

«Создание пилотного участка территориально распределенной волоконной сети доставки сверхточного времени и частоты»

заместитель начальника ГМЦ ГСВЧ
ФГУП «ВНИИФТРИ» по научной работе
Хромов М.Н.

г. Нижний Новгород
2026 г.



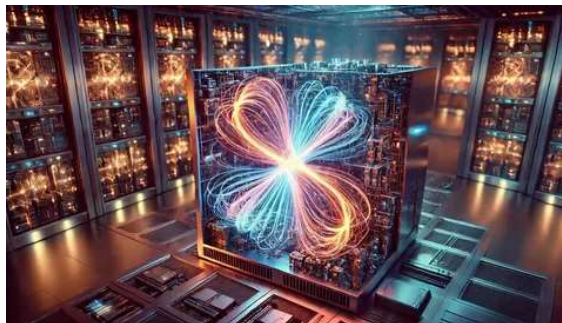
Квантовые технологии



Квантовые коммуникации

КРК

Вспомогательное оборудование
(коммутаторы, маршрутизаторы и др)
оборудование сопряжения участков
квантовой сети (ВОЛС- атмосфера,
различные производители)
Абонентские устройства и
оборудование квантовых
коммуникаций



Квантовые вычисления

Сверхпроводники
Ионы
Нейтральные атомы
Фотоны
И др.

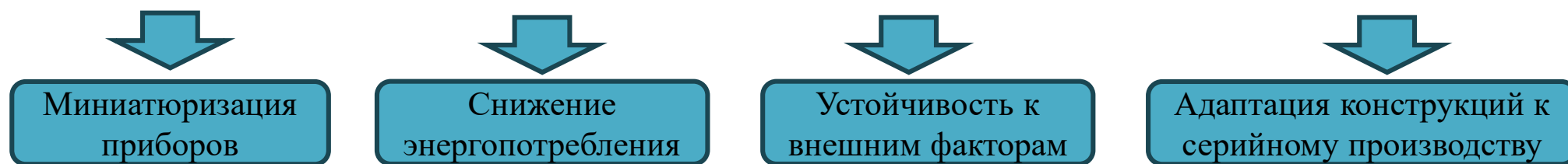


Квантовые сенсоры

магнитометры;
гравиметры;
гироскопы;
акселерометры;
измерители электромагнитного поля;
оптические датчики;
квантовые эталоны;
квантовые измерители (эталон)
времени и др

Текущее состояние развития квантовых сенсоров в РФ

На 2026 г. развитие квантовых сенсоров в мире характеризуется переходом от стадии фундаментальных исследований к этапу прикладной разработки и ограниченной коммерциализации при сохраняющейся неравномерности зрелости отдельных технологических направлений.



В Российской Федерации имеется научно-технологический задел и отдельные разработки мирового уровня, однако должна быть сформирована производственная база, налажен серийный выпуск и осуществлено масштабное отраслевое внедрение квантовых сенсоров.

Требования потребителей

Квантовый компьютер (КК) (нейтральные атомы, ионы)

Система для охлаждения атомов и детектирования состояний

Высокостабильный сигнал оптического диапазона (относительная нестабильность частоты $\approx 10^{-15}$)

КК с квантовым гейтом $\sim <10$ нс (Сверхпроводники и нейтральные атомы)

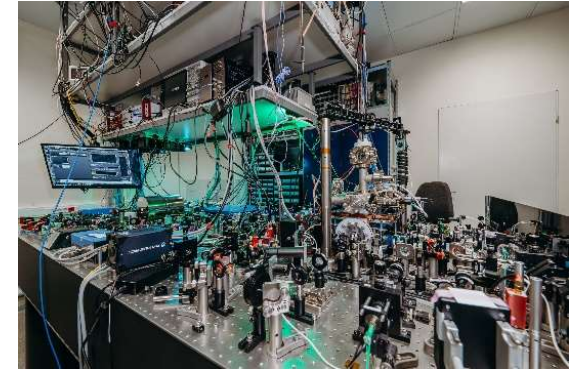
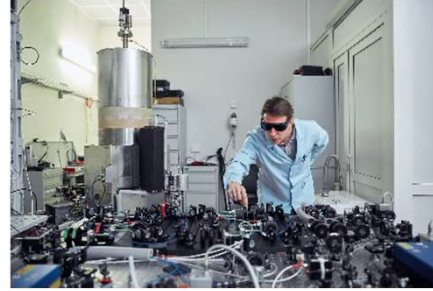
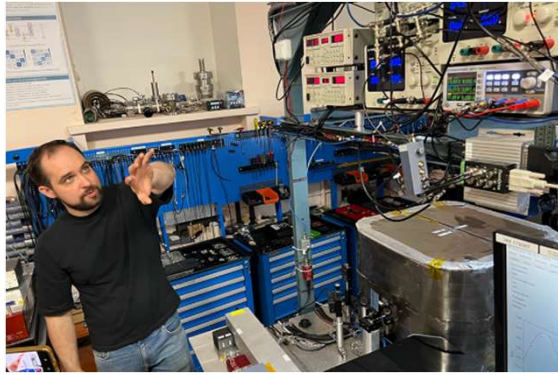
Синхронизация <1 нс

