

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.7>

УДК: 537.862

## МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СВЧ-СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ САМОГЕТЕРОДИНИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

К.Б. Микитчук, А.С. Лебедев, А.Л. Чиж

Государственное научно-производственное объединение  
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
220072, Минск, Беларусь, пр. Независимости, 68-1

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2022 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается метод генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинамирования излучения лазерного диода в волоконно-оптическом интерферометре Майкельсона. Метод генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов реализован с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона с зеркалами Фарадея. Предлагаемая схема интерферометра обеспечивает удвоение длительности задержки, уменьшение гироскопических эффектов из-за встречно распространяющегося оптического сигнала, а также позволяет получать стабильный СВЧ-сигнал биений независимо от состояния поляризации оптических сигналов в оптическом волокне. В предлагаемом методе используется прямая модуляция тока лазерного диода, обеспечивающая периодическое изменение частоты лазерного излучения. Оптическое излучение с модуляцией частоты направляется в волоконно-оптический интерферометр Майкельсона с большим рассогласованием плеч (более 10 мкс), обеспечивающий на входе мощного СВЧ-фотодиода режим самогетеродинамирования. После оптоэлектронного преобразования на выходе

СВЧ-фотодиода формируется сверхширокополосный СВЧ-сигнал с линейно-частотной модуляцией. Предлагаемый метод позволяет формировать СВЧ-сигналы с линейно-частотной модуляцией и полосой частот до нескольких десятков гигагерц, причем это достигается при модуляции тока накачки лазера в диапазоне частот менее 100 МГц из-за высокого коэффициента перестройки частоты излучения с изменением тока накачки лазерного диода ( $\sim 1$  ГГц/мА). Изменение параметров генерируемых СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией достигается с помощью изменения формы и амплитуды управляющего импульса тока накачки лазерного диода. В статье также предлагается использовать частотно-временной анализ для извлечения зависимости частоты от времени, что позволяет выполнить прямую оценку импульсной характеристики частоты лазерного диода и рассчитать необходимую форму и амплитуду импульса тока накачки для обеспечения заданных свойств выходного СВЧ-сигнала.

**Ключевые слова:** радиофотоника, генерация сверхширокополосных СВЧ-сигналов, лазерный диод, самогетеродинирование, волоконно-оптический интерферометр Майкельсона.

**Автор для переписки:** Микитчук Кирилл Борисович, [mikitchuk@oelt.basnet.by](mailto:mikitchuk@oelt.basnet.by)

## Введение

Сверхширокополосные СВЧ-сигналы широко используются в широкополосной радиосвязи и измерительной СВЧ-технике, а также для формирования радиоизображений с высоким пространственным разрешением [1]. Такие сигналы имеют большое значение для систем радиолокации, так как они обеспечивают устойчивость к электромагнитным помехам и низкую спектральную плотность мощности зондирующего сигнала [2]. Сверхширокополосные СВЧ-сигналы допускают применение методов сжатия автокорреляционной функции с целью улучшения разрешения по дальности. В частности, стандартом для радиолокационных систем и систем формирования

изображений являются линейно-частотно модулированные СВЧ-сигналы длительностью от 100 нс до 100 мкс [3].

Перспективные радиолокационные системы должны обладать рядом свойств: гетерогенность, многофункциональность и компактность, а также предоставлять наиболее полную информацию о наблюдаемом пространстве, при этом обеспечивать обнаружение и распознавание цели [4]. Традиционные решения, основанные на электронной элементной базе, характеризуются принципиально ограниченной полосой пропускания, большими размерами, весом и энергопотреблением [3,4]. Сложная техническая реализация, обусловленная использованием многоступенчатых электронных преобразований вверх или вниз с помощью электронных гетеродинов, является следствием названных ограничений, влекущих за собой значительное увеличение сложности как программного, так и аппаратного обеспечения радиолокационной системы [5]. Радиофотоника позволяет ослабить влияние данных ограничений за счет следующих особенностей:

- существует фундаментальная разница между временными/частотными масштабами оптической несущей (~200 ТГц) и модуляционной СВЧ-составляющими (~1 – 100 ГГц) в радиофотонных устройствах, то есть любой модулированный оптический сигнал является узкополосным с точки зрения оптических компонентов;
- оптическое волокно и волоконно-оптические компоненты характеризуются уникальными свойствами, некоторые из которых не имеют аналогов в электронике: сверхнизкие потери, невосприимчивость к электромагнитным помехам СВЧ-диапазона, высокая оптическая и полная гальваническая развязки;
- электронная генерация сигналов с линейной-частотной модуляцией ограничивает параллелизацию и/или формирование опорных каналов, поскольку отдельные СВЧ-генераторы некогерентны между собой, а радиофотонные устройства, напротив, позволяют гибко распределять и

задерживать любой сверхширокополосный СВЧ-сигнал на оптической несущей [4].

Методы генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов (включая сигналы с линейной-частотной модуляцией) на основе технологий радиофотоники можно разделить на четыре группы: метод формирования оптических сигналов в частотной области и преобразования «частота–время», гармоническая Фурье-синхронизация оптоэлектронных генераторов, умножение частоты оптоэлектронными методами и гетеродинирование лазерного излучения [1,6]. Первая группа методов основана на модификации спектра импульсного лазера, которая выполняется для синтеза формы спектра, идентичной форме генерируемого СВЧ-сигнала во временной области. После фотодетектирования сигнала с синтезированным спектром оказывается возможна реализация преобразования «частота–время» и формирование сверхширокополосного СВЧ-сигнала. Ключевым компонентом в таких системах является специальный формирователь спектра с линейно изменяющимся спектральным откликом в области свободной дисперсии оптического фильтра [1].

