

## ПРОСТОЕ РАДИОФОТОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ МНОЖЕСТВА СВЧ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СИММЕТРИЧНОГО НЕПЛОСКОГО ГЕНЕРАТОРА ГРЕБЕНКИ<sup>1</sup>

© 2023 г. А. В. Мальцев<sup>а</sup>, О. Г. Морозов<sup>а,\*</sup>, А. А. Иванов<sup>а</sup>,  
А. Ж. Сахабутдинов<sup>а</sup>, А. А. Кузнецов<sup>а</sup>, А. А. Лустина<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева—КАИ  
Россия, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

\*e-mail: ogmorozov@kai.ru

Поступила в редакцию 08.12.2022 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 05.04.2023 г.

Представлены и проанализированы результаты проектирования и реализации радиофотонного устройства для измерения мгновенной частоты СВЧ-сигналов, включая ситуацию с одновременным измерением мгновенных частот их множества. Принцип работы устройства заключается в сочетании измерительного преобразования “частота–амплитуда” для определяемой частоты с подавлением несущей и формирования эквидистантных каналов на гребенке частот для оценки ее величины. Предложен эффективный метод генерации неплюсской симметричной гребенки оптических частот, основанный на коммутации фазы оптической несущей с ее подавлением в фазовом модуляторе. Гребенка позволяет формировать до 10 каналов шириной 2 ГГц, которая может регулироваться. Амплитуды пограничных частот каналов неодинаковы, что позволяет проводить дифференцирование измеряемых частот по отношению мощностей их биений. Отдельно исследуются особенности измерения мгновенной частоты в нулевом канале устройства. Использование информационных сигналов с подавленной несущей позволяет снизить требования к стабильности частоты лазера. Полоса пропускания фотоприемника равна ширине канала, что позволяет использовать его как канальный фильтр. Устройство сначала моделируется в программной среде Optiwave System, а затем изучаются факторы, влияющие на характеристики системы, на испытательном стенде. Отмечается простота конструкции устройства, построенного всего на двух модуляторах.

DOI: 10.31857/S0032816223050129, EDN: ZJZYIA

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиофотонных технологий и соответствующей элементной базы привело к значительному прогрессу методов и средств измерения мгновенной частоты (ИМЧ) СВЧ-сигналов на основе оптических генераторов гребенок, что ранее осуществлялось с использованием классической электронной компонентной базы [1].

В работе [2] предложен инструмент разбиения измеряемого диапазона частот 2–12 ГГц на пять каналов. При этом ширина канала и полосы пропускания фотоприемника составляли 2 ГГц (типичная ширина канала при ИМЧ), а достигнутая потенциальная погрешность измерений – 2 МГц. Для формирования пограничных частот каналов

измерений использовался однополосный генератор гребенки на двухпортовом модуляторе Маха–Цендера (ММЦ), а отношение амплитуд двух соседних спектральных составляющих сигнала этой гребенки определяло номер канала и задавалось специальной волоконной брэгговской решеткой (ВБР) с множеством окон с различными коэффициентами отражения/пропускания. Верхняя составляющая измеряемой частоты, сформированная в однопортовом ММЦ интенсивности, смешивалась в фотоприемнике с граничными частотами гребенки канала, внутри которого она находилась, и по частотам биений и их амплитудам определялась искомая частота. В работе также была рассмотрена возможность ИМЧ нескольких СВЧ-сигналов одновременно.

В работе [3] описан способ реализации радиофотонного устройства ИМЧ СВЧ-сигналов, реализующего технологию биений, на основе тандемной

<sup>1</sup> Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

амплитудно-фазовой модуляции (ТАФМ) [4–6]. При этом ТАФМ используется как для получения оптической двухчастотной копии СВЧ-сигнала с полностью подавленной оптической несущей, так и для создания эквидистантной гребенки пограничных частот, которые покрывают весь диапазон измерений и симметрично привязаны к оптической несущей. В отличие от классических видов модуляции, разностная частота между составляющими измеряемой частоты равна самой измеряемой частоте. Ее значение определяется на основе регистрируемых амплитуд и частот биений между составляющими измеряемой частоты и двумя парами симметрично расположенных составляющих гребенки, между которыми они находятся в конкретный момент времени. Полоса пропускания фотоприемника равна ширине полосы частот одного канала частотной гребенки и служит своего рода фильтром для подавления биений измеряемой частоты с другими элементами гребенки. Различение частот биений, попавших в различные каналы, осуществляется за счет использования ВБР с амплитудно-частотной характеристикой вогнутой формы для дифференциации каналов по амплитуде регистрируемых сигналов биений.

В обеих работах [2, 3] используются генераторы гребенки плоского типа (с практически равными амплитудами), различие заключается в применении несимметричной однополосной [2] и симметричной двухполосной [3] модуляции оптической несущей СВЧ-сигналом. В [7] представлено комбинированное устройство с плоским генератором гребенки и наклонным фильтром с линейно-изменяющейся частотной характеристикой во всем диапазоне измерений. Подобный фильтр может быть изготовлен с использованием ВБР с наклонной частотной характеристикой или на основе интерферометра Фабри–Перо, изготовленного на базе двух ВБР.

