

СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

Фотонный микроволновый генератор с пониженным фазовым шумом на малых отстройках от несущей частоты

А.С.Шелковников, А.Н.Киреев, Д.А.Тюриков, М.А.Губин

Разработан транспортируемый лабораторный образец фотонного микроволнового генератора (ФМГ) на основе оптического стандарта частоты (He–Ne/CH₄-лазер, $\lambda = 3.39$ мкм) и делителя оптической частоты (фемтосекундный волоконный Er-лазер, $\lambda = 1.55$ мкм). Спектр излучения генератора представляет собой гребенку частот в диапазоне 1–10 ГГц. Продемонстрирована относительная девиация Аллана менее 1×10^{-14} на временах усреднения 1–1000 с для компонент спектра с частотами 1.0 и 9.2 ГГц. Выбор частот обусловлен перспективой применения созданного ФМГ в качестве задающего генератора в эталонах времени и частоты фонтанного типа на атомах Cs/Rb. На временах усреднения 1–200 с полученная нестабильность частоты ниже, чем у коммерческих водородных мазеров. Спектральная плотность мощности фазовых шумов на указанных частотах при отстройках от несущей частоты менее 100 Гц значительно ниже, чем у лучших электронных и оптоэлектронных генераторов. Созданный генератор представляется полезным для задач фундаментальной метрологии времени-частоты, разработки и фазовой калибровки прецизионной микроволновой аппаратуры, когерентной радиолокации, мониторинга, связи, а также в случаях, требующих относительно длительного (10^{-2} – 10^3 с) накопления слабого сигнала в области малых отстроек от несущей и/или удержания синхронизации разнесенных источников.

Ключевые слова: фотонный микроволновый генератор, стабильность частоты, фазовые шумы, He–Ne/CH₄-лазер, оптический стандарт частоты, фемтосекундный волоконный делитель оптической частоты.

1. Введение

Повышение несущей частоты генераторов электромагнитных колебаний до миллиметрового диапазона при одновременном улучшении спектральной чистоты и кратковременной стабильности частоты сигналов по сравнению с кварцевыми генераторами перспективно для развития ряда важных применений: фундаментальная частотно-временная метрология, быстродействующая связь следующих поколений, когерентные радары, наземный и космический мониторинг, радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой, высокоскоростная обработка сигналов, измерительная СВЧ техника и другие [1–6]. Развитие микроволновых источников, обеспечивающих низкие фазовые шумы, идет по нескольким направлениям. Традиционное направление основано на умножении частоты малошумящих кварцевых генераторов или генераторов на поверхностных акустических волнах. Известно, что препятствием в таком подходе является быстрое нарастание фазовых шумов по мере умножения ($20 \times \log N$, где N – степень умножения). Другой путь – применение диэлектрических (сапфировых) резонаторов [7, 8]. Однако радикальное снижение фазовых шумов на частотах отстройки от несущей менее 100 Гц достигнуто в них только при криогенных температурах [9].

Эффективным способом частичного решения задачи стало объединение радио- и оптических компонентов и

создание оптоэлектронных генераторов (ОЭГ), основанных на использовании в контуре генератора многокилометровой оптической линии задержки или высокодобротного диэлектрического резонатора диаметром порядка миллиметра с возбуждением мод шепчущей галереи. Это позволило эффективно снизить фазовые шумы сигналов в диапазоне до 10–12 ГГц при отстройках от несущей более 1 кГц [10, 11]. Одной из проблем генераторов с линиями задержки является рождение паразитных мод, которые проявляются в спектре фазовых шумов и с которыми достаточно трудно бороться [12].

Наиболее значимые практические результаты с генераторами на модах шепчущей галереи достигнуты компанией OE Waves, разработавшей компактные ОЭГ с характерным уровнем фазовых шумов – 138 дБн/Гц при отстройке 10 кГц на частотах 8–12 ГГц [13]. Отечественные исследования в настоящее время ведутся в основном по ОЭГ с оптоволоконными линиями задержки [14, 15].

