



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.9>

УДК: 53.082.54

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ НЕСКОЛЬКИХ СВЧ-СИГНАЛОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО СМЕШЕНИЯ С ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ

Д.Ю. Сидлеров, К.Б. Микитчук, А.Л. Чиж

**ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
220072, Минск, пр. Независимости, 68–1**

Статья поступила в редакцию 8 июня 2026 г.

Аннотация. В данной статье предлагается метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе оптоэлектронного смешения с частотно-модулированными оптическими сигналами. Изложен принцип измерения частоты СВЧ-сигналов, а также экспериментально продемонстрирована возможность одновременного измерения частоты нескольких СВЧ-сигналов с неопределенностью измерения менее 40 МГц.

Ключевые слова: измерение частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени, оптоэлектронное смешение, оптический модулятор Маха-Цендера, частотно-временное преобразование, радиوفотоника.

Автор для переписки: Чиж Александр Леонидович, chizh@oelt.basnet.by

Введение

В системах радиолокации и радиоэлектронной борьбы частота является одним из наиболее значимых параметров СВЧ-сигналов, позволяющим идентифицировать и классифицировать их источник. Вследствие того, что анализируемый СВЧ-сигнал поступает на вход приемного устройства непредсказуемо и его воздействие может быть кратковременным, измерение частоты СВЧ-сигналов в таких системах необходимо осуществлять в режиме реального времени и в широком диапазоне частот [1].

Радиоэлектронные системы измерения частоты СВЧ-сигналов обеспечивают малое время измерения (менее 1 мкс) и высокую точность, однако из-за узкополосности радиоэлектронной аппаратуры они обладают сложной архитектурой для сигналов с шириной полосы более 2 ГГц, а также чувствительны к электромагнитным помехам [2].

Из-за огромной разности частот оптической несущей (~ 200 ТГц) и модуляционной СВЧ-составляющей (~ 1 -100 ГГц) в радиофотонных устройствах модулированный оптический сигнал является узкополосным, что существенно упрощает обработку и анализ СВЧ-сигналов в таких устройствах [2, 3]. Применение радиофотонных методов обработки СВЧ-сигналов в устройствах измерения частоты позволяет значительно расширить диапазон рабочих частот, упростить их архитектуру и устранить влияние электромагнитных помех [4, 5].

В радиофотонных устройствах измерения частоты СВЧ-сигналов используются методы на основе смещения анализируемых СВЧ-сигналов с опорным сигналом с изменяющейся частотой [6-8]. Реализация данных методов измерения на практике затруднена тем, что формирование опорного сигнала с изменяющейся частотой, как правило, требует разработки и создания специализированных волоконно-оптических и СВЧ-компонентов. В данной работе исследуется метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе оптоэлектронного смещения с частотно-модулированными оптическими сигналами, формирование которых реализовано с помощью стандартных волоконно-оптических компонентов.

1. Метод измерения частоты СВЧ-сигналов

Радиофотонные устройства измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени предназначены для первоначальной идентификации сигналов и определения частотных диапазонов, на которые стоит сосредоточить более сложные ресурсы частотного анализа [9]. Измерение частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени в радиофотонных устройствах осуществляется путем преобразования частоты в величину, поддающуюся измерению более простыми методами [10]. В предлагаемом методе – это временной интервал.

Структурная схема радиофотонного метода измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе оптоэлектронного смещения с частотно-модулированными оптическими сигналами показана на рис. 1. В данном методе частотно-модулированный оптический сигнал формируется одночастотным лазерным диодом, ток накачки которого изменяется во времени с помощью импульсного источника тока. Затем оптический сигнал поступает на вход волоконно-оптического интерферометра Майкельсона, сформированного оптическим разветвителем 2×2 , волоконно-оптической катушкой с временем задержки τ и двумя зеркалами Фарадея, и на выходе которого формируется оптический сигнал в виде суммы двух составляющих, сдвинутых во времени относительно друг друга на величину 2τ . Волоконно-оптический изолятор не допускает в лазерный диод оптический сигнал, обратно отраженный от интерферометра Майкельсона.