В силу симметричности и отсутствия присущих однополосной модуляции искажений модуляционных преобразований с не до конца подавленной несущей, а также благодаря полному использованию мощности СВЧ-сигнала на измеряемой частоте устройство [3] позволяет получить выигрыш по сравнению не только с указанными выше устройствами [2, 7], но и с другими известными решениями аналогичного типа [8–10] по точности измерений, полосе пропускания приемника, простоте внутрисистемного мониторинга параметров при изменении параметров окружающей среды, что показано в работах [11, 12]. Однако существенным недостатком всех указанных устройств является наличие в их структуре специальных ВБР, к которым предъявляются очень высокие требования по точности изготовления и по стабильности при изменении параметров окружающей среды.

Новым шагом к развитию устройств ИМЧ СВЧ-сигналов стало их построение без применения ВБР. В работе [13] демонстрируется несимметричное устройство ИМЧ нескольких СВЧ-сигналов. В этой работе предложен эффективный метод генерации неплоского треугольного генератора гребенки, основанный на модуляции оптической несущей в ММЦ пилообразным сигналом, который содержит множество пограничных частот спадающей амплитуды с требуемым шагом гребенки в измеряемом диапазоне. Поскольку используется однополосная модуляция оптической несущей измеряемым СВЧ-сигналом во втором ММЦ, а сама несущая сдвинута по частоте в фазовом модуляторе и однополосном фильтре, области нижней и верхней полос гребенки, в которые попадают измеряемые составляющие, далее разделяются с помощью оптического гибрида и полученные результирующие спектры подаются на балансные фотоприемники для формирования частот биений.

Учитывая уже известные нам преимущества симметричных методов, в данной работе нами предложено устройство ИМЧ множества СВЧ-сигналов, которое существенно отличается от предложенного в работе [13] простотой реализации. В верхнем плече устройства для двухполосного формирования измеряемых оптических составляющих, соответствующих множеству СВЧ-сигналов, используется ММЦ, работающий в точке минимального пропускания, а в нижнем плече для формирования треугольной симметричной гребенки используется фазовый модулятор с коммутацией полуволнового напряжения с частотой, равной частоте гребенки. В обоих случаях происходит подавление оптической несущей, что позволяет снизить требования к ее стабильности, поскольку все измерения не зависят от конкретного значения частоты и привязаны к значению пограничных частот каналов.

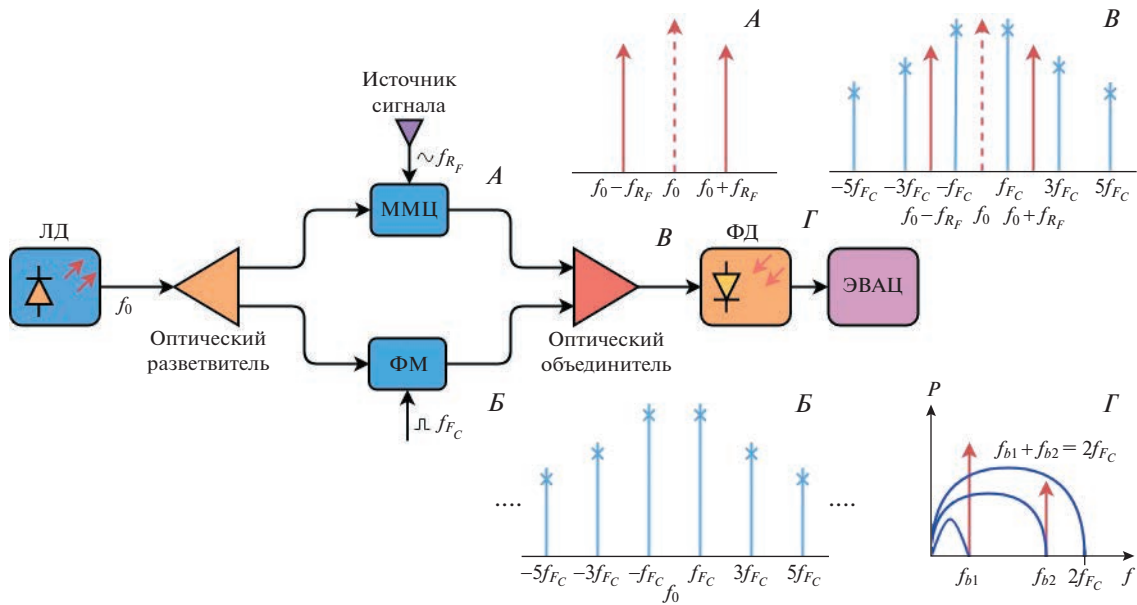
## ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВА

На рис. 1 показана структурная схема предлагаемого устройства. Устройство состоит из непрерывного лазера (ЛД), модулятор Маха–Цендера (ММЦ), фазового модулятора (ФМ) и фотодетектора (ФД). Модулятор Маха–Цендера используется для достижения двухполосной модуляции с подавлением несущей измеряемыми СВЧ-сигналами. Фазовый модулятор используется для создания неплоской треугольной гребенки также с подавлением несущей, с множеством пограничных частот и узкополосных каналов.

