Фотон обладает импульсом:

$$p_{\gamma} = \hbar k$$

или, что эквивалентно:

$$p_{\gamma} = \frac{h}{\lambda}$$

Когда атом поглощает фотон, импульс атома изменяется на величину импульса фотона. Если фотон летел навстречу атому, поглощение немного замедляет атом. Один фотон оказывает ничтожное воздействие. Но за одну секунду атом может взаимодействовать с огромным количеством фотонов. Множество очень малых изменений импульса превращается в вполне заметную силу. Так возникает **давление света**.

Поглощение и испускание фотона

Рассмотрим атом, движущийся навстречу лазерному лучу.

Он поглощает фотон.

Полученный импульс направлен по направлению распространения света.

Если лазер светит против движения атома, импульс фотона оказывается направлен противоположно скорости атома.

Атом замедляется.

Позже возбужденный атом самопроизвольно испускает фотон и возвращается в более низкое энергетическое состояние.

Может показаться, что при испускании атом просто получит импульс обратно и никакого охлаждения не произойдет.

Но направления спонтанного испускания случайны.

После большого количества циклов импульсы от спонтанного излучения в среднем взаимно компенсируются.

А поглощение происходит преимущественно из определенного направления.

Поэтому остается направленная тормозящая сила.

Схематично:

направленное поглощение → торможение

случайное переизлучение → средний импульс около нуля

Так свет может постепенно отнимать у атомного облака кинетическую энергию.

Почему нельзя просто направить лазер навстречу атомам

Если бы все атомы двигались в одном направлении с одной скоростью, задача была бы сравнительно простой.

Но в газе атомы движутся хаотически:

вправо;

влево;

вверх;

вниз;

вперед;

назад.

Поэтому требуется воздействовать сразу по нескольким направлениям.

Обычно используются три взаимно перпендикулярные пары лазерных лучей.

Таким образом, атом оказывается окружен светом с шести сторон.

Но возникает еще одна проблема.

Как сделать так, чтобы атом преимущественно поглощал именно тот луч, который направлен против его движения?

Ответ дает эффект Доплера.

Эффект Доплера

Эффект Доплера хорошо знаком по звуку.

Когда источник звука приближается, воспринимаемая частота возрастает.

Когда удаляется — уменьшается.

Свет подчиняется аналогичному принципу.

Если атом движется навстречу лазерному лучу, частота света в системе отсчета атома кажется немного выше.

Для небольших скоростей доплеровский сдвиг можно представить как:

$$\Delta\omega \approx -\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$$

где:

$\mathbf{k}$

— волновой вектор лазера;

$\mathbf{v}$

— скорость атома.

Атом поглощает свет особенно эффективно тогда, когда его частота совпадает с частотой определенного атомного перехода.

Пусть эта резонансная частота равна ω_0 .

Лазер специально настраивают немного ниже:

$$\omega_L < \omega_0$$

Это называется **красной отстройкой**.

Для неподвижного атома частота лазера немного недостаточна для эффективного резонансного взаимодействия.

Но атом, движущийся навстречу лучу, вследствие эффекта Доплера воспринимает частоту как более высокую.

Она приближается к резонансу.

В результате атом преимущественно поглощает фотоны именно из луча, направленного навстречу его движению.

И получает тормозящий импульс.

Оптическая патока

Теперь окружим атом шестью лазерными лучами:

два вдоль оси X ;

два вдоль Y ;

два вдоль Z .

Все лазеры имеют небольшую красную отстройку от атомного резонанса.

Если атом начинает двигаться вправо, для него становится более резонансным луч, идущий слева навстречу движению.

Он тормозит атом.

Если атом движется в противоположную сторону, сильнее действует противоположный луч.

То же происходит по другим координатам.

В результате возникает сила, приблизительно противоположная скорости:

$$\mathbf{F} \approx -\alpha \mathbf{v}$$

где α — коэффициент эффективного оптического торможения.

Это напоминает движение частицы в вязкой жидкости.

Поэтому такой режим получил название **optical molasses** — **оптическая патока**.

Атомы словно пытаются двигаться через чрезвычайно вязкую среду.

Но никакой жидкости внутри камеры нет.

Их тормозит свет.

Доплеровский предел

Лазерное охлаждение не может бесконечно уменьшать температуру простым повторением поглощения и испускания фотонов.

Каждое спонтанное испускание дает атому случайный импульс отдачи.

Поэтому существуют два конкурирующих процесса:

лазерное торможение уменьшает скорость;

случайная отдача при излучении снова увеличивает разброс скоростей.

В простейшей модели устанавливается минимальная температура, называемая доплеровским пределом:

$$T_D = \frac{\hbar\Gamma}{2k_B}$$

где Γ характеризует естественную ширину атомного перехода.

Для различных атомов значение отличается, но типичные величины находятся в диапазоне сотен микрокельвин.

Однако оказалось, что атомы можно охлаждать даже ниже доплеровского предела.

Для этого используются более тонкие квантовые механизмы взаимодействия света с многоуровневой структурой атома.

Так появились методы субдоплеровского охлаждения.

Сизифово охлаждение

Один из наиболее известных субдоплеровских механизмов называется **сизифовым охлаждением**.

Название происходит от древнегреческого мифа о Сизифе, который снова и снова поднимал камень на гору.

В неоднородном световом поле внутренние энергетические уровни атома изменяются в зависимости от положения.

Атом словно движется вверх по потенциальному холму, теряя кинетическую энергию.

Оптическая перекачка затем переводит его в другое внутреннее состояние, где процесс повторяется.

В результате атом снова и снова «взбирается на холм».

Его кинетическая энергия постепенно уменьшается.

Такие методы позволили получать температуры значительно ниже простого доплеровского предела.

Почему одной оптической патоки недостаточно

Оптическая патока уменьшает скорость атомов, но сама по себе плохо удерживает их в определенной точке пространства.

Атомное облако может оставаться холодным, но постепенно расширяться и уходить из рабочей области.

Для квантового датчика этого недостаточно.

Нужно одновременно:

охлаждать атомы;

собирать их в небольшой объем.

Так появилась **магнито-оптическая ловушка**.

Магнито-оптическая ловушка

МОЛ — магнито-оптическая ловушка, или MOT — Magneto-Optical Trap, объединяет:

- лазерное охлаждение;
- неоднородное магнитное поле.

Обычно магнитное поле создается парой катушек с противоположными направлениями токов.

В центре установки магнитное поле близко к нулю.

При удалении от центра его величина возрастает.

Из-за эффекта Зеемана энергетические уровни атома изменяются в магнитном поле.

Следовательно, изменяется и частота, на которой атом наиболее эффективно поглощает свет.

С помощью подходящей поляризации лазерных лучей систему настраивают так, чтобы атом, отклонившийся от центра, преимущественно поглощал фотоны, толкающие его обратно.

Получается восстанавливающая сила.

Упрощенно:

$$\mathbf{F} \approx -\alpha \mathbf{v} - \kappa \mathbf{r}$$

Первый член тормозит движение.

Второй возвращает атомы к центру ловушки.

В результате формируется небольшое облако холодных атомов, практически висящее в пустоте.

Как выглядит атомное облако

Человеческий глаз отдельные атомы, конечно, увидеть не может.

Но облако содержит огромное число атомов.

Когда на него направляют резонансный лазер, атомы рассеивают свет.

Поэтому облако может выглядеть как небольшая яркая светящаяся точка или туманное пятно внутри вакуумной камеры.

Размер может составлять миллиметры.

Внутри этого небольшого объема находятся миллионы или даже больше атомов.

Именно из такого облака затем формируется пробная масса атомного интерферометра.

Откуда берутся атомы

В большинстве современных интерферометрических установок используются щелочные металлы.

Особенно распространены:

рубидий;

цезий.

Причина заключается не только в их атомной массе.

У них удобная структура энергетических уровней и оптические переходы, доступные современным лазерам.

Например, для рубидия широко используются переходы в ближней инфракрасной области около 780 нм.

Для цезия характерна длина волны около 852 нм.

Это позволяет применять хорошо освоенные полупроводниковые лазерные технологии.

Почему особенно популярен рубидий

Рубидий стал своего рода рабочей лошадкой холодноатомной физики.

Он имеет несколько преимуществ:

сравнительно удобные спектральные линии;

доступные лазерные источники;

хорошо изученную атомную структуру;

возможность эффективного лазерного охлаждения;

подходящие изотопы.

В экспериментах часто используется рубидий-87.

Именно системы на рубидии встречаются во многих разработках атомных:

акселерометров;

гравиметров;

гироскопов;

часов.

Однако это не означает, что квантовая навигация обязательно должна использовать именно рубидий.

Выбор атома зависит от конкретной архитектуры датчика.

Почему нужен вакуум

Представим охлажденный атом, который медленно движется внутри камеры.

Если там находится обычный воздух, он практически мгновенно столкнется с молекулой азота или кислорода.

Такое столкновение способно полностью изменить его скорость и разрушить подготовленное квантовое состояние.

Поэтому холодные атомы должны находиться в высоком или сверхвысоком вакууме.

Давление внутри системы может быть во многие миллиарды раз ниже атмосферного.

Основная цель проста:

атом должен взаимодействовать преимущественно с тем, с чем экспериментатор хочет, чтобы он взаимодействовал.

То есть с:

лазерными полями;

магнитными полями;

гравитацией;

движением платформы.

А не со случайными молекулами остаточного газа.

Вакуум — одна из главных инженерных проблем

В лаборатории создать сверхвысокий вакуум можно с помощью сложной насосной системы.

Но квантовый навигатор должен быть:

компактным;

надежным;

малопотребляющим;

устойчивым к вибрациям;

способным работать годами.