В оптоэлектронном генераторе с гармонической синхронизацией время задержки в контуре обратной связи должно быть равно целому числу периодов сканирования частоты высокочастотного узкополосного СВЧ-фильтра. Это приводит к необходимости реализации специального функционального компонента: узкополосного фильтра со сверхширокополосным диапазоном перестройки и с очень высокой скоростью перестройки [1]. При умножении частоты оптоэлектронными методами сверхкороткий лазерный импульс растягивается во времени и модулируется по частоте высокодисперсионным элементом, после чего модулируется модулятором Маха-Цендера и дополнительно растягивается/сжимается во времени другим высокодисперсионным элементом. Это требует использования очень сложной архитектуры всей системы.

При гетеродинировании лазерного излучения используется частотная модуляция лазерного диода посредством изменения тока накачки (токовый

коэффициент частоты составляет  $\sim 1$  ГГц/мА). Это позволяет генерировать частотно-модулированный оптический сигнал, биение двух задержанных и сдвинутых по частоте копий которого используется для генерации СВЧ-сигналов [6,7]. Две сдвинутые во времени оптические несущие, разность частот которых в каждый момент времени определяется задержкой в интерферометре Маха-Цендера, направляются в СВЧ-фотодиод, который детектирует СВЧ-сигнал биений с изменяющейся во времени частотой [6,8]. Для стабилизации частоты биений необходим точный контроль состояния поляризации обоих оптических сигналов в плечах интерферометра, для обеспечения максимальной амплитуды биений обычно используется волоконно-оптический контроллер поляризации, что сильно ограничивает практическую реализацию данного метода вне лаборатории.

В данной работе предлагается метод генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода, который реализован с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона с зеркалами Фарадея. Такая схема интерферометра обеспечивает удвоение длительности задержки, уменьшение гироскопических эффектов из-за встречно распространяющегося оптического сигнала, а также позволяет получать стабильный СВЧ-сигнал биений независимо от состояния поляризации оптических сигналов в оптическом волокне [9,10]. Для управления диапазоном частотной модуляции СВЧ-сигнала предлагается использовать напряжение смещения фотодиода.

## **1. Конструкция радиофотонного генератора сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией**

Рис. 1 показывает схему радиофотонного генератора для формирования сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода при помощи волоконно-оптического интерферометра Майкельсона. Высокочастотный

электрический генератор сигналов произвольной формы используется для задания формы импульса тока накачки для лазерного диода, который формируется с помощью управляемого напряжением источника тока. Подача изменяющегося во времени тока накачки приводит к излучению лазерным диодом оптического сигнала с изменяющейся во времени частотой. Следует отметить, что для обеспечения одночастотной генерации используется лазерный диод с распределенной обратной связью. После этого лазерный сигнал с изменяющейся во времени частотой направляется в волоконно-оптический интерферометр Майкельсона. Паразитные отражения от волоконно-оптического интерферометра подавляются изолятором. Волоконно-оптический интерферометр Майкельсона позволяет реализовать оптическое самогетеродинирование следующим образом.

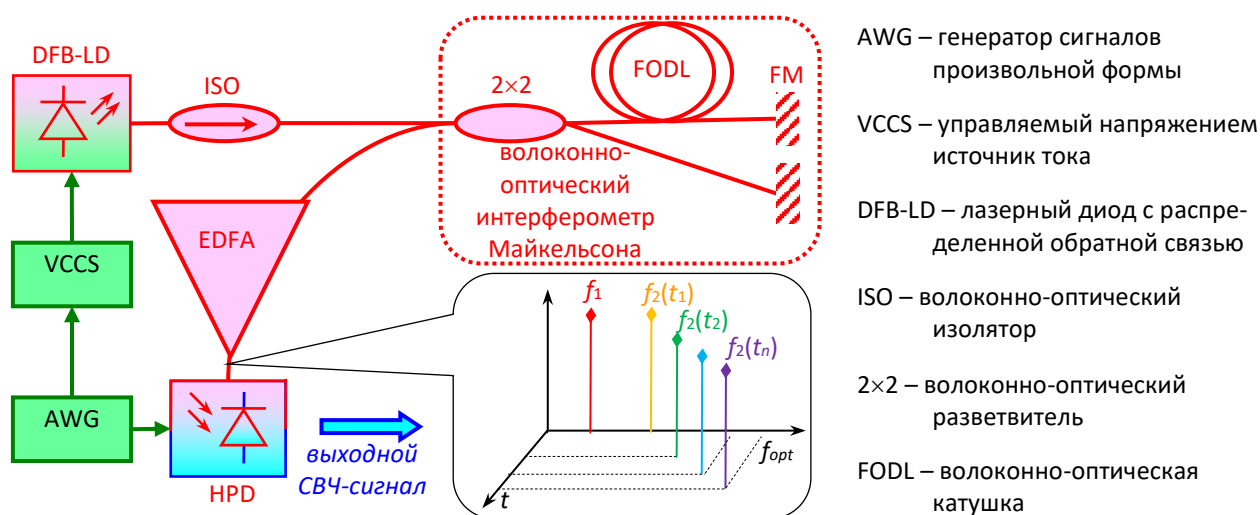


Рис. 1. Схема радиофотонного генератора сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода при помощи волоконно-оптического интерферометра Майкельсона

Интерферометр суммирует лазерный сигнал и его точную копию с временной задержкой  $\tau$ , которая, в свою очередь, определяется временной разностью задержки между плечами. При необходимости оптический сигнал в виде двух оптических несущих на выходе волоконно-оптического интерферометра Майкельсона усиливается оптическим усилителем на легированном эрбием волокне. Оптоэлектронное преобразование

осуществляется мощным СВЧ-фотодиодом. Для управления длительностью выходных СВЧ-импульсов и, как следствие, диапазоном частотной модуляции используется напряжение смещения мощного СВЧ-фотодиода.