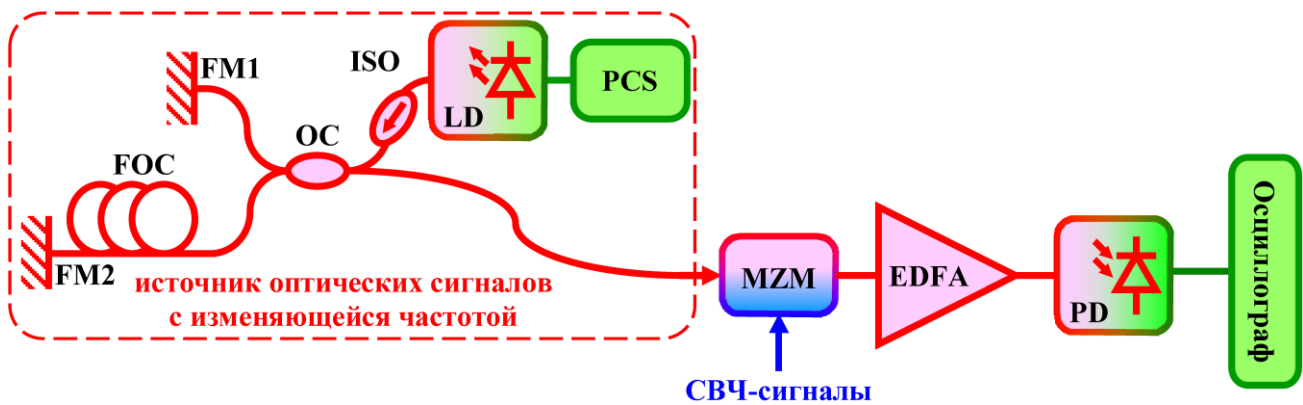


Рис. 1. Структурная схема радиофотонного метода измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе оптоэлектронного смещения с частотно-модулированными оптическими сигналами.

Таким образом, в опорном оптическом сигнале в каждый момент присутствует составляющая с постоянной частотой и составляющая, частота которой изменяется согласно изменению тока накачки лазерного диода, форма и параметры которого заданы так, чтобы разность частот между составляющими формируемого оптического сигнала изменялась линейно: сначала линейно увеличивалась, а затем линейно уменьшалась, как показано на рис. 2. Далее, опорный оптический сигнал поступает на вход электрооптического модулятора Маха-Цендера, где он модулируется по интенсивности анализируемым СВЧ-сигналом (в том числе и многочастотным), поступающим на электрический вход модулятора. Оптический сигнал с выхода модулятора Маха-Цендера сначала усиливается оптическим усилителем, компенсирующим потери в волоконно-оптических компонентах, а затем преобразуется в электрический сигнал низкочастотным фотодиодом.

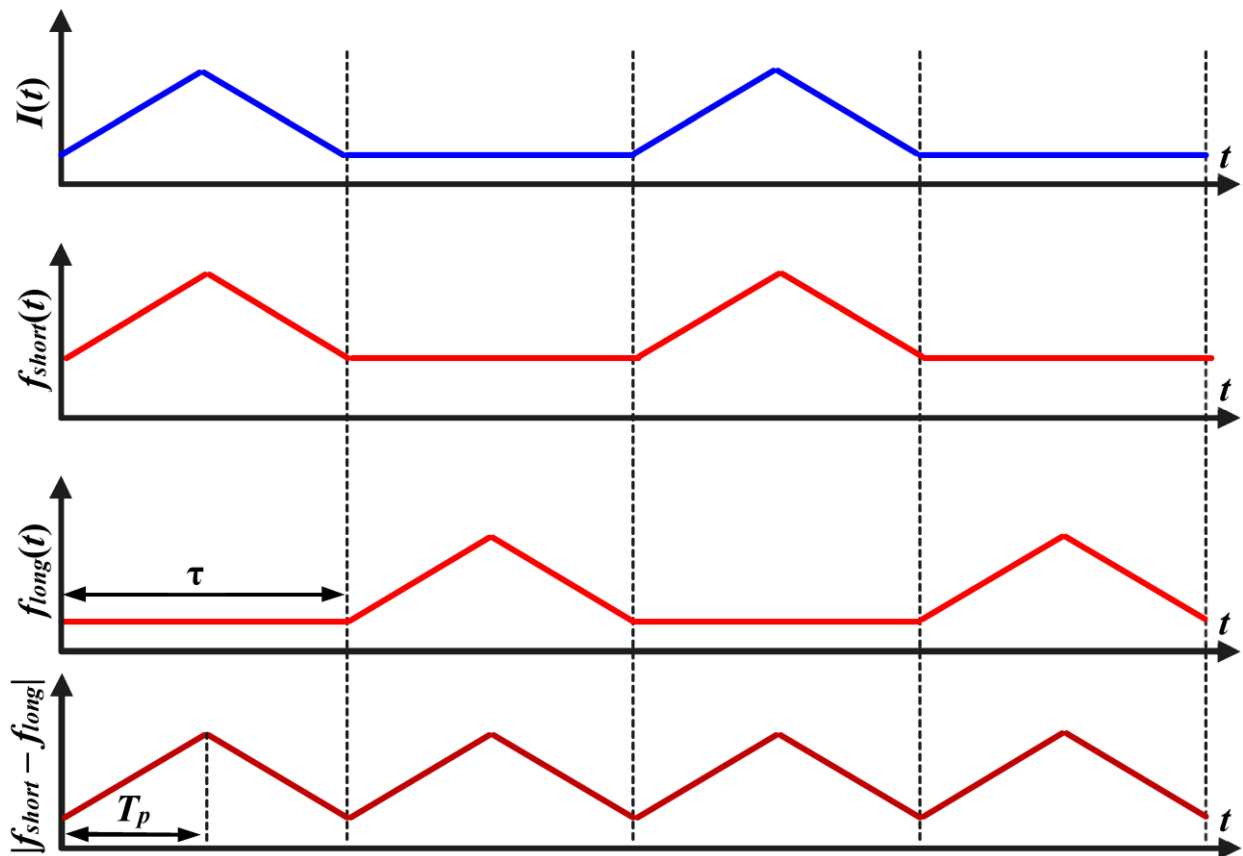


Рис. 2. Схематичное представление тока накачки $I(t)$ лазерного диода и оптических сигналов, формируемых в коротком и длинном плечах интерферометра Майкельсона с изменяющимися частотами $f_{short}(t)$ и $f_{long}(t)$, соответственно.