Характерным ограничением для всех типов ОЭГ является температурная нестабильность основных оптических элементов (линий задержки и микрорезонаторов), приводящая к резкому увеличению фазовых шумов при приближении к несущей (при отстройках менее 100 Гц). Поэтому для задач, требующих кардинального улучшения кратковременной стабильности частоты и пониженных фазовых шумов при малых отстройках от несущей, развивается другая схема генерации радиоволн с привлечением оптических технологий. Она основана на использовании лазера (полупроводникового, волоконного или твердотельного), частотно-стабилизированного по резонансу высокодобротного оптического интерферометра Фабри–Перо, выполненного из материалов с низким коэффициентом температурного расширения (ситалл, стекло ULE (Ultra-Low Expansion), кристаллический крем-

А.С.Шелковников, А.Н.Киреев, Д.А.Тюриков, М.А.Губин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: shelkov@lebedev.ru

Поступила в редакцию 6 июля 2023 г., после доработки – 17 августа 2023 г.

ний) [16–18]. Высокая стабильность частоты, полученная в оптике, переносится далее в радиодиапазон с помощью делителя/синтезатора оптических частот на основе фемтосекундного лазера с пассивной синхронизацией мод [19]. Генераторы этого типа принято называть фотонными микроволновыми генераторами (ФМГ).

Создание ФМГ позволило значительно улучшить кратковременную стабильность и на один-три порядка снизить фазовые шумы при малых отстройках от несущей (менее 1 кГц) по сравнению с ОЭГ на линиях задержки и микрорезонаторах [20–22].

Главным недостатком созданных к настоящему времени ФМГ на лазерах с синхронизацией мод являются большие габаритные размеры устройств. Однако, поскольку такие системы позволяют значительно улучшить чувствительность детектирования слабых сигналов при малых отстройках (с малым доплеровским сдвигом) или время устойчивой синхронизации распределенных устройств, для ряда применений их массогабаритные недостатки могут отступить на второй план. При этом активно разрабатываются варианты ФМГ с меньшей стабильностью по сравнению с лабораторными устройствами, но способные работать в «полевых» условиях [22].

ФМГ, разрабатываемый в рамках наших исследований, также основан на использовании высокостабильного лазера и переносе его стабильности в радиодиапазон с помощью фемтосекундного лазера с пассивной синхронизацией мод. Задачей разработки являлось создание ФМГ диапазона 1–10 ГГц, обладающего повышенной на порядок, по сравнению с кварцевыми генераторами и водородными лазерами, кратковременной стабильностью частоты (1×10^{-14} при времени усреднения $\tau = 1$ с), а также сверхнизкими фазовыми шумами в области малых отстроек от несущей (менее 100 Гц).

2. Основные компоненты ФМГ

Схема разработанного «метанового» ФМГ была детально описана в [23, 24], и здесь мы приведем его основные компоненты. Генератор состоит из оптического стандарта частоты (ОСЧ), стабилизированного по спектральной линии метана (He–Ne/CH₄-лазер, $\lambda = 3.39$ мкм), и делителя оптической частоты (ДОЧ) на основе фемтосекундного волоконного Eг-лазера. Высокая стабильность оптической частоты передается частоте повторения импульсов фемтосекундного лазера (рис. 1).

Частота He–Ne/CH₄-ОСЧ ($\lambda = 3.39$ мкм) находится вне гребенки частот фемтосекундного волоконного Eг-лазера ($\lambda = 1.52–1.57$ мкм), и для связи частот этих двух

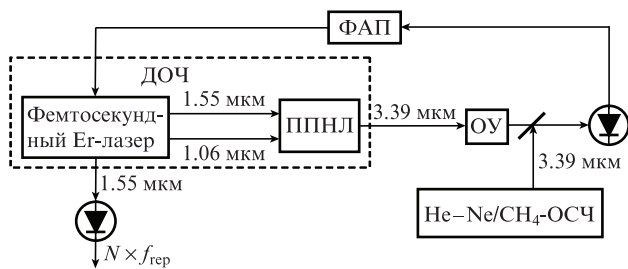


Рис. 1. Схема фотонного микроволнового генератора: ОСЧ – оптический стандарт частоты; ДОЧ – делитель оптической частоты; ППНЛ – кристалл периодически поляризованного ниобата лития; ОУ – оптический усилитель; ФАП – блок фазовой автоподстройки.

