

## ОПТИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ

# Метановый радиооптический задающий генератор для эталонов фонтанного типа

А.С.Шелковников, А.И.Бойко, А.Н.Киреев, А.В.Таусенев,  
Д.А.Тюриков, Д.В.Шепелев, А.В.Конященко, М.А.Губин

*Разработан задающий радиогенератор на оптических принципах на основе оптического He-Ne/CH<sub>4</sub>-стандарта частоты ( $\lambda = 3.39$  мкм) и фемтосекундной волоконной лазерной системы ( $\lambda = 1.54$  мкм). Спектр выходного сигнала генератора – это эквидистантная гребенка частот в диапазоне 60 МГц – 10 ГГц с шагом 60 МГц. Сравнение частот двух задающих генераторов показало, что кратковременная нестабильность выходной частоты для компонент гребенки в диапазоне 0.8–1.5 ГГц составляет менее  $1 \times 10^{-14}$  при времени усреднения 1 с. Проведено тестирование радиосигналов созданного генератора на аппаратуре эталонного комплекса Государственной службы времени и частоты ФГУП ВНИИФТРИ. Сигнал на номинальной частоте 100 МГц, синтезированный из одной из компонент гребенки, сравнивался с сигналами двух водородных мазеров с улучшенной кратковременной стабильностью, входящих в эталонный комплекс. Показано, что кратковременная стабильность частоты синтезированного сигнала превышает стабильность указанных мазеров в два раза и ограничивается собственной нестабильностью коммерческого синтезатора номинальной частоты 100 МГц. Выполненные эксперименты подтверждают перспективность применения разработанного радиооптического задающего генератора для систем с повышенными требованиями к кратковременной стабильности частоты, в частности для эталонов времени и частоты фонтанного типа.*

**Ключевые слова:** He-Ne/CH<sub>4</sub>-стандарт частоты, фемтосекундный делитель оптической частоты, волоконный фемтосекундный лазер, СВЧ генератор со сверхнизким фазовым шумом, атомный фонтан.

## 1. Введение

В настоящее время в качестве первичных стандартов частоты и времени, формирующих мировую и национальные шкалы времени, используются эталоны и хранители частоты фонтанного типа на холодных атомах Cs (частота перехода  $\nu = 9.2$  ГГц) и Rb ( $\nu = 6.8$  ГГц) [1]. Точность лучших Cs-эталонных находится на уровне  $1 \times 10^{-16}$ , что на два порядка превышает точность предыдущего поколения Cs-эталонных на тепловых атомах. Основной достигнутой прогресса стали методы лазерного охлаждения атомов, позволившие получить ширину реперной линии Рэмси  $\Delta\nu \sim 1$  Гц (относительная ширина линии  $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-9}$ ). Исследование шумовых характеристик стандартов частоты пассивного типа, каковыми являются и

фонтаны, показало, что из-за эффекта Дика [2, 3] время достижения указанной точности существенным образом зависит от кратковременной стабильности частоты генератора опорного сигнала, или задающего генератора (ЗГ), т. к. при регистрации сигнала узкой реперной линии и определении ее центра требуется усреднять шумы, вызванные частотными флуктуациями ЗГ.

Время получения одного отсчета сигнала реперной линии Рэмси в фонтанах определяется временем  $T_c$  «элементарного» цикла: подготовка (охлаждение) сгустка атомов, пролет по траектории, детектирование излученных атомами фотонов, и в сумме составляет  $\sim 1$  с. Принципиально важным является поддержание когерентности СВЧ поля на указанном интервале времени, т. е. необходим ЗГ с высокой кратковременной стабильностью частоты.

Относительная нестабильность частоты атомного фонтана зависит от шумов и времени измерения  $\tau > T_c$  следующим образом [4]:

$$\sigma_y = \frac{1}{\pi Q_{at}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}} \sqrt{\frac{1}{N_{at}} + \frac{1}{N_{at} N_{ph}} + \frac{2\sigma_{\delta N}^2}{N_{at}^2}} + \gamma, \quad (1)$$

где  $Q_{at}$  – фактор качества линии ( $Q_{at} = \nu_0/\Delta\nu$ ). Первые три слагаемых под корнем, содержащие число атомов  $N_{at}$  в облаке и число фотонов  $N_{ph}$  при регистрации люминесценции, определяют собственные шумы фонтана, последнее слагаемое,  $\gamma$ , отражает вклад нестабильности генератора опорного сигнала;  $\sigma_{\delta N}$  – некоррелированные среднеквадратические флуктуации числа атомов в канале детектирования..