Из-за нелинейности модулятора Маха-Цендера при подаче на его электрический вход анализируемых СВЧ-сигналов на выходе низкочастотного фотодиода формируются импульсы, временное положение которых соответствует началу опорного сигнала и моментам совпадения мгновенной частоты анализируемого СВЧ-сигнала с частотой биений составляющих опорного оптического сигнала, как показано на рис. 3. При известном линейном законе изменения разности частот составляющих опорного оптического сигнала, определение временного интервала между низкочастотными импульсами позволяет рассчитать частоты анализируемых СВЧ-сигналов.

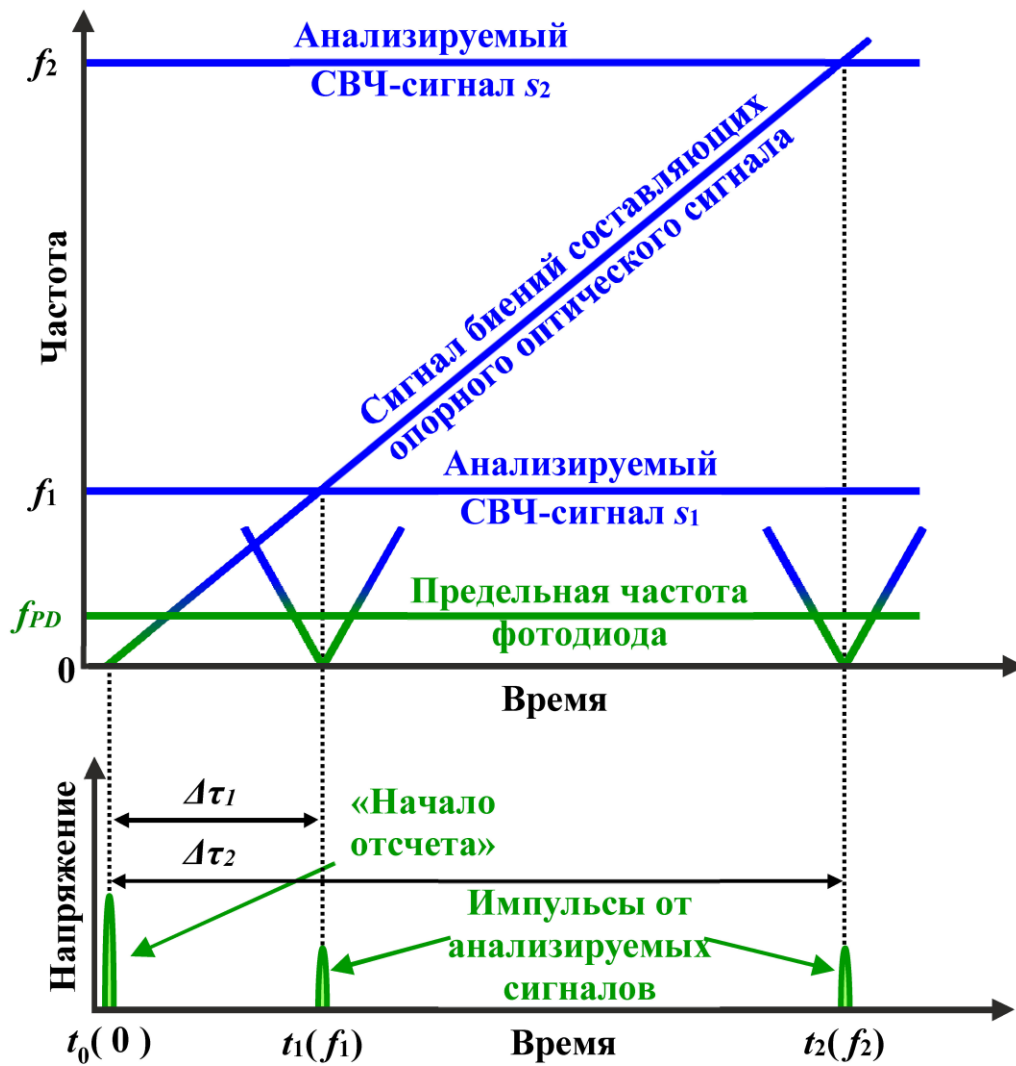


Рис. 3. Принцип радиофотонного метода измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе оптоэлектронного смешения с частотно-модулированными оптическими сигналами.