Синхронизация крупных научных установок, геодезический мониторинг, синхронизация аппаратуры квантового шифрования

Синхронизация <1 нс

Требования потребителей сигналов частоты и времени

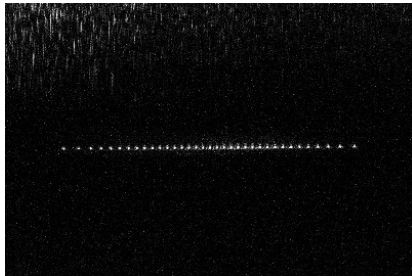
Гражданские потребители ЧВИ	Точность синхронизации	Относительная погрешность по частоте	Технология	Квантовый абрис
Служба времени	~ 100 пс	$1 \cdot 10^{-17}$	ОСЧ, атомный фонтан, водородные СЧ, ядерный СЧ, ВОЛС, ГНСС, Дуплекс	
Геодинамика; радиоастрометрия; высокоточная глобальная навигация; определения ПВЗ методами РСДБ; космическая связь; спутниковая геодезия и картография; калибровка приборов времени – частоты – длины; цифровая оптическая связь	~ 1 нс	$1 \cdot 10^{-15}$	Атомный фонтан, водородные СЧ, ВОЛС, ГНСС, Дуплекс, РТР сервер v2.1	
Системы связи, включая цифровую; телевидение; ВСМ;	1 нс ÷ 10 нс	$5 \cdot 10^{-13} \div 5 \cdot 10^{-14}$	КПН- эффект, двойной радиооптический резонанс, РТР сервер v2, SDH	
Синхронное радиовещание; наземный, морской, воздушный транспорт; NTP	100 мкс ÷ 1 мс	$1 \cdot 10^{-11}$	КПН- эффект, NTP сервер, SDH	
Сейсмическая служба; управление энергосистемами	10 мс ÷ 1 с	$1 \cdot 10^{-5}$	NTP сервер	
Часофикация городов, посёлков, вокзалов, населения	1 с ÷ 30 с		NTP сервер	
Специальные потребители	2 нс ÷ 500 мкс	$1 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-16}$	ОСЧ, атомный фонтан, водородные СЧ	
Наземный беспилотный транспорт	1 нс ÷ 3 нс		ОСЧ, атомный фонтан, водородные СЧ, ВОЛС, ГНСС, Дуплекс	
Квантовый футшток	~ 1 пс	$1 \cdot 10^{-18} \div 1 \cdot 10^{-19}$	ОСЧ, ядерный СЧ	



ГЭТ-1

Квантовый компьютер

ионы Yb^+



*

Лазеры
стабилизированные по
резонатору

«Квантовый фундамент»

1550 нм (абсолютное
значение частоты)

«Квантовый фундамент»

Квантовый компьютер

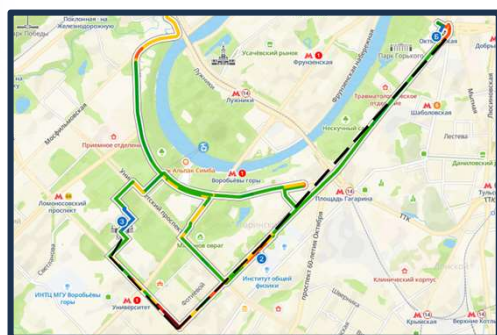
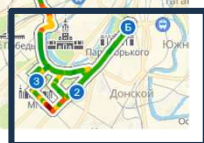
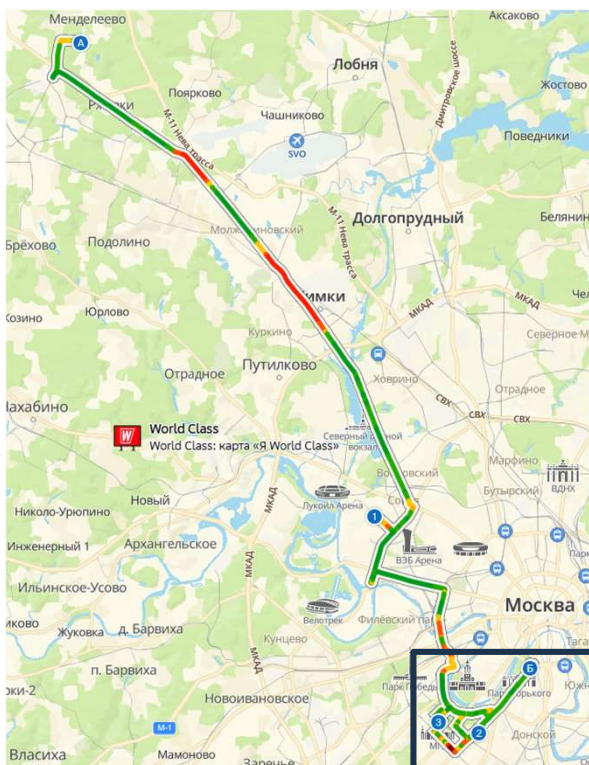
Нейтральные атомы

