

СРАВНЕНИЕ КОММЕРЧЕСКИХ И НОВЫХ АТОМНЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ: ТЕКУЩЕЕ РАЗВИТИЕ И БУДУЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

ANNOTATION:

Atomic frequency standards are used to generate accurate and precise time and frequency, enabling many communications, synchronization, and navigation systems in modern life. GPS and other satellite navigation systems, voice and data telecommunications, and timestamping of financial transactions all rely on precise time and frequency enabled by atomic frequency standards. This review provides a snapshot and an outlook of commercial and emerging atomic frequency standards. We provide a concise summary of the performance and physics of operation of current atomic frequency standards. In addition, we discuss examples of emerging frequency standard technologies and prototype demonstrations with a focus on technologies expected to provide commercial or military utility within the next decade. We include a comparison of performance versus size and power for current atomic frequency standards. We develop and discuss an empirical relationship between frequency standard performance and product size.

Key words: atomic clock, atomic frequency standard, clock, frequency, oscillator, review, timing.

АҢДАТПА:

Атомдық жиілік стандарттары дәл және нақты уақыт пен жиілікті құру үшін қолданылады, бұл қазіргі өмірдегі көптеген байланыс, синхрондау және навигация жүйелеріне мүмкіндік береді. GPS және басқа да спутниктік навигация жүйелері, дауыс және деректер телекоммуникациясы, қаржылық транзакцияларды уақыт белгілеу атомдық жиілік стандарттары қамтамасыз ететін нақты уақыт пен жиілікке тәуелді. Бұл шолу коммерциялық және жаңа атомдық жиілік стандарттарының қысқаша шолуын және болашағын ұсынады. Біз қазіргі атомдық жиілік стандарттарының өнімділігі мен жұмыс физикасын қысқаша қорытындылаймыз. Сонымен қатар, келесі онжылдықта коммерциялық немесе әскери пайдасы болуы күтілетін жаңа жиілік стандарттары технологияларының мысалдары мен прототиптік демонстрацияларын талқылаймыз. Біз қазіргі атомдық жиілік стандарттарының өнімділігін олардың өлшемі мен қуат тұтынуына қатысты салыстыруды қосамыз. Сондай-ақ жиілік стандарттарының өнімділігі мен өнімнің өлшемі арасындағы эмпирикалық байланысты дамытамыз және талқылаймыз.

Түйінді сөздер: атомдық сағат, атомдық жиілік стандарты, сағат, жиілік, осциллятор, шолу, уақыт белгілеу.

АННОТАЦИЯ:

Атомные стандарты частоты используются для генерации точного и прецизионного времени и частоты, что позволяет функционировать многим системам связи, синхронизации и навигации в современной жизни. GPS и другие системы спутниковой навигации, голосовые и информационные телекоммуникации, а также временная метка финансовых транзакций зависят от точного времени и частоты, обеспечиваемых атомными стандартами частоты. Данный обзор предоставляет краткий обзор и перспективы коммерческих и новых атомных стандартов частоты. Мы предлагаем краткое изложение характеристик и физических принципов работы текущих атомных стандартов частоты. Кроме того, рассматриваются примеры новых технологий стандартов частоты и демонстрационные прототипы с акцентом на технологии, которые, как ожидается, будут иметь коммерческое или военное применение в течение следующего десятилетия. В статье проводится сравнение характеристик текущих атомных стандартов частоты по отношению к их размеру и энергопотреблению. Также обсуждается эмпирическая зависимость между характеристиками стандартов частоты и размером изделий.

Ключевые слова: атомные часы, атомный стандарт частоты, часы, частота, осциллятор, обзор, синхронизация.

ВВЕДЕНИЕ

Атомные стандарты частоты обеспечивают повышенную автономность, устойчивость и целостность для критически важных навигационных, коммуникационных, сенсорных и метрологических приложений. Коммерческие стандарты частоты, разработанные за последние десять лет, вроде атомных часов на микросхеме (CSAC), являются значимыми инженерными достижениями, расширяя возможности автономного ведения

времени на разнообразные подвижные платформы. Атомные стандарты частоты следующего поколения могут дополнительно уменьшить зависимость от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), обеспечивать чрезвычайно точные измерения в фундаментальной физике и, возможно, повлечь за собой изменение переопределения «секунды» в Международной системе единиц (СИ).