В случае, если форма и параметры тока накачки лазерного диода подобраны таким образом, чтобы разность частот между составляющими формируемого оптического сигнала изменялась линейно на некотором интервале времени, то для мощности оптического сигнала на входе модулятора Маха-Цендера справедлива следующая формула [11]:

$$P_{opt}(t) = P_{ref} \cos(\mu t^2), \quad t \in [0, T_p], \quad (1)$$

где P_{ref} – мощность опорного оптического сигнала, $\mu = 2\pi B/T_p$ – коэффициент изменения частоты составляющих опорного оптического сигнала, B и T_p – ширина полосы частот и длительность опорного оптического сигнала.

Опорный оптический сигнал подается на оптический вход модулятора Маха-Цендера, на электрический вход которого поступает несколько

анализируемых СВЧ-сигналов $s_1, s_2, \dots$ с частотами $f_1, f_2, \dots$, соответственно. Затем модулированный оптический сигнал усиливается и поступает на вход низкочастотного фотодиода. В результате воздействия анализируемого СВЧ-сигнала $s_1(t)$ с частотой f_1 формируется составляющая напряжения на выходе фотодиода, для которой справедливо следующее представление:

$$V(t) = \eta R_L G \alpha [1 - \gamma \cos(\pi s_1(t) / V_\pi + \varphi_{MZM})] P_{opt}(t). \quad (2)$$

где η – чувствительность фотодиода, R_L – сопротивление нагрузки фотодиода, G – коэффициент усиления оптического усилителя, α и γ – параметры модулятора Маха-Цендера, учитывающие оптические потери и контрастность, $s_1(t) = V_1 \cos(2\pi f_1 t)$ – СВЧ-сигнал с амплитудой V_1 и частотой f_1 , V_π и φ_{MZM} – полуволновое напряжение и фаза смещения модулятора Маха-Цендера.

Сигнал на выходе фотодиода (2) при учете разложения Якоби-Ангера можно переписать в виде суммы трех слагаемых:

$$V(t) = \Phi_1(t) + \Phi_2(t) + \Phi_3(t). \quad (3)$$

где слагаемые в формуле (3) определяются следующим образом:

$$\Phi_1(t) = V_0 \cos[\Psi(t)] J_0(\pi V_1 / V_\pi). \quad (4)$$

$$\Phi_2(t) = 2V_0 \cos[\Psi(t)] \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\pi V_1 / V_\pi) \cos[2\pi 2n f_1 t]. \quad (5)$$

$$\Phi_3(t) = -2V_0 \sin[\Psi(t)] \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} J_{2n-1}(\pi V_1 / V_\pi) \cos[2\pi (2n-1) f_1 t]. \quad (6)$$

где $V_0 = \gamma \eta V_{ref} R_L / 2$, $\Psi(t) = \varphi_{MZM} - \mu t^2$, n – целое число.

Из представления (3) – (6) видно, что сигнал на выходе СВЧ-фотодиода содержит ряд комбинационных составляющих, для анализа которых следует рассмотреть слагаемые в формуле (3) по отдельности:

1) первое слагаемое представляет собой сигнал с линейно-частотной модуляцией, с точностью до амплитуды и постоянного сдвига фазы совпадающее с огибающей опорного оптического сигнала;

2) второе слагаемое представляет собой сигнал с комбинационными частотами вида $\mu t \pm 2n f_1$ и амплитудами $\sim J_{2n}(\pi V_1 / V_\pi)$, определяемыми функциями

Бесселя четного порядка;

3) третье слагаемое представляет собой сигнал с комбинационными частотами вида $\mu t \pm (2n - 1)f_1$ и амплитудами $\sim J_{2n-1}(\pi V_1/V_\pi)$, определяемыми функциями Бесселя нечетного порядка.

Обычно отношение амплитуды анализируемого сигнала и полуволнового напряжения модулятора не превышает 1, поэтому $J_0(\pi V_1/V_\pi) \geq J_1(\pi V_1/V_\pi) \gg J_2(\pi V_1/V_\pi), J_3(\pi V_1/V_\pi), \dots$, следовательно, в формуле (3) можно пренебречь вторым слагаемым, а из третьего слагаемого остаются значимыми только составляющие с частотами $\mu t \pm f_1$ и амплитудами $\sim J_1(\pi V_1/V_\pi)$. Если учесть, что предельная частота фотодиода $f_{PD} \ll f_1$, то составляющей с суммарной частотой можно пренебречь, тогда электрический сигнал на выходе низкочастотного фотодиода можно представить в виде:

$$V_{PD}(t) \approx V_0 J_1(\pi V_1 / V_\pi) \sin(\mu t^2 - 2\pi f_1 t - \varphi_{MZM}), \quad (7)$$

Низкочастотный импульс формируется на выходе фотодиода в момент времени t_1 , когда частота сигнала (7) оказывается близка к нулевой:

$$f(t_1) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \arg(V_{PD}) \Big|_{t=t_1} = 0 \Rightarrow -f_1 + \frac{\mu}{2\pi} t_1 = 0 \Rightarrow f_1 = \frac{B}{T_p} t_1, \quad (8)$$