Большой вакуумный насос плохо соответствует этим требованиям.

Поэтому разработчики создают герметичные миниатюрные вакуумные ячейки.

После откачки остаточные молекулы связываются специальными материалами — **геттерами**.

Геттер химически поглощает молекулы остаточного газа и помогает сохранять вакуум без постоянно работающего большого насоса.

Это один из ключевых путей миниатюризации квантовых датчиков.

Лазерная система сложнее, чем кажется

Фраза «посветить лазером на атомы» сильно упрощает реальность.

Для работы с холодными атомами необходимо чрезвычайно точно контролировать:

частоту света;

мощность;

поляризацию;

направление луча;

временные импульсы;

фазу.

Частота лазера должна быть связана с конкретным атомным переходом.

Даже небольшое отклонение изменяет эффективность охлаждения.

Кроме того, в одной установке может потребоваться несколько различных оптических частот:

охлаждающее излучение;

репампинг;

подготовка состояния;

Raman-импульсы;

детектирование.

Поэтому значительная часть реального атомного навигационного датчика — вовсе не атомы.

Это оптика и лазерная электроника.

Репампинг

У реального атома существует несколько энергетических уровней.

В процессе многократного взаимодействия со светом атом может случайно перейти в состояние, которое больше не взаимодействует с основным охлаждающим лазером.

Такой атом становится для системы практически «темным».

Чтобы вернуть его в цикл охлаждения, используется дополнительный лазер или дополнительная частота — **repump**, то есть репампирующее излучение.

Оно переводит атом обратно в нужную систему уровней.

Без репампинга эффективность ловушки быстро снижалась бы.

Этот небольшой технический пример хорошо показывает, насколько реальная система сложнее простой картинки «атом плюс лазер».

Подготовка квантового состояния

Само охлаждение еще не означает готовность к интерферометрии.

Перед измерением атомы желательно привести в хорошо определенное внутреннее состояние.

Это позволяет:

- уменьшить влияние магнитных полей;
- получить однородную начальную систему;
- улучшить контраст интерференции;
- точнее управлять переходами.

Для этого применяются:

- оптическая накачка;
- микроволновые импульсы;
- магнитные поля;
- дополнительные лазерные последовательности.

Таким образом, процесс подготовки атомов напоминает настройку прецизионного измерительного прибора.

Только сам «прибор» каждый цикл создается заново из облака атомов.

Один измерительный цикл

Типичный холодноатомный датчик работает циклически.

Упрощенно цикл выглядит так:

загрузка атомов → охлаждение → захват → подготовка состояния → освобождение атомов → интерферометрия → детектирование

После измерения атомное облако обычно теряется.

Для следующего измерения создается новое.

Это принципиально отличается от классического акселерометра, который измеряет непрерывно.

У атомного устройства возникает так называемое **мертвое время**, необходимое для подготовки следующего облака.

Именно отсюда происходит одна из важных современных проблем квантовой навигации — сравнительно низкая частота обновления данных.

Почему атомы приходится отпускать

Может возникнуть вопрос: если магнито-оптическая ловушка так хорошо удерживает атомы, почему не проводить интерферометрию прямо внутри нее?

Потому что ловушка сама воздействует на атомы.

Лазерные и магнитные поля создают силы, которые затрудняют точное измерение внешнего ускорения.

Для интерферометрического этапа атомы обычно освобождают из ловушки.

После выключения удерживающих полей облако начинает двигаться практически свободно.

Именно в этот момент атомы становятся хорошими пробными массами.

На них продолжают действовать:

гравитация;

инерциальные эффекты;

управляющие интерферометрические лазерные импульсы.

И именно их свободное движение позволяет измерять ускорение.

Атомный фонтан

Один из распространенных способов увеличить время свободного движения — придать холодным атомам начальную скорость вверх.

Облако поднимается, замедляется под действием гравитации, достигает верхней точки и затем падает.

Получается **атомный фонтан**.

Во время полета атомов выполняются необходимые лазерные импульсы.

Так можно увеличить время T между импульсами и тем самым повысить чувствительность.

Поскольку:

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}}aT^2$$

увеличение T особенно эффективно.

Но атомный фонтан требует вертикального пространства.

Это одна из причин, почему высокочувствительные лабораторные установки могут иметь значительные размеры.

Почему квантовый акселерометр пока не микросхема

Теперь становится понятен масштаб инженерной задачи.

Для создания холодноатомного датчика необходимы:

- источник атомов;
- вакуумная камера;
- сверхвысокий вакуум;
- несколько лазерных частот;
- оптические элементы;
- магнитные катушки;
- стабилизация лазеров;
- фотодетекторы;
- управляющая электроника;
- вычислительная система.

И все это необходимо разместить на подвижной платформе.

При этом прибор должен выдерживать:

- вибрации;
- ускорения;
- изменение температуры;
- изменение ориентации;
- длительную эксплуатацию.

Поэтому путь от лабораторного эксперимента до серийного навигационного устройства оказался гораздо длиннее, чем могло показаться после первых успехов лазерного охлаждения.

Интегральная фотоника как следующий шаг

Большая часть объема современной установки связана не непосредственно с вакуумной камерой, а с оптической системой.

Традиционно лазерный луч проходит через множество отдельных компонентов:

зеркала;

линзы;

светоделители;

модуляторы;

волокна.

Каждый элемент необходимо установить и юстировать.

Если значительную часть этой системы перенести на фотонную интегральную схему, устройство можно резко уменьшить.

То, что сегодня занимает оптический стол, в перспективе может быть выполнено на небольшом чипе.

Именно поэтому интегральная фотоника считается одним из главных технологических путей от лабораторной атомной физики к мобильному квантовому навигатору.

Можно ли обойтись вообще без лазерного охлаждения

Холодные атомы — один из наиболее развитых путей квантовой навигации, но не единственный.

Существуют квантовые сенсоры, способные работать при значительно более высокой температуре.

Например:

атомные магнитометры на тепловом паре;

NV-центры в алмазе;

некоторые твердотельные квантовые сенсоры.

Поэтому будущий квантовый навигатор не обязательно будет содержать миниатюрный атомный фонтан.

Возможно, разные задачи будут решаться разными физическими технологиями.

Но для высокоточной атомной интерферометрии холодные атомы сегодня остаются одним из основных подходов.

От облака атомов к измерительному прибору

Теперь последовательность построения квантового акселерометра становится более понятной.

Сначала необходимо получить атомы.

Затем создать вакуум.

После этого лазеры замедляют атомы благодаря эффекту Доплера.

Шесть встречных лучей формируют оптическую патоку.

Магнитное поле превращает ее в магнито-оптическую ловушку.

Возникает компактное облако холодных атомов.

Атомы переводятся в нужное квантовое состояние.

Затем ловушка выключается.

Облако начинает свободное движение.

После этого можно применять интерферометрическую последовательность:

$$\frac{\pi}{2} - \pi - \frac{\pi}{2}$$

и измерять фазу волн материи.

Итак, вся цепочка выглядит следующим образом:

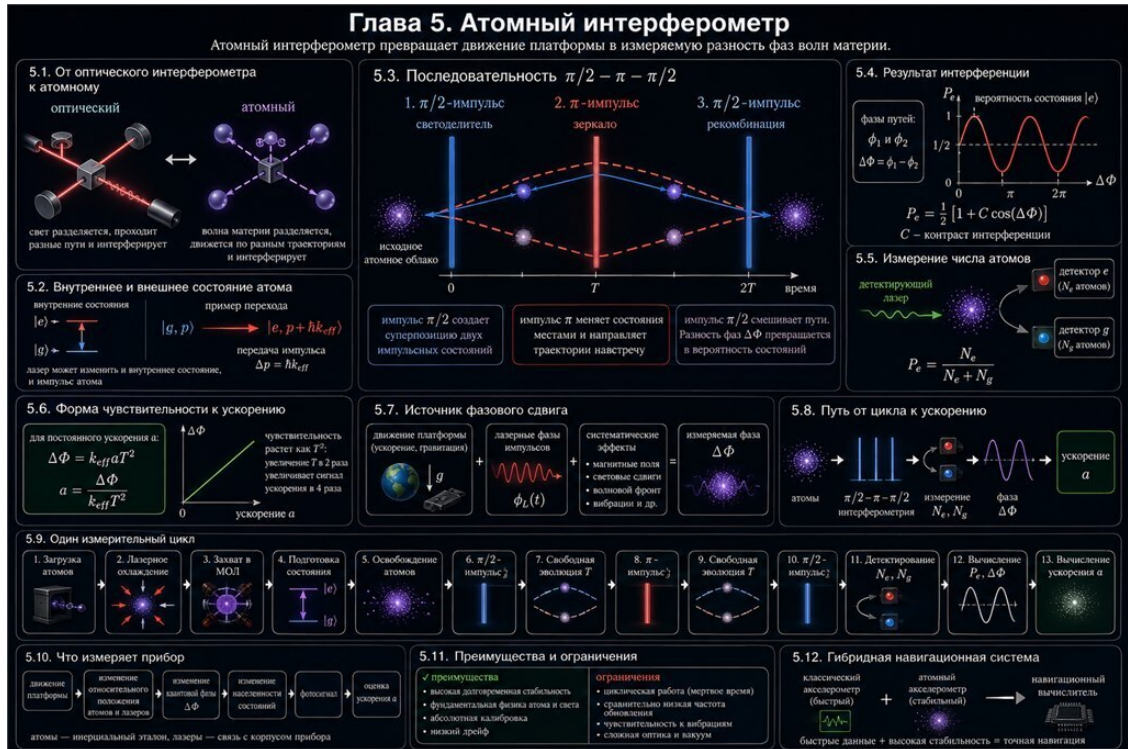
**тепловые атомы → лазерное охлаждение → магнито-оптическая ловушка →
холодное атомное облако → подготовка состояния → свободное движение → атом-
ная интерферометрия**

К этому моменту атомы уже подготовлены.