Вставка на рис. 1 схематически показывает частотно-временное распределение оптического сигнала на входе волоконно-оптического фотодиодного модуля, спектральные компоненты представлены в дискретные моменты времени  $t_1, \dots, t_n$ . В любой момент времени оптический сигнал содержит составляющую с постоянной частотой от одного плеча интерферометра Майкельсона, а также составляющую, частота которой изменяется со временем в соответствии с током накачки, от другого плеча интерферометра.

Рис. 2 показывает схематическое представление во временной области для высокочастотных, оптических и СВЧ-сигналов в радиофотонном генераторе СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода. Следует отметить, что на данном рисунке проиллюстрирован только базовый принцип, так как в реальном устройстве из-за динамики лазерной генерации невозможно генерировать зависимости частоты от времени с резкими скачками.

В наиболее простом случае частота генерации лазера  $\nu$  зависит от тока накачки  $I(t)$  следующим образом:

$$\nu(t) \Big|_{I(t)=I_0+\tilde{I}(t)} \approx \nu_0 + \alpha\tilde{I}(t), \quad (1)$$

где  $\nu_0$  – частота генерации в стационарном состоянии, соответствующая постоянному току накачки  $I_0$ ,  $\alpha$  – токовый коэффициент частоты,  $\tilde{I}(t)$  – переменная составляющая тока накачки.

После распространения в обоих плечах интерферометра оптические импульсы сдвигаются на половину периода  $T$ . В случае скважности, равной 2, и периода  $T$ , равного удвоенной разности задержек плеч волоконно-оптического интерферометра Майкельсона  $\tau$ , формируется линейно-частотно модулированный СВЧ-сигнал, частота которого изменяется с периодом  $T_p = T/2$ .

В этом случае ток накачки и соответствующую ему частоту генерации на временном интервале  $[0, T]$  можно представить в следующем виде:

$$I(t) = \begin{cases} I_0 + \tilde{I}(t), & t \in [0, T_p] \\ I_0, & t \in (T_p, T] \end{cases} \leftrightarrow v(t) \approx \begin{cases} v_0 + \alpha \tilde{I}(t), & t \in [0, T_p] \\ v_0, & t \in (T_p, T] \end{cases}. \quad (2)$$

Результирующая частота биений  $f_{beat}(t)$  на СВЧ-фотодиоде определяется абсолютным значением разности двух оптических несущих частот:

$$f_{beat}(t) \approx \alpha \tilde{I}(t), t \in [nT/2, (n+1)T/2], n \in \mathbb{Z}. \quad (3)$$

Сигнал фотодиода может быть «вырезан по времени» для формирования требуемого диапазона частот с помощью управления напряжением смещения.

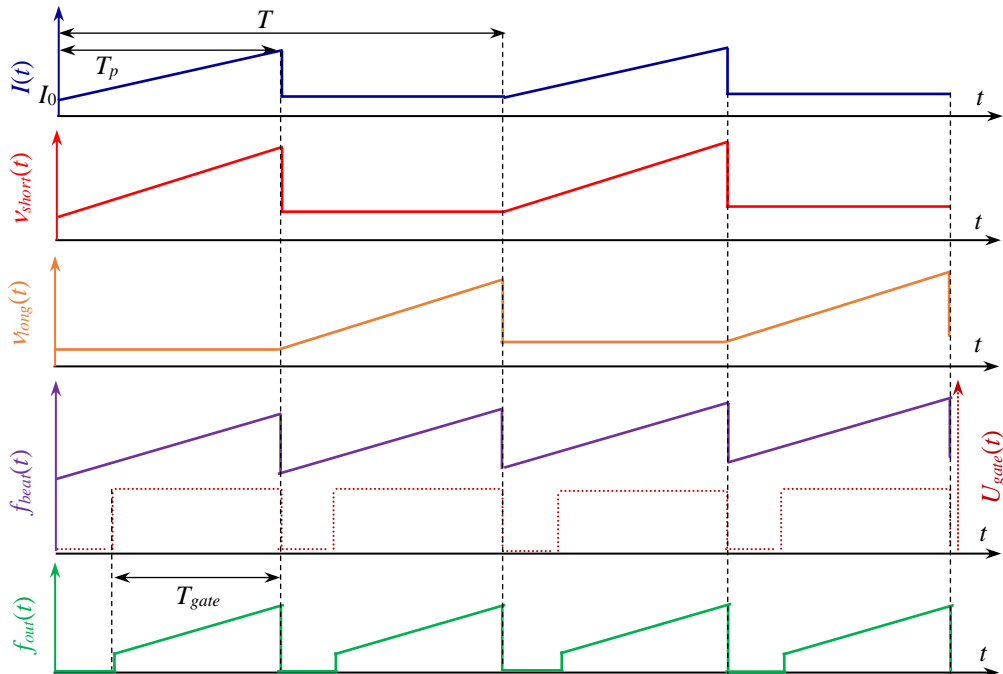


Рис. 2. Схематическое представление во временной области для высокочастотных, оптических и СВЧ-сигналов в радиофотонном генераторе СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода, где  $I(t)$  – ток накачки лазерного диода,  $v_{short}(t)$ ,  $v_{long}(t)$  – частоты оптических сигналов в коротком и длинном плечах интерферометра Майкельсона,  $U_{gate}(t)$  – управляющее напряжение на СВЧ-фотодиоде,  $f_{beat}(t)$  – частота биений,  $f_{out}(t)$  – частота выходного СВЧ-сигнала

Несмотря на внешние воздействия (температурные или механические колебания), состояние поляризации обоих оптических несущих в случае использования интерферометра Майкельсона на основе зеркал Фарадея остается



одинаковым. В традиционной конструкции на основе интерферометра Маха-Цендера случайное различное изменение состояния поляризации света двух оптических несущих является одним из основных препятствий в практической реализации самогетеродинамирования. Флуктуации амплитуды сигнала биений частично подавляются для случая использования интерферометра Маха-Цендера только внутри звуконепроницаемого корпуса, помещенного на вибростабилизированный стол, а также при соответствующей настройке перед каждым экспериментом состояния поляризации в каждом из плеч интерферометра [9]. Наоборот, при использовании интерферометра Майкельсона, зеркала Фарадея действуют как сопряженные по фазе зеркала, создавая фазовый сдвиг  $\pi/2$ , так что индуцированные в плечах флуктуации состояния поляризации устраняются на обратном пути, поскольку как температурное, так и механическое двулучепреломление в оптическом волокне «заморожены» в масштабе времени распространения света [10].