источников используется процесс генерации разностной частоты (ГРЧ) [25]. Вначале спектр Eг-лазера уширяется вплоть до 1.06 мкм в высоконелинейном волокне, а затем компоненты суперконтинуума с длиной волны 1.06 мкм и компоненты лазерного спектра с длиной волны 1.55 мкм смешиваются в нелинейном кристалле периодически поляризованного ниобата лития, где происходит ГРЧ в соответствии с соотношением $1/1.06 - 1/1.55 = 1/3.39$.

После нелинейного кристалла компоненты новой гребенки с частотой 88 ТГц ($\lambda = 3.39$ мкм), не содержащие начального сдвига, смешиваются с непрерывным излучением ОСЧ на InAs-фотодетекторе, и сигнал биений используется для стабилизации частоты повторения фемтосекундного лазера (рис. 1). Перед смешением с излучением He–Ne-лазера излучение ГРЧ проходит через селективный оптический He–Ne-усилитель, в котором усиливаются лишь несколько компонент в пределах линии усиления He–Ne-среды. Соотношение сигнал/шум результирующего сигнала биений в области 3.39 мкм одной из компонент ГРЧ и излучения ОСЧ составляет 35–40 дБ в полосе 100 кГц, что достаточно для работы фазовой петли обратной связи и обеспечения нестабильности фазовой привязки менее 10^{-2} Гц при $\tau = 1$ с.

2.1. Оптический стандарт частоты

Оптический стандарт частоты состоит из двух непрерывных лазеров: двухмодового опорного He–Ne/CH₄-лазера с внутривибрационной метановой поглощающей ячейкой и привязанного к нему одномодового гетеродина He–Ne-лазера. Опорный лазер работает в двухчастотном режиме, при этом лазерные поля имеют линейные взаимно ортогональные поляризации. Частота лазера стабилизируется по узкому внутривибрационному спектральному резонансу насыщенной дисперсии в молекуле метана (колебательно-вращательный переход на длине волны 3.39 мкм) [26]. Резонанс детектируется в частоте межмодовых биений и используется для стабилизации частоты лазера. Этот метод позволил достигнуть нестабильности оптической частоты (относительной девиации Аллана) менее 1×10^{-14} при времени усреднения 1 с даже с неохлаждаемым фотодетектором.

Резонатор опорного лазера представляет собой шестизеркальный резонатор размером $20 \times 20 \times 5$ см, сделанный из ситалла. Оптическая длина резонатора составляет ~ 1 м, в котором длина активной среды (He–Ne) составляет около 40 см, а пассивной среды (CH₄) – 60 см. Все оптические элементы крепятся на оптическом контакте непосредственно к ситалловому блоку и не имеют механических подстроек, за исключением приклеенных снаружи пьезокерамик. Одно из промежуточных зеркал резонатора имеет заданный фазовый набег, обеспечивающий разность частот двух генерируемых мод в 5 МГц.

Компактная и жесткая конструкция лазера позволяет достаточно легко реализовать температурную стабилизацию опорного лазера. В результате система становится менее чувствительной к влиянию окружающей среды, а время непрерывной работы лазера не ограничивается динамическим диапазоном используемой пьезокерамики и составляет несколько недель.