В данной статье представлен обзор текущих и новейших атомных стандартов частоты, сфокусированный на практических аспектах их использования. Анализ охватывает все существующие коммерческие продукты, передовые прототипы из исследовательских учреждений и национальных лабораторий, прошедшие значительную миниатюризацию или усовершенствование при участии коммерческого партнера, а также перевозимые оптические стандарты частоты.

КОММЕРЧЕСКИЕ АТОМНЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

А. ВОДОРОДНЫЙ МАЗЕР

1) Принцип работы. Водородные мазеры, служащие в качестве атомных стандартов частоты подразделяется на два типа. Активный водородный мазер представляет собой большие габариты и наиболее стабильные характеристики, доступное на рынке в настоящее время, в то время как пассивный водородный мазер является более компактным и менее производительным вариантом. Основой для атомного перехода в них служит гиперфинный переход основного состояния атомов водорода, который имеет частоту перехода около 1420 МГц [2].

В водородном лазере пучок атомов водорода создается с помощью радиочастотного возбуждения и направляется через магнит, который выбирает состояние атомов. Только атомы в верхнем гиперфинном основном состоянии направляются в хранилище внутри полости, что создает инверсию популяции [2]. Атомы ограничиваются внутри кварцевой колбы с характерным размером, меньшим длины волны микроволнового излучения (21 см), что удовлетворяет критерию Дикке [3] и устраняет Доплеровский эффект первого порядка. Работа активного водородного лазера основана на принципе самоподдерживающихся колебаний [1]: если потери в полости достаточно низки и интенсивность пучка водорода, выбранного по состоянию, достаточно высока, то атомы и микроволновая полость взаимодействуют таким образом, чтобы поддерживать самоподдерживающиеся колебания.

После синтеза микроволновой частоты кварцевый осциллятор фазово запирается на эту микроволновую частоту. Пассивный водородный мазер работает по аналогичному принципу, что и активный водородный мазер, но с подпороговым усилением полости. В этом случае используется более маленькое хранилище и/или полость с более низкой добротностью Q, что приводит к созданию более компактного устройства с сравнительно низкой производительностью.

2) Описание продукта и производительность.

Активные водородные мазеры имеют объем порядка 300 л и обладают лучшей производительностью с точки зрения краткосрочной стабильности, фазового шума и минимального значения колебаний на длинных временных интервалах среди всех существующих продуктов на рынке. На краткосрочных временных интервалах (порядка 1–10 с) их $\sigma_y(\tau)$ улучшается как τ^{-1} , потому что шум определяется белым фазовым шумом в электронике восстановления сигнала. Точность водородного лазера ограничивается свойствами стенок хранилища, отстройкой полости и плотностью водорода, которые вызывают долгосрочное старение этих стандартов частоты. Технические характеристики коммерческих продуктов указывают на минимальное значение колебаний на длинных временных интервалах в размере 10^{-15} или меньше и долгосрочное старение $2 \times 10^{-16}/\text{сут}$ (достижимое только после длительной, непрерывной, без помех эксплуатации). В настоящее время водородные мазеры предлагаются тремя поставщиками: Microchip (США), T4Science (Швейцария, также доступен через Orolia) и Vremya-Ch (Россия).

Активный водородный мазер является предпочтительным инструментом для приложений, где необходима высокая краткосрочная стабильность, таких как радиоастрономия и метрология частоты. Одним из важных применений водородных мазеров является обеспечение точной фазовой стабильности между удаленными телескопами для выполнения очень длиннобазовой интерферометрии (VLBI), что было успешно применено, например, в телескопе Horizon при создании изображения черной дыры [4].