Для нескольких анализируемых СВЧ-сигналов k и m будут формироваться комбинационные составляющие порядка $(i + j)$, аналогичные произведениям (6) и (7), амплитуды которых удовлетворяют следующему условию:

$$V_{km}^{(ij)} \sim V_0 J_i(\pi V_k / V_\pi) J_j(\pi V_m / V_\pi) \ll V_0 J_1(\pi V_{k,m} / V_\pi), \forall i, j > 0, \quad (9)$$

То есть для каждого анализируемого сигнала в момент времени $t_1, t_2, \dots$ будет формироваться низкочастотный импульс, временной сдвиг которого относительно импульса, соответствующего опорному сигналу (4), позволяет однозначно рассчитать частоту данного сигнала с помощью соотношения (8). Следует отметить, что с помощью частотно-временного распределения [11] возможно определить временной сдвиг сигнала (7).

2. Экспериментальная проверка метода измерения частоты СВЧ-сигналов

Для проверки работоспособности предложенного метода измерения был собран макет радиофотонного устройства на основе схемы, показанной на рис. 1. В составе лабораторного макета для формирования опорного оптического сигнала использовался лазерный модуль с выходной оптической мощностью 20 мВт на основе InGaAsP/InP лазерного диода с распределенной обратной связью и управляемого напряжением импульсного источника тока. Излучение лазерного модуля направлялось в волоконно-оптический интерферометр Майкельсона, обеспечивающего разницу времен задержки 140 мкс. Для задания формы тока накачки лазерного диода использовался низкочастотный генератор сигналов произвольной формы. Для перестройки частоты оптического сигнала на 10 ГГц достаточно подать на лазерный диод изменяющийся ток накачки с полосой частот не более 40 кГц (методы синтеза временной формы тока приведены в работе [11]). Это позволило сформировать опорный оптический сигнал в виде суммы двух составляющих, разность частот между которыми изменялась следующим образом: линейно росла от 0 до $B = 4.5$ ГГц в течение $T_p = 70$ мкс, а затем линейно спадала также в течении $T_p = 70$ мкс от 4.5 до 0 ГГц. Для модуляции опорного оптического сигнала использовался электрооптический модулятор Маха-Цендера на основе LiNbO₃ с полуволновым напряжением 6 В, предельной частотой модуляции 20 ГГц и контрастностью 30 дБ. Для усиления оптического сигнала на выходе модулятора Маха-Цендера использовался малошумящий оптический усилитель на легированном эрбием волокне с коэффициентом усиления 10 дБ. Оптоэлектронное преобразование выполнялось фотоприемным модулем на основе мощного InGaAs/InP *p-i-n* фотодиода с токовой чувствительностью 1 А/Вт и предельной частотой 400 МГц. Оцифровка сигнала с выхода фотоприемного модуля выполнялась с помощью цифрового осциллографа реального времени с частотой дискретизации 500 МГц.

Для проверки работоспособности макета радиофотонного устройства измерения частоты на его вход от СВЧ-генератора сначала был подан гармонический СВЧ-сигнал мощностью 10 дБм и с частотой 2.0 ГГц. На рис. 4

приведены сигнал на выходе низкочастотного фотодиода, измеренный осциллографом, и его частотно-временное распределение. Зависимость частоты от времени извлекается как частотный аргумент локальных максимумов для каждого момента времени. В общем случае частота анализируемого сигнала рассчитывается из временного интервала Δt между двумя моментами времени, когда частота сигнала на выходе низкочастотного фотодиода оказывается близка к нулевой. При этом один из моментов соответствует началу опорного сигнала («начало отсчета»), а другой – разности частоты опорного и анализируемого сигнала. Следует отметить, что значения параметров опорного частотно-модулированного оптического сигнала (длительность линейного изменения частоты T_p и ширина полосы частот B) в соответствии с формулой (8) позволяют рассчитать частоту анализируемого сигнала с помощью коэффициента пропорциональности B/T_p , который в эксперименте равен ~ 0.064 ГГц/мкс.