Выходная мощность опорного лазера составляет ~ 0.05 мВт в каждой моде. Этой мощности недостаточно для получения требуемого отношения сигнал/шум сигнала биений со слабой компонентой (~ 1 нВт) гребенки

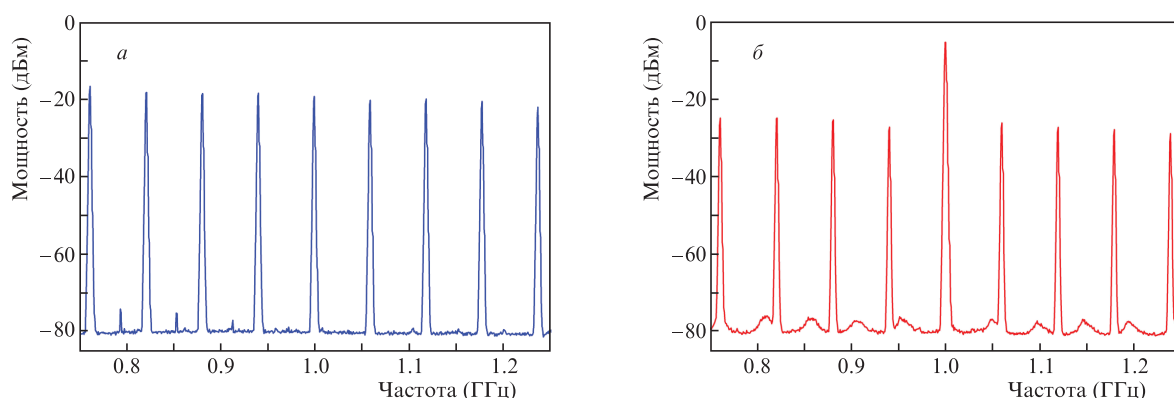


Рис.2. Спектры радиосигнала на выходе фотодетектора без оптической фильтрации (а) и с оптической фильтрацией (б). Полоса анализатора спектра 1 МГц.

разностной частоты для фазовой привязки фемтосекундного лазера. Поэтому используется дополнительный, более мощный гетеродинный He–Ne-лазер, который также представляет собой ситалловый моноблок размерами $20 \times 10 \times 5$ см; его выходная мощность составляет ~ 1 мВт, около 80% которой используется для стабилизации гребенки разностных частот.

2.2. Фемтосекундный волоконный Eг-лазер

Фемтосекундный волоконный Eг-лазер, входящий в состав ДОЧ, собран полностью на волокнах, поддерживающих поляризацию. Синхронизация мод осуществляется за счет керровской нелинейности с использованием интерферометра Саньяка (нелинейно отражающее петлевое зеркало) [27]. Частота повторения f_{rep} лазера составляет около 59 МГц. Зеркало, закрепленное на пьезокерамике, и внутрирезонаторный ЭОМ обеспечивают полосу обратной связи 150 кГц. Медленные флуктуации частоты повторения импульсов компенсируются путем контроля температуры короткого участка лазерного волокна с помощью элемента Пельтье.

2.3. Выходной сигнал генератора

Радиочастотный выходной сигнал ФМГ представляет собой непрерывную последовательность пикосекундных импульсов со стабилизированной частотой повторения на выходе фотодетектора (рис.1). Спектр такой последовательности – гребенка радиочастот $f_N = Nf_{\text{rep}}$ с шириной, определяемой полосой фотодетектора, в нашем случае 10 ГГц (DSC50S, Discovery Semiconductor). Любая компонента из этого диапазона может быть использована в качестве выходного сигнала ФМГ.

Для использования ФМГ в качестве задающего генератора в эталонах на фонтанах атомов Cs/Rb его выходная частота была выбрана равной ~ 1 ГГц, что соответствует 17-й гармонике частоты повторения $f_{\text{rep}} = 59$ МГц.

С целью увеличения соотношения сигнал/шум выбранной компоненты гребенки оптические импульсы на выходе ДОЧ усиливались в волоконном Eг-усилителе примерно до 20 мВт, после чего использовалось внерезонаторное умножение частоты повторения импульсов с помощью четырех последовательно расположенных волоконных интерферометров Маха–Цендера с соответствующими длинами плеч [27, 28]. Таким образом происходит прореживание спектра (оптическая фильтрация) с

перераспределением энергии между компонентами. В результате соотношение сигнал/шум для компоненты 1 ГГц выросло почти на 20 дБ (рис.2).