В существующих фонтанах собственная нестабильность (значение  $\sigma_y(\tau)$  в (1) при  $\gamma = 0$ ) может лежать в диапазоне  $(10^{-13} - 10^{-14})/\sqrt{\tau/1c}$  в зависимости от конкретной

А.С.Шелковников, А.Н.Киреев, Д.А.Тюриков. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: shelkov@x4u.lebedev.ru

А.И.Бойко. ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево

А.В.Таусенев, А.В.Конященко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ООО «Авеста-Проект», Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 11

Д.В.Шепелев. ООО «Авеста-Проект», Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 11

М.А.Губин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5

Поступила в редакцию 18 ноября 2018 г., после доработки – 24 января 2019 г.

реализации стандарта [5, 6]. Если в качестве источника опросного сигнала, подаваемого на СВЧ резонатор, используются прецизионные кварцевые генераторы или Н-мазеры, имеющие характерную кратковременную нестабильность частоты  $1 \times 10^{-13}$  при  $\tau = 1$  с, то для достижения точности  $1 \times 10^{-16}$  время усреднения шумов должно составлять  $(1-2) \times 10^6$  с (три-четыре недели). Следовательно, для малощумящих фонтанов с собственной нестабильностью  $(1-3) \times 10^{-14}/\sqrt{\tau/1\text{с}}$  крайне важно применение задающего генератора с кратковременной нестабильностью не более  $1 \times 10^{-14}$  при  $\tau = 1$  с (на порядок ниже, чем у кварца или Н-мазера), т.к. это позволяет на два порядка снизить время выхода фонтана на номинальную точность. Радикальное сокращение времени измерения снижает и систематическую погрешность эталонной частоты, поскольку позволяет оперативно контролировать работу фонтана и вносить поправки в формируемую шкалу времени.

Например, в работе [6] переход на ЗГ с нестабильностью  $7.8 \times 10^{-15}$  при  $\tau = 1$  с позволил снизить нестабильность фонтана CSF2 почти на порядок, до уровня  $2.5 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau/1\text{с}}$ , что сократило время выхода фонтана на уровень  $1 \times 10^{-16}$  с недель до 17 часов. Полученное значение нестабильности соответствовало собственным шумам фонтана, а вклад шумов ЗГ в указанном случае стал пренебрежимо мал.

Задача создания задающего СВЧ генератора с высокой кратковременной стабильностью (низким уровнем фазовых шумов при малых отстройках от несущей) имеет самостоятельное значение для ряда других применений: для разработки прецизионных анализаторов спектра и измерителей фазовых шумов, для повышения чувствительности приема сигналов в радиотелескопах, системах мониторинга пространства и др. (см. [7, 8] и ссылки в этих работах).

В зарубежных лабораториях, в основном, используются два способа построения высокостабильного ЗГ для фонтанов: на основе криогенного сапфирового СВЧ генератора, являющегося весьма сложной и дорогостоящей установкой [9], и на основе лазеров, стабилизированных по сверхдобротным интерферометрам Фабри–Перо с последующим делением оптической частоты до СВЧ диапазона с помощью фемтосекундной лазерной системы [10]. Достижения российских исследователей в области создания и применения интерферометров в задачах фундаментальной метрологии отражены в [11, 12].

В настоящей работе для создания высокостабильного ЗГ на оптических принципах применен другой подход – в качестве источника стабильной частоты используется оптический He–Ne/CH<sub>4</sub>-стандарт, частота которого, как и в случае со сверхдобротными интерферометрами, делится до СВЧ диапазона фемтосекундной лазерной системой.

Привлекательными сторонами развиваемого подхода являются отсутствие криогенного оборудования, а также прямого влияния тепловых колебаний тела резонатора и поверхности зеркал на нестабильность частоты, т.к. используется квантовый репер (спектральная линия метана), а не оптический резонанс, определяемый геометрией макроскопической системы. Стабильность последней на низких частотах обусловлена коэффициентом температурного расширения и стабильностью внешних условий (температура, давление, вибрации). Использование метанового квантового репера позволяет достигать и высокой кратковременной, и высокой долговременной ста-

бильности, по крайней мере на временах до нескольких часов, поскольку дрейф частоты спектральной линии существенно меньше дрейфа резонансов интерферометра.