Исходное излучение ЛД запишем в виде

$$e(t) = E_0 \sin \varphi(t), \quad (1)$$

где  $\varphi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$  — закон изменения фазы излучения во времени, а  $E_0$ ,  $\omega_0$ ,  $\varphi_0$  — его постоянные



**Рис. 1.** Структурная схема устройства для измерения мгновенной частоты СВЧ-сигналов. ЛД – лазерный диод; ММЦ – модулятор Маха–Цендера; ФМ – фазовый модулятор; ФД – фотодетектор; ЭВАЦ – электронный векторный анализатор цепей. На вставках А–Г приведены спектры сигналов на соответствующих выходах элементов схемы.

амплитуда, частота и начальная фаза соответственно. Из теории модулированных колебаний известно, что при фазовой модуляции с определенными индексами возможно уменьшение (подавление) амплитуды несущего колебания и образование двух симметричных боковых полос.

Определим спектр излучения на выходе ММЦ при его работе в “нулевой” точке:

$$E_{\text{вых}} = -jE_0 e^{j\omega_0 t} \left[ 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) \sin(2k+1)2\pi F_R t \right], \quad (2)$$

где  $J_{2k+1}(z)$  – функция Бесселя  $(2k+1)$ -го порядка;  $F_R$  – измеряемая частота.

Анализ выражения (2) показывает, что спектр выходного излучения ММЦ в “нулевой” точке при гармоническом воздействии на измеряемой частоте содержит только ее нечетные гармоники  $(2k+1)2\pi F_R$ . Их амплитуда определяется значением функции Бесселя  $(2k+1)$ -го порядка. Фазы боковых составляющих одинаковы по величине и противоположны по знаку. Индекс  $j$  в данном выражении указывает на то, что полученные составляющие ортогональны вектору поляризации исходного излучения ЛД. При значении напряжения смещения модулятора, равном полуволновому напряжению, т.е.  $U_m = U_{\lambda/2}$ , при  $z = \pi/2$  получим  $J_1(z) = 0.57$ ,  $J_3(z) = 0.07$ , а при  $z = \pi/3$  –  $J_1(z) = 0.4$ ,  $J_3(z) = 0$ . Таким образом, основная доля энергии в спектре излучения содержится в первых гармониках, а сам спектр можно считать двухчастотным (см. рис. 1, вставка А).

Рассмотрим случай, когда фаза излучения  $\varphi(t)$  (1) изменяется по закону:

$$\varphi(t) = \begin{cases} \omega_0 t & \text{при } T(2p-1)/2 < t \leq Tp, \\ \omega_0 t + \theta & \text{при } Tp < t \leq T(2p+1)/2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $T = 2\pi/\Omega$  – период;  $\Omega = \omega_0/k = 2\pi F_C$  – частота;  $\theta$  – величина изменения фазы, причем  $k \gg 1$  – целое число;  $p = 0, 1, 2, \dots$ ;  $F_C$  – частота гребенки.

Рассмотрим случай, когда  $\theta = \pi$ , тогда разложение (3) в ряд Фурье имеет вид

$$e(t) = \frac{2E_0}{\pi} \sum_n \frac{1}{n} \{ \cos(\omega_0 + n2\pi F_C)t - \cos(\omega_0 - n2\pi F_C)t \}, \quad (4)$$

где  $n = 1, 3, 5$  – номер составляющей разложения по модулирующей частоте.

Таким образом, спектр выходного излучения ФМ представляет собой излучение с подавленной несущей и гребенку из множества пограничных составляющих, амплитуда которых определяется коэффициентами ряда Фурье (4)  $E_n = 2E_0/(\pi n)$ . Спектр коэффициентов ряда Фурье и их частотная расстановка представлены на рис. 1, вставка Б.

На выходе оптического объединителя спектры излучений с выходов ММЦ и ФМ объединяются. Например, неизвестная частота  $F_R$  попадает в первый канал, как показано на рис. 1, вставка В. На выходе ФД получим два сигнала биений как в правой, так и левой полосах гребенки: один – от

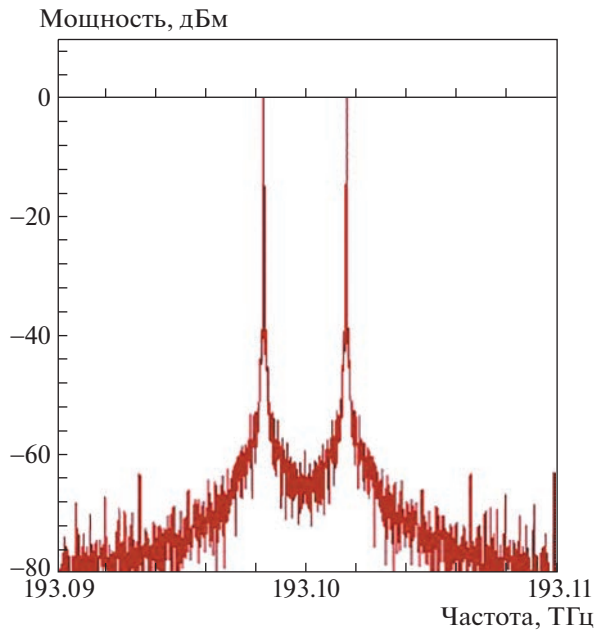


Рис. 2. Спектр сигнала на выходе ММЦ для измеряемой частоты 1.7 ГГц.