Остается использовать их как настоящий измерительный прибор.

В следующей главе мы подробно разберем сердце холодноатомной квантовой навигации — атомный интерферометр — и проследим полный путь от первого лазерного импульса до численного значения ускорения.

Глава 5. Атомный интерферометр



В предыдущей главе мы получили то, без чего холодноатомный квантовый датчик вообще не может существовать: небольшое облако охлажденных атомов в вакууме.

Теперь начинается собственно измерение.

Атомы освобождаются из магнито-оптической ловушки и на короткое время превращаются в почти свободно движущиеся пробные массы. Затем последовательность строго синхронизированных лазерных импульсов разделяет их квантовое состояние, изменяет траектории и вновь соединяет их.

Если за это время прибор испытал ускорение или вращение, две компоненты квантового состояния накопят различную фазу.

Эта разность фаз и является измерительным сигналом.

В наиболее известной схеме используется последовательность:

$$\frac{\pi}{2} - \pi - \frac{\pi}{2}$$

Она выполняет для волн материи те же функции, которые в обычном оптическом интерферометре выполняют светоделитель, зеркала и второй светоделитель.

Именно поэтому атомный интерферометр можно считать сердцем квантового акселерометра и одного из основных вариантов квантового гироскопа.

От оптического интерферометра к атомному

Классический интерферометр разделяет световой луч на две части.

Обе части проходят по различным путям, а затем снова объединяются.

Если за время движения между ними возникла разность фаз, она проявляется после рекомбинации в виде изменения интенсивности света.

У атомного интерферометра принцип похож:

**одна исходная волна материи → две квантовые траектории → накопление фаз
→ рекомбинация → интерференция**

Но существуют принципиальные различия.

В оптическом приборе интерферируют электромагнитные волны.

В атомном — волновые функции материальных частиц.

Кроме того, атом обладает массой, поэтому его движение непосредственно чувствительно к:

ускорению;

гравитации;

вращению;

инерциальным силам.

Именно это делает атомную интерферометрию особенно привлекательной для навигации.

Подготовка измерения

Перед началом интерферометрического цикла атомное облако должно быть подготовлено.

Типичная последовательность включает:

загрузку атомов в магнито-оптическую ловушку;

лазерное охлаждение;

дополнительное уменьшение температуры;

подготовку внутреннего состояния;

выключение удерживающих лазеров;

выключение или изменение магнитных полей;

начало свободного движения атомов.

После освобождения атомное облако уже не удерживается ловушкой.

Теперь оно движется под действием внешних сил.

В простейшем вертикальном гравиметре главной силой становится земная гравитация.

В навигационном акселерометре существенным становится относительное движение атомов и корпуса прибора.

Именно это относительное движение необходимо измерить.

Внутреннее и внешнее состояние атома

Для понимания работы интерферометра полезно разделить две характеристики атома.

Первая — его внутреннее квантовое состояние.

Обозначим два состояния:

$$|g\rangle$$

и

$$|e\rangle$$

Их можно представить как два определенных энергетических уровня.

Вторая характеристика — импульс атома.

Например:

$$|g, p\rangle$$

означает, что атом находится во внутреннем состоянии $|g\rangle$ и имеет импульс p .

Лазерное взаимодействие может одновременно изменить и внутреннее состояние, и импульс.

Например:

$$|g, p\rangle \rightarrow |e, p + \hbar k_{\text{eff}}\rangle$$

Именно такое связанное изменение позволяет лазерам разделять атомную волну на различные траектории.

Почему часто используются два лазерных луча

В реальных атомных интерферометрах часто применяется не непосредственное поглощение одного фотона, а двухфотонный рамановский процесс.

Используются два лазерных поля с волновыми векторами k_1 и k_2 .

Атом взаимодействует с обоими полями таким образом, что результирующая передача импульса определяется эффективным волновым вектором:

$$\mathbf{k}_{\text{eff}} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$$

Если лучи распространяются почти навстречу друг другу, величина эффективного волнового вектора приблизительно равна:

$$k_{\text{eff}} \approx k_1 + k_2$$

В этом случае атом получает сравнительно большой и очень хорошо определенный импульс:

$$\Delta p = \hbar k_{\text{eff}}$$

Это важно сразу по двум причинам.

Во-первых, две компоненты атомной волны начинают двигаться по различным траекториям.

Во-вторых, именно k_{eff} входит в формулу чувствительности интерферометра к ускорению.

Первый

$$\pi/2$$

-импульс — светоделиитель

До первого импульса условно можно считать, что атом находится в состоянии:

$$|g, p\rangle$$

Первый импульс с площадью $\pi/2$ создает суперпозицию двух состояний.
Упрощенно:

$$|g, p\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|g, p\rangle + |e, p + \hbar k_{\text{eff}}\rangle)$$

Теперь квантовое состояние содержит две компоненты.

Одна сохраняет исходный импульс.

Вторая получает дополнительный импульс:

$$\hbar k_{\text{eff}}$$

Следовательно, их скорости немного различаются.

Если масса атома равна m , дополнительная скорость составляет:

$$\Delta v = \frac{\hbar k_{\text{eff}}}{m}$$

С этого момента две компоненты начинают пространственно расходиться.

Именно первый $\pi/2$ -импульс выполняет роль светоделиителя атомного интерферометра.

Разделение волновых пакетов

После первого импульса две компоненты состояния свободно эволюционируют в течение времени T .

Они имеют разные импульсы, а значит — разные скорости.

Расстояние между центрами волновых пакетов увеличивается приблизительно как:

$$\Delta x \approx \Delta v T$$

или:

$$\Delta x \approx \frac{\hbar k_{\text{eff}}}{m} T$$

При этом не следует представлять ситуацию так, будто один атом физически разрезали на две половины.

При последующем обнаружении атом остается одной частицей.

Разделена амплитуда его квантового состояния.

Пока сохраняется квантовая когерентность, обе альтернативы могут впоследствии снова интерферировать.

Когерентность

Для интерференции недостаточно просто создать два пути.
Между ними должна сохраняться определенная фазовая связь.
Это называется **когерентностью**.

Если окружающая среда получает информацию о том, по какой траектории двигался атом, или если фаза становится случайной от атома к атому, интерференционный контраст уменьшается.

Когерентность могут разрушать:

- столкновения с остаточным газом;
- неоднородные магнитные поля;
- нестабильность лазеров;
- разброс скоростей атомов;
- неодинаковые световые сдвиги;
- неконтролируемое взаимодействие с окружающей средой.

Поэтому атомный интерферометр требует высокого вакуума и чрезвычайно стабильной системы управления.

Второй

π

-импульс — квантовое зеркало

Через время T после первого импульса подается второй лазерный импульс.

Его площадь соответствует π .

В упрощенном представлении он меняет импульсные состояния двух компонент местами.

Компонента, которая ранее двигалась быстрее, изменяет импульс одним образом.

Вторая — другим.

В результате относительное движение меняется так, что волновые пакеты начинают снова приближаться друг к другу.

Поэтому π -импульс часто называют **зеркалом атомного интерферометра**.

Но никакого механического зеркала здесь нет.

Все управление траекториями выполняется импульсом лазерного света.

Еще один интервал времени

$$T$$

После второго импульса система снова свободно эволюционирует в течение времени T .

Если параметры выбраны правильно, к моменту третьего импульса две компоненты снова оказываются пространственно совмещены достаточно хорошо для интерференции.

Весь основной интерферометрический цикл занимает приблизительно:

$$2T$$

При этом чувствительность к постоянному ускорению определяется не просто общей длительностью, а характерной зависимостью:

$$\Delta\Phi \propto T^2$$

Поэтому даже небольшое увеличение времени свободной эволюции заметно повышает чувствительность.

Третий

$$\pi/2$$

-импульс — рекомбинация

Последний $\pi/2$ -импульс снова смешивает два квантовых пути. Это аналог второго светоделителя в оптическом интерферометре. До третьего импульса две компоненты накопили определенные фазы:

$$\phi_1$$

и

$$\phi_2$$

Их разность:

$$\Delta\Phi = \phi_1 - \phi_2$$

определяет результат рекомбинации.

После третьего импульса атом может оказаться в одном из двух внутренних состояний.

Вероятность зависит от накопленной фазы.

В идеализированном случае:

$$P = \frac{1}{2} [1 + C \cos(\Delta\Phi)]$$

где:

$$P$$

— вероятность обнаружения атома в выбранном состоянии;

$$C$$

— контраст интерференции;

$$\Delta\Phi$$

— результирующий фазовый сдвиг.

Таким образом, невидимая квантовая фаза превращается в измеряемое количество атомов.

Как измеряется число атомов

После завершения интерферометрии на атомное облако направляют детектирующий лазер.

Он настроен так, чтобы атомы одного внутреннего состояния активно поглощали и переизлучали свет.

Интенсивность флуоресценции измеряется фотодетектором.

Затем аналогичным способом определяется число атомов в другом состоянии.

Получаются величины:

$$N_g$$

и

$$N_e$$

Относительная населенность одного состояния может быть вычислена как:

$$P_e = \frac{N_e}{N_g + N_e}$$

Это уже обычное число, которое поступает в электронную систему обработки.

Квантовый процесс закончился.

Дальше начинается классическая цифровая обработка данных.

Откуда берется фазовый сдвиг

В атомном интерферометре результирующая фаза формируется несколькими механизмами.