В настоящее время кратковременная нестабильность частоты He–Ne/CH<sub>4</sub>-стандарта, определяющие предельные характеристики ЗГ, составляет  $7 \times 10^{-15}$  при времени усреднения 1 с. По этому параметру оптический He–Ne/CH<sub>4</sub>-стандарт частоты (ОСЧ) уступает системам с интерферометрами Фабри–Перо, изготовленными из материала «УЛЕ» ( $\sim 1 \times 10^{-15}$  при  $\tau = 1$  с), но видны возможности улучшения кратковременной стабильности метанового ОСЧ, а также перспектива ее сохранения до времен усреднения  $\tau \sim 10^4-10^5$  с. В случае применения He–Ne/CH<sub>4</sub>-ЗГ в качестве генератора опросного сигнала для Cs- и Rb-фонтанов полученной в настоящее время стабильности ОСЧ достаточно, поскольку собственная нестабильность лучших фонтанов находится на уровне  $(2-3) \times 10^{-14}$  при экстраполяции на время  $\tau = 1$  с.

Первые варианты метанового ЗГ были экспериментально продемонстрированы в работе [13] с использованием фемтосекундного Ti:сапфирового синтезатора, а затем в [14, 15], где использовался компактный фемтосекундный синтезатор на волоконном эрбиевом лазере. Собственная нестабильность делителя оптической частоты (ДОЧ) была измерена в [16] и составила  $1 \times 10^{-14}$  при времени усреднения 1 с в пересчете на полосу регистрации 3 Гц. В настоящей работе метановый ЗГ получил дальнейшее развитие. Прямые сличения с мазерами показали, что ЗГ превосходит по кратковременной стабильности Н-мазеры с улучшенной кратковременной стабильностью, используемые на фонтанах ВНИИФТРИ.

Описаны основные компоненты метанового ЗГ нового поколения и приведены результаты измерения стабильности частоты радиосигналов, выполненного в лаборатории КРФ ФИАНа и на эталонном комплексе ГМЦ ГСВЧ ВНИИФТРИ.

## 2. Общая схема задающего генератора

Метановый ЗГ (рис.1) состоит из двух основных компонентов: He–Ne/CH<sub>4</sub>-ОСЧ ( $\lambda = 3.39$  мкм) и ДОЧ. Последний включает в себя фемтосекундную лазерную систему на основе волоконного эрбиевого лазера ( $\lambda = 1.54$  мкм) и оптический интерфейс связи лазеров, обеспечивающий генерацию гребенки разностных частот в кристалле

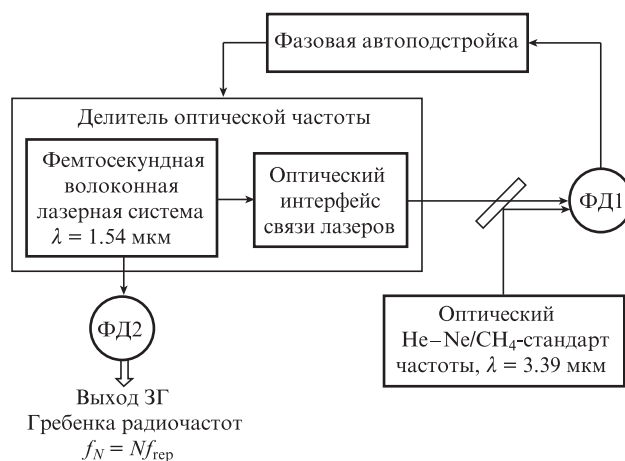


Рис.1. Схема ЗГ на основе оптического He–Ne/CH<sub>4</sub>-стандарта частоты.

периодически поляризованного ниобата лития в области длин волн ОСЧ 3.3–3.4 мкм [15].

Частоты компонент  $\nu_n$  разностной гребенки определяются только частотой следования  $f_{\text{геп}}$  импульсов фемтосекундного лазера:  $\nu_n = n f_{\text{геп}}$  ( $n$  – целое число), т. к. частота отстройки гребенки от нуля  $f_0$  вычитается в процессе генерации разностных частот. Это значительно упрощает фемтосекундную часть прибора, поскольку не требуется дополнительного канала для стабилизации  $f_0$ , т. е. сигнала биений между частотой одной из компонент разностной гребенки и частотой излучения He–Ne-ОСЧ достаточно для стабилизации частоты  $f_{\text{геп}}$  по оптическому реперу.

Ниже кратко описаны особенности основных компонентов метанового ЗГ.