Собственная нестабильность этих компонент определялась путем прямого сравнения двух ДОЧ и составила 5×10^{-15} при времени усреднения $\tau = 1$ с, снижаясь до 4×10^{-17} при $\tau = 1000$ с [27].

2.4. Синтез частот 9.2/6.8 ГГц с низкими шумами

Кратковременная стабильность метанового ФМГ по крайней мере на порядок лучше, чем стабильность кварцевых генераторов, поэтому представляется перспективным его использование в эталонах времени и частоты фонтанного типа на атомах Cs/Rb в качестве задающего генератора. Частота цикла в фонтанах составляет около 1 Гц; соответственно, важно иметь достаточно малую нестабильность генератора опорного сигнала на временах усреднения около 1 с. Под эту задачу компания «Авантех» разработала малошумящий радиочастотный синтезатор с подстраиваемой входной частотой в районе 1 ГГц и выходными частотами 9.2/6.8 ГГц.

Два таких синтезатора были протестированы в нашей лаборатории, и результаты измерений показали, что собственная нестабильность частоты синтезаторов находится на уровне 10^{-15} при времени усреднения $\tau = 1$ с, т. е. не ограничивает стабильность метанового ФМГ и не увеличивает фазовые шумы при малых отстройках от несущей на выходных частотах 9.2/6.8 ГГц [24]. Подробное описание синтезатора можно найти в работе [29].

3. Измерение стабильности частоты метанового ФМГ

Измерения стабильности частоты ФМГ проводились с помощью измерителя фазовых шумов и девиации Аллана Symmetricom 5125A. Максимальная входная частота прибора ограничена 400 МГц, поэтому использовалась разностная схема измерений с вышеупомянутыми радиочастотными синтезаторами, изображенная на рис.3. Кроме того, выбранная разностная схема позволила повысить чувствительность измерений на три порядка и использовать водородный мазер в качестве эталонного источника.

Два независимых и почти идентичных ФМГ генерировали сигналы на частоте, близкой к 1 ГГц, которые подавались на два радиочастотных синтезатора. Выходные

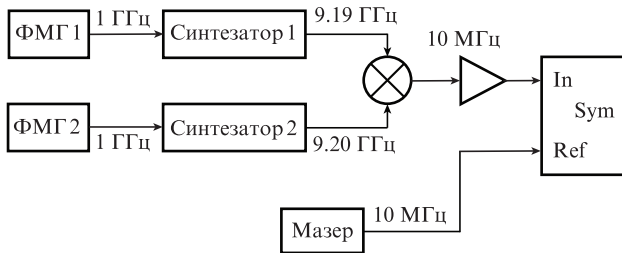


Рис.3. Схема измерения стабильности и фазовых шумов метанового фотонного генератора:
Sym – измеритель фазовых шумов и девиации Аллана Symmetricom 5125A; In и Ref – входы измерителя.

частоты синтезаторов в области 9.2 ГГц были настроены так, чтобы обеспечить разность частот 10 МГц, и подавались на смеситель. После усиления сигнал с частотой 10 МГц поступал на один вход (Input) измерителя, а на второй вход (Reference) подавался сигнал 10 МГц от водородного лазера.

Относительная девиация Аллана фотонного генератора, определенная из этих измерений в предположении идентичности двух систем, показана на рис.4. Для времен усреднения в интервале 1–1000 с получена нестабильность частоты менее 1×10^{-14} . Минимальная нестабильность частоты, равная 4×10^{-15} , достигнута на временах усреднения 20–100 с. Вплоть до времен $\tau = 200$ с стабильность метанового ФМГ лучше, чем стабильность активного коммерческого лазера ВЧ-1003М.