В ходе экспериментального исследования InGaAsP/InP лазерный диод с распределенной обратной связью с выходной мощностью 13 дБм и шириной линии генерации 350 кГц использовался с волоконно-оптическим изолятором для генерации оптического сигнала на длине волны 1,55 мкм. Управляемый напряжением источник тока использовался для преобразования управляющего сигнала от генератора сигналов произвольной формы с шириной полосы частот 40 МГц в ток накачки лазерного диода. Волоконно-оптический интерферометр Майкельсона построен на оптическом разветвителе  $2 \times 2$ , волоконно-оптической катушке, которая используется в качестве длинного плеча интерферометра, обеспечивающего разницу времен задержки 30 мкс, и двух зеркалах Фарадея. Мощный InGaAs/InP СВЧ-фотодиод с частично-обедненным поглощающим слоем использовался для оптоэлектронного преобразования оптического сигнала в СВЧ-сигнал [11]. Фотодиод обладает чувствительностью 0,7 А/Вт на частоте 10 ГГц и позволяет в линейном режиме достичь выходной СВЧ-мощности до 7 мВт. Малошумящий оптический усилитель на легированном эрбием волокне с

мощностью насыщения 50 мВт использовался для компенсации потерь в волоконно-оптическом интерферометре Майкельсона [12].

## 2. Характеристики радиофотонного генератора

В общем случае изменение тока накачки лазерного диода приводит к изменению плотности носителей в резонаторе и, в свою очередь, частоты излучения. Помимо изменения оптической мощности, изменение плотности носителей заряда приводит к изменению эффективного времени жизни в резонаторе лазера из-за изменения показателя преломления (динамическая частотная модуляция) и изменения температуры в активной области (термическая частотная модуляция) [8]. Оба эти процесса приводят к нелинейной зависимости выходной частоты от тока накачки. Ранее было показано, что для обеспечения генерации СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией методом самогетеродинамирования необходимо предискажение тока накачки, отличное от линейного закона [8]. Чтобы определить параметры предварительного искажения сигнала, необходимо оценить переходную или импульсную характеристику частоты лазерного диода. Как правило, частотно-модулированные сверхширокополосные сигналы характеризуются методом мгновенного измерения частоты, основанным на фазовом СВЧ-дискриминаторе с временной задержкой. Несмотря на то, что этот метод показал точные результаты в эксперименте, его использование сильно ограничено из-за влияния фазового шума, паразитной амплитудной модуляции, необходимости использования почти идеальных сверхширокополосных СВЧ-смесителей. Также ранее был предложен метод измерения импульсной характеристики со сканированием спектра, основанный принципе стробоскопического сбора данных, когда короткие выборки почти постоянной частоты формируются импульсом быстродействующего оптического усилителя с переменной временной задержкой [7,8]. В этом случае требуются значительные изменения конструкции самого радиофотонного сверхширокополосного генератора, внутри которого необходим быстродействующий твердотельный оптический усилитель

в режиме насыщения, синхронизированный с системой сбора данных и измерения частоты. Рис. 3 показывает временное представление формируемого СВЧ-сигнала с частотной модуляцией, когда в лазерный диод инжектировался линейно нарастающий ток от 15 до 15,5 мА. Видно, что во временной области анализ сигнала очень осложнен из-за плавного изменения частоты.

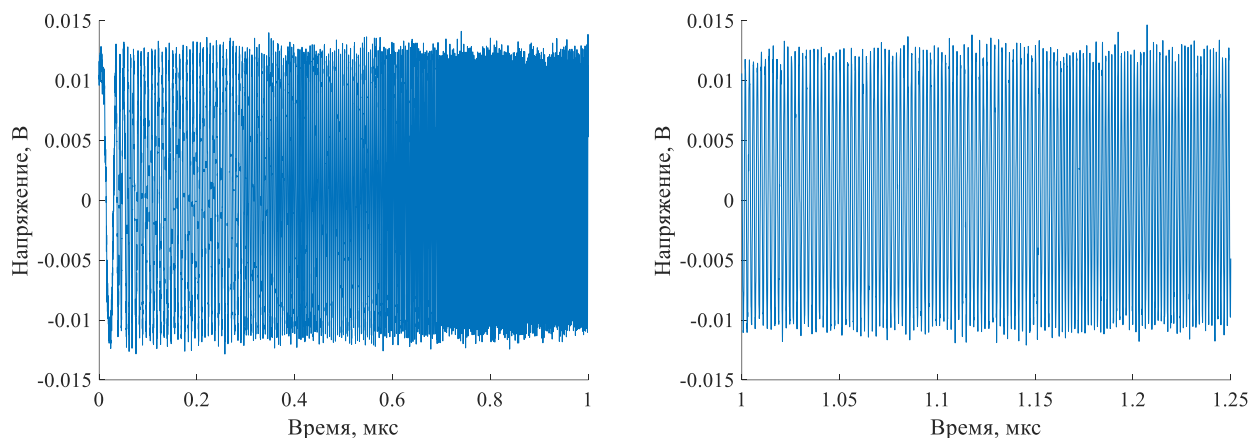


Рис. 3. Временное представление формируемого СВЧ-сигнала с частотной модуляцией, когда в лазерный диод инжектировался линейно нарастающий ток от 15 до 15,5 мА