Лазеры на ULE резонаторе

6

* <https://lebedev.ru/ru/main-news/news/5831>

«Пилотный участок сети сверхточного времени и частоты»



--дальнейшее
взаимодействие,
МГУ, МИСИС

Расположение: ФГУП «ВНИИФТРИ». Эталонный аппаратный комплекс оптических и радиоэлектронных средств распространения по ВОЛС высокоточной информации о времени и частоте.

Назначение: комплекс должен обеспечивать передачу по ВОЛС высокоточной информации:
-о частоте высокостабильного источника лазерного излучения;
-об эталонной частоте и шкале времени UTC(SU) формируемой ГЭВЧ и доставляемой путем пакетной передачи.

Расположение: НИЦ «Курчатовский институт». Аппаратный комплекс оптических и радиоэлектронных средств потребителя 2 класса для распространения по ВОЛС высокоточной информации о времени и частоте.

Назначение: Комплекс должен обеспечивать прием от ГЭВЧ и дальнейшую передачу по ВОЛС высокоточной информации:
-о частоте высокостабильного источника лазерного излучения;
-об эталонной частоте и шкале времени UTC(SU) формируемой ГЭВЧ и доставляемой путем пакетной передачи.

Расположение: ФИАН им. П.Н. Лебедева. Эталонный аппаратный комплекс оптических и радиоэлектронных средств потребителя 1 класса для распространения по ВОЛС высокоточной информации о времени и частоте.

Назначение: комплекс должен обеспечивать передачу по ВОЛС высокоточной информации:
-о частоте высокостабильного источника лазерного излучения;
-об эталонной частоте и шкале времени UTC(SU) формируемой ГЭВЧ и доставляемой путем пакетной передачи.

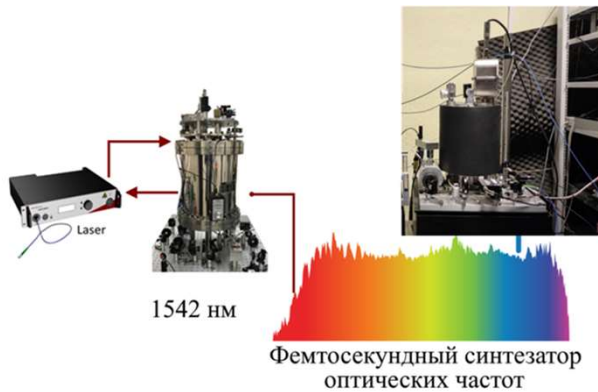
«Пилотный участок сети сверхточного времени и частоты». Состав ч. 1

ФГУП «ВНИИФТРИ»

Система передачи информации об оптической частоте высокостабильного лазера с узкой спектральной линией по выделенным ВОЛС

Система приемо-передающая для доставки на оптической несущей по выделенным ВОЛС высокоточных сигналов частоты и времени с компенсацией фазовых шумов, вносимых линией

Система пакетной передачи по ВОЛС на основе протокола IEEE1588v2.1 шкалы времени UTC(SU), формируемой государственным первичным эталоном



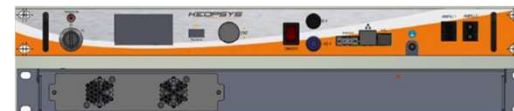
Фемтосекундный синтезатор оптических частот

Оптические усилители

Система передачи высокостабильного оптического сигнала



Модемы



Оптические усилители

Сервера точного времени



«Пилотный участок сети сверхточного времени и частоты». Состав ч. 2

НИЦ «Курчатовский институт»

Система передачи по выделенным ВОЛС излучения высокостабильного лазера

Система приемо-передающая для доставки на оптической несущей по выделенным ВОЛС высокоточных сигналов частоты и времени с компенсацией фазовых шумов, вносимых линиями