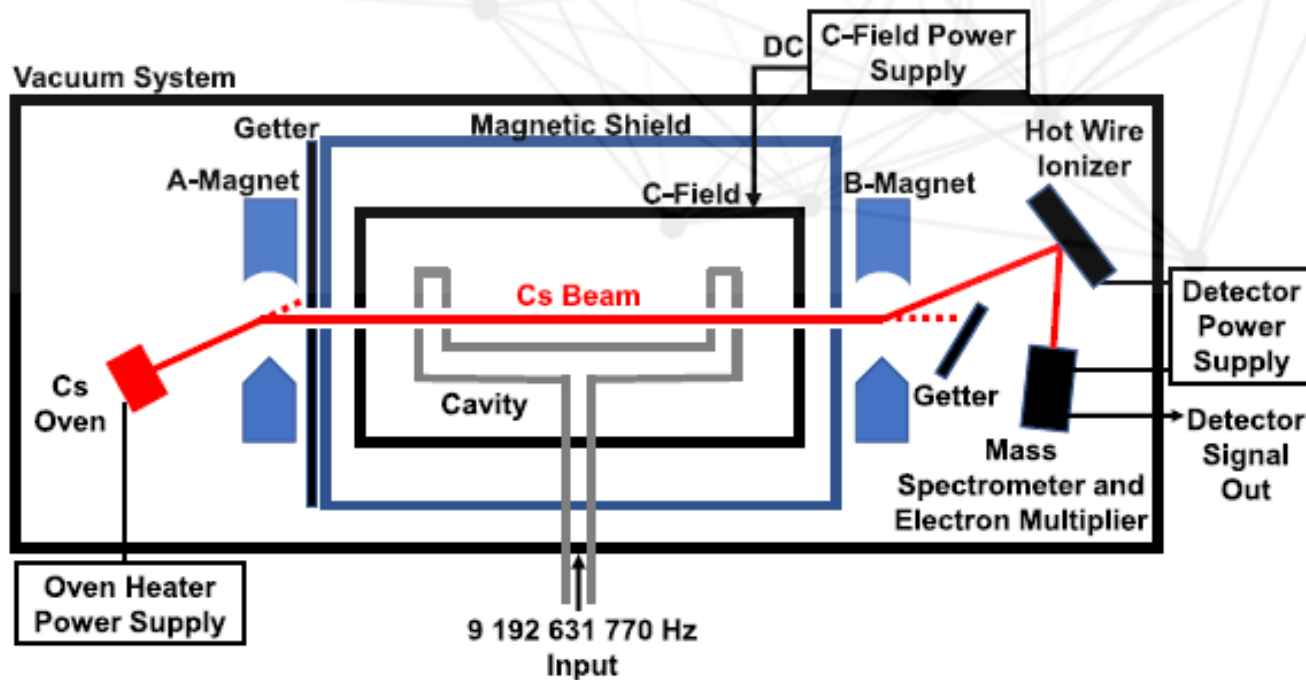
Б. ЦЕЗИЕВАЯ ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

1) Принцип работы. Цезий используется в электронно-лучевых трубках стандартов частоты из-за высокого давления паров при разумных температурах печи, небольшого второго порядка эффекта Зеемана, большой гипертонкой частоты и атомных энергетических уровней, которые поддаются атомной подготовке, интеррогации и обнаружению. Благодаря всем этим факторам, цезий также является основой определения секунды в Международной системе единиц (СИ).



На схематическом изображении стандарта частоты на основе цезиевой лучевой трубки СВТ, представленном на рисунке 1 [5], [6], атомы испаряются из тепловой печи в направлении микроволновой полости. Сильное магнитное поле, создаваемое магнитом типа А, направляет только одно из состояний в направлении U-образной микроволновой полости. Внутри микроволновой полости формируется квантовая ось за счет небольшого магнитного поля смещения, известного

как поле С (C-field), в то время как в полости микроволновые излучения вызывают переход части атомов в другое состояние. Эти атомы затем направляются магнитом типа В к горячему проволочному детектору и регистрируются как сигнал. Атомный пучок проходит через полость, где магнитное микроволновое поле остается примерно постоянным, что исключает доплеровский сдвиг первого порядка [2].



■ Рис. 1. Схема атомного стандарта частоты на основе цезиевой лучевой трубки СВТ (адаптировано из [5]).

Вариант стандарта частоты на основе цезиевой лучевой трубки, известный как оптически накачиваемый стандарт цезия (ОПС), отличается от традиционных конструкций использованием лазерной накачки вместо А и В-магнитов для выбора состояния. Преимуществом лазерной накачки является более эффективная оптическая стимуляция и детекция состояний, что приводит к улучшенной стабильности. Кроме того, ОПС-стандарты частоты обеспечивают более эффективное использование пучка цезия, что приводит к продлению срока службы устройства [7].