### 2.1. Оптический He–Ne/CH<sub>4</sub>-стандарт частоты

Оптический стандарт частоты состоит из двух непрерывных лазеров: двухмодового опорного He–Ne/CH<sub>4</sub>-лазера, стабилизированного по F<sub>2</sub>-линии метана, и одномодового гетеродинного He–Ne-лазера, привязанного системой фазовой автоподстройки к опорному лазеру. Последний генерирует две моды с линейными взаимно ортогональными поляризациями с разностью частот  $\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2 \approx 5$  МГц. В частоте межмодовых биений  $\omega_{12}$  детектируется внутридоплеровский резонанс насыщенной дисперсии в метане, по которому стабилизируется частота лазера [17]. Для стабилизации используются сам резонанс насыщенной дисперсии, выделяемый с помощью частотного детектора, и его вторая гармоника, выделяемая синхронным детектором (рис.2). Частота модуляции  $f_m = 8$  кГц.

Величина (размах) полученного резонанса составляет  $\sim 130$  кГц при полной ширине резонанса  $2\gamma \approx 440$  кГц (рис.3). Спектральная плотность шумов частоты межмодовых биений на выходе частотного детектора на частоте второй гармоники модуляции  $2f_m = 0.15$  Гц/Гц<sup>1/2</sup>. Вклад в эту величину примерно в равных долях вносят естественный частотный шум лазера, шум частотного детектора и аддитивный шум InAs-фотодетектора. Указанные параметры резонанса позволили достигнуть нестабильности оптической частоты (относительная девиация Аллана)  $7 \times 10^{-15}$  при времени усреднения 1 с. Стабильность частоты определялась путем сличения гетеродинных лазе-

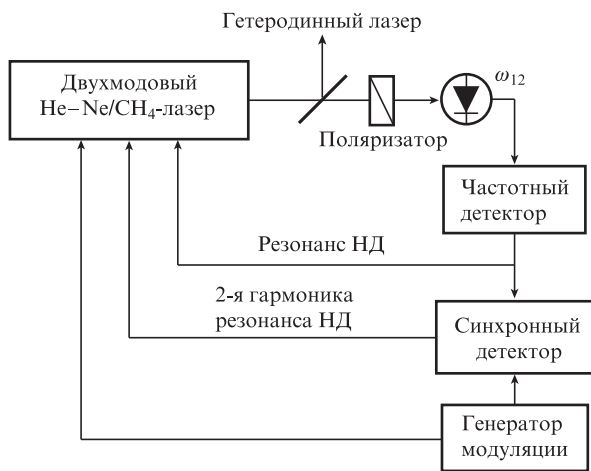


Рис.2. Схема стабилизации частоты опорного двухмодового He–Ne/CH<sub>4</sub>-лазера по резонансам насыщенной дисперсии (НД);  $\omega_{12}$  – частота межмодовых биений.

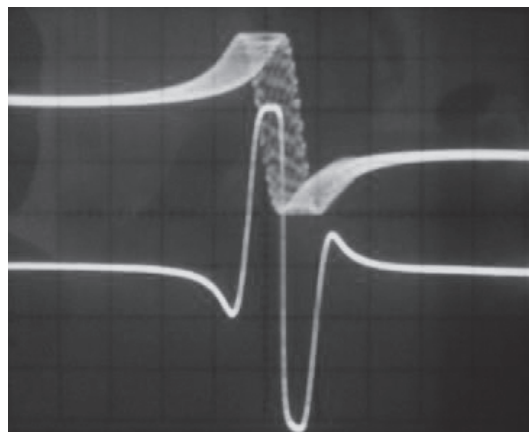


Рис.3. Резонанс насыщенной дисперсии F<sub>2</sub>-линии метана. Верхняя кривая – сигнал на выходе частотного детектора, нижняя – сигнал второй гармоники частоты модуляции на выходе синхронного детектора.

ров, входящих в состав двух идентичных ОСЧ. Излучение гетеродинного лазера не содержит частотной модуляции, используемой в опорном лазере, и он обладает повышенной выходной мощностью ( $\sim 1$  мВт), достаточной для использования в фемтосекундном делителе.

Конструктивно оптические резонаторы обоих лазеров – опорного и гетеродинного – представляют собой моноблоки, изготовленные из ситалла [18]. Моноблочная конструкция лазеров и отсутствие охлаждаемых жидким азотом фотодетекторов позволили создать относительно компактное устройство, которое в дальнейшем можно будет модернизировать, в том числе повысить долговременную стабильность частоты за счет, например, термостабилизации.

На рис.4 приведен результат сравнения двух моноблочных He–Ne/CH<sub>4</sub>-ОСЧ. Девиация Аллана при времени усреднения 1 с составляет  $7 \times 10^{-15}$  в пересчете на один лазер. Измерения проводились с помощью частотомера HP53132A, работающего в П-режиме.