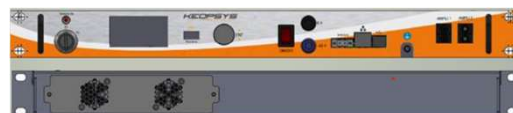
Система пакетной передачи по ВОЛС на основе протокола IEEE1588v2.1 шкалы времени UTC(SU), формируемой государственным первичным эталоном



Оптические усилители



Модемы



Оптические усилители

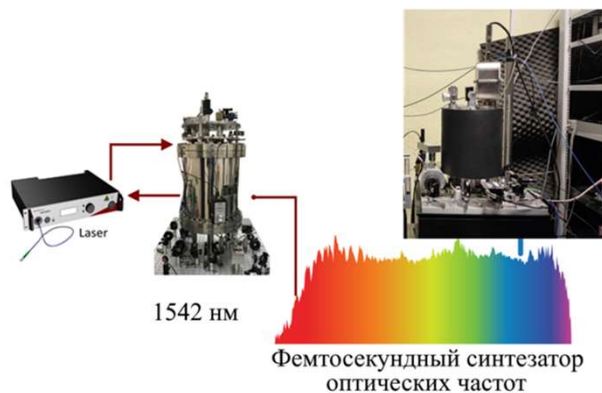
Сервера точного времени



«Пилотный участок сети сверхточного времени и частоты». Состав ч. 2

ФИАН им. С.П. Лебедева

Система передачи информации об оптической частоте высокостабильного лазера с узкой спектральной линией по выделенным ВОЛС



Оптические усилители

Система передачи высокостабильного оптического сигнала



Модемы



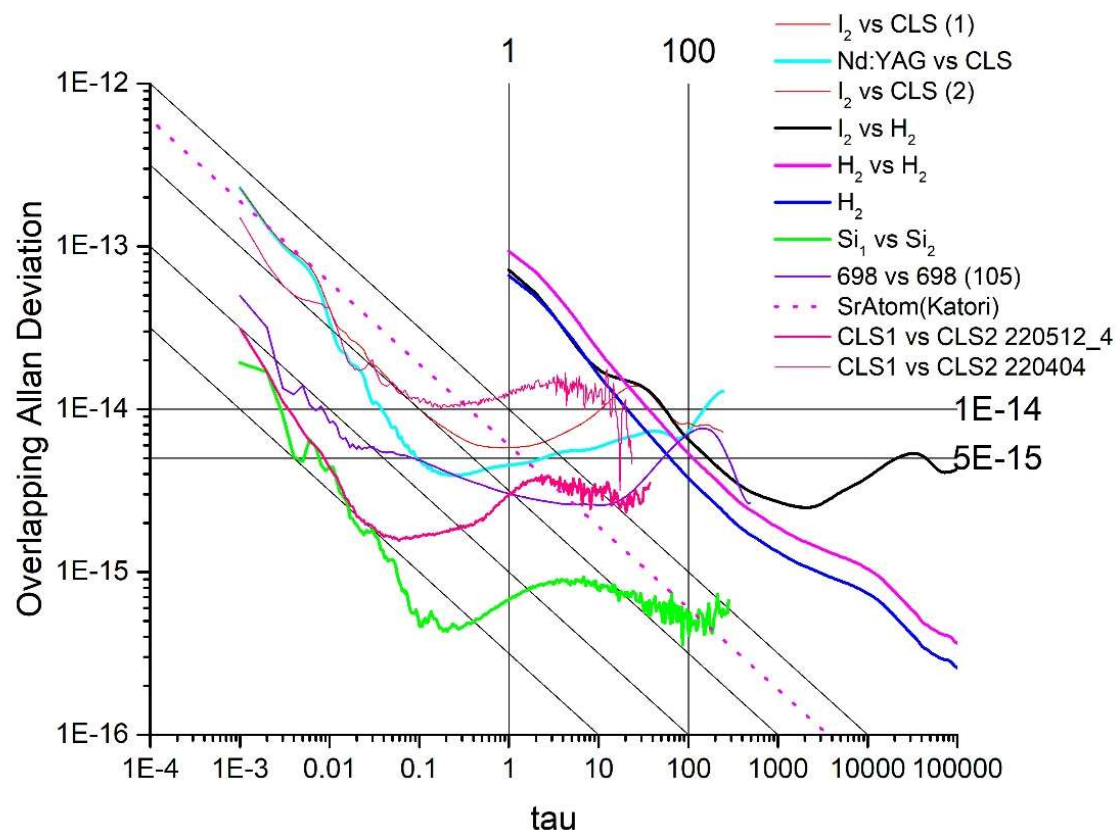
Оптические усилители

Система пакетной передачи по ВОЛС на основе протокола IEEE1588v2.1 шкалы времени UTC(SU), формируемой государственным первичным эталоном