2) Описание продукта и производительность. В коммерческих продуктах [5], атомы испаряются из тепловой печи при температуре около 100 °С. Проходя через кавитацию Рамзи длиной около 10 см, атомы образуют линию с шириной, ограниченной транзитным временем, приблизительно 500 Гц, а значение Q линии составляет около 2×10^7 . Ширина линии атома обратно пропорциональна расстоянию между двумя ветвями кавитации. Исходя из (3), отношение сигнал/шум примерно $3000 \text{ (Гц)}^{1/2}$ приведет к нестабильности 1×10^{-11} за 1 с.

Нестабильность коммерческих СВТ ограничена шумом при взаимодействии с пучком [5].

Ограничения точности в коммерческих СВТ возникают из-за неспособности точно компенсировать смещения в измеренной частоте часов, включая смещение поля С, вторичный доплеровский сдвиг, любые остаточные фазовые различия между двумя ветвями кавитации и систему сервопривода, управляющую осциллятором. Эти эффекты вносят вклад порядка нескольких десятков частей в 10^{13} в указанную точность устройства [2].

Избыточное сравнение по габариту и весу приводит к выводу, что анализ производительных характеристик, таких как ошибка времени в сравнении с комбинированным показателем SWaP, не является оптимальным. Поэтому мы приходим к выводу, что наиболее полезным является сравнение производительных характеристик по отдельности по габариту и мощности.



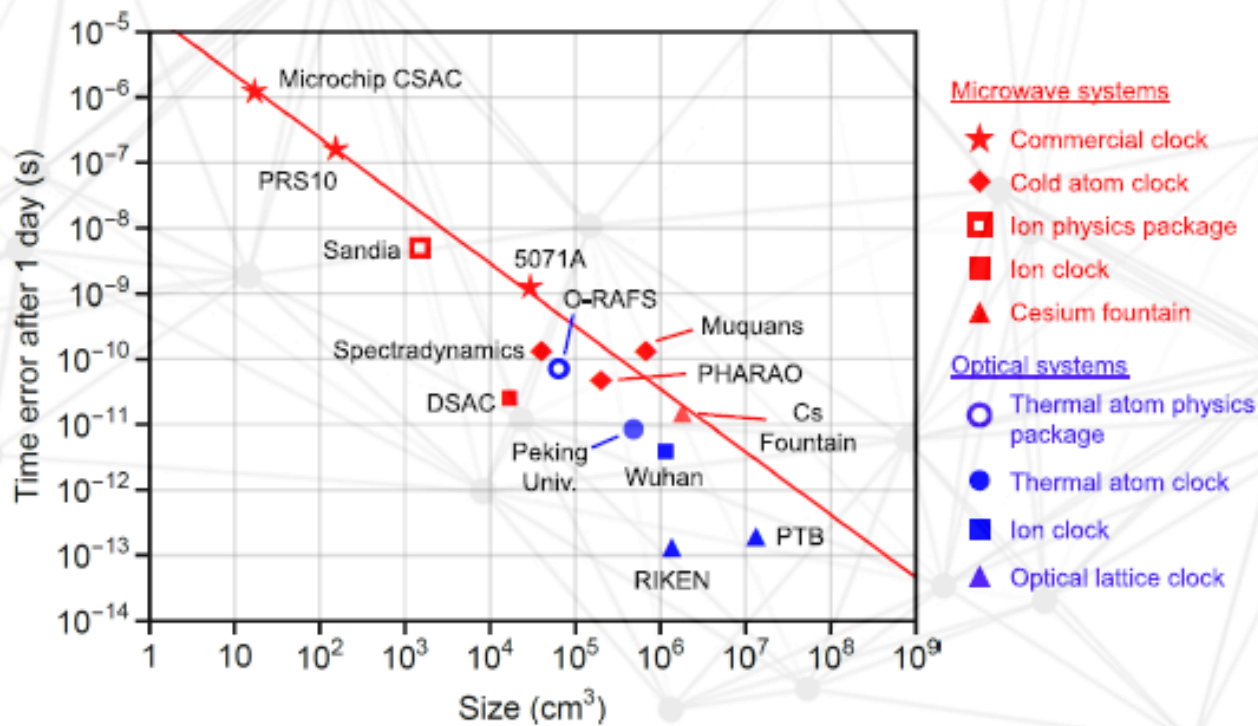


Рис. 2. Ошибка времени после одного дня по сравнению с размером для текущих и развивающихся микроволновых и оптических стандартов частоты, которые подверглись усилиям по миниатюризации, представлена на графике.

АТОМНЫЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Несмотря на значительные достижения в улучшении производительности и миниатюризации атомных стандартов частоты, практические микроволновые стандарты частоты, кажется, приближаются к своему практическому пределу из-за производительности кварцевых осцилляторов. В настоящее время сложно найти крупномасштабный источник кварцевых кристаллических осцилляторов с краткосрочной нестабильностью лучше, чем 1×10^{-13} за 1 секунду. Интеграция кварцевого локального осциллятора (LO) и микроволнового физического пакета с временем замыкания часов на уровне 1 секунды ограничивает результирующую нестабильность заблокированного атомного стандарта частоты угловым коэффициентом на уровне 1×10^{-13} . Для приложений, требующих улучшения производительности, необходимо либо использовать более высокий LO с большим показателем SWaP (например, мазер), разрабатывать малогабаритные механические LO с улучшенной стабильностью, либо использовать архитектуру, основанную на фундаментально иной LO и физическом пакете, например, оптическом переходе. В этом разделе мы описываем ряд новых микроволновых стандартов частоты, за которыми следует обзор практических оптических стандартов частоты, находящихся на стадии разработки. Мы ограничиваем наше обсуждение микроволновыми стандартами частоты, которые подверглись существенной миниатюризации или зрелости с участием коммерческого партнера, и оптическими стандартами частоты, которые продемонстрировали прогресс в

направлении транспортируемости. Мы анализируем их текущую и прогнозируемую производительность по сравнению с текущими возможностями стандартов частоты.

А. Будущие практические микроволновые стандарты частоты

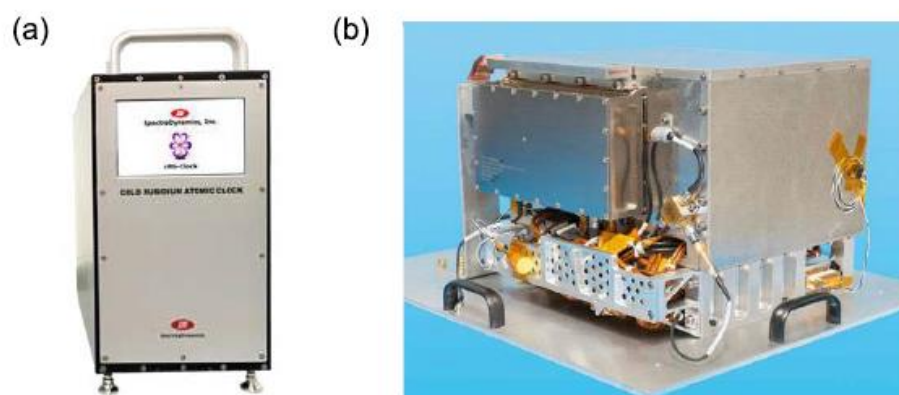
В научном сообществе продолжают исследования по улучшению производительности промышленных микроволновых стандартов частоты. Эти усилия включают модификации уже существующих систем с использованием теплых атомов, а также разработку новых ионных и холодных атомных стандартов. В данном разделе мы представляем обзор каждой из этих платформ с учетом их текущей производительности и потенциала для миниатюризации.

Несколько высокопроизводительных микроволновых стандартов частоты уже были подвергнуты процессу миниатюризации, и их относительная ошибка времени после одного дня в зависимости от габаритов представлена на рисунке 2. Технологические демонстрации, достигшие стадии прототипа, обозначены закрытыми символами с указанием полного размера стандарта частоты. Для других передовых лабораторных разработок мы указываем только примерные размеры физического пакета (представленные открытыми символами), с предположением о том, что будущие прототипы стандартов частоты, основанные на этих технологиях, будут подвергнуты дальнейшей миниатюризации.