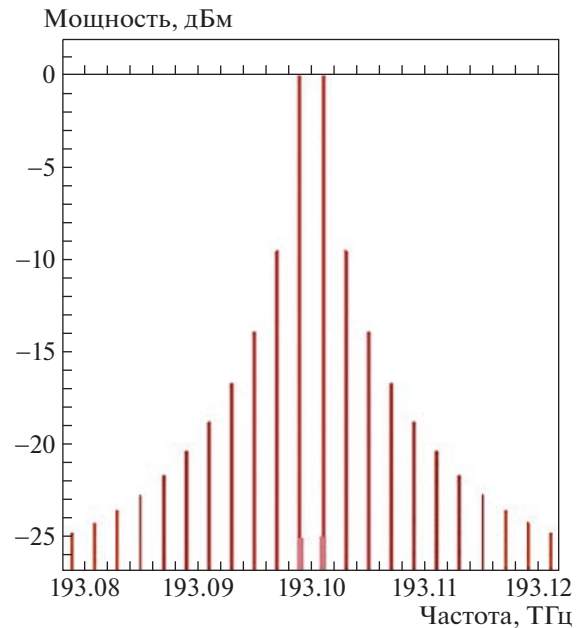


Рис. 3. Спектр частотной гребенки на выходе ФМ с шириной каналов 2 ГГц.

$F_R$  и линии гребенки  $F_C$ , а другой — от  $F_R$  и линии гребенки  $3F_C$ . Первый определяется как  $f_{b1} = F_R - F_C$ , а второй как  $f_{b2} = F_R - 3F_C$ . Выходной спектр ФД показан на рис. 1, вставка Г. Поскольку частоты  $f_{b1}$  и  $f_{b2}$  в правой и левой полосах получаются одинаковыми, для квадратичного фотодетектора можно говорить о сумме их амплитуд. На самом деле, когда проектируемое устройство получает неизвестную радиочастоту для измерения, предполагается, что она попадает между  $i$ -й и  $(i + 2)$ -й пограничными частотами. Соотношение  $\alpha$  мощностей между сигналами биений на частотах  $f_{b1}$  и  $f_{b2}$  можно описать как:

$$\alpha = P_{f_{b1}} / P_{f_{b2}} = G_i^2 / G_{i+2}^2, \quad (5)$$

где  $G_i$  — амплитуда составляющей  $i$ -й пограничной частоты.

Из уравнения (5) следует, что отношения мощностей этих двух сигналов биений различаются в разных подканалах, поскольку каждому каналу соответствуют разные амплитуды пограничных частот. Во всех каналах  $f_{b1} + f_{b2} = 2F_C$ , а номер канала распознается по соотношению  $\alpha$  мощностей. Неизвестная частота может быть идентифицирована как  $F_R = (2i + 1)F_C - f_{b2i}$  в канале  $F_C - 3F_C$ , где  $i = 1$  — номер канала. Если частота  $F_R$  попадает в канал  $3F_C - 5F_C$ , то она определяется как  $F_R = (2i + 1)F_C - f_{b2i}$ ,  $i = 2$  — номер канала.

Особое внимание следует уделить каналу  $-F_C \dots + F_C$ . В этом случае (5) принимает значение, рав-

ное 1, а сигналы биений в правой и левой полосах будут одинаковыми. Тогда для дискриминации частоты  $F_R$  берется разностная частота между ее верхней и нижней составляющими выходного сигнала ММЦ, отличительным признаком сигнала биений на данной частоте является его коэффициент амплитудной модуляции, равный 1.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Спектральные характеристики информационных сигналов смоделированы в программе OptiWave System и показаны на рис. 2, 3.

На рис. 2 показан спектр сигнала на выходе ММЦ для измеряемой частоты на оптическую несущую. Для примера выбрана частота  $F_R$ , равная 1.7 ГГц, которая при ширине каналов, равной 2 ГГц, попадает в первый канал.

На рис. 3 показан спектр сигнала на выходе ФМ для формирования гребенки частот с неплоским спектром и амплитудных составляющих, изменяющихся по закону  $E_n = 2E_0/(\pi n)$ . Для примера выбрана частота  $F_C$ , равная 1 ГГц.

Таким образом, процедура ИМЧ СВЧ-сигналов сводится к определению номера канала по отношению мощностей сигналов биений (рис. 4) и вычислению собственно мгновенной частоты внутри этого канала по значениям частот сигналов биений.