Стабильность микроволновой частоты, приведенная на рис.4, фактически определяется стабильностью He–Ne/CH₄-лазера. Для времен усреднения менее 1 с штриховой линией показана девиация Аллана He–Ne/CH₄-ОСЧ, измеренная в оптическом диапазоне. Дальнейшее улучшение кратковременной стабильности частоты этого лазера и, соответственно, ФМГ на его основе может быть реализовано путем увеличения чувствительности выделения реперной линии метана, в частности, за счет снижения спонтанных шумов лазера (шумов Шавлова–Таунса). Причины ухудшения долговременной стабильности изучаются. Из результатов измерений собственной нестабильности делителя оптической частоты [27] следует, что стабильность метанового ФМГ при $\tau < 0.1$ с в настоящее время ограничивается системой ДОЧ. На рис.4 для сравнения также приведена относительная девиация Аллана

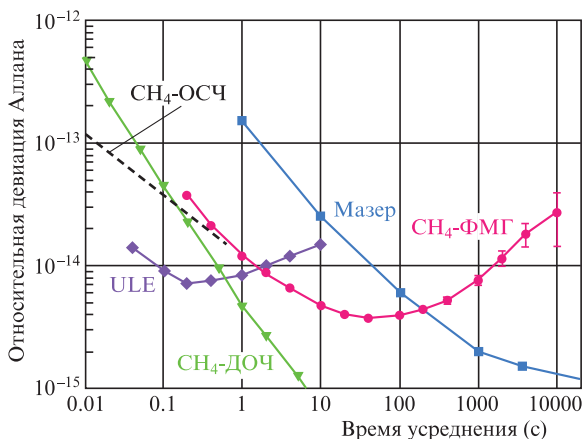


Рис.4. Относительная девиация Аллана He–Ne/CH₄-ФМГ (●), He–Ne/CH₄-ОСЧ (штриховая линия), CH₄-ДОЧ (▼), активного Н-лазера (■), стабилизированного по ULE-резонатору лазера (◆) [30].

оптического репера фирмы «Менло» [30, 31] на основе резонатора из стекла ULE с зеркалами, изготовленными методом ионного распыления. Видно, что на временах $\tau > 2$ с метановый ФМГ превосходит по стабильности частоты ФМГ на ULE-резонаторе, но уступает ему по стабильности на меньших временах.

4. Измерение фазовых шумов метанового ФМГ

Спектральная плотность мощности фазовых шумов метанового ФМГ измерялась на частоте 9.2 ГГц по той же схеме, что и девиация Аллана (рис.3); результаты измерений представлены на рис.5.

В области отстроек от 0.1 до 10 Гц поведение фазового шума ФМГ (кривая 1) соответствует «белому» частотному шуму со значением -80 дБн/Гц для отстройки 1 Гц, что коррелирует с полученной нестабильностью частоты 1×10^{-14} при времени усреднения $\tau = 1$ с. При отстройках более 100 Гц наблюдается выход на плато на уровне -120 дБн/Гц. В этой области поведение кривой определяется собственным шумом используемого делителя оптической частоты, который, в частности, связан с процессом фотодетектирования оптических фемтосекундных импульсов. Отметим, что ДОЧ не оптимизирован в области отстроек выше 100 Гц, т.к. ФМГ разрабатывался для применения в Cs/Rb-фонтанах, где важен уровень шума на отстройке около 1 Гц (соответствует периоду цикла работы фонтана). Собственный фазовый шум радиочастотного синтезатора (9.2 ГГц) представлен кривой 2.

В работах, посвященных шумам, вносимым делителем, были найдены способы снижения их вклада до уровня -170 дБн/Гц на несущей частоте 12 ГГц [21]. В частности, при фотодетектировании требуется тщательный подбор длительности и энергии регистрируемых фемтосекундных оптических импульсов, а также их согласование с характеристиками конкретного используемого фотоприемника [32]. Предварительные оценки показывают, что за счет модернизации ДОЧ возможно снижение шумов метанового ФМГ до уровня -150 дБн/Гц для отстроек более 10 кГц на несущей частоте 10 ГГц.