### 2.2. Фемтосекундная волоконная лазерная система

Для деления частоты из оптического диапазона в радиодиапазон использовалась система на основе фемтосе-

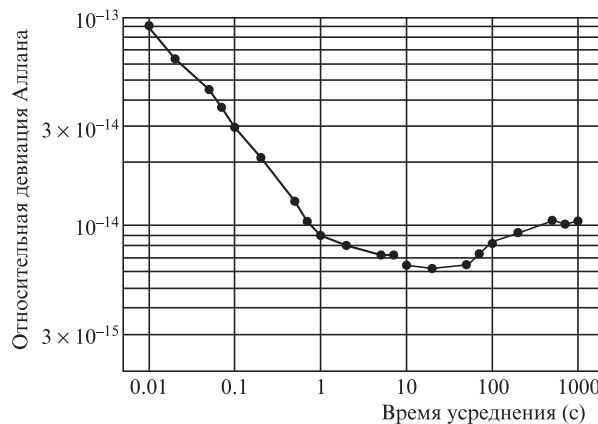


Рис.4. Относительная девиация Аллана двух независимых ОСЧ, полученная путем прямого сличения входящих в состав ОСЧ гетеродинных лазеров. Частота биений составляла 2.6 МГц при несущей частоте 88 ТГц.

кундного волоконного  $\text{Er}^{3+}$ -лазера. Лазер собран на волокнах, поддерживающих поляризацию, для обеспечения механизма самомодуляции в нем используется керровская нелинейность. Частота следования импульсов лазера  $f_{\text{rep}}$  составляла  $\sim 60$  МГц. По сравнению с [14, 15] в лазер дополнительно введены еще два канала активного контроля частоты следования: электрооптический модулятор и элемент Пельтье, регулирующий температуру участка волокна лазера. Использование электрооптического модулятора вместе с пьезокерамическим транслятором позволило расширить полосу обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты до 150 кГц, что оказалось достаточным для достижения нестабильности на уровне  $1 \times 10^{-14}$  при времени усреднения 1 с.

Подробное описание и особенности работы созданной фемтосекундной системы, включающей фемтосекундный генератор, волоконные усилители и генератор суперконтинуума, будут предоставлены в отдельной публикации. Здесь отметим, что данные, полученные при сравнении выходной частоты ЗГ с частотами Н-мазеров, позволили определить проблемные узлы и достичь после доработки устойчивой многодневной автономной работы фемтосекундной системы и ЗГ в целом.

Выходным сигналом ЗГ является непрерывная последовательность пикосекундных импульсов со стабилизированной частотой следования, получаемая на выходе фотодетектора ФД2 (см. рис.1). Длительность импульсов определяется быстродействием фотодетектора и в нашем случае составляет  $\sim 100$  пс. Спектр непрерывной последовательности импульсов представляет собой гребенку радиочастот:  $f_N = Nf_{\text{rep}}$ . Любая из компонент спектра может быть выделена радиотехническими методами и использована в качестве выходного сигнала ЗГ. Однако относительная стабильность этих компонент разная. Стабильность сначала растет с увеличением номера гармоники, а затем начинает уменьшаться вследствие ухудшения отношения сигнал/шум из-за конечности полосы фотоприемника. Исходя из этих соображений и с учетом имеющейся элементной базы, в настоящей работе использовались гармоники с  $N = 14$  (834 МГц) и  $N = 26$  (1.55 ГГц).

Для получения предельных характеристик ЗГ также следует учитывать возможное насыщение фотоприемника большой энергией фемтосекундного импульса. Проблема насыщения может быть решена с помощью внерезонаторного мультиплицирования частоты следования фемтосекундных импульсов, что эквивалентно прореживанию (фильтрации) оптической гребенки с перераспределением мощности между компонентами [19].

### 3. Результаты сравнения частот двух независимых задающих генераторов

К настоящему времени создано два экспериментальных макета метанового ЗГ, что позволило провести оценку стабильности выходных радиосигналов путем их прямого сравнения. Сигналы генераторов сравнивались на частоте 1.55 ГГц (26-я гармоника частоты  $f_{\text{rep}}$ ). Частоты следования двух фемтосекундных лазеров, входящих в состав ЗГ, различались на 400 Гц, что приводило к разности частот 10 кГц на 26-й гармонике. Такое небольшое различие при несущей частоте 1.55 ГГц обеспечивало проведение частотных измерений с необходимой точностью. Схема эксперимента приведена на рис.5.