Сервера точного времени



Сравнительные характеристики



Обозначения на рисунке:

CLS (1), CLS (2) «часовой» лазер из состава оптического стандарта на 1156 нм

CLS (2) в 2022 г. май доработка;

I_2 — йодный стандарт частоты;

Nd:YAG — лазер на основе йодной ячейки;

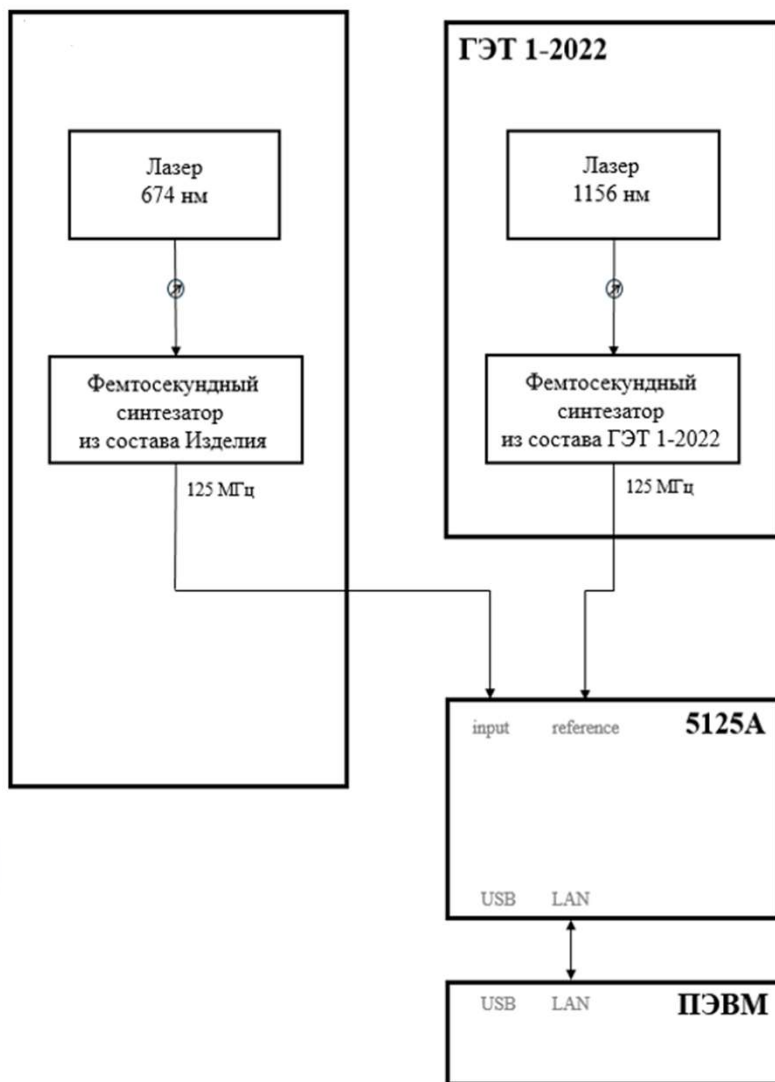
H_2 — водородный мазер / $\sqrt{2}$;

H_2 vs H_2 - сравнение двух водородных мазеров;

Si_1, Si_2 - криогенный кремниевый резонатор;

698 - «часовой» лазер из состава оптического стандарта на Sr;

SrAtom (Katori) — предельное расчётное поведение Sr оптического стандарта, которое провел Hidetoshi Katori



Экспериментальные данные,

п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Относительная нестабильность частоты (СКДО) при времени измерений 1 с	$1,86 \cdot 10^{-14}$
2	Относительная нестабильность частоты (СКДО) при времени измерений 10 с	$5,27 \cdot 10^{-15}$
3	Относительная нестабильность частоты (СКДО) при времени измерений 100 с	$1,41 \cdot 10^{-15}$

Обозначения на рисунке:

Лазер 674 нм - система спектроскопии квантового перехода в ионе стронция КБМШ.433739.001;

Фемтосекундный синтезатор из состава Изделия - фемтосекундный синтезатор оптических частот 1550/1156/871/674 (EFO-COMB) с частотой повторения 125 МГц;

Лазер 1156 нм – лазер стабилизированный по УЛЕ резонатору из состава ГЭТ 1-2022;

Фемтосекундный синтезатор из состава ГЭТ 1-2022 - фемтосекундный синтезатор оптических частот с частотой повторения 125 МГц из состава ГЭТ 1-2022;