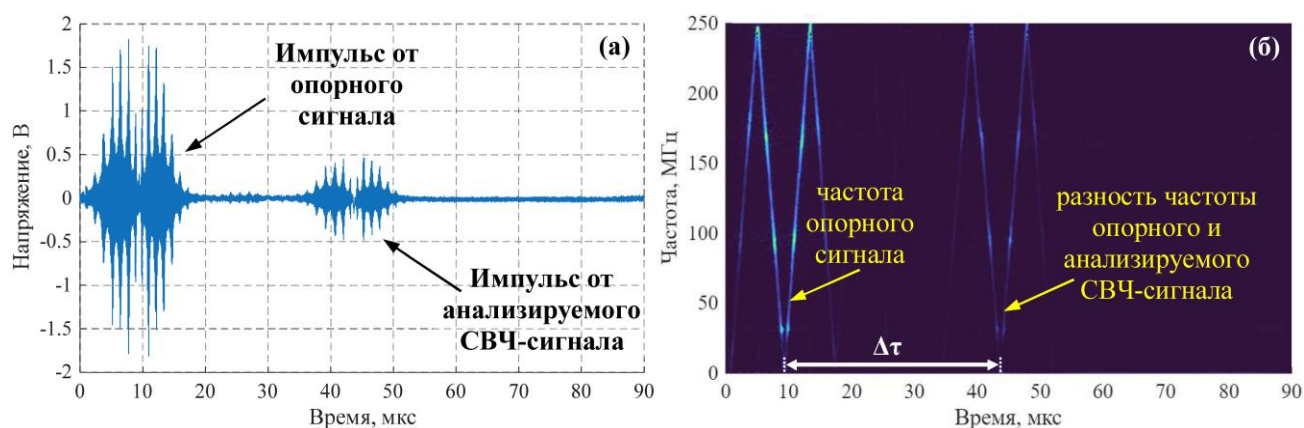


Рис. 4. Сигнал на выходе низкочастотного фотодиода, измеренный осциллографом, при подаче на вход модулятора Маха-Цендера гармонического СВЧ-сигнала с частотой 2.0 ГГц (а) и его частотно-временное распределение (б)

Для оценки неопределенности измерения частоты с помощью макета радиофотонного устройства на его вход подавались гармонические СВЧ-сигналы в интервале частот от 0.5 до 4.5 ГГц с шагом 0.1 ГГц. На рис. 5 приведен измеренный временной интервал Δt и соответствующая неопределенность расчета частоты в зависимости от частоты гармонического СВЧ-сигнала на входе макета радиофотонного устройства. Полученная в эксперименте зависимость временного интервала Δt от частоты анализируемого СВЧ-сигнала хорошо аппроксимируется линейной функцией, что удобно для калибровки

реальных устройств. Неопределенность измерения частоты составила менее 40 МГц. Максимальная измеренная частота в эксперименте составила 4.5 ГГц, однако путем изменения параметров и формы тока накачки лазерного диода полоса частот опорного оптического сигнала может быть значительно увеличена [11]. При увеличении полосы частот опорного оптического сигнала диапазон измерения частот может ограничиваться также предельной рабочей частотой модулятора Маха-Цендера.

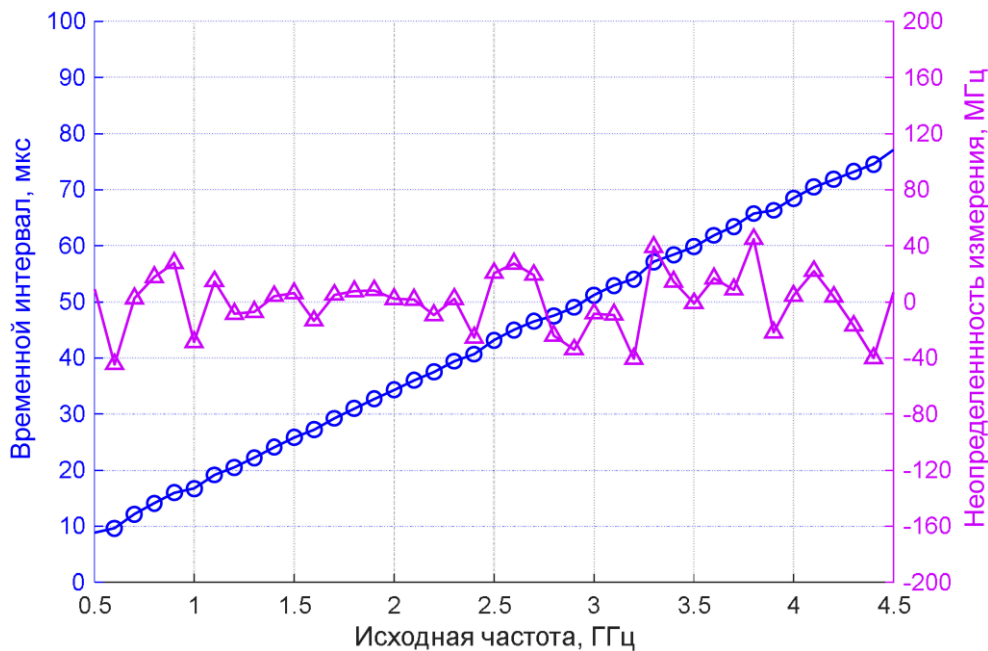


Рис. 5. Измеренный временной интервал Δt и неопределенность измерения частоты в зависимости от частоты гармонического СВЧ-сигнала на входе макета радиофотонного устройства.

Для проверки возможности измерения частот нескольких спектральных составляющих, одновременно присутствующих в сигнале, на вход макета радиофотонного устройства измерения частоты через СВЧ-сумматор мощности подавалась пара сигналов с частотами, лежащими в диапазоне от 0.7 до 0.9 ГГц и от 2.0 до 4.0 ГГц. Затем для каждой пары сигналов осциллографом измерены сигналы на выходе низкочастотного фотодиода и рассчитаны их частотно-временные распределения, которые показаны на рис. 6. Из приведенного рисунка видно, что ошибка определения нескольких частот не превышает неопределенности измерения гармонического сигнала на единственной частоте.