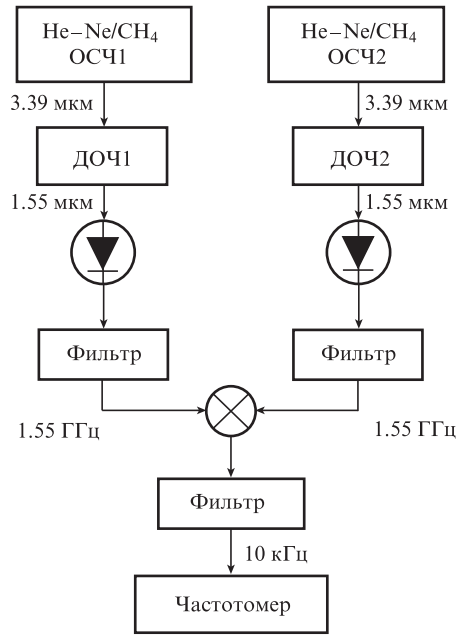


Рис.5. Схема измерения стабильности частоты выходного сигнала ЗГ.

Для измерения разности частот двух ЗГ использовался частотомер HP53132A в двух режимах счета: в П-режиме с фильтром с полосой пропускания 300 Гц на входе и в Л-режиме. Зависимость относительной девиации Аллана двух ЗГ от времени усреднения изображена кружками на рис.6. На временах до 10 с зависимость ведет себя как  $1/\tau$ , что характерно для белого фазового шума. Вклад такого шума в нестабильность зависит от ширины полосы пропускания тракта на входе частотомера. В стандартной процедуре измерения нестабильности мазеров используется фильтр с полосой 3 Гц. Пересчет девиации Аллана для фильтра с полосой 3 Гц при времени усреднения 1 с дает не более  $1 \times 10^{-14}$ . На рис.6 квадратами приведена зависимость двухвыборочной «треугольной» девиации, т. е. девиации, рассчитанной из данных, полученных при работе частотомера в Л-режиме [20]. В Л-режиме входной сигнал дополнительно обрабатывается в частотомере по определенному алгоритму с фильтрацией данных; полученные данные не корректно использовать для расчета девиации Аллана, но, тем не менее, «треуголь-

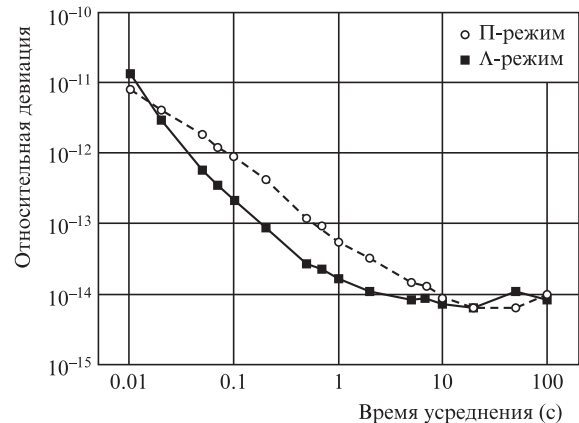


Рис.6. Относительная нестабильность частоты двух ЗГ на несущей 1.55 ГГц. При измерениях использовался фильтр с полосой пропускания 300 Гц на входе частотомера.

ную» девиацию можно использовать для оценки нижней границы неустойчивости генератора. В пересчете на один генератор в  $\Lambda$ -режиме неустойчивость частоты при  $\tau = 1$  с также не превышает  $1 \times 10^{-14}$ . Полученная кратковременная стабильность частоты метанового ЗГ существенно выше стабильности Н-мазеров, обычно используемых в качестве источников опросного сигнала на фонтанах.

#### 4. Результаты сравнения задающего генератора с Н-мазерами эталонного комплекса

Для продолжения исследований с использованием прецизионной радиоизмерительной аппаратуры один из ЗГ был доставлен на эталонный комплекс ВНИИФТРИ. Основная задача исследований состояла в выяснении возможности применения метанового ЗГ в качестве генератора опросного сигнала для фонтанов с целью улучшения стабильности эталонной частоты.

Исходя из требований совместимости метанового ЗГ и действующих во ВНИИФТРИ фонтанов, была разработана и реализована схема синтеза опорного сигнала для фонтанов, показанная на рис.7.