1) Микроволновые стандарты частоты на основе теплового пара. Благодаря использованию новых методов оптического накачивания и все более стабильным полупроводниковым лазерам с узкой линейной шириной [57], [58], микроволновые стандарты частоты, основанные на тепловом паре, в последние годы заметно улучшили свою производительность, как отражено в таблице II. Недавние демонстрации достигли уровня стабильности, сопоставимого с водородными мазерами [12], [13], по краткосрочным характеристикам. Хотя эти системы пока не были явно уменьшены в размерах, многие инженерные препятствия уже преодолены благодаря разработке CSAC. Таким образом, эта платформа открывает перспективы для будущих приложений стандартов частоты, требующих ультранизкой потребляемой мощности, веса и габаритов (SWaP).

2) Микроволновые стандарты частоты на холодных атомах. Усилия по снижению шума и воздействия окружающей среды стимулируют разработку нейтральных систем холодных атомов, которые характеризуются значительно меньшими доплеровскими и столкновительными сдвигами по сравнению с теплыми атомами и могут иметь более низкие размеры, вес и потребление энергии по сравнению с атомными фонтанами. В таких системах атомы сначала охлаждаются лазером в магнитооптической ловушке (MOT) или оптическом потоке. MOT замедляет атомы, снижая их скорость до уровня около 10 см/с или ниже, и удерживает их в определенной области с помощью градиентов магнитного поля. Оптический поток позволяет охлаждать атомы лазером без применения пространственной ловушки и часто обеспечивает достижение более низких температур по сравнению с MOT.



■ Рис. 3. (а) Часы на холодных атомах Spectradynamics (высота = 48 см) [16], (б) Система DSAC (объем = 17 л) [10].

В то время как ранее фонтаны цезия были перевозимы между лабораториями (начиная с 1999 года [14]), оптические стандарты частоты на холодных атомах могут быть сделаны еще более компактными для удобства транспортировки, и в последнее время были предприняты значительные усилия по миниатюризации этих систем [15]. Эта архитектура требует периодической последовательности действий с периодами лазерного охлаждения, опроса часов с отключенными охлаждающими полями и считывания состояния. Поскольку атомы не заключены (и, следовательно, свободно падают из-за гравитации), максимальная практическая длительность фазы опроса часов ограничена 10-100 мс, что определяет пределы стабильности стандарта частоты. Компактные версии холодных атомных стандартов частоты достигли краткосрочных неустойчивостей до $3 \times 10^{-13} / (\tau / s)^{1/2}$, как показано в таблице II, и ожидается, что часы PHARAO на проекте ACES Европейского космического агентства (ESA) достигнут $\leq 1 \times 10^{-13} / (\tau / s)^{1/2}$ [9]. Компактные холодные атомные стандарты частоты

уже работают на орбите [15] и летали на самолете, и они доступны для коммерческого использования у Muquans [9] и SpectraDynamics [8], последняя система показана на рисунке 3(а).

График ошибки времени относительно размера для этих стандартов частоты на холодных атомах представлен на рисунке 2. На данном графике мы включаем прототипные демонстрации с определенным уровнем переносимости, общим габаритом стандарта частоты или физического пакета, а также измеренной абсолютной дифференциальной фазовой шумности (АДФВ) до, по крайней мере, 10^4 секунд. Из рисунка 2 видно, что ошибка времени после одного дня относительно размера этих новых демонстраций и прототипов следующего поколения соответствует аналогичным зависимостям, как и у текущих стандартов частоты. Это свидетельствует о том, что они не обеспечивают улучшения стабильности для данного размера по сравнению с современными технологиями.