Условно ее можно представить как сумму:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\text{движение}} + \Delta\Phi_{\text{лазер}} + \Delta\Phi_{\text{систематика}}$$

Первая часть связана с движением атомов в инерциальном поле.

Вторая — с фазами лазерных импульсов.

Третья включает нежелательные систематические эффекты.

Именно поэтому реальный атомный интерферометр одновременно является:
датчиком движения;

чрезвычайно точным фазовым измерителем;

системой сравнения движения атомов с оптической системой прибора.

Атомы как инерциальный эталон

Представим, что после освобождения атомы движутся практически свободно.

Корпус прибора вместе с зеркалами и лазерной системой испытывает ускорение.

Атомы и корпус начинают двигаться относительно друг друга.

Но лазерные импульсы приходят к атомам из системы, жестко связанной с прибором.

Поэтому моменты и фазы взаимодействия зависят от положения оптической системы относительно свободно движущегося атомного облака.

Получается принципиально важная схема:

атомы задают свободно движущийся инерциальный эталон, а лазеры связывают этот эталон с корпусом прибора.

Именно относительное движение между ними кодируется в фазе.

Формула атомного акселерометра

Для идеализированной трехимпульсной схемы при постоянном ускорении вдоль чувствительной оси:

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} a T^2$$

Отсюда ускорение:

$$a = \frac{\Delta\Phi}{k_{\text{eff}} T^2}$$

Это одна из центральных формул квантовой навигации.

Она показывает три способа увеличить фазовую чувствительность:

увеличить k_{eff} ;

увеличить время T ;

точнее измерять фазу $\Delta\Phi$.

Каждый путь породил отдельное направление исследований.

Почему зависимость от

$$T^2$$

настолько важна

Пусть время между импульсами увеличили вдвое.

Тогда:

$$T \rightarrow 2T$$

Фазовый сдвиг становится:

$$\Delta\Phi' = k_{\text{eff}} a (2T)^2$$

Следовательно:

$$\Delta\Phi' = 4\Delta\Phi$$

То есть удвоение времени взаимодействия увеличивает сигнал ускорения в четыре раза.

При увеличении T в десять раз фазовый эффект увеличивается в сто раз.

Это объясняет стремление физиков создавать:

высокие атомные фонтаны;

длинные вертикальные вакуумные трубы;

эксперименты в микрогравитации;

космические атомные интерферометры.

Но для мобильной навигации возникает противоположное требование: прибор должен быть компактным.

Так появляется фундаментальный инженерный конфликт:

большое T повышает чувствительность, но обычно увеличивает размеры и время измерительного цикла.

Что такое чувствительная ось

Формула:

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} a T^2$$

содержит ускорение не вообще, а его проекцию на направление эффективного волнового вектора.

Точнее:

$$\Delta\Phi = \mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{a} T^2$$

Поэтому направление лазерных лучей определяет чувствительную ось прибора.

Если $\mathbf{k}_{\text{eff}}$ направлен вертикально, интерферометр особенно чувствителен к вертикальному ускорению.

Если горизонтально — к горизонтальной составляющей.

Для полноценного навигационного устройства необходимо измерять движение по нескольким осям.

В идеале требуется трехосевая система:

$$a_x, a_y, a_z$$

Это заметно усложняет оптическую архитектуру.

Измерение земной гравитации

Если чувствительная ось интерферометра вертикальна, главным ускорением становится ускорение свободного падения g .

Тогда:

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} g T^2$$

Измерив фазу, можно определить:

$$g = \frac{\Delta\Phi}{k_{\text{eff}} T^2}$$

Именно так работает атомный абсолютный гравиметр.

Физически атомный гравиметр и атомный акселерометр очень близки.

Главное различие заключается в том, что считается измеряемой величиной.

В гравиметре интерес представляет само поле тяжести Земли.

В навигационном акселерометре необходимо определить движение платформы.

Эта близость технологий позже позволит использовать квантовые гравиметры и для навигации по гравитационным картам.

Зеркало как часть акселерометра

В реальной схеме встречные лазерные лучи часто формируются с помощью отражающего зеркала.

Его положение оказывается чрезвычайно важным.

Если зеркало вибрирует, фаза света в моменты взаимодействия с атомами изменяется.

Для атомов это может выглядеть почти так же, как ускорение всей системы.

Следовательно, атомный акселерометр способен стать настолько чувствительным, что начинает измерять вибрацию собственного оптического стола.

В лабораторных условиях используются:

виброизоляционные платформы;

классические акселерометры;

математическая компенсация вибраций.

На самолете, автомобиле или корабле проблема становится намного серьезнее.

Поэтому квантовый датчик не просто должен быть чувствительным.

Он должен уметь работать в мире, где все постоянно вибрирует.

Динамический диапазон

Очень чувствительный прибор не обязательно хорошо измеряет большие ускорения. Представим, что фазовый сдвиг определяется через:

$$\cos(\Delta\Phi)$$

Функция косинуса периодична.

Одинаковое значение сигнала может соответствовать фазам:

$$\Delta\Phi$$

$$\Delta\Phi + 2\pi$$

$$\Delta\Phi + 4\pi$$

и так далее.

Следовательно, при больших или быстро изменяющихся ускорениях возникает неоднозначность: необходимо определить, сколько полных интерференционных периодов прошло.

Для лабораторного гравиметра это сравнительно легко.

Для маневрирующего самолета задача намного сложнее.

Именно здесь особенно полезна гибридизация с классическим акселерометром.

Классический датчик имеет широкий динамический диапазон и высокую скорость.

Квантовый обеспечивает точный долговременный эталон.

Почему нужен классический акселерометр рядом с квантовым

Может показаться странным: если мы строим квантовый акселерометр, зачем устанавливать рядом обычный?

Потому что оба прибора имеют взаимодополняющие свойства.

Классический датчик хорошо отслеживает:

быстрые вибрации;

удары;

маневры;

большие ускорения.

Квантовый датчик особенно ценен для:

долговременной стабильности;

контроля систематического смещения;

абсолютной калибровки;

медленно меняющихся составляющих.

Поэтому практическая архитектура может выглядеть так:

быстрый классический акселерометр + медленный квантовый акселерометр

Классический датчик помогает интерпретировать каждый квантовый цикл.

Квантовый датчик периодически корректирует дрейф классического.

Именно такая гибридизация может стать одним из наиболее реалистичных путей внедрения квантовой навигации.

Частота измерений

Холодноатомный интерферометр работает циклически.

Необходимо:

загрузить атомы;

охладить их;

подготовить;

провести интерферометрию;

считать результат;

начать новый цикл.

Поэтому квантовый датчик не обязательно выдает данные тысячи раз в секунду.

У некоторых архитектур частота обновления может находиться в диапазоне единиц или десятков герц, в зависимости от конструкции.

Для сравнения, классическая IMU может выдавать данные с частотой:

сотни герц;

тысячи герц;

иногда еще выше.

Следовательно, прямая замена классической IMU квантовым устройством пока не всегда рациональна.

Гибридная система позволяет использовать преимущества обоих подходов.

Мертвое время

Период между окончанием одного измерения и началом следующего называют **мертвым временем**.

В этот момент новый квантовый результат отсутствует.

Мертвое время может приводить к дополнительным проблемам.

Например, высокочастотные вибрации, происходящие между измерениями, могут преобразовываться в низкочастотную ошибку.

Это один из вариантов aliasing — наложения частот.

Для борьбы с этим разрабатываются схемы:

- с перекрывающимися атомными облаками;
- с несколькими одновременно работающими ансамблями;
- с непрерывными или квазинепрерывными измерениями;
- с коррекцией по классическим датчикам.

Таким образом, увеличение частоты обновления является одной из важных инженерных задач.

Bragg-интерферометрия

Рамановские переходы — не единственный способ управлять атомными волнами.

Другой подход основан на **брэгговской дифракции** атомов на оптической решетке.

В этом случае можно изменить импульс атома, не обязательно переводя его в другое внутреннее состояние.

Условно:

$$|p\rangle \rightarrow |p + 2n\hbar k\rangle$$

где n зависит от порядка процесса.

Bragg-интерферометрия удобна тем, что разные пути могут оставаться в одном внутреннем состоянии.

Это иногда уменьшает чувствительность к определенным систематическим эффектам.

Выбор между Raman- и Bragg-схемами зависит от задачи и конструкции прибора.

Large Momentum Transfer

Из основной формулы:

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} a T^2$$

следует еще один способ увеличить чувствительность — увеличить эффективную передачу импульса.

Если вместо одного элементарного импульсного перехода передать атому несколько фотонных импульсов, траектории расходятся сильнее.

Так появились методы **Large Momentum Transfer — LMT**, передачи большого импульса.

Условно:

$$\Delta p = N \hbar k_{\text{eff}}$$

где N может быть больше единицы.

Тогда эффективная чувствительность также увеличивается.

Это позволяет частично компенсировать ограничение на размер прибора: вместо значительного увеличения T можно попытаться увеличить разделение траекторий импульсными методами.

Но большое число взаимодействий предъявляет еще более строгие требования к:

лазерной мощности;

фазовой стабильности;

однородности светового поля;

точности импульсов.

Получается еще один характерный для квантовой техники компромисс.

Что значит «контраст интерференции»

В идеальном интерферометре вероятность могла бы изменяться практически от нуля до единицы.

В реальной установке интерференционные колебания имеют меньшую амплитуду.

Это характеризуется контрастом C :

$$P = \frac{1}{2} [1 + C \cos(\Delta\Phi)]$$

Если:

$$C = 1$$

контраст идеален.

Если:

$$C \rightarrow 0$$

интерференция практически исчезает.