К настоящему времени фирма «Авеста», лазеры которой использовались в описываемом ФМГ, разработала

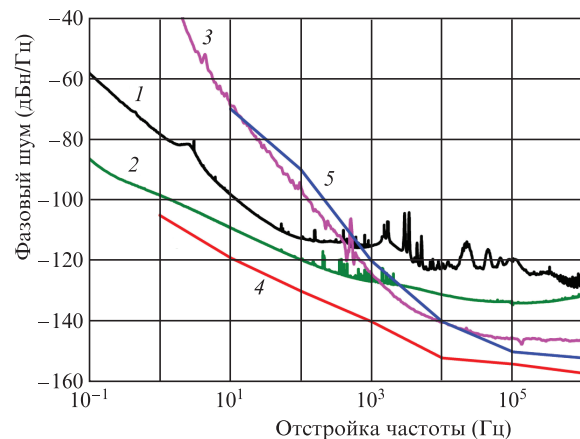


Рис.5. Спектральная плотность мощности фазового шума метанового ФМГ на несущей частоте 9.2 ГГц (1), радиочастотного синтезатора, 9.2 ГГц (2), новой версии фемтосекундного волоконного Ег-лазера фирмы «Авеста», пересчет на 10 ГГц (3), цифрового фотонного синтезатора NIST, 10 ГГц (4) [20], а также нижняя граница шумов электронных и оптоэлектронных генераторов, 10 ГГц (5) [20].

новую версию фемтосекундного лазера для ДОЧ с усовершенствованной системой детектирования оптического сигнала. Фазовый шум этого варианта лазера, снятый на несущей частоте 1 ГГц и пересчитанный на несущую 10 ГГц, представлен на рис.5 (кривая 3). Данный лазер был привязан к нестабилизированному непрерывному Ег-лазеру, поэтому на отстройках менее 1 кГц шум существенно выше, чем у метанового ФМГ. На отстройках выше 10 кГц определяющим становится собственный шум фемтосекундного лазера и системы детектирования, где наблюдается существенное улучшение по сравнению с описанным метановым ФМГ; это позволяет рассчитывать на создание ФМГ на основе He–Ne/CH₄-ОСЧ с низким уровнем шума на отстройках от несущей вплоть до 1 МГц. Прямое использование новой версии фемтосекундного лазера в метановом ФМГ на данный момент не представляется возможным, поскольку требует значительных дополнительных работ.

Для сравнения на рис.5 приведены фазовые шумы фотонного синтезатора на основе ULE-резонатора (кривая 4), разработанного в NIST, и нижняя граница шумов электронных и оптоэлектронных генераторов (кривая 5), работающих на частоте 10 ГГц [20].

5. Массогабаритные параметры

В настоящее время создана лабораторная версия транспортируемого ФМГ, причем техническая оптимизация его размеров, массы и энергопотребления не проводилась. Оптическая часть ФМГ состоит из двух блоков (ОСЧ и ДОЧ) с размерами 70 × 70 × 20 см каждый. Масса одного блока составляет около 50 кг и определяется в основном массой алюминиевой плиты в его основании. Источники питания, осциллографы, анализатор спектра и электроника размещаются в 19-дюймовой стойке. Полное энергопотребление составляет около 300 Вт. В лабораторных условиях достигнута стабильная работа генератора в течение нескольких суток без вмешательства оператора.

6. Заключение

Разработан и протестирован транспортируемый лабораторный образец фотонного микроволнового генератора на основе оптического стандарта частоты (He–Ne/CH₄-лазер, $\lambda = 3.39$ мкм) и делителя оптической частоты (фемтосекундный волоконный Ег-лазер, $\lambda = 1.55$ мкм). Спектр излучения генератора представляет собой гребенку частот в диапазоне 1–10 ГГц.

Для компонент спектра с частотами 1.0 и 9.2 ГГц продемонстрирована относительная девиация Аллана менее 1×10^{-14} на временах усреднения 1–1000 с. На временах усреднения 1–200 с полученная нестабильность частоты ниже, чем у коммерческих водородных мазеров. Спектральная плотность мощности фазовых шумов на указанных частотах при отстройках от несущей менее 100 Гц значительно ниже, чем у лучших электронных и оптоэлектронных генераторов. Имеются пути снижения фазовых шумов и для отстроек выше 1 кГц до уровня, достиг-

нутого в других разработках генераторов на базе лазеров с синхронизированными модами.