3) Стандарты частоты на основе запертых ионов: Системы на основе ионов также значительно продвигаются в снижении SWaP [17], [18]. Ионы, используемые в стандартах частоты, представляют собой положительно заряженные частицы, которые образуются из атомов, у которых отсутствует один или несколько электронов. Ионы могут быть заперты в определенных конфигурациях электрических и/или магнитных полей, которые удерживают заряженные частицы внутри ловушки. Ионные ловушки могут состоять из одиночных ионов, нескольких ионов или даже облака до приблизительно 10 миллионов ионов. Одиночные ионы, находящиеся в глубоких потенциальных ямах, работают в очень устойчивых условиях, хорошо изолированных от внешних воздействий. Более того, ионные ловушки обладают высокой стабильностью, и время их жизни может достигать нескольких месяцев, что позволяет проводить длительные сеансы измерений во время опроса часов, в то время как холодные атомы требуют постоянного охлаждения и запираения (обычно каждые 10-100 мс). Платформа на основе ионов развивается с использованием различных видов атомов, как показано в таблице II, и одним из самых передовых примеров является ртутный DSAC.

DSAC, разработанный NASA JPL, достиг краткосрочной нестабильности, ограниченной $SNR \times Q$, равной $1,5 \times 10^{-13} / (\tau / s)^{1/2}$ [10]. Цикл опроса ионов начинается с применения света от ртутной лампы для оптического перекачивания запертых ионов в магнитно-нечувствительное основное состояние. Затем к ионам применяется микроволновое поле с частотой 40,5 ГГц, что приводит к увеличению скорости флуоресценции при настройке его частоты на резонанс с гиперфинным расщеплением. Флуоресценция собирается фотоумножителем [10], выходной сигнал которого используется для формирования ошибки, обратно подаваемой на микроволновый источник. Система DSAC хорошо подходит для длительной работы в космосе в качестве бортовых часов ГНСС систем, поскольку использует лампу вместо лазера и не требует криогенных установок или микроволновой полости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, мы представили обзор текущего состояния технологий в области коммерческих и новых атомных стандартов частоты, включая описание принципов работы и производительности многих продуктов, доступных на рынке сегодня.

В широком смысле, приложения, которым требуются атомные стандарты частоты, можно разделить на три области: низкопотребляющие,

тактические и стратегические. Низкопотребляющие приложения – это те, которым требуется крайне низкое энергопотребление, порядка менее 1 Вт, для выполнения своей задачи; в настоящее время для таких приложений используется CSAC. Тактические приложения – это те, которые исторически обслуживаются широким спектром микроволновых стандартов частоты на основе газовых клеток рубидия на рынке сегодня для различных коммуникационных и военных приложений. Стратегические приложения – это те, для которых требуется инвестиция в большой размер, потребление энергии и стоимость высокопроизводительных эталонных стандартов частоты для обеспечения производительности системы.