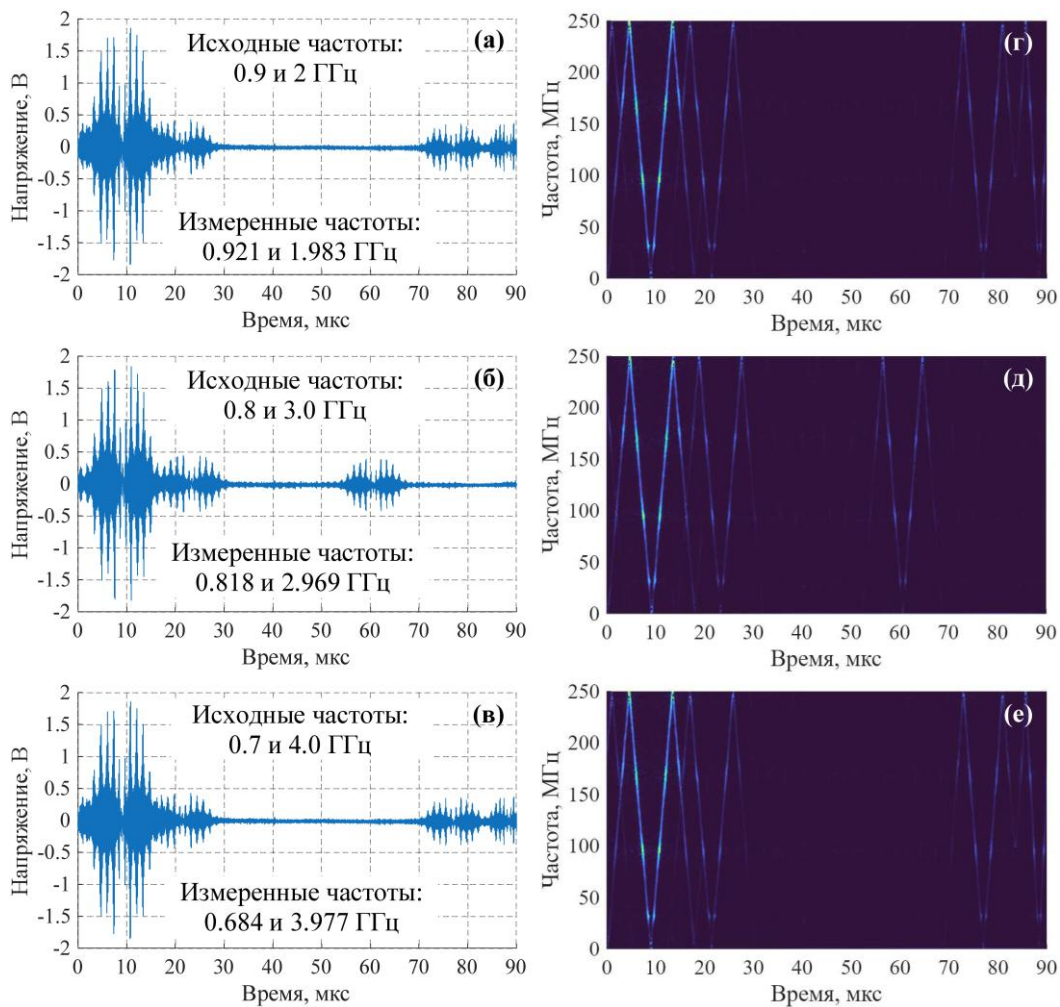


Рис. 6. Сигналы на выходе низкочастотного фотодиода, измеренные осциллографом, при подаче на вход модулятора Маха-Цендера СВЧ-сигналов с разными частотами (а) – (в) и их частотно-временное распределение (г) – (е).

Для оценки разрешения по частоте на вход макета радиофотонного устройства измерения подавались два сигнала, частота первого сигнала была зафиксирована на значении 1.0 ГГц, а частота второго сигнала изменялась в диапазоне от 1.01 до 1.1 ГГц с шагом 0.01 ГГц. На рис. 7 представлен сигнал на выходе низкочастотного фотодиода, измеренный осциллографом, при подаче на вход модулятора Маха-Цендера суммы гармонических СВЧ-сигналов с частотами 1.0 и 1.03 ГГц и его частотно-временное распределение. Видно, что временной сдвиг между двумя моментами времени, когда частоты сигналов на выходе низкочастотного фотодиода, соответствующих исходным (1.0 и 1.03 ГГц), оказываются близки к нулевой, не превышает 0.5 мкс, что, с учетом коэффициента $B/T_p = 0.064$ ГГц/мкс, позволяет оценить разрешение по частоте макета радиофотонного устройства в ~ 30 МГц.