В радиоаппаратуре, обеспечивающей синтез опросного сигнала для атомов Cs/Rb, связь фонтана с комплексом хранителей на Н-мазерах и контроль стабильности частоты, в качестве опорных используются стандартные частоты 5 и 100 МГц. Для приведения выходной частоты ЗГ к одному из этих значений в схему был включен синтезатор номинальной частоты. Входным сигналом для него выбрана компонента гребенки с частотой 834 МГц ( $N = 14$ ). Для формирования опросного сигнала для Cs/Rb-фонтана на частоте 9.1/6.8 ГГц во ВНИИФТРИ используется прецизионный синтезатор фирмы SDI (рис.7). Стандартным опорным сигналом для него служит сигнал на частоте 5 МГц, но при перекоммутации внутренних блоков синтезатора возможно использование опорного сигнала на частоте 100 МГц. Измерения неустойчивости данного синтезатора на частоте 6.8 ГГц показали, что при опорном сигнале 5 МГц его собственная неустойчивость составляет  $5 \times 10^{-14}$  в полосе 5 Гц, а при опорном сигнале 100 МГц – на порядок ниже:  $5 \times 10^{-15}$ . Поэтому в качестве номинальной частоты была выбрана частота 100 МГц. Кроме того, синтез частот менее 50 МГц из компонент гребенки с сохранением начальной неустойчивости  $1 \times 10^{-14}$  при  $\tau = 1$  с – это сложная радиотехническая задача, хотя и принципиально решаемая [21].

Второе условие проведения экспериментов на фонтане – обеспечение долговременной стабильности метанового ЗГ. Для этого ЗГ на больших временах был привязан к Н-мазеру, используемому на фонтане. Цифровая фазовая привязка была реализована путем введения в схему (рис.7) частотного компаратора в качестве фазового детектора и устройства подстройки частоты гетеродинного лазера, входящего в состав ОСЧ. В результате реализация схемы стыковки ЗГ с фонтаном обеспечивала синтез номинальной частоты 100 МГц и медленную, с постоянной времени 20–50 с, привязку ЗГ к одному из Н-мазеров эталонного комплекса.

Разработанная схема позволяла проводить измерение стабильности частоты синтезированного опорного сигнала 100 МГц путем его сравнения с сигналами от Н-мазеров, разработанных ЗАО «Время-Ч» специально для комплекса фонтанов ВНИИФТРИ и обладающих кратковременной неустойчивостью частоты на уровне  $(6-8) \times 10^{-14}$  при  $\tau = 1$  с. На входы частотного компаратора VCH-314 одновременно подавалось три сигнала на частоте 100 МГц: от метанового ЗГ и двух мазеров. Метод «трех точек» позволяет из получаемых данных определять неустойчивость каждого из сигналов. Результаты измерений приведены на рис.8 (полоса фильтра 3 Гц).

Полученное значение относительной девиации Аллана для сигнала от He-Ne/CH<sub>4</sub>-ЗГ, составившее  $3 \times 10^{-14}$  при  $\tau = 1$  с, в два раза меньше, чем у мазеров, но в три раза больше неустойчивости ЗГ на СВЧ частотах (см. рис.6). Дegrадация стабильности связана с шумами, вносимыми

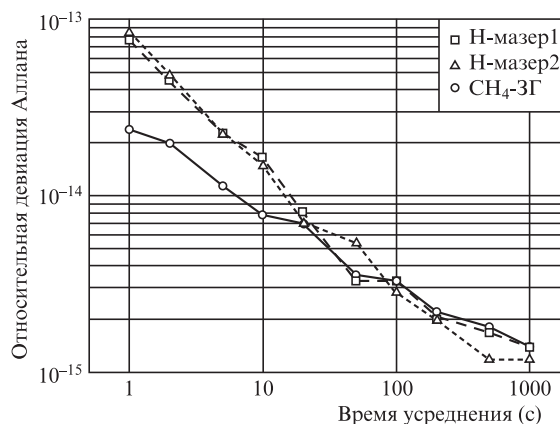


Рис.8. Зависимости относительной девиации Аллана от времени усреднения для двух водородных мазеров и метанового ЗГ в режиме медленной привязки к одному из мазеров.