Альтернативный предлагаемый авторами метод основан на использовании осциллографа реального времени без необходимости изменения внутренней структуры радиофотонного генератора. Выходной СВЧ-сигнал дискретизируется и собирается с помощью осциллографа реального времени с полосой пропускания 5 ГГц (25 Гвыб./с) и разрешением 8 бит. После этого численно рассчитывается частотно-временное распределение СВЧ-сигнала. Частотно-временной анализ позволяет анализировать произвольные сигналы с изменяющейся во времени частотой и одновременно представляет сигнал во временной и в частотной областях. Синхронное преобразование Фурье выбрано в качестве математического инструмента, поскольку для нестационарных сигналов с плавно изменяющейся частотой оно дает более четкие частотно-временные оценки [13].

Преобразование Фурье с синхронным сжатием является обобщением кратковременного преобразования Фурье, которое позволяет получить более высокое разрешение как по частоте, так и по времени. Данное преобразование

определяется в два этапа, вначале выполняется преобразование без сжатия, причем результат преобразования является функцией двух переменных  $(t, \eta)$  [13]:

$$s^*(t, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)w(\tau - t)e^{-j2\pi\eta(\tau - t)} d\tau \quad (4)$$

$w(\tau)$  – функция временного окна,  $\eta$  – частота, отличие от кратковременного преобразования Фурье заключается в использовании множителя  $e^{-j2\pi\eta t}$ .

На втором этапе выполняется кратковременное преобразование Фурье сигнала  $s(t)$  с использованием временного окна  $w(\tau)$ , обеспечивающего наилучшее спектральное разрешение вблизи значения функции  $\Omega(t, \eta)$ , имеющей физический смысл мгновенной частоты в некоторой окрестности на частотно-временной плоскости  $(t, \eta)$  первоначального кратковременного преобразования Фурье  $s^*(t, \eta)$  [13]:

$$F_{ssft}(s(t)) \square s^*(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)w(\tau - t)e^{-j2\pi\eta(\tau - t)} \delta(\omega - \Omega(t, \eta)) d\eta d\tau, \quad (5)$$

где  $F_{ssft}$  – оператор синхронного преобразования Фурье,  $\delta$  –  $\delta$ -функция Дирака,  $\omega$  – циклическая частота,  $\Omega(t, \eta)$  – функция, имеющая физический смысл мгновенной частоты в некоторой окрестности на частотно-временной плоскости  $(t, \eta)$  первоначального кратковременного преобразования Фурье  $s^*(t, \eta)$ , величина которой определяется с помощью следующей формулы [13]:

$$\Omega(t, \eta) = \frac{1}{j2\pi} \frac{\partial s^*(t, \eta) / \partial t}{s^*(t, \eta)} \quad (6)$$

Чтобы оценить динамику частоты лазерного диода, необходимо рассчитать зависимость частоты от времени как реакцию на импульс тока. Из предыдущих работ [6-8] следует, что типичная длительность переходного процесса для лазерных диодов составляет свыше нескольких микросекунд. При экспериментальном исследовании в лазерный диод инжектировался импульс тока с амплитудой 15 мА, длительностью 500 нс и временем нарастания / спада 8 нс. Рис. 4 показывает схематическое представление во временной области для высокочастотных, оптических и СВЧ-сигналов при оценке импульсного отклика

частоты радиопотонного генератора СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода. Ток накачки приводит к генерации оптического сигнала с изменяющейся во времени частотой.

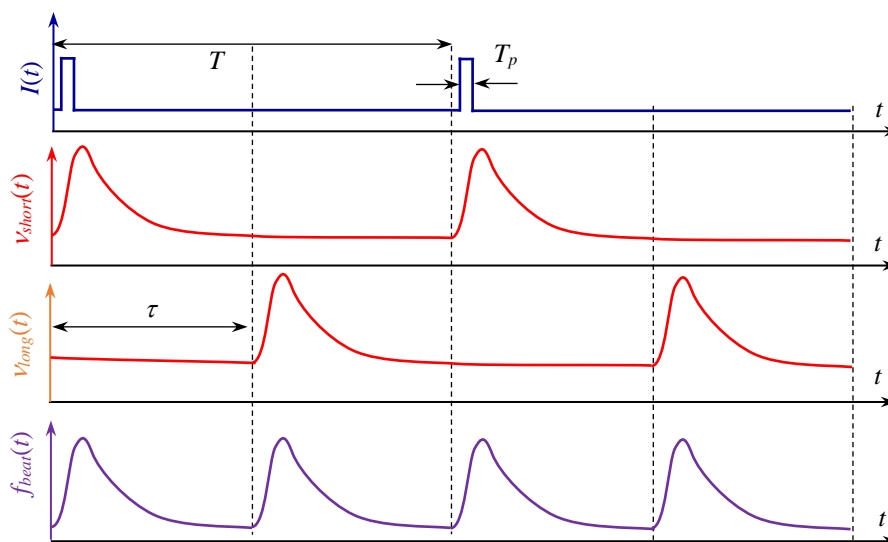


Рис. 4. Схематическое представление во временной области для высокочастотных, оптических и СВЧ-сигналов при оценке импульсного отклика частоты радиопотонного генератора СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода, где  $I(t)$  – ток накачки лазерного диода,  $v_{short}(t)$ ,  $v_{long}(t)$  – частоты оптических сигналов в коротком и длинном плечах интерферометра Майкельсона,  $f_{beat}(t)$  – частота биений