5125A – анализатор фазовых шумов 5125A (АФШ 5125A), который предназначен для измерения нестабильности частоты и спектральной плотности мощности фазовых шумов;

ГЭТ 1-2022 - Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени;

ПЭВМ – персональная электро-вычислительная машина;

input – вход для измеряемого сигнала;

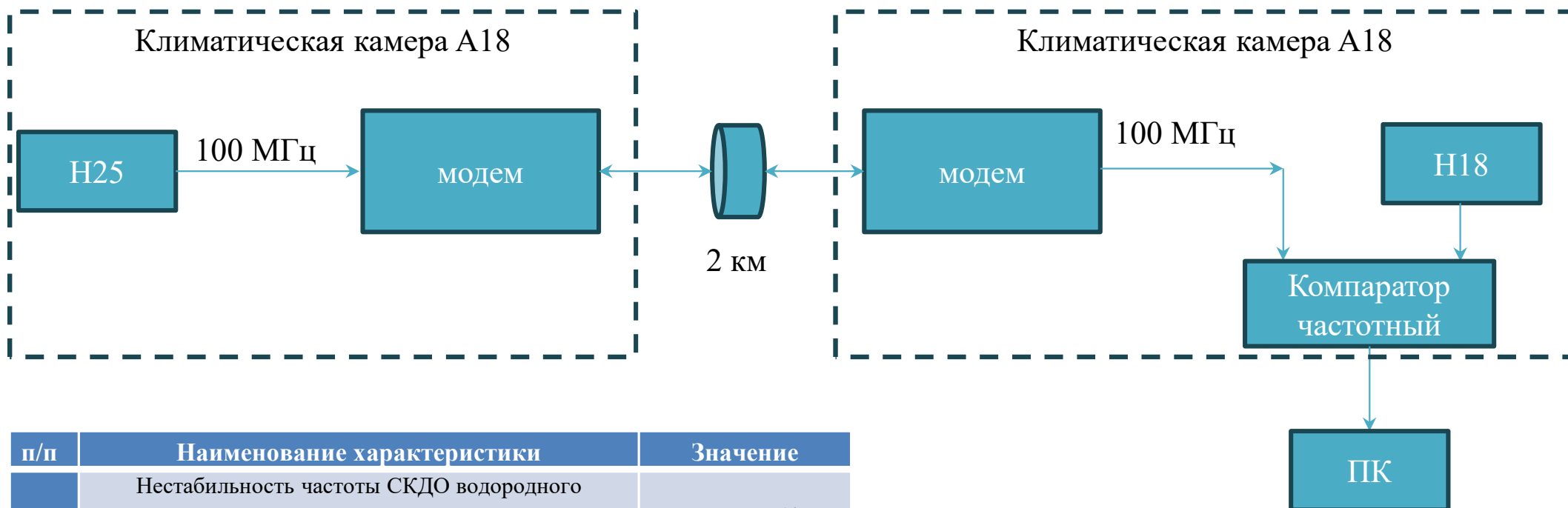
reference – вход для опорного сигнала;

LAN – порт RJ-45 Ethernet;

USB – разъем USB приборов 5125A, ПЭВМ.

Экспериментальные данные, полученные с применением модемов

Упрощенная схема измерений



п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Нестабильность частоты СКДО водородного хранителя H25 в сравнении с частотой водородного хранителя H18 из состава ГЭТ 1-2022 на 1 ч	$9,385 \cdot 10^{-16}$
2	Нестабильность частоты СКДО водородного хранителя H25 в сравнении с частотой водородного хранителя H18 из состава ГЭТ 1-2022 на 1 сутки	$3,912 \cdot 10^{-16}$

Обозначения на рисунке:

H25 - водородный хранитель Ч1-1035;

H18 - водородный хранитель из состава Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022;

A18 – климатическая камера VCH-A18;

Компаратор 315 – компаратор VCH-315M (или VCH-314);

2 км – межобъектовый оптоволоконный кабель

ПК – персональная электро-вычислительная машина;

Эксперименты по передаче точного времени по RTP протоколу

Проведены исследования возможностей синхронизации по протоколу RTP v.2.

Цели исследований:

- экспериментальная оценка точности синхронизации времени, достигаемой с использованием серверов точного времени различного типа по протоколу RTP;
- изучение стабильности синхронизации времени и ее устойчивости к изменениям в сетевой инфраструктуре и нагрузке.