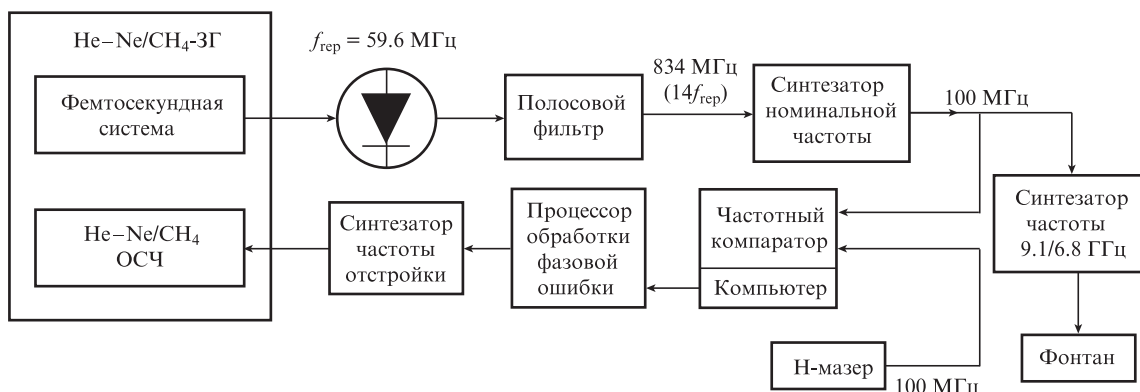


Рис.7. Схема синтеза опорного сигнала 100 МГц для Cs/Rb-фонтана.

коммерческим синтезатором номинальной частоты, который формирует сигнал 100 МГц.

Собственная нестабильность синтезатора определялась в отдельном эксперименте с помощью анализатора фазовых шумов и девиации Аллана «Microsemi» 5125A. Для этого использовались два идентичных синтезатора, на входы которых подавался сигнал от одного высокостабильного генератора. Измеренная нестабильность составила  $3 \times 10^{-14}$  в полосе 5 Гц при  $\tau = 1$  с, что совпадает с приведенным выше значением. В настоящее время идет разработка нового синтезатора с выходными частотами 9.1/6.8 ГГц и уровнем собственной нестабильности не хуже  $5 \times 10^{-15}$  при  $\tau = 1$  с.

## 5. Заключение

Создан задающий генератор, превосходящий по кратковременной стабильности водородные лазеры с улучшенной кратковременной стабильностью из эталонного комплекса ВНИИФТРИ. В области выходных частот 0.8–1.5 ГГц нестабильность генератора составляет менее  $1 \times 10^{-14}$  при времени усреднения 1 с.

На основе созданного генератора разработана и реализована схема синтеза опорного сигнала номинальной частоты 100 МГц для формирования опросного сигнала Cs/Rb-фонтанов ВНИИФТРИ. Нестабильность синтезированной частоты 100 МГц составляет  $3 \times 10^{-14}$  при времени усреднения 1 с, и она ограничена собственной нестабильностью используемого коммерческого радиосинтезатора.

Следующим этапом исследований станет испытание задающего генератора непосредственно на фонтанах.

Авторы выражают благодарность Ю.С.Домнину за многочисленные ценные разъяснения, связанные с работой эталонного комплекса.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 16-19-10694).

1. Риле Ф. *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009).
2. Dick G.J., in *Proc. 19th Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting* (Redondo Beach, CA, 1987, p.133).
3. Santarelli G. et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **45**, 887 (1998).
4. Santarelli G., Laurent P., Lemonde P., Clairon A., Mann A.G., Chang S., Luiten A.N., Salomon C. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 4619 (1999).
5. Guéna J. et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **59**, 391 (2012).
6. Lipphardt B., Gerginov V., Weyers S., et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **64**, 761 (2017).
7. Загороднов А.П., Якунин А.Н. *Научное приборостроение*, **22**, 19 (2012).
8. Kim J., Cox J., Chen J., Kartner F. *Nature Photon.*, **2**, 733 (2008).
9. Fluhr C. et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **63**, 915 (2016).
10. Fortier T.M. et al. *Nature Photon.*, **5**, 425 (2011).
11. Колачевский Н.Н., Хабарова К.Ю. *УФН*, **184**, 1354 (2014).
12. Вишнякова Г.А. и др. *УФН*, **186**, 176 (2016).
13. Foreman S., Marian A., Ye J., Petrukhin E., Gubin M., Mücke O., Wong F., Ippen E., Kaertner F. *Opt. Lett.*, **30**, 570 (2005).
14. Губин М.А. и др. *Квантовая электроника*, **38**, 613 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 613 (2008)].
15. Gubin M.A. et al. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
16. Киреев А.Н. и др. *Квантовая электроника*, **46**, 1139 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1139 (2016)].
17. Губин М.А., Проценко Е.Д. *Квантовая электроника*, **24**, 1080 (1997) [*Quantum Electron.*, **27**, 1048 (1997)].
18. Gubin M.A. et al., in *Proc 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)* (Besancon, France, 2017, p. 452).
19. Haboucha A., Zhang W., Li T., Lours M., Luiten A.N., Le Coq Y., Santarelli G. *Opt. Lett.*, **36**, 3654 (2011).
20. Dawkins S.T., McFerran J.J., Luiten A.N. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **54**, 918 (2007).
21. Hatti A. et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **60**, 1796 (2013).