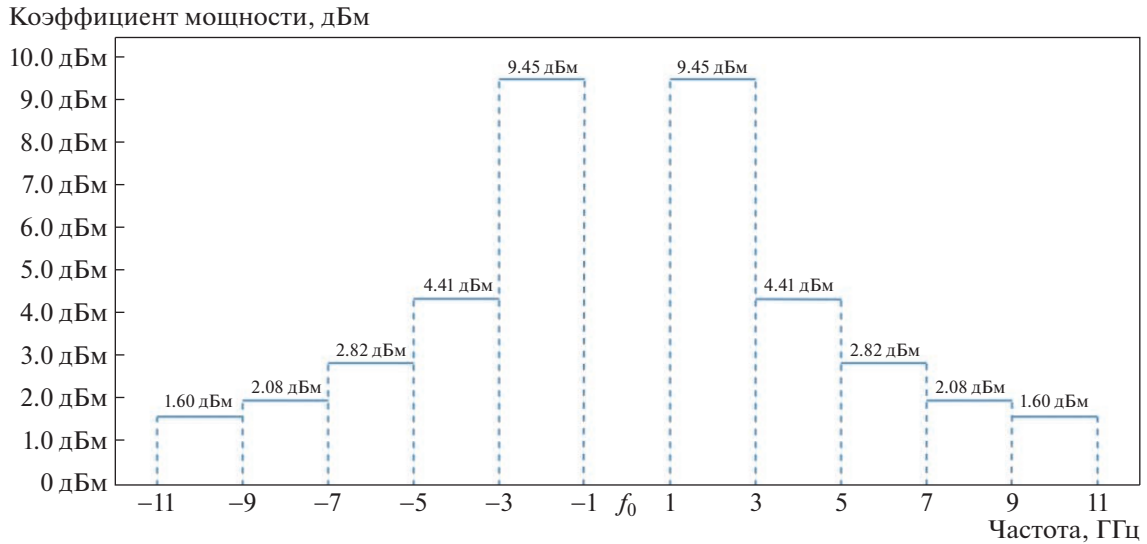


Рис. 4. Пороги каналов мощности, сформированные для гребенки, полученной в ФМ.

Для нулевого канала должна быть рассмотрена особая ситуация. Спектр сигнала, используемый для измерения выбранной в качестве примера частоты 0.6 ГГц, представлен на рис. 5. Спектр содержит частоту биений  $F_R$  с левой пограничной частотой  $-F_C$  и правой пограничной частотой  $F_C$ . Между ними расположена искомая частота биений  $2F_R$ . Для нее характерна осциллограмма с коэффициентом амплитудной модуляции, равным 1 (рис. 6).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ

Общий вид экспериментального стенда для исследования устройства ИМЧ СВЧ-сигналов представлен на рис. 7.

Устройство содержит узкополосный лазерный источник с распределенной обратной связью с центральной длиной волны 1550 нм и шириной спектра менее 10 МГц. На выходе устройства установлен векторный анализатор цепей Rohde &

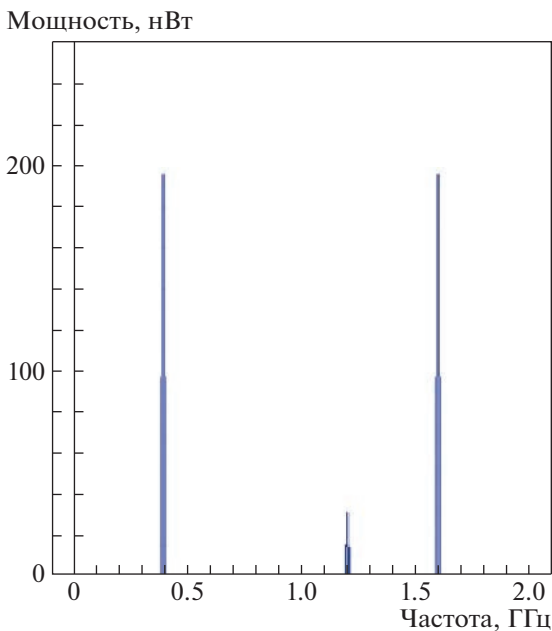


Рис. 5. Спектр сигнала на выходе нулевого канала для измеряемой частоты 0.6 ГГц.