Выводы:

- Подтверждена возможность синхронизации от RTP серверов по протоколу RTP v.2.
- Определяющим фактором для повышения точности синхронизации является качество организации канала связи (в т.ч. наличие коммутационного оборудования с поддержкой протокола RTP, выделенные ВОЛС).
- Для достижения **субнаносекундной** точности синхронизации по протоколу **RTP v.2.1** (White Rabbit) необходима разработка специализированной аппаратуры (серверов точного времени, коммутационного оборудования, в т.ч. прозрачных и пограничных часов)

Наименование и требуемые значения технических характеристик

№ п/п	Наименование	Требуемое значение
1	Среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение (СКДО) частоты лазера, стабилизированного по оптическому высокочастотному резонатору, при интервале времени измерения 1 с не более	$5 \cdot 10^{-15}$
2	Вклад, вносимый системой передачи по ВОЛС в погрешность частоты, при доставке высокостабильного лазерного излучения $\lambda = 1,55$ мкм по ВОЛС длиной до 100 км при интервале времени измерения 10^4 с не более	$1 \cdot 10^{-17}$
3	Вклад, вносимый системой передачи ЭСЧВ по ВОЛС длиной до 100 км, составляет: - в относительную погрешность (СКДО) при передаче частоты 10 МГц при интервале времени измерения 10^5 с не более - в абсолютную погрешность при передаче сигнала синхронизации шкалы времени 1 pps не более, нс	$1 \cdot 10^{-16}$ 0,5
4	Пределы допускаемой инструментальной погрешности пакетной передачи шкалы времени по ВОЛС на расстояние до 100 км не более, нс	20

Территориально распределенная волоконная сеть доставки сверхточного времени и частоты

- Обеспечение работы систем подготовки рабочих частиц квантовых компьютеров (КК) (охлаждение, атомов, ионов, детектирование их энергетических состояний);
- Обеспечение возможности совместных вычислений КК на различных рабочих частицах за счет получения абсолютного значения частоты от ГЭТ-1;
- Синхронизация КК на различных платформах (атомы сверхпроводники);
- Синхронизация аппаратуры широкого круга потребителей (Системы связи, включая цифровую; телевидение; ВСМ; Геодинамика; радиоастрометрия; высокоточная глобальная навигация; определения ПВЗ методами РСДБ; космическая связь; спутниковая геодезия и картография; калибровка приборов времени – частоты – длины; цифровая оптическая связь.



Благодарю за внимание!

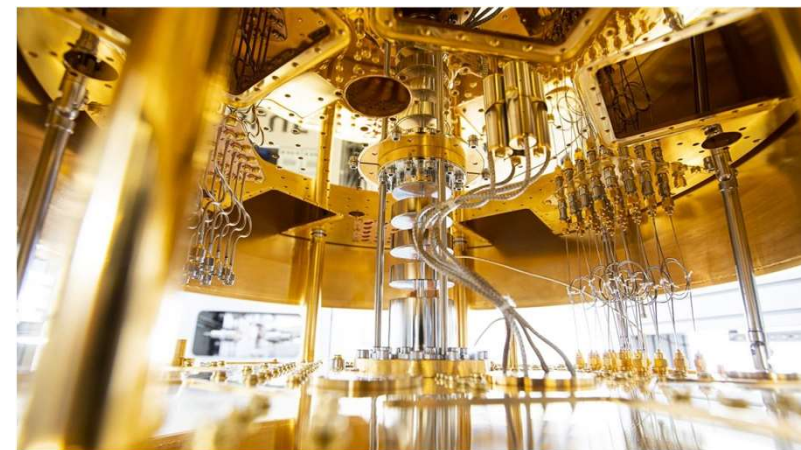
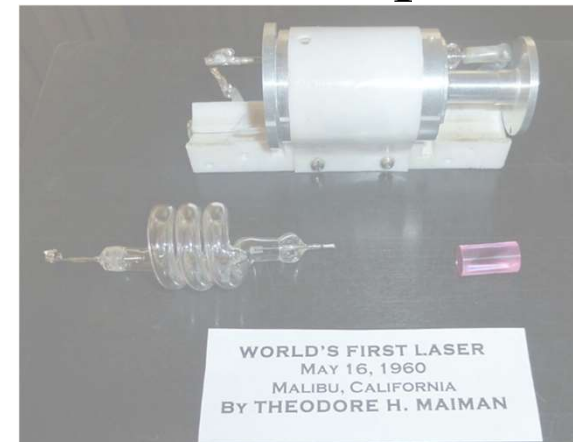
Квантовые технологии, как новый этап технологического развития

«Первая квантовая революция», связанная со становлением квантовой механики в начале XX века и основанная на понимании коллективных квантовых явлений, привела к появлению транзисторов, лазеров, мазеров, технологий атомной энергетики, медицинской диагностики, неразрушающего контроля материалов и ряда других технологий.