Рис. 5 показывает частотно-временное распределение выходного СВЧ-сигнала при оценке импульсного отклика частоты радиопотонного генератора СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода. Зависимость частоты выходного СВЧ-сигнала от времени вычисляется из собранных осциллографом данных  $s(t)$  во временной области следующим образом:

$$\left[ \begin{aligned} f(t) &= \arg_f \{ \rho_{\max}(f, t) \} \\ \rho_{\max}(f, t) &= \max_{t=\text{const}} |\rho(f, t)|, \rho(f, t) = F_{sfft} [s(t)] \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где  $F_{ssft}$  – оператор синхронного преобразования Фурье,  $\rho(f, t)$  – частотно-временное распределение в пространстве  $(f, t)$ ,  $\rho_{\max}$  – кривая в пространстве  $(f, t)$ ,  $\arg_f$  – частотный аргумент функции  $\rho_{\max}(f, t)$ .

Зависимость частоты от времени извлекается с помощью пороговой фильтрации распределения  $\rho(f, t)$ , которое предварительно обрабатывается с помощью гомоморфного фильтра. Пунктирная линия представляет собой извлеченную зависимость частоты от времени. Как во время нарастания, так и во время спада частота определяется как взвешенная коэффициентами  $p_n$  сумма экспонент с помощью методов линейной алгебры и многомерного интегрирования [12]:

$$f(t) \approx \sum_{n=1}^3 p_n \exp(-t / \tau_n), t \in [0, T]. \quad (8)$$

Можно видеть, что время нарастания частоты составляет почти 2 мкс, а время спада не превышает 20 мкс. Также на основе анализа этого частотно-временного распределения оценены характерные времена для внутррезонаторной термализации  $\sim 1,1$  мкс и для процессов теплообмена между чипом и кристаллоносителем лазерного диода  $\sim 17$  мкс. Разница длительностей задержки между плечами интерферометра в 30 мкс позволяет достоверно оценить импульсную характеристику частотной модуляции лазерного диода.

Исследуемый лазерный диод не допускает формирования «классической» асимметричной пилообразной формы частоты, как показано на рис. 2, однако не ограничивает возможность генерации СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника, которая может быть преобразована в асимметричную форму с помощью соответствующего управления смещением СВЧ-фотодиода. По определению, частотная характеристика – это преобразование Фурье от импульсной характеристики  $f_{imp}(t)$ . Следует отметить, что предлагаемый метод позволяет оценить импульсную характеристику частоты лазерного диода независимо от цели генерации СВЧ-сигнала. Чтобы генерировать СВЧ-сигнал с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника  $g_0(t)$ , на лазер необходимо подать импульс тока следующего вида:

$$I(t) = I_0 F_{fft}^{-1} \left\{ F_{fft} \left( f_{imp}(t) \right) g_0(f) \right\}, \quad (9)$$

где  $F_{fft}, F_{fft}^{-1}$  – прямое и обратное преобразование Фурье.

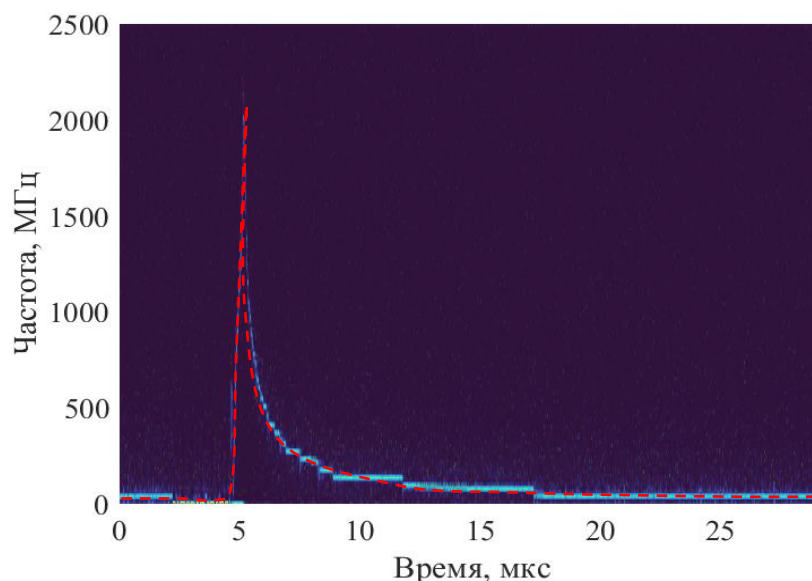


Рис. 5. Частотно-временное распределение выходного СВЧ-сигнала при оценке импульсного отклика частоты радиопотонного генератора СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинамирования излучения лазерного диода, где пунктирная линия – извлеченная зависимость частоты от времени

Рис. 6 показывает рассчитанную из экспериментальных данных форму импульса тока, которая обеспечивает формирование СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника. Видно, что импульс тока асимметричен из-за асимметричной импульсной характеристики.

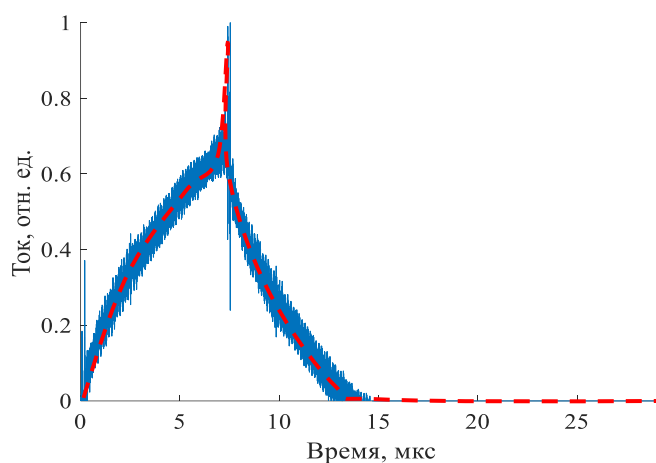


Рис. 6. Рассчитанная из экспериментальных данных форма импульса тока, которая обеспечивает формирование СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника

Рис. 7 показывает частотно-временное распределение выходного СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника при подаче импульса тока накачки с амплитудой 15 мА и с формой, представленной на рис. 6. Можно видеть, что зависимость частоты генерируемого СВЧ-сигнала от времени близка к линейной. Небольшие отклонения от линейной зависимости частоты от времени объясняются остаточными ошибками в оценке импульсной характеристики, которые возможно скомпенсировать с помощью автоматического метода малых возмущений. Необходимо отметить, что с помощью амплитуды тока возможно управлять частотным диапазоном генерируемых СВЧ-сигналов [8]. Это позволяет использовать однажды оцененную импульсную характеристику частоты лазера для генерации различных диапазонов частот.

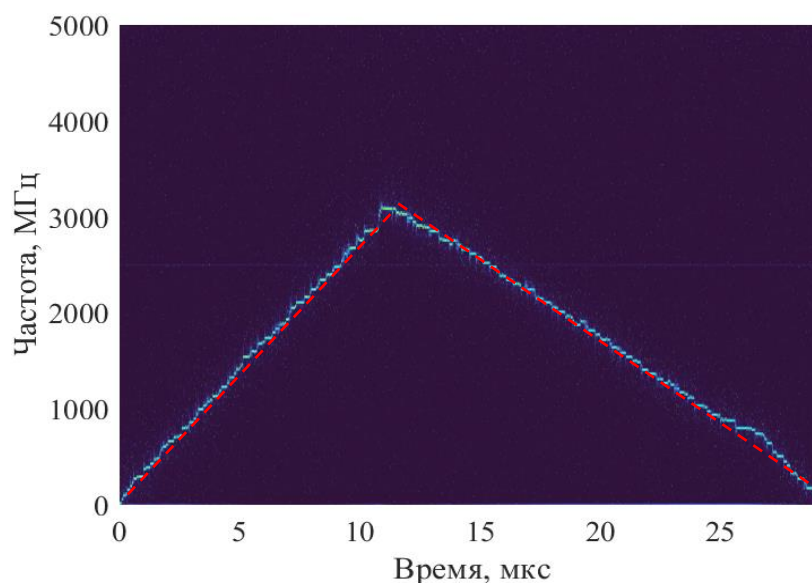


Рис. 7. Частотно-временное распределение выходного СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника при подаче импульса тока накачки с амплитудой 15 мА и с формой, представленной на рис. 6. Заданная зависимость частоты от времени приведена пунктирной линией

Рис. 8 показывает частотно-временное распределение выходного СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника при подаче импульса тока накачки с амплитудой 22 и 25 мА и с формой, представленной на рис. 6. Видно, что для амплитуды сигнала 22 мА частота генерируемого СВЧ-



сигнала изменяется в диапазоне от 0 до 4,5 ГГц, а во втором случае – от 0 до 5 ГГц.

Таким образом, экспериментально показано формирование сверхширокополосного СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника в диапазоне частот от 0 до 5 ГГц за полное время 30 мкс. Следует отметить, что экспериментально полученная максимальная частота в 5 ГГц ограничена используемым осциллографом.