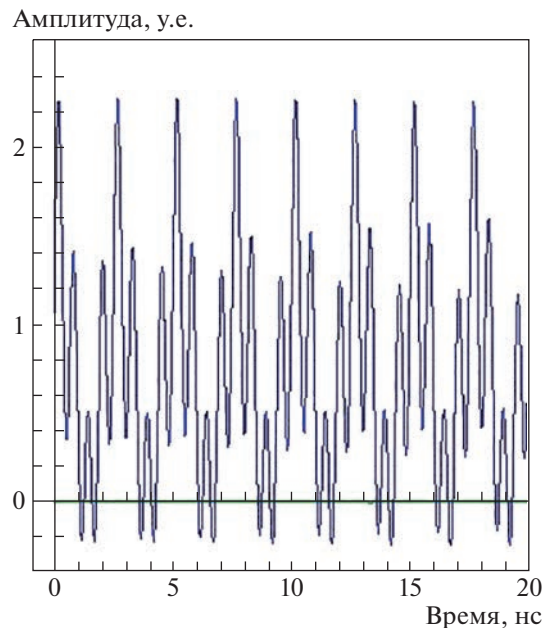
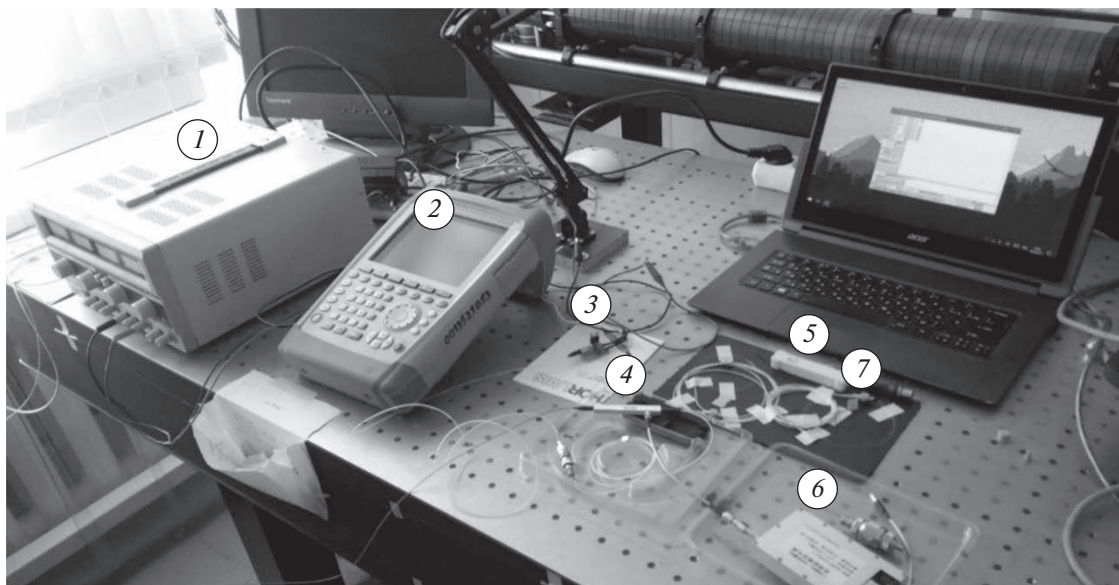
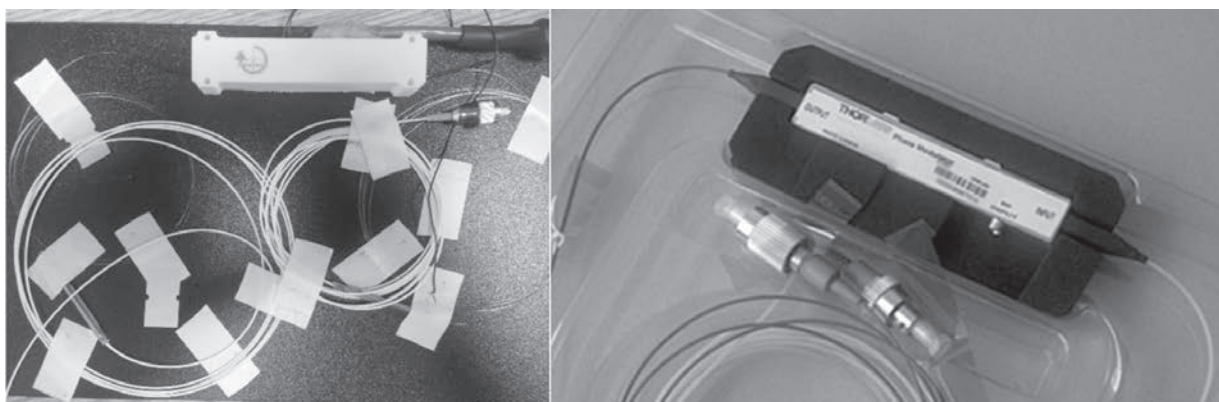


Рис. 6. Сигналограмма биений на удвоенной измеряемой частоте 0.6 ГГц с коэффициентом амплитудной модуляции 1.



**Рис. 7.** Общий вид экспериментального стенда для исследования устройства для измерения мгновенной частоты СВЧ-сигналов. 1 – генератор напряжения смещения ММЦ; 2 – векторный анализатор цепей и генератор СВЧ-сигнала; 3 – узкополосный лазерный источник; 4 – фазовый модулятор; 5 – модулятор Маха–Цендера; 6 – генератор СВЧ-сигнала гребенки; 7 – фотодетектор.