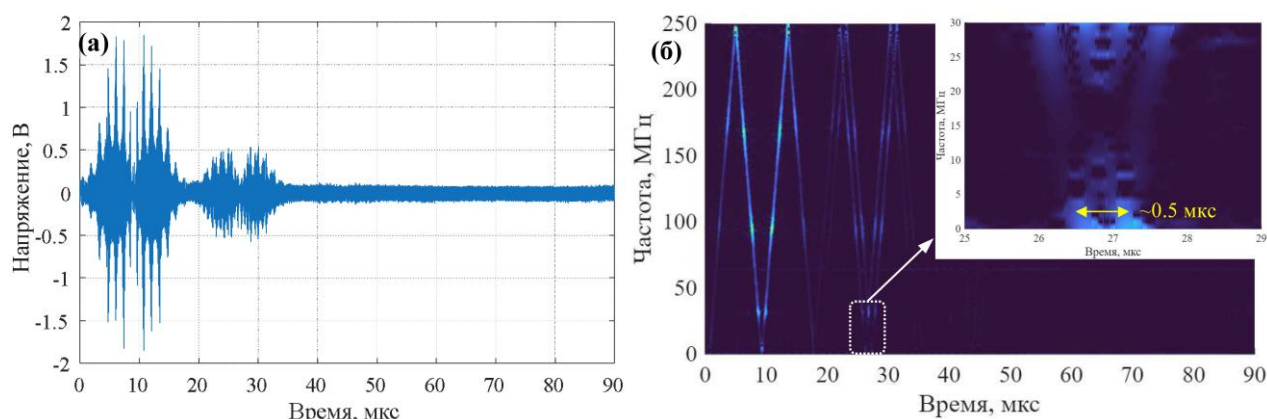


Рис. 7. Сигнал на выходе низкочастотного фотодиода, измеренный осциллографом, при подаче на вход модулятора Маха-Цендера суммы гармонических СВЧ-сигналов с частотами 1.0 и 1.03 ГГц (а) и его частотно-временное распределение (б).

Заключение

В данной статье предложен метод измерения частоты СВЧ-сигналов в режиме реального времени, в рамках которого реализуется преобразование частоты во временной интервал на основе оптоэлектронного смещения с частотно-модулированными оптическими сигналами. Теоретически показано, что при взаимодействии линейно-частотно модулированного оптического сигнала и анализируемого СВЧ-сигнала в электрооптическом модуляторе Маха-Цендера формируются низкочастотные импульсы в строго определенные моменты времени, что позволяет по измерению временного интервала между ними оценить частоту анализируемого СВЧ-сигнала. Экспериментально показана возможность одновременного измерения частоты нескольких анализируемых СВЧ-сигналов в диапазоне частот до 5 ГГц, причем при использовании частотно-временного преобразования для анализа выходного сигнала обеспечивается неопределенность измерения менее 40 МГц, при этом разрешение по частоте нескольких СВЧ-сигналов составляет величину 30 МГц.

Литература

1. Yao J., Capmany J., Li M. Microwave Photonics. – John Wiley & Sons, 2024.
<https://doi.org/10.1002/9781394205318>
2. Егоров Н., Кочемасов В. Мгновенное измерение частоты: методы и средства // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2017. – №. 5. – С. 136-141.
<https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.165.5.136.141>
3. Urick V., Williams K., McKinney J. Fundamentals of microwave photonics. – John Wiley & Sons, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781119029816>
4. Jiang H. et al. Wide-range, high-precision multiple microwave frequency measurement using a chip-based photonic Brillouin filter // Optica. – 2016. – Т. 3. – №. 1. – С. 30-34. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.000030>
5. Liu J., Shi T., Chen Y. High-accuracy multiple microwave frequency measurement with two-step accuracy improvement based on stimulated Brillouin scattering and frequency-to-time mapping // Journal of Lightwave Technology. – 2021. – Т. 39. – №. 7. – С. 2023-2032. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3044251>
6. Shi N. et al. A compact multifrequency measurement system based on an integrated frequency-scanning generator // Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 23. – С. 8571. <https://doi.org/10.3390/app10238571>
7. Zhu B. et al. Broadband instantaneous multi-frequency measurement based on a Fourier domain mode-locked laser // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2021. – Т. 69. – №. 10. – С. 4576-4583. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3103569>
8. Hao T. et al. Microwave photonics frequency-to-time mapping based on a Fourier domain mode locked optoelectronic oscillator // Optics Express. – 2018. – Т. 26. – №. 26. – С. 33582-33591. <https://doi.org/10.1364/OE.26.033582>
9. Wu R. et al. A novel method based on probability density function used in instantaneous frequency measurement system for wider range and less error // Journal of Lightwave Technology. – 2024. – Т. 42. – №. 10. – С. 3669-3676. <https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3363003>

10. Wang X. et al. Wideband adaptive microwave frequency identification using an integrated silicon photonic scanning filter // Photonics Research. – 2019. – Т. 7. – №. 2. – С. 172-181. <https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000172>
11. Микитчук К.Б., Лебедев А.С., Чиж А.Л. Метод генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.7>

Для цитирования:

Сидлеров Д.Ю., Микитчук К.Б., Чиж А.Л. Измерение частоты нескольких СВЧ-сигналов в режиме реального времени на основе оптоэлектронного смещения с частотно-модулированными оптическими сигналами // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.9>