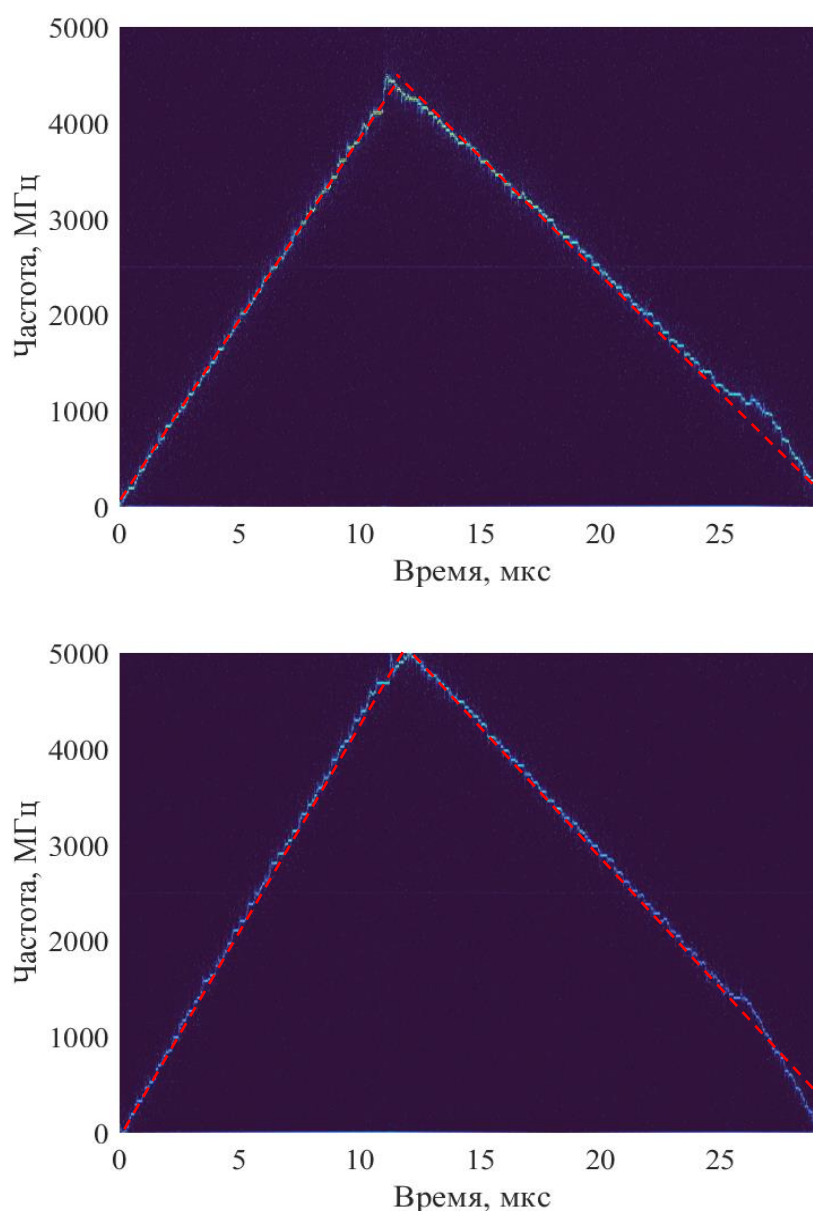


Рис. 9. Частотно-временное распределение выходного СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника при подаче импульса тока накачки с амплитудой 22 мА (верхний график) и 25 мА (нижний график) и с формой, представленной на рис. 6. Заданная зависимость частоты от времени приведена пунктирной линией

## Заключение

В данной работе предлагается метод генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода, который реализован с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона с зеркалами Фарадея. Предлагаемая схема интерферометра обеспечивает удвоение длительности задержки, уменьшение гироскопических эффектов из-за встречно распространяющегося оптического сигнала, а также позволяет получать стабильный СВЧ-сигнал биений независимо от состояния поляризации оптических сигналов в оптическом волокне. Для управления диапазоном частотной модуляции СВЧ-сигнала использовалось напряжение смещения фотодиода. Также предлагается использовать частотно-временной анализ для извлечения зависимости частоты от времени, что позволяет выполнить прямую оценку импульсной характеристики частоты лазерного диода и рассчитать необходимую форму и амплитуду импульса тока накачки для обеспечения заданных свойств выходного СВЧ-сигнала. Показано, что рассчитанная с помощью оцененной импульсной характеристики частоты форма импульса тока накачки лазерного диода позволяет генерировать сигнал с частотой в виде треугольника в диапазоне до 5 ГГц и полной длительностью 30 мкс, которая ограничена только используемой в интерферометре волоконно-оптической катушкой, а экспериментально полученная максимальная частота в 5 ГГц ограничена используемым осциллографом.

## Литература

1. Chi H., Wang C., Yao J. Photonic generation of wideband chirped microwave waveforms. *IEEE Journal of Microwaves*. 2021. V.1. №3. P.787-803. <https://doi.org/10.1109/JMW.2021.3085868>

2. Pan S., Zhang Y. Microwave photonic radars. *Journal of Lightwave Technology*. 2020. V.38. №19. P.5450-5484. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2993166>
3. Luo X., Wang A., Wo J., Wang Y., Fu J., Zhu Y., Zhang J., Cong W., Liu R., Yang H., Yu L. Microwave photonic video imaging radar with widely tunable bandwidth for monitoring diverse airspace targets. *Optics Communications*. 2019. V.451. P.296-300. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.06.073>
4. Serafino G., Scotti F., Lembo L., Hussain B., Porzi C., Malacarne A., Maresca S., Onori D., Ghelfi P., Bogoni A. Toward a new generation of radar systems based on microwave photonic technologies. *Journal of Lightwave Technology*. 2019. V.37. №2. P.643-650. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2894224>
5. Schuetz C., Harrity C., Schneider G., Murakowski J., Shi S., Deroba J., Prather D. A promising outlook for imaging radar. Imaging flash radar realized using photonic spatial beam processing. *IEEE Microwave Magazine*. 2018. V.19. №3. P.91-101. <https://doi.org/10.1109/MMM.2018.2801639>
6. Herrera L., Ribeiro R., Jabulka V., Tovar P., von der Weid J. Photonic generation and transmission of linearly chirped microwave pulses with high TBWP by self-heterodyne technique. *Journal of Lightwave Technology*. 2018. V.36. №19. P.4408-4415. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2844099>
7. Tovar P., Herrera L., Ribeiro R., von der Weid J. Photonic generation of NLFM microwave pulses from DFB-laser chirp. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2019. V.31. №17. P.1417-1420. <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2929709>
8. Tovar P., Herrera L., von der Weid J. Time-resolved spectroscopy for laser chirp characterization and self-heterodyne generation of apodized-NLFM microwave pulses. *Proceedings of International Topical Meeting on Microwave Photonics*. 2018. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/MWP.2018.8552851>
9. Aslund M., Michie A., Canning J., Holdsworth J., Fleming S. Comparison between a Mach-Zender interferometer and a Michelson interferometer employing Faraday mirrors for delayed self-heterodyne interferometry. *35<sup>th</sup> Australian Conference on Optical Fibre Technology*. 2010. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/ACOFT.2010.5929884>

10. Pistoni N., Martinelli M. Polarization noise suppression in retracing optical fiber circuits. *Optics Letters*. 1991. V.16. №10. P.711-713. <https://doi.org/10.1364/OL.16.000711>
11. Malyshev S., Chizh A., Vasileuski Y. High-power InGaAs/InP partially depleted absorber photodiodes for microwave generation. *Journal of Lightwave Technology*. 2008. V.26. №15. P.2732-2739. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.927594>
12. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. Noise and gain of an erbium-doped fiber amplifier for delay-line optoelectronic oscillator. *IEEE International Conference on Noise and Fluctuations*. 2017. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/ICNF.2017.7985957>
13. Oberlin T., Sylvain M., Perrier V. The Fourier-based synchrosqueezing transform. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 2014. P.315-319. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2014.6853609>

**Для цитирования:**

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* [электронный журнал]. 2022. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.7>