**Рис. 8.** Амплитудный модулятор Маха–Цендера ПАО “ПНППК” (а) и фазовый модулятор Thorlabs (б).

Schwarz FSH8 с диапазоном частот до 8 ГГц и подключением к ПК через программу FSH8 View для сохранения результатов измерений в виде массивов данных и Agilent E5071C с частотным диапазоном до 20 ГГц. В качестве амплитудного модулятора использовался модулятор Маха–Цендера, предоставленный ПАО “ПНППК”, Пермь (рис. 8а). Фазовая модуляция осуществлялась с помощью электрооптического модулятора Thorlabs LN53S-FC (рис. 8б).

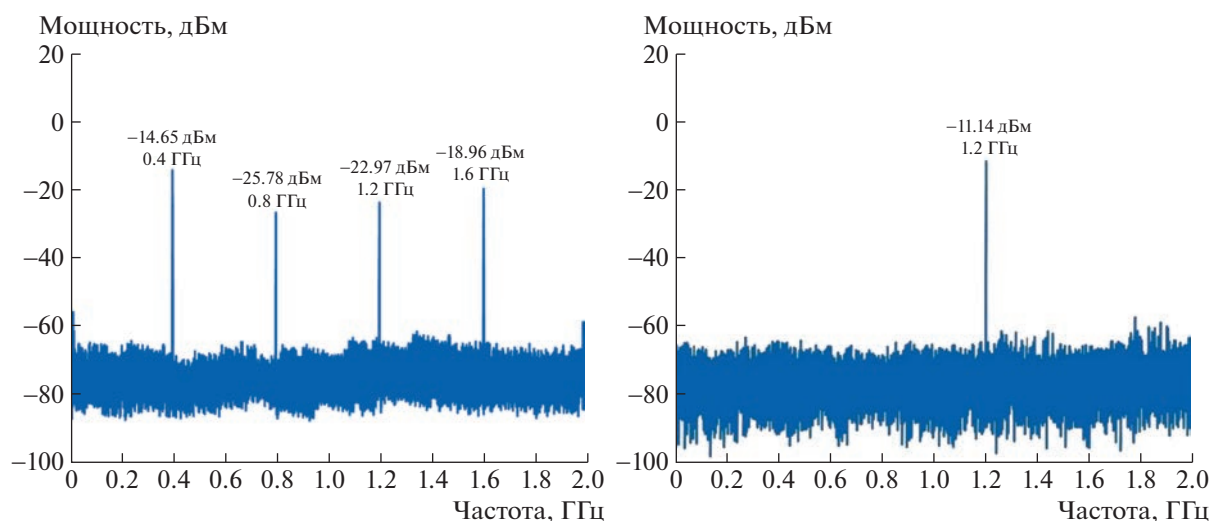
В качестве тестовых частот использовались частоты 3.4 и 6.2 ГГц.

Спектры сигналов биений, полученных на выходе ФД, изображены на рис. 9. Для случая измерения частоты 3.4 ГГц отношение амплитуд сигналов биений составило 2.81 дБ, для случая изме-

рения частоты 6.2 ГГц – 4.31 дБ (рис. 9а). Отличие от расчетных значений (рис. 4) объясняется наличием погрешностей измерений, итоговая величина которых составила по измеряемой частоте менее 1 МГц и определялась нестабильностью температуры лазера и ММЦ, для стабилизации которых применялись стандартные средства контроля и управления. Для нулевого канала (рис. 9б) показана выделенная информационная составляющая на удвоенной измеряемой частоте 0.6 ГГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В представленной работе смоделирован и экспериментально исследован способ реализации



**Рис. 9.** Спектры сигналов биений на выходе ФД для измеряемых частот: **а** — 3.4 ГГц во втором канале (крайние составляющие) и 6.2 ГГц в третьем канале (внутренние составляющие), измерение происходит одновременно; **б** — 0.6 ГГц в нулевом канале.

радиофотонного устройства для измерения мгновенной частоты множества СВЧ-сигналов на основе симметричного неплоского генератора гребенки. При этом используется двухполосный сигнал с полностью подавленной оптической несущей и составляющими на измеряемых частотах, полученный ММЦ, работающим в нулевой рабочей точке. Для создания эквидистантной гребенки пограничных частот с интервалом 2 ГГц, которые покрывают весь диапазон измерений 20 ГГц и симметрично привязаны к подавленной оптической несущей, использовался ФМ в режиме коммутации фазы на  $\pi$ . Отсутствие несущей частоты в обоих информационных сигналах значительно снижает требования к стабильности частоты лазерного источника.

Значение измеренных частот сигналов определяется на основе регистрации амплитуд и частот биений между составляющими измеряемых частот и двумя парами симметрично расположенных составляющих на пограничных частотах гребенки, между которыми они находились в конкретный момент времени. Полоса пропускания ФД равна ширине полосы частот одного «канала» частотной гребенки и служит своего рода фильтром для подавления биений измеряемой частоты с другими элементами гребенки. Различение частот биений, попавших в различные каналы, осуществляется за счет формирования неплоской гребенки для дифференциации каналов по отношению к амплитудам регистрируемых сигналов биений. В ходе модельных компьютерного и физического экспериментов с проверкой принципа действия фотонного устройства проведены двухчастотные измерения на частотах 3.4 и 6.2 ГГц. Получена низкая погрешность измерения, менее

1 МГц, в реальном масштабе времени, определяемая шириной линии излучения лазера.