Replica of First Transistor Invented at Bell Labs
December 23, 1947



Современный этап, обозначаемый как «вторая квантовая революция», характеризуется расширением возможностей контролируемого формирования квантовых состояний и управления ими на уровне отдельных атомов, ионов, фотонов и искусственных квантовых систем, включая сверхпроводящие электрические цепи



«Юлихский
квантовый компьютер», 2026 г.

Вызовы и тренды, определяющие необходимость развития квантовых технологий

Технологический суверенитет и вычислительные ресурсы:

- Доступ к мощным вычислительным ресурсам — ключевой фактор конкурентоспособности высокотехнологичных отраслей.
- Несоответствие между ростом требований к расчётам и возможностями классических систем создаёт риск отставания в критически важных направлениях.
- Для России это усугубляется санкционными ограничениями и технологическим разрывом в микроэлектронике.
- Квантовые вычисления позволяют преодолеть эти барьеры за счёт принципиально новых подходов к моделированию и оптимизации.
- Приоритетные эффекты: прогнозирование свойств материалов, сокращение экспериментальной фазы, независимость расчётной базы.

Актуальность

Дорожная карта развития высокотехнологичного направления «Квантовые вычисления» до 2030 г.

- Навигация и геологоразведка;
- Медицина (лекарства) и биомедицина (персонализированные методы лечения);
- Энергетика и связь;
- Беспилотный транспорт и робототехника;
- Научные исследования (синхронизация установок) и мониторинг;
- Банковская сфера (прогнозирование, аналитика), роботизированная биржевая торговля;
- Логистика и транспорт (оптимизация маршрутов, автоматизация и т.п.);
- Телекоммуникация 5G и 6G.



620—1270 млрд долларов — выигрыш от возможного использования квантовых технологий в финансовой, автомобильной, химической и фармацевтической индустриях к 2035 году.

[<https://sber.pro/publication/kvantovaya-superpozitsiya-kakie-vozmozhnosti-dlya-biznesa-otkrivayut-kvantovie-tehnologii/?ysclid=mv569dme6r665127901>]

Цель развития квантовых сенсоров:

- Достижение технологического паритета для обеспечения национальной безопасности;
- Опережающее социально-экономическое развитие страны;
- Рост конкурентоспособности экономики за счет создания новых решений;
- Увеличение благосостояния и продолжительности жизни населения к 2050 г.

Ключевые задачи для технологической независимости в сфере квантовых сенсоров:

- **Снижение зависимости от иностранных решений.** Минимизация использования зарубежных технологий, компонентов, ПО, оборудования и сервисных услуг в области квантовых сенсоров.
- **Импортонезависимость в критических сферах.** Обеспечение самостоятельного применения квантовых сенсоров в стратегически значимых отраслях и в задачах национальной безопасности.
- **Защита ключевых активов.** Создание механизмов охраны критически важных технологий, результатов интеллектуальной деятельности, компетенций и данных, формируемых при эксплуатации сенсорных систем.
- **Комплексное развитие отрасли.** Формирование кадрового, научного, производственного и нормативного потенциала для долгосрочного устойчивого роста.

Российская Федерация – в числе топ 5 мировых лидеров в сфере квантовых сенсоров, в т.ч. в создании международных эталонов и технологических стандартов.

Основные проблемы, ограничения и риски

- **Проблемы развития квантовых сенсоров**
- **Разрыв «наука — практика»:** большинство разработок остаются на стадиях исследований, прототипирования и испытаний.
- **Незрелость производственной базы:** нужны специализированные мощности, отработанные технологические процессы и устойчивые цепочки поставок.
- **Слабая метрологическая и нормативная база:** не хватает инструментов для сопоставимой оценки характеристик и масштабных испытаний.
- **Низкая коммерческая зрелость:** экономическая эффективность многих сенсоров недостаточно подтверждена.
- **Дефицит кадров:** растёт конкуренция за квалифицированных специалистов.

Технологические ограничения

- **Чувствительность к условиям эксплуатации:** характеристики зависят от вибраций, температуры, движения платформы, внешних электрических и магнитных полей.
- **Сложности интеграции:** трудно сопрягать сенсоры с оптическими, электронными и программными подсистемами, средствами обработки данных и классическими средствами измерений.

Квантовые коммуникации

Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Квантовые коммуникации».

К 2030 году планируется построить не менее 15 тысяч километров магистральных каналов квантовых коммуникаций.

«Квантовый фундамент» предоставляет каналам единую частотно-временную основу, необходимую для:

- квантового распределения ключей;
- синхронизации узлов распределенного квантового вычислителя;
- синхронизации квантовых сенсоров;
- конфиденциальности и целостности данных;
- калибровки бортовых и наземных эталонов частоты;
- обеспечения сличения шкал времени на разнесенных терминалах;
- квантового интернета.