Контраст уменьшается из-за:

неоднородности атомного облака;

неправильной длительности импульсов;

фазовых шумов;

декогеренции;

магнитных градиентов;

различий волновых фронтов;

недостаточного перекрытия волновых пакетов.

Поэтому высокий контраст является одним из показателей качества интерферометра.

От одного атома к миллионам

Обычно измерение проводится не над одним атомом.

Используется ансамбль, содержащий большое число атомов.

Каждый атом представляет собой отдельную реализацию квантового эксперимента.

После последнего импульса измеряется статистическое распределение состояний.

Если всего зарегистрировано N атомов, статистическая неопределенность в простейшем случае уменьшается приблизительно как:

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Поэтому большое число атомов улучшает отношение сигнал/шум.

Но слишком плотное облако может создавать дополнительные взаимодействия между атомами.

В реальном приборе снова приходится искать оптимальный компромисс.

Почему фаза лазера должна быть стабильной

Лазер в атомном интерферометре выполняет не только роль источника импульса. Он одновременно является фазовым эталоном.

Каждый импульс передает атомам информацию о фазе светового поля в конкретный момент времени.

Если лазерная система сама имеет случайный фазовый шум, он попадает в результат измерения.

Поэтому необходимы:

узкополосные лазеры;

стабилизация частоты;

фазовая синхронизация;

стабильные оптические пути;

высококачественные генераторы опорной частоты.

Это объясняет, почему оптическая и радиочастотная части квантового датчика иногда оказываются не менее сложными, чем сама атомная система.

Волновой фронт лазера

В идеальной формуле считается, что лазерная фаза одинакова по всему поперечному сечению атомного облака.

В реальности волновой фронт может быть слегка искривлен или искажен.

Разные атомы проходят через разные его участки и получают немного разные фазы.

Поскольку облако имеет конечную температуру, от цикла к циклу распределение атомов немного меняется.

В результате искажение волнового фронта способно превращаться в систематическую ошибку ускорения.

Это хороший пример того, насколько необычна метрология квантового прибора:

даже почти незаметное несовершенство формы лазерного фронта может оказаться существенным для навигационной точности.

Что измеряет прибор на самом деле

На бытовом уровне принято говорить:

квантовый акселерометр измеряет ускорение атомами.

Но более точная формулировка звучит иначе.

Прибор измеряет **разность фаз атомного интерферометра относительно фаз лазерной системы**, а затем по математической модели восстанавливает ускорение.

Цепочка выглядит так:

**движение платформы → изменение относительной геометрии атомов и лазеров
→ изменение квантовой фазы → изменение населенности состояний → фотосигнал
→ цифровое число → оценка ускорения**

Это важнейший принцип.

Квантовый датчик не избавляет от вычислений.

Напротив, для его работы необходима сложная математическая обработка.

Полный измерительный цикл

Теперь можно собрать всю процедуру в одну последовательность.

Этап 1. Загрузка атомов

В вакуумной камере создается атомный пар.

Этап 2. Лазерное охлаждение

Скорость атомов уменьшается.

Этап 3. Захват

Магнито-оптическая ловушка собирает холодное облако.

Этап 4. Подготовка состояния

Атомы переводятся в выбранное внутреннее состояние.

Этап 5. Освобождение

Ловушка выключается, и атомы начинают свободное движение.

Этап 6. Первый

$$\pi/2$$

-импульс

Создается суперпозиция двух импульсных состояний.

Этап 7. Свободная эволюция

$$T$$

Волновые пакеты расходятся и накапливают фазу.

Этап 8.

$$\pi$$

-импульс

Квантовые траектории перенаправляются.

Этап 9. Вторая свободная эволюция

$$T$$

Волновые пакеты снова сближаются.

Этап 10. Второй

$$\pi/2$$

-импульс

Происходит рекомбинация и интерференция.

Этап 11. Детектирование

Измеряются N_g и N_e .

Этап 12. Вычисление вероятности

$$P_e = \frac{N_e}{N_g + N_e}$$

Этап 13. Определение фазы

Из интерференционного сигнала восстанавливается $\Delta\Phi$.

Этап 14. Вычисление ускорения

$$a = \frac{\Delta\Phi}{k_{\text{eff}} T^2}$$

Этап 15. Передача данных в навигационный вычислитель

Полученное ускорение объединяется с данными других датчиков.

Так атомное облако превращается в числовой поток навигационной информации.

Атомный интерферометр как абсолютный эталон

В классическом акселерометре необходимо знать характеристики изготовленной человеком конструкции:

массу;

жесткость;

геометрию;

параметры электроники.

Они способны изменяться со временем.

В атомном интерферометре основная шкала связана с величинами:

$$k_{\text{eff}}$$

и

$$T$$

Время может быть связано с чрезвычайно стабильным частотным эталоном.

Длина волны лазера также может быть точно стабилизирована относительно атомного перехода.

Поэтому атомный интерферометр обладает возможностью очень стабильного и воспроизводимого определения масштаба измерения.

Именно это является одним из главных его преимуществ для долгосрочной навигации.

Но абсолютный не значит безошибочный

Слово «абсолютный» легко понять неправильно.

Оно не означает, что прибор не имеет ошибок.

Реальный атомный интерферометр подвержен:

вибрациям;

вращению;

магнитным полям;

световым сдвигам;

фазовому шуму;

ошибкам волнового фронта;

температурному разбросу атомов;

колебаниям лазерной мощности;

конечному числу атомов;

ошибкам детектирования.

Преимущество заключается не в исчезновении физической метрологии.

Преимущество заключается в том, что основной измерительный эталон связан с фундаментальными свойствами атомов и света, а не исключительно с геометрией конкретной механической детали.

От акселерометра к гироскопу

До сих пор мы рассматривали главным образом линейное ускорение.

Но атомный интерферометр чувствителен и к вращению.

Если система вращается, геометрия двух квантовых путей относительно корпуса изменяется.

Возникает фазовый эффект, связанный с вращением и эффектом Саньяка.

Это позволяет создать атомный гироскоп.

Но для измерения вращения необходимо организовать интерферометр так, чтобы его квантовые траектории охватывали эффективную площадь.

Именно эта площадь станет одной из ключевых величин следующей главы.

Если атомный акселерометр можно представить как квантовый аналог чрезвычайно стабильного линейного датчика движения, то атомный гироскоп становится квантовым измерителем вращения.

Его работа приводит нас к одному из самых красивых явлений интерферометрической физики — эффекту Саньяка.

Глава 6. Квантовый гироскоп

Глава 6. Квантовый гироскоп
Атомный интерферометр измеряет вращение по фазовому сдвигу эффекта Саньяка

1. Идея: эффект Саньяка

Неподвижная система Вращающаяся система

При вращении контуров в противоположных направлениях волны проходят разные пути и накапливают разную фазу.

2. Световой интерферометр Саньяка

Два луча света проходят замкнутый контур в противоположных направлениях.

$\Delta\Phi_S = \frac{8\pi A \Omega}{\lambda c}$

A – площадь контура
 Ω – угловая скорость
 λ – длина волны
 c – скорость света

Чем больше площадь A , тем выше чувствительность к вращению.

3. Атомный интерферометр (гироскоп)

Лазерные импульсы создают две траектории атомов.

При вращении прибора появляется фазовый сдвиг.

Фаза зависит от проекции угловой скорости на нормаль к площади A .

$\Delta\Phi_S = \frac{2m}{\hbar} \Omega \cdot A$

m – масса атома
 $\hbar$ – приведен. пост. Планка
 Ω – угловая скорость
 A – вектор площади

4. Площадь интерферометра

Две траектории атомов охватывают эффективную площадь A .

Чем больше эта площадь, тем выше чувствительность.

5. Кориолисова сила

Во вращающейся системе движущиеся атомы испытывают силу Кориолиса.

$\vec{F}_C = -2m \Omega \times \vec{v}$

$\vec{v}$ – скорость атомов

6. Отделение ускорения и вращения

Два встречных атомных облака: вклад ускорения одинаков, вклад вращения – противоположен.

Сумма: $\frac{\Delta\Phi_+ - \Delta\Phi_-}{2} = \Delta\Phi_a$ (ускорение)
Разность: $\frac{\Delta\Phi_+ + \Delta\Phi_-}{2} = \Delta\Phi_\Omega$ (вращение)

7. Чувствительность к вращению

Для кориолисовой схемы:

$\Delta\Phi_\Omega = 2k_{eff} \cdot (\vec{v} \times \Omega) T^2$

k_{eff} – эффективный волновой вектор
 $\vec{v}$ – скорость атомов
 Ω – угловая скорость
 T – интервал между импульсами

8. Пример: атомный фонтан – гироскоп

Атомы запускаются вверх и получают горизонтальную скорость. Лазерные импульсы создают интерферометр, охватывающий площадь.

9. Трехосевой квантовый гироскоп

Три взаимно перпендикулярных интерферометра измеряют три компоненты угловой скорости.

$\begin{cases} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{cases}$

10. Сигнал и измерение

детектирование → N_e, N_g → $P = \frac{N_e}{N_e + N_g}$ → $\Delta\Phi$ → $\Omega = \frac{\Delta\Phi}{K_\Omega}$

вероятность фазовый сдвиг угловая скорость

11. Гибридная наангационная система

быстрый классический гироскоп (широкий динамический диапазон) + квантовый гироскоп (высокая долговременная стабильность) → навигационный вычислитель (ИНС)

Преимущества квантового гироскопа

- ✓ чрезвычайно высокая чувствительность
- ✓ опора на фундаментальные константы
- ✓ долговременная стабильность масштабного коэффициента
- ✓ ориентация по вращению Земли (гироскопас)
- ✓ идеален для навигации без GNSS

Основные сложности

- ✗ большая площадь / время полета
- ✗ чувствительность к вибрациям
- ✗ отделение ускорения и вращения
- ✗ динамический диапазон
- ✗ сложность и энергопотребление

Акселерометр сообщает навигационной системе, как изменяется поступательное движение объекта. Но этого недостаточно.