Разработка ФМГ представляется полезной для задач фундаментальной метрологии времени-частоты, разработки и фазовой калибровки прецизионной микроволновой аппаратуры, когерентной радиолокации, мониторинга, связи, а также в случаях, требующих относительно длительного (10^{-2} – 10^3 с) накопления слабого сигнала в области малых отстроек от несущей и/или удержания синхронизации разнесенных источников.

Авторы благодарят компанию «Адваптех» за предоставление радиочастотных синтезаторов, компанию «Авеста» и персонально А.В.Таусенева и К.Н.Окишева за предоставление информации о шумах новой версии фемтосекундного лазера, а также признательны группе компаний «Конти» за финансовую поддержку исследований.

1. Santarelli G. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 4619 (1999).
2. Lipphardt B., Gerginov V., Weyers S. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **64**, 761 (2017).
3. Шелковников А.С. и др. *Квантовая электроника*, **49**, 272 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 272 (2019)].
4. Skolnik M.I. *Radar Handbook* (New York: McGraw-Hill, 2008).
5. Rubiola E., Cripps S.C. *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008).
6. Ghelfi P. et al. *Nature*, **507**, 341 (2014).
7. Ivanov E., Tobar M. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **56**, 263 (2009).
8. Егоров В.Н. Док. дис. (Иркутск, ВНИИФТРИ – Восточно-Сибирский филиал, 2013).
9. Nand N.R. et al. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **59**, 2978 (2011).
10. Maleki L. *Nat. Photonics*, **5**, 728 (2011).
11. Chembo Y.K. et al. *Rev. Mod. Phys.*, **91**, 035006 (2019).
12. Okusaga O. et al. *Opt. Express*, **19**, 5839 (2011).
13. <https://www.oewaves.com/oe3700>.
14. Ustinov A.B. et al. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1038**, 012033 (2018).
15. Чиж А.Л., Микитчук К.Б., Скоторенко И.В. *Квантовая электроника*, **51**, 254 (2021) [*Quantum Electron.*, **51**, 254 (2021)].
16. Young B.C., Cruz F.C., Itano V.M., Bergquist J.C. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 3799 (1999).
17. Zhadnov N.O., Kudayarov K.S., Kryuchkov D.S., Vishnyakova G.A., Khabarova K.Yu., Kolachevsky N.N. *Appl. Opt.*, **60**, 9151 (2021).
18. Matei D.G. et al. *J. Phys. Conf. Ser.*, **723**, 012031 (2016).
19. Diddams S.A., Vahala K., Udem T. *Science*, **369**, 3676 (2020).
20. Fortier T.M. et al. *Laser Photonics Rev.*, **10**, 780 (2016).
21. Xie X. et al. *Nat. Photonics*, **11**, 44 (2017).
22. <https://www.menlosystems.com/products/ultrastable-microwaves/pmww-1500/>.
23. Gubin M.A. et al. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
24. Shelkovnikov A. et al. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **71**, 8003706 (2022).
25. Zimmermann M., Gohle C., Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W. *Opt. Lett.*, **29**, 310 (2004).
26. Губин М.А., Проценко Е.Д. *Квантовая электроника*, **24**, 1080 (1997) [*Quantum Electron.*, **27**, 1048 (1997)].
27. Киреев А.Н. и др. *Квантовая электроника*, **50**, 1155 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 1155 (2020)].
28. Haboucha A. et al. *Opt. Lett.*, **36**, 3654 (2011).
29. Pluteshko A.V. *Proc. 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)* (Russia, Yaroslavl, 2019, pp 1–6).
30. Giunta M. et al. *Opt. Lett.*, **45**, 1140 (2020).
31. Zobel J. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **31**, 1323 (2019).
32. Zhang W. et al. *Opt. Lett.*, **39**, 1204 (2014).