Предложенная схема ИМЧ множества СВЧ-сигналов не ограничена компромиссом между диапазоном, точностью и скоростью измерений. Для регистрации мгновенной частоты используется узкополосный приемник с полосой пропускания 2 ГГц. В отличие от известных решений, разработана симметричная схема, свободная от недостатков однополосных решений, модуляционных преобразований с не до конца подавленной несущей, а также полностью использующая мощность микроволнового сигнала на измеряемой частоте.

Анализ приведенных примеров ИМЧ множества СВЧ-сигналов показывает, что разработанная методика измерений имеет ряд проблем, которые должны быть дополнительно изучены. К таким проблемам относятся измерения на частотах до 1 ГГц и ситуации, когда измеряемые частоты расположены одинаково в рамках каналов. В первом случае понадобится дополнительный анализ и определение параметров сигнала на удвоенной измеряемой частоте, для которого характерен коэффициент амплитудной модуляции, равный 1. Во втором случае следует оценить возможность различать сигналы биений на одинаковой частоте в разных каналах частотной гребенки по амплитуде и фазе, что позволит проводить измерения одновременно множества СВЧ-сигналов. Авторы надеются, что данные проблемы удастся решить при проведении дальнейших исследований представленного в данной статье радиофотонного устройства.

В заключение следует отметить простоту предложенного радиофотонного устройства, которое в своем составе содержит только два модулятора без применения устройств сдвига частоты, оптических гибридов, однополосных фильтров и т.д. При этом при изготовлении данного устройства в виде фотонной интегральной схемы могут быть дополнительно решены вопросы, связанные с габаритами устройства и его температурной стабильностью.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации государственного задания и программы стратегического академического лидерства КНИТУ-КАИ.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov A., Morozov O., Sakhabutdinov A., Kuznetsov A., Nureev I.* // Photonics. 2022. V. 9. P. 754. <https://doi.org/10.3390/photonics9100754>
2. *Shen Z., Jin C., He Q., Zhang Z., Zhao Y.* // IEEE Photonics Journal. 2019. V. 11. P. 5501708. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2922546>
3. *Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж., Иванов А.А., Папазян С.Г., Василец А.А., Мисбахов Р.Ш.* // Фотон-экспресс. 2019. № 5 (157). С. 16.
4. *Morozov O.G., Aybatov D.L.* // Proc. SPIE Optical Technologies for Telecommunications 2009. Russia, Samara, 2009. V. 7523. P. 75230D. <https://doi.org/10.1117/12.854957>
5. *Morozov O.G.* // Proc. SPIE Optical Technologies for Telecommunications 2011 (OTT 2011). Russia, Kazan, 2011. V. 8410. P. 84100P. <https://doi.org/10.1117/12.923115>
6. *Morozov O.G., Il'in G.I., Morozov G.A.* // Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). 2017. Russia, Kazan, 2017. P. 1. <https://doi.org/10.1109/SINKHROINFO.2017.7997544>
7. *Sahabutdinov A.J., Morozov O.G., Ivanov A.A., Morozov G.A., Misbakhov R.S., Feofilaktov S.V.* // Proc. of SPIE Optical Technologies in Telecommunications 2017. Russia, Kazan, 2017. V. 10774. P. 107740Y. <https://doi.org/10.1117/12.2318741>
8. *Ivanov A.A., Morozov O.G., Andreev V.A., Kuznetsov A.A., Faskhutdinov L.M.* // Proc. of XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Ukraine, Kyiv, 2017. P. 427. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972681>
9. *Ivanov A.A., Morozov O.G., Andreev V.A., Morozov G.A., Kuznetsov A.A., Faskhutdinov L.M.* // Proc. of SPIE Optical Technologies for Telecommunications 2016. Russia, Samara, 2016. V. 10342. P. 103421A. <https://doi.org/10.1117/12.2270839>
10. *Morozov O.G., Il'in G.I., Morozov G.A., Nureev I.I., Misbakhov R.S.* // Proc. of SPIE Optical Technologies for Telecommunications 2015. Russia, Ufa, 2015. V. 9807. P. 980711. <https://doi.org/10.1117/12.2231948>
11. *Morozov O.G., Nureev I.I., Morozov G.A., Ivanov A.A., Sakhabutdinov A.Z.* // Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Russia, Kaliningrad, 2021. P. 1. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488407>
12. *Sakhabutdinov A.Z., Nureev I.I., Morozov G.A., Ivanov A.A., Tyazhelova A.A.* // Proc. of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2021. Russia, Kaliningrad, 2021 P. 1. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488368>
13. *Wei Zhu, Jing Li, Miaoxia Yan, Li Pei, Tigang Ning, Jingjing Zheng, and Jianshuai Wang* // Appl. Opt. 2022. V. 61. P. 10499. <https://doi.org/10.1364/ao.476452>