Самолет может двигаться вперед и одновременно менять крен, тангаж или курс. Подводная лодка способна сохранять почти постоянную скорость, но поворачивать. Космический аппарат может практически не испытывать линейного ускорения и при этом вращаться вокруг собственного центра масс.

Навигационная система должна поэтому измерять не только ускорение, но и **угловую скорость**.

Эту задачу выполняет гироскоп.

В классических системах для этого используются механические, кольцевые лазерные, волоконно-оптические или MEMS-гироскопы.

В квантовой навигации ту же задачу можно решить с помощью атомной интерферометрии.

Основная идея остается знакомой: лазерные импульсы создают две квантовые траектории, затем вновь объединяют их и измеряют разность фаз.

Но теперь фазовый сдвиг возникает прежде всего потому, что во время движения атомов **сам прибор вращается**.

В результате атомный интерферометр превращается в квантовый гироскоп.

Почему акселерометра недостаточно

Представим самолет, летящий горизонтально.

Три акселерометра измеряют ускорения вдоль трех осей корпуса.

Но чтобы перевести эти данные в координаты относительно Земли, необходимо знать, куда в данный момент направлены оси самолета.

Если самолет накренился, прежнее направление «вверх» относительно корпуса уже не совпадает с вертикалью.

Навигационный компьютер должен поэтому постоянно определять ориентацию.

Для этого необходимо измерять угловую скорость:

$$\Omega = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$$

Из нее вычисляется изменение ориентации.

В простейшем одномерном случае:

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \Omega(\tau) d\tau$$

Как и в случае акселерометра, возникает проблема интегрирования ошибки.

Если гироскоп имеет постоянное смещение:

$$\delta\Omega$$

то ошибка угла растет примерно как:

$$\delta\theta = \delta\Omega t$$

А затем неправильная ориентация начинает вносить ошибки и в обработку акселерометров.

Поэтому стабильность гироскопа критически важна для долговременной автономной навигации.

Что именно измеряет гироскоп

В повседневном языке гироскоп часто представляют как прибор, «показывающий направление».

Но современный навигационный гироскоп обычно измеряет прежде всего **угловую скорость**.

Например:

$$\Omega = 0,01^\circ/\text{с}$$

означает, что система поворачивается на одну сотую градуса в секунду.

Интегрируя угловую скорость, навигационный компьютер определяет изменение ориентации.

Поэтому гироскоп для вращения играет примерно ту же роль, что акселерометр для поступательного движения:

акселерометр → линейное ускорение

гироскоп → угловая скорость

В полноценной IMU обычно используются три гироскопических канала:

$$\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$$

Эффект Саньяка

Одним из фундаментальных физических способов измерения вращения является **эффект Саньяка**.

Представим замкнутый контур.

По нему одновременно запускаются две волны:

одна по часовой стрелке;

другая против часовой стрелки.

Если система не вращается, условия прохождения двух путей симметричны.

Если система вращается, симметрия нарушается.

Одна волна движется по контуру в направлении вращения системы, другая — против.

После прохождения контура между ними возникает разность времени распространения и, соответственно, разность фаз.

Именно этот фазовый сдвиг позволяет определить вращение.

Световой интерферометр Саньяка

Рассмотрим сначала оптический вариант.

Световой луч разделяется на два.

Два луча проходят замкнутый контур в противоположных направлениях.

Затем они снова объединяются.

Если устройство вращается, появляется фазовый сдвиг Саньяка.

Для оптического интерферометра в одной из распространенных форм:

$$\Delta\Phi_S = \frac{8\pi A\Omega}{\lambda c}$$

где:

A

— площадь, охватываемая контуром;

Ω

— угловая скорость;

λ

— длина волны света;

c

— скорость света.

Из формулы видно главное:

чем больше площадь контура, тем выше чувствительность к вращению.

На этом принципе работают кольцевые лазерные и волоконно-оптические гироскопы.

Почему площадь так важна

В акселерометре мы стремились увеличить время между импульсами T .

В гироскопе появляется еще одна важная геометрическая характеристика — **площадь интерферометра**.

Если две траектории практически совпадают и не образуют заметного контура, чувствительность к вращению мала.

Если же они расходятся и затем вновь сходятся, образуя большую эффективную площадь, эффект Саньяка усиливается.

Схематично:

маленький контур → небольшой фазовый сдвиг

большой контур → большой фазовый сдвиг

Поэтому задача квантового гироскопа состоит не только в создании интерференции, но и в формировании подходящей геометрии атомных траекторий.

Волны материи вместо света

В атомном гироскопе роль интерферирующих волн играют уже не световые лучи.

Используются волны материи.

Лазерные импульсы разделяют атомное состояние на две компоненты с различными импульсами.

Они движутся по разным траекториям.

Если система вращается, геометрия этих траекторий относительно лазерной системы изменяется.

Возникает фазовый сдвиг.

Для атомного интерферометра эффект Саньяка можно выразить в форме:

$$\Delta\Phi_S = \frac{2m}{\hbar} \Omega \cdot A$$

где:

m

— масса атома;

$\hbar$

— приведенная постоянная Планка;

Ω

— вектор угловой скорости;

A

— вектор эффективной площади интерферометра.

Эта формула особенно наглядно показывает значение площади контура.

Вектор площади

Площадь интерферометра — не просто число.

Она имеет направление.

Поэтому удобно использовать вектор:

$$\mathbf{A}$$

Он направлен перпендикулярно плоскости, в которой лежит интерферометр.

Фазовый эффект зависит от скалярного произведения:

$$\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{A}$$

Следовательно, гироскоп наиболее чувствителен к вращению вокруг оси, перпендикулярной плоскости интерферометра.

Если вращение происходит вокруг другой оси, измеряется только соответствующая проекция.

Это аналогично тому, что атомный акселерометр измеряет проекцию ускорения на направление $\mathbf{k}_{\text{eff}}$.

Как создать площадь в атомном интерферометре

В обычной трехимпульсной схеме атомы могут двигаться преимущественно вдоль одной оси.

Для высокой чувствительности к вращению необходимо сформировать пространственно разнесенные траектории.

Один из подходов состоит в том, чтобы сообщить атомам начальную скорость поперек направления лазерных импульсов.

Затем импульсы $\pi/2 - \pi - \pi/2$ разделяют траектории.

В результате две компоненты проходят разные пространственные пути, образуя замкнутую эффективную площадь.

Условно:

поперечное движение атомов + импульсное разделение → интерферометрический контур

Чем больше поперечная скорость, время взаимодействия и переданный импульс, тем больше эффективная площадь.

Сила Кориолиса

Существует еще один удобный способ посмотреть на работу атомного гироскопа. В вращающейся системе координат движущаяся частица испытывает силу Кориолиса:

$$\mathbf{F}_C = -2m\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}$$

Соответствующее ускорение:

$$\mathbf{a}_C = -2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}$$

Если холодные атомы имеют известную скорость $\mathbf{V}$, вращение прибора создает поперечное кориолисово ускорение.

Атомный интерферометр чрезвычайно чувствителен к ускорениям.

Поэтому можно измерить эту составляющую и восстановить угловую скорость.

В этом смысле атомный гироскоп можно рассматривать одновременно как: интерферометр Саньяка;

чрезвычайно чувствительный измеритель кориолисова ускорения.

Оба описания относятся к одной и той же физике.

Формула кориолисовой фазы

Для типичной атомно-интерферометрической схемы вклад вращения может иметь вид:

$$\Delta\Phi_{\Omega} = 2\mathbf{k}_{\text{eff}} \cdot (\mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega}) T^2$$

Здесь:

$\mathbf{k}_{\text{eff}}$

задает направление чувствительности;

$\mathbf{v}$

— скорость атомов;

$\boldsymbol{\Omega}$

— угловая скорость;

T

— интервал между импульсами.

Из этой формулы видно, что сигнал вращения исчезает, если геометрия выбрана неудачно.

Для высокой чувствительности векторы должны быть правильно ориентированы.

Именно поэтому квантовый гироскоп геометрически сложнее простого одноосевого атомного акселерометра.

Как отделить ускорение от вращения

Здесь появляется серьезная проблема.

Атомный интерферометр чувствителен одновременно к:

линейному ускорению;

вращению.

Результирующая фаза может содержать оба вклада:

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_a + \Delta\Phi_\Omega + \Delta\Phi_{\text{прочее}}$$

Поэтому необходимо научиться разделять эти эффекты.

Один из методов — использовать два атомных облака, движущихся в противоположных направлениях.

Пусть их скорости:

$$+\mathbf{v}$$

и

$$-\mathbf{v}$$

Для линейного ускорения фазовый сдвиг будет примерно одинаковым.

Для вращения кориолисовский вклад изменит знак.

Получаются две фазы:

$$\Delta\Phi_+ = \Delta\Phi_a + \Delta\Phi_\Omega$$

$$\Delta\Phi_- = \Delta\Phi_a - \Delta\Phi_\Omega$$

Теперь можно взять сумму:

$$\frac{\Delta\Phi_+ + \Delta\Phi_-}{2} = \Delta\Phi_a$$

и разность:

$$\frac{\Delta\Phi_+ - \Delta\Phi_-}{2} = \Delta\Phi_\Omega$$

Таким образом, одна система потенциально способна одновременно измерять и ускорение, и вращение.

Два встречных атомных облака

Практически это может выглядеть следующим образом.

Формируются два облака холодных атомов.