Под влиянием требований низкопотребляющих коммерческих и военных приложений ожидается значительное изменение рыночной доступности низкопотребляющих атомных стандартов частоты в ближайшие 5-10 лет. Несколько лет на рынке был доступен всего один коммерческий продукт (Microchip CSAC), но недавнее появление дополнительных поставщиков, а также продолжающиеся инвестиции из Европы, Китая и Японии указывают на дальнейшее развитие ландшафта продуктов в будущем. Аналогично, ожидается эволюция в области высокопроизводительных продуктов (лучше, чем Microchip 5071A CBT). Недавнее появление коммерческих продуктов на основе холодных атомов от SpectraDynamics и Muquans, коммерческие усилия от Microchip, AOSense и Honeywell, а также прототипы научных лабораторий от JPL, NPL, NIST, AFRL, Draper и других указывают на более разнообразный и конкурентоспособный ландшафт стратегических стандартов частоты в будущем. В сравнении мы отмечаем, что относительно недостаточно коммерческих инвестиций в новые тактические стандарты частоты среднего диапазона, что свидетельствует о том, что эти приложения хорошо обслуживаются текущим ассортиментом Rb стандартов частоты на рынке сегодня. Ожидается, что в ближайшие годы произойдут значительные изменения в области низкопотребляющих, а также стратегических (микроволновых и оптических) коммерческих атомных стандартов частоты.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. H. W. Hellwig, "Atomic frequency standards: A survey," Proc. IEEE, vol. 63, no. 2, pp. 212–229, Feb. 1975.
2. C. Audoin and J. Vanier, "Atomic frequency standards and clocks," J. Phys. E, Sci. Instrum., vol. 9, no. 9, p. 697, Sep. 1976.
3. R. Dicke, "The effect of collisions upon the Doppler width of spectral lines," Phys. Rev., vol. 89, no. 2, p. 472, 1953.
4. K. Akiyama et al., "First M87 event horizon telescope results. II. Array and instrumentation," Astrophys. J. Lett., vol. 875, no. 1, p. L2, 2019.
5. L. S. Cutler, "Fifty years of commercial caesium clocks," Metrologia, vol. 42, no. 3, pp. S90–S99, Jun. 2005.
6. S. A. Diddams, "Standards of time and frequency at the outset of the 21st century," Science, vol. 306, no. 5700, pp. 1318–1324, Nov. 2004.
7. R. Lutwak, D. Emmons, R. M. Garvey, and P. Vlitaz, "Optically pumped cesium-beam frequency standard for GPS-III," in Proc. 33th Annu. Precise Time Interval Syst. Appl. Meeting, Long Beach, CA, USA, 2001, pp. 19–32.
8. F. G. Ascarrunz, Y. O. Dudin, M. C. D. Aramburo, J. Savory, and S. R. Jefferts, "Long-term frequency instability of a portable cold 87Rb atomic clock," in Proc. 49th Annu. Precise Time Interval Syst. Appl. Meeting, Feb. 2018, pp. 107–110.
9. MuClock. Accessed: Dec. 30, 2020. [Online]. Available: [ht.tps://www.w. muquans.com/product/muclock/](https://www.muquans.com/product/muclock/)
10. R. L. Tjoelker et al., "Mercury ion clock for a NASA technology demonstration mission," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control, vol. 63, no. 7, pp. 1034–1043, Jul. 2016.
11. M. A. Hafiz, X. Liu, S. Guérandel, E. De Clercq, and R. Boudot, "A CPT-based cs vapor cell atomic clock with a short-term fractional frequency stability of $3 \times 10^{-13} \text{ }_{-1/2}$," J. Phys., Conf. Ser., vol. 723, Jun. 2016, Art. no. 012013.
12. P. Yun et al., "High-performance coherent population trapping clock with polarization modulation," Phys. Rev. A, Gen. Phys., vol. 7, no. 1, Jan. 2017, Art. no. 014018.
13. M. Gharavipour et al., "High performance vapour-cell frequency standards," J. Phys., Conf. Ser., vol. 723, Jun. 2016, Art. no. 012006.
14. J. Guena et al., "Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control, vol. 59, no. 3, pp. 391–409, Mar. 2012.
15. J. A. Rushton, M. Aldous, and M. D. Himsworth, "Contributed review: The feasibility of a fully miniaturized magneto-optical trap for portable ultracold quantum technology," Rev. Sci. Instrum., vol. 85, no. 12, Dec. 2014, Art. no. 121501.
16. cRb-Clock. Accessed: Dec. 30, 2020. [Online]. Available: <http://spectradynamics.com/products/crb-clock/>
17. S. Mulholland et al., "A portable microwave clock using laser-cooled trapped 171Yb+ ions," in Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp. (IFCS), May 2018, pp. 1–2.
18. M. Delehaye and C. Lacroate, "Single-ion, transportable optical atomic clocks," J. Mod. Opt., vol. 65, nos. 5–6, pp. 622–639, Mar. 2018.



КРАТКАЯ АВТОБИОГРАФИЯ

СМАГУЛОВ Султанбек Бериккулы – главный специалист лаборатории №1 РГП «Казахстанский институт стандартизации и метрологии», ученый-хранитель Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени Республики Казахстан. Имеет степень магистра электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

В настоящее время является аспирантом Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета по специальности «Электроника, фотоника, приборостроение и связь».

Смагулов Султанбек Бериккулы является победителем международного конкурса «Лучший молодой метролог КОOMET» 2023 года и участником международного конкурса «Лучший молодой метролог МГС СНГ» 2024 года. Он является членом-корреспондентом в Технических комитетах по измерениям времени и частоте КОOMET, EUROMET, CCTF VIPM. С 2023 года выполняет обязанности технического эксперта по экспертизе СМС строк по времени и частоте КОOMET. Область исследования Смагулова включает автоподстройку шкал времени, анализ характеристик атомных стандартов частоты и методы передачи сигналов частоты и времени.