Одно запускается вправо.

Второе — влево.

Оба проходят через одну и ту же лазерную систему.

Если вся установка испытывает линейное ускорение, оба интерферометра получают похожий фазовый вклад.

Если установка вращается, эффект Кориолиса действует на два облака противоположным образом.

Так появляется дифференциальное измерение.

Его преимущество состоит еще и в том, что часть общих помех может взаимно вычитаться.

Например, некоторые фазовые колебания лазера воздействуют на оба ансамбля одинаково.

Атомный фонтан как гироскоп

Для квантового гироскопа также можно использовать атомный фонтан.

Холодное облако запускается вверх.

Одновременно атомам сообщается горизонтальная скорость.

Получается параболическая траектория.

Лазерные импульсы создают две квантовые ветви.

Во время подъема и падения они охватывают определенную пространственную площадь.

Если вся установка вращается, возникает фазовый сдвиг Саньяка.

Чем дольше атомы находятся в свободном полете, тем большую площадь потенциально можно получить.

Поэтому атомные фонтаны привлекательны для высокоточной гироскопии.

Но снова возникает проблема размеров.

Вращение Земли

Квантовые гироскопы могут быть настолько чувствительными, что непосредственно измеряют вращение Земли.

Угловая скорость Земли приблизительно равна:

$$\Omega_E \approx 7,292 \times 10^{-5} \text{ рад/с}$$

Это соответствует одному полному обороту примерно за сутки.

Для бытового датчика такая угловая скорость кажется очень малой.

Для высокоточного атомного интерферометра она является вполне измеряемым сигналом.

Более того, при обработке данных вращение Земли необходимо учитывать как систематическую составляющую.

Это означает, что прибор способен определять не только быстрое вращение самолета или корабля, но и чрезвычайно медленные изменения ориентации.

Гирокомпас

Если гироскоп достаточно чувствителен, вращение Земли можно использовать для определения направления на географический север.

Так работает принцип гирокомпаса.

Магнитный компас ориентируется по магнитному полю Земли.

Гирокомпас использует ее вращение.

Это важно, потому что магнитный север и географический север не совпадают, а магнитное поле может быть сильно искажено:

металлическими конструкциями;

электрооборудованием;

силовыми кабелями;

локальными геологическими аномалиями.

Высокоточный квантовый гироскоп потенциально способен выполнять ориентацию по вращению самой Земли, не используя магнитное поле.

Почему это особенно важно для подводных лодок

Для подводной лодки ориентация представляет особую проблему.

На поверхности можно использовать:

GNSS;

астрономические ориентиры;

внешние радиосигналы.

Под водой возможности резко сокращаются.

Магнитный компас также не является идеальным решением из-за огромного количества металлического оборудования и электромагнитных источников на борту.

Поэтому высокостабильные инерциальные гироскопы имеют огромное значение.

Если квантовый гироскоп сможет значительно уменьшить долговременный дрейф, подводная лодка сможет дольше сохранять точную ориентацию без внешней коррекции.

Именно поэтому квантовая гироскопия имеет стратегическое значение.

Измерение трех осей

Одноосевой гироскоп измеряет только одну компоненту угловой скорости. Для полноценной навигации необходим вектор:

$$\boldsymbol{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$$

Следовательно, нужно измерять вращение вокруг трех взаимно перпендикулярных осей. В классической IMU это сравнительно просто концептуально: устанавливаются три чувствительных элемента.

Для атомной системы задача сложнее.

Необходимо создать несколько независимых чувствительных геометрий либо одну многомерную архитектуру.

Возможны схемы с:

несколькими лазерными осями;

несколькими атомными облаками;

последовательным переключением направлений;

многопетлевыми интерферометрами.

Но каждая дополнительная ось увеличивает число компонентов и сложность калибровки.

Квантовый IMU

Конечная цель навигации — не отдельный квантовый акселерометр или гироскоп. Необходим полноценный **квантовый инерциальный измерительный модуль**. В идеале он должен выдавать шесть величин:

$$a_x, a_y, a_z, \Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$$

То есть три компоненты линейного ускорения и три компоненты угловой скорости. В классической технике такой набор называется шестистепенной IMU.

Для квантового устройства требуется добиться того же результата при сохранении: компактности;

высокой частоты измерений;

большого динамического диапазона;

устойчивости к вибрациям;

долговременной стабильности.

Именно переход от отдельного лабораторного сенсора к полноценному шестиканальному квантовому IMU является одним из важнейших инженерных этапов.

Почему гироскоп сложнее акселерометра

На первый взгляд оба устройства используют одну и ту же атомную интерферометрию. Но требования отличаются.

Для акселерометра достаточно получить фазовую чувствительность вдоль определенной оси.

Для гироскопа нужно дополнительно:

- создать эффективную площадь;
- контролировать поперечную скорость атомов;
- учитывать кориолисовы эффекты;
- отделять ускорение от вращения;
- стабилизировать геометрию нескольких траекторий.

Кроме того, любое нежелательное движение атомного облака может быть ошибочно интерпретировано как вращение.

Поэтому квантовая гироскопия требует чрезвычайно точного контроля начальной скорости атомов.

Температура атомного облака и ошибка вращения

Даже после лазерного охлаждения атомы не имеют абсолютно одинаковой скорости. Существует некоторое распределение:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \delta\mathbf{v}$$

Поскольку кориолисова фаза зависит от скорости:

$$\Delta\Phi_{\Omega} \propto \mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega}$$

разброс скоростей приводит к разбросу фаз.

Следовательно, температура атомного облака непосредственно влияет на качество гироскопического измерения.

Чем холоднее атомы, тем меньше неконтролируемый разброс скоростей и тем точнее можно определить вращение.

Вот еще одна причина, почему лазерное охлаждение настолько важно.

Ошибка начального положения

Важна не только скорость.

Если атомное облако каждый цикл появляется немного в другом месте, оно взаимодействует с другими участками лазерного волнового фронта.

При наличии оптических искажений это может создать ложный фазовый сдвиг.

Для гироскопа такая ошибка особенно опасна, потому что система пытается измерять чрезвычайно небольшие изменения пространственной геометрии траекторий.

Поэтому требуется стабильное воспроизведение:

положения облака;

скорости;

температуры;

размеров;

внутреннего состояния.

Каждый измерительный цикл должен начинаться практически одинаково.

Вибрации и вращение

Атомный гироскоп устанавливается на реальную подвижную платформу.

Она испытывает:

вибрации двигателей;

удары;

линейные ускорения;

высокочастотные вращения;

аэродинамические нагрузки.

Все это может создавать фазовые сдвиги, намного превосходящие интересующий длительный сигнал.

Поэтому квантовый гироскоп часто нуждается в классических датчиках.

Высокоскоростной MEMS-, FOG- или другой гироскоп может отслеживать быстрые движения.

Атомный сенсор обеспечивает долговременную стабильность.

Опять возникает гибридная архитектура.

Быстрый и медленный гироскоп

Пусть классический гироскоп измеряет:

$$\Omega_{\text{класс}}(t) = \Omega(t) + b(t) + n(t)$$

где:

$$\Omega(t)$$

— истинная угловая скорость;

$$b(t)$$

— медленно меняющийся bias;

$$n(t)$$

— шум.

Квантовый гироскоп может реже выдавать более стабильную оценку:

$$\Omega_{\text{квант}}$$

Сравнивая два значения, система оценивает bias классического датчика.

Затем он корректируется.

Получается:

классический гироскоп → быстрые данные

квантовый гироскоп → долговременная коррекция

Это может быть значительно практичнее полной замены классического гироскопа.

Почему нельзя просто сделать огромный интерферометр

Если чувствительность растёт с площадью A , возникает очевидная идея: просто сделать контур очень большим.

Для лаборатории это иногда возможно.

Для навигационной системы — нет.

Гироскоп должен помещаться:

в самолет;

корабль;

автомобиль;

подводный аппарат;

ракету.

Кроме того, большие траектории означают:

большее время свободного движения;

более крупную вакуумную камеру;

сложную оптику;

более строгий контроль волнового фронта.

Поэтому разработчики ищут способы увеличить **эффективную**, а не обязательно геометрическую площадь.

Многопетлевые интерферометры

Одним из способов повысить чувствительность является создание нескольких интерферометрических петель.

Атомные траектории могут многократно перенаправляться лазерными импульсами.

Условно вместо одного контура получается:

петля + петля + петля

Эффекты вращения от отдельных участков могут складываться.

Таким образом, эффективная площадь возрастает, хотя физический размер устройства увеличивается значительно меньше.

Но усложняется последовательность лазерных импульсов.

Каждый дополнительный импульс должен иметь:

правильную фазу;

точную частоту;

заданную длительность;

стабильную мощность.

Large Momentum Transfer и гироскоп

Методы LMT, рассмотренные в предыдущей главе, также полезны для гироскопии.

Если атомным компонентам сообщить больший относительный импульс, их траектории расходятся сильнее.

Следовательно, увеличивается охватываемая площадь.

Если:

$$\Delta p = N \hbar k_{\text{eff}}$$

то при прочих равных эффективная площадь также может увеличиваться.

Это дает возможность повышать чувствительность без пропорционального увеличения времени полета.

Но цена — более сложная лазерная система.

Кольцевые атомные интерферометры

Особенно привлекательна идея заставить атомы двигаться по замкнутой кольцевой траектории.

Тогда геометрия становится похожей на оптический кольцевой гироскоп.

Вместо света в двух направлениях распространяются атомные волны.

Возможны различные реализации:

магнитные ловушки;

оптические кольцевые ловушки;

атомные волноводы;

Bose–Einstein condensate.

Такие схемы потенциально позволяют многократно обходить один и тот же контур и увеличивать эффект Саньяка.

Однако создание стабильного кольцевого атомного гироскопа для мобильной навигации остается очень сложной задачей.

Bose–Einstein condensate

При еще более глубоком охлаждении атомный газ может перейти в состояние **конденсата Бозе–Эйнштейна**.

Большое число атомов начинает описываться общей когерентной квантовой волной.

Это выглядит чрезвычайно привлекательно для интерферометрии.

Вместо большого ансамбля сравнительно независимых атомов получается очень хорошо контролируемый когерентный источник волн материи.

Потенциальные преимущества:

узкое распределение скоростей;

высокая пространственная когерентность;

возможность сложного управления атомными волнами.

Но создание конденсата требует дополнительного охлаждения и увеличивает сложность системы.

Поэтому не очевидно, что именно ВЕС станет основой массовой квантовой навигации.

Динамический диапазон гироскопа

Как и атомный акселерометр, квантовый гироскоп сталкивается с проблемой периодичности интерференционного сигнала.

Если измеряется:

$$P = \frac{1}{2}[1 + C \cos(\Delta\Phi)]$$

то фазы, отличающиеся на 2π , дают одинаковый сигнал.

При быстром вращении фазовый сдвиг может пройти множество периодов между измерениями.

Возникает неоднозначность.

На спокойной лабораторной установке это не является большой проблемой.

На маневрирующем самолете — является.

Поэтому широкий динамический диапазон снова требует либо сложных алгоритмов, либо помощи классического гироскопа.

От фазы к угловой скорости

В идеализированной ситуации квантовый гироскоп измеряет фазу:

$$\Delta\Phi_{\Omega}$$

Зная геометрию интерферометра и параметры атомного движения, можно вычислить угловую скорость.

Условно:

$$\Omega = \frac{\Delta\Phi_{\Omega}}{K_{\Omega}}$$

где K_{Ω} — масштабный коэффициент гироскопа.

Он определяется:

эффективным волновым вектором;

скоростью атомов;

временем между импульсами;

геометрией интерферометра.

Важное преимущество заключается в том, что эти параметры могут быть связаны с фундаментальными физическими эталонами.

Это создает предпосылки для высокой долговременной стабильности масштабного коэффициента.

Что представляет собой полный квантовый гироскоп

Теперь можно собрать устройство по блокам.

Необходимы:

- источник атомов;
- вакуумная камера;
- лазерное охлаждение;
- магнито-оптическая ловушка;
- система подготовки состояния;
- механизм запуска атомных облаков;
- интерферометрические лазеры;
- система стабилизации их частоты и фазы;
- детекторы;
- классические акселерометры;
- классические гироскопы;
- навигационный вычислитель.

То есть реальный квантовый гироскоп является гибридом:

атомной физики + лазерной техники + вакуумной техники + электроники + классической инерциальной навигации + программного обеспечения

Именно поэтому путь к компактному изделию настолько сложен.

Главное преимущество

Главная потенциальная ценность атомного гироскопа заключается не обязательно в том, что он во всех режимах лучше современного FOG или RLG.

Его преимущество — возможность получить новый долговременный инерциальный эталон, основанный на атомах и фундаментальных физических константах.

Если удастся добиться:

малого bias;

высокой стабильности;

компактности;

большого динамического диапазона;

приемлемой частоты измерений,

квантовый гироскоп сможет значительно увеличить время автономной работы ИНС без внешней коррекции.

Именно эта характеристика особенно важна для навигации без GNSS.

Но атомы не решают проблему времени

Теперь у нас есть два важнейших квантовых инерциальных датчика.

Атомный акселерометр измеряет поступательное движение.

Атомный гироскоп — вращение.

Можно представить будущую квантовую IMU:

$$\mathbf{a} + \boldsymbol{\Omega}$$

Но современной навигационной системе требуется еще один фундаментальный эталон.

Время.

Радионавигация измеряет расстояния через время распространения сигнала.

Навигационные компьютеры должны синхронизировать огромное количество измерений.

При потере GNSS необходимо сохранять собственную временную шкалу.

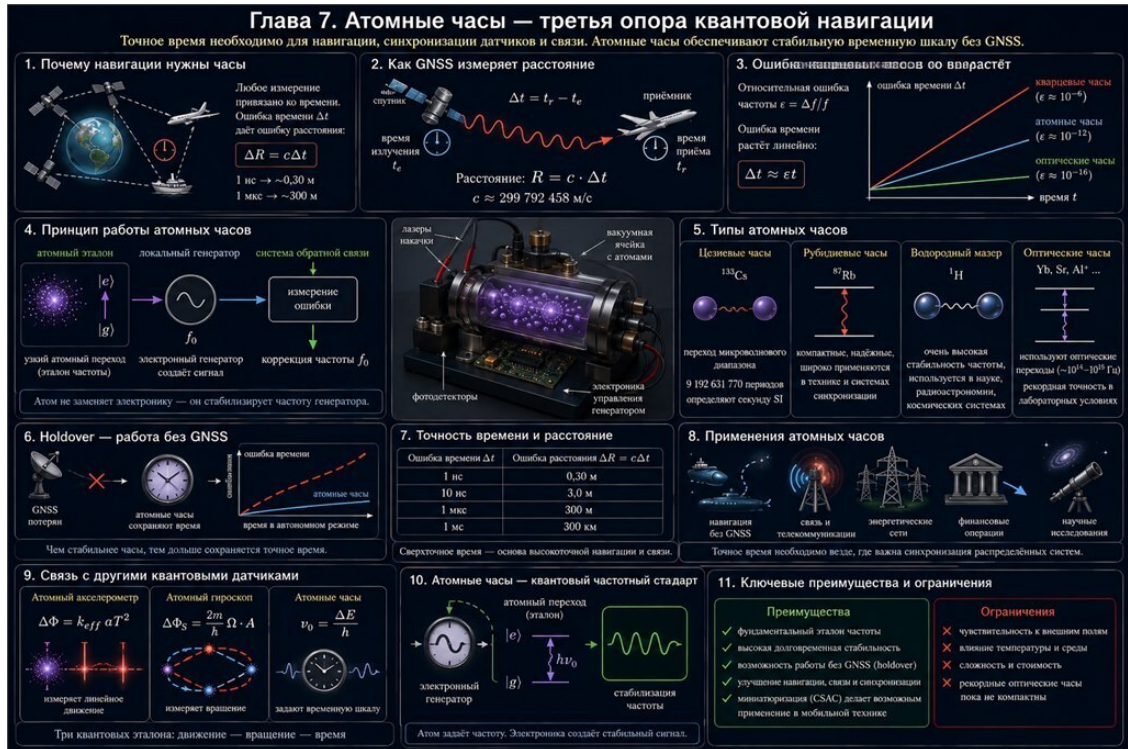
Ошибки времени постепенно превращаются в ошибки синхронизации и положения.

И здесь атомы снова предлагают уникальное решение.

Только теперь используется не движение атома, а строго определенная частота перехода между его энергетическими состояниями.

Так мы переходим к третьей опоре квантовой навигации — **атомным часам**.

Глава 7. Атомные часы — третья опора квантовой навигации



Квантовая навигация обычно ассоциируется с атомными акселерометрами и гироскопами. Они измеряют движение объекта без внешних радиосигналов и позволяют значительно уменьшить дрейф инерциальной системы.

Но существует еще одна величина, без которой современная навигация невозможна. Это **время**.

Любая сложная навигационная система должна не только знать координаты и ориентацию, но и точно понимать, **когда** было выполнено каждое измерение.

Для спутниковой навигации точное время вообще является основой определения расстояния.

Для автономной навигации стабильные часы позволяют:

синхронизировать датчики;

сохранять временную шкалу при потере GNSS;

поддерживать связь;

выполнять точные измерения частоты;

уменьшать ошибки объединения данных;

быстрее восстанавливать спутниковую навигацию после исчезновения помех.

И здесь атомы снова оказываются практически идеальным эталоном.

Только теперь используется не движение атома, как в интерферометре, а **частота перехода между его квантовыми энергетическими состояниями**.

Почему навигации вообще нужны часы

Представим самолет, на котором работают:

три акселерометра;

три гироскопа;

GNSS-приемник;

барометр;

радиолокатор;

камера;

магнитометр.

Каждый датчик передает данные в свой момент времени.

Чтобы объединить их, навигационный компьютер должен знать время каждого измерения.

Если акселерометр сообщил ускорение в один момент, а камера дала координатную поправку на несколько миллисекунд позже, эти данные нельзя бездумно считать одновременными.

При больших скоростях даже небольшая ошибка синхронизации превращается в пространственную ошибку.

Пусть объект движется со скоростью:

$$v = 250 \text{ м/с}$$

Если временная ошибка составляет:

$$\Delta t = 1 \text{ мс}$$

то объект за это время пройдет:

$$\Delta x = v\Delta t = 250 \cdot 10^{-3} = 0,25 \text{ м}$$

При более высоких скоростях эффект возрастает.

Следовательно, время является такой же частью навигационного состояния, как координаты и скорость.

PNT

Именно поэтому используется термин:

PNT — Positioning, Navigation and Timing

то есть:

позиционирование;

навигация;

точное время.

Эти три функции тесно связаны.

Современный GNSS-приемник фактически является одновременно:

навигатором;

высокоточным источником времени.

Атомные часы позволяют сохранить вторую функцию даже тогда, когда внешняя спутниковая синхронизация исчезает.

Как GNSS измеряет расстояние

Спутник передает сигнал, содержащий информацию о моменте его излучения.

Приемник определяет момент прихода.

Если время распространения равно Δt , то расстояние можно приблизительно определить как:

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.