

# Радиофотонные модули для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов и методы формирования сигналов с линейно-частотной модуляцией на их основе

К.Б. Микитчук, А.С. Лебедев, А.Л. Чиж

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

**Аннотация:** В данной работе предлагается основанный на принципе причинности способ предсказания формы импульса тока накачки лазерного диода в составе устройства самогетеродинамирования излучения с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона с зеркалами Фарадея, обеспечивающий линейно-частотную модуляцию СВЧ-сигнала, а также рассматриваются радиофотонные модули для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов на основе продемонстрированного ранее метода. В работе приведены экспериментальные результаты по генерации сигнала с линейно-частотной модуляцией от 0 до 4.8 ГГц при полной длительности сигнала с треугольной формой изменения частоты 140 мкс.

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

## Введение

Устройства генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов необходимы для развития систем широкополосной радиосвязи и радиолокации [1]. Сверхширокополосные устройства генерации традиционно строятся на элементной базе СВЧ-техники, для которой характерны ограниченная полоса пропускания, большой вес и энергопотребление [2]. Радиофотоника позволяет ослабить влияние данных ограничений, так как из-за огромной разницы между временными/частотными масштабами оптической несущей (~200 ТГц) и модуляционной СВЧ-составляющей (~1÷100 ГГц) в радиофотонных устройствах любой модулированный оптический сигнал является узкополосным с точки зрения оптической системы. Оптическое волокно и волоконно-оптические компоненты характеризуются уникальными свойствами, которые не имеют аналогов в электронике: сверхнизкие потери, невосприимчивость к электромагнитным помехам СВЧ-диапазона и полная гальваническая развязка [2].

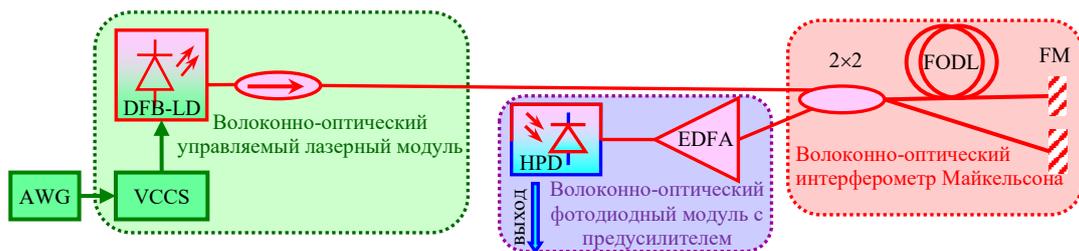
Техническая реализация методов формирования оптических сигналов в частотной области и преобразования «частота–время», гармонической Фурье-синхронизации оптоэлектронных генераторов, умножения частоты оптоэлектронными методами осложнена тем, что для их создания требуется разработка уникальных как волоконно-оптических, так и СВЧ-компонентов [3]. При гетеродинамировании лазерного излучения используется частотная модуляция лазерного диода посредством изменения тока накачки (токовый коэффициент частоты составляет 0.5 – 1 ГГц/мА), причем для получения СВЧ-сигналов с частотно-временной базой свыше  $10^4$  оказывается достаточно использования низкочастотной модуляции тока. При этом биение двух задержанных и сдвинутых по частоте копий такого сигнала используется для сверхширокополосной СВЧ-генерации. Ранее показана возможность генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов на основе самогетеродинамирования излучения лазерного диода, которое реализовано с помощью волоконно-оптического

интерферометра [3,4]. Изменение тока накачки лазерного диода приводит к динамической и термической частотной модуляции [3], следствием чего является нелинейная зависимость выходной частоты от тока накачки, что, в свою очередь, осложняет формирование СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией.

В данной работе рассматриваются радиофотонные модули для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов на основе продемонстрированного ранее метода самогетеродинирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона с зеркалами Фарадея [4,5]. Также предлагается способ формирования импульса тока накачки лазерного диода, обеспечивающего линейно-частотной модуляцию выходного СВЧ-сигнала. Предлагаемый способ предсказания формы импульса тока накачки основан на принципе причинности, когда от некоторого приближения формы импульса тока последовательно варьируется величина тока в каждой следующей точке по времени, причем решение о переходе к вариации каждой следующей точки принимается исходя из величины нормы отклонения всех значений частоты от начала и до текущего шага по времени от линейного закона. Приводятся достижимые диапазоны длительностей сверхширокополосных СВЧ-сигналов и экспериментальные результаты по генерации сигнала с линейно-частотной модуляцией.

### Радиофотонные модули для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов

Подача изменяющегося во времени тока накачки на лазерный диод приводит к излучению им оптического сигнала с изменяющейся во времени частотой. Лазерный сигнал с изменяющейся во времени частотой направляется в волоконно-оптический интерферометр Майкельсона, после которого 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 изменением тока накачки, от другого плеча интерферометра. На рисунке 1 приведена схема радиофотонного устройства для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона с зеркалами Фарадея.



**Рисунок 1.** Схема радиофотонного устройства для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона: AWG – генератор сигналов произвольной формы, VCCS – управляемый напряжением источник тока, DFB-LD – лазерный диод, ISO – волоконно-оптический изолятор, 2x2 – волоконно-оптический разветвитель, FODL – волоконно-оптическая катушка, FM – зеркала Фарадея, EDFA – оптический усилитель на легированном эрбием волокне, HPD – мощный СВЧ-фотодиод

Импульс тока накачки для лазерного диода формируется с помощью управляемого напряжением источника тока. Высокочастотный электрический генератор сигналов произвольной формы используется для задания формы импульса накачки. После этого лазерный сигнал с изменяющейся во времени частотой направляется в волоконно-оптический интерферометр Майкельсона. Паразитные отражения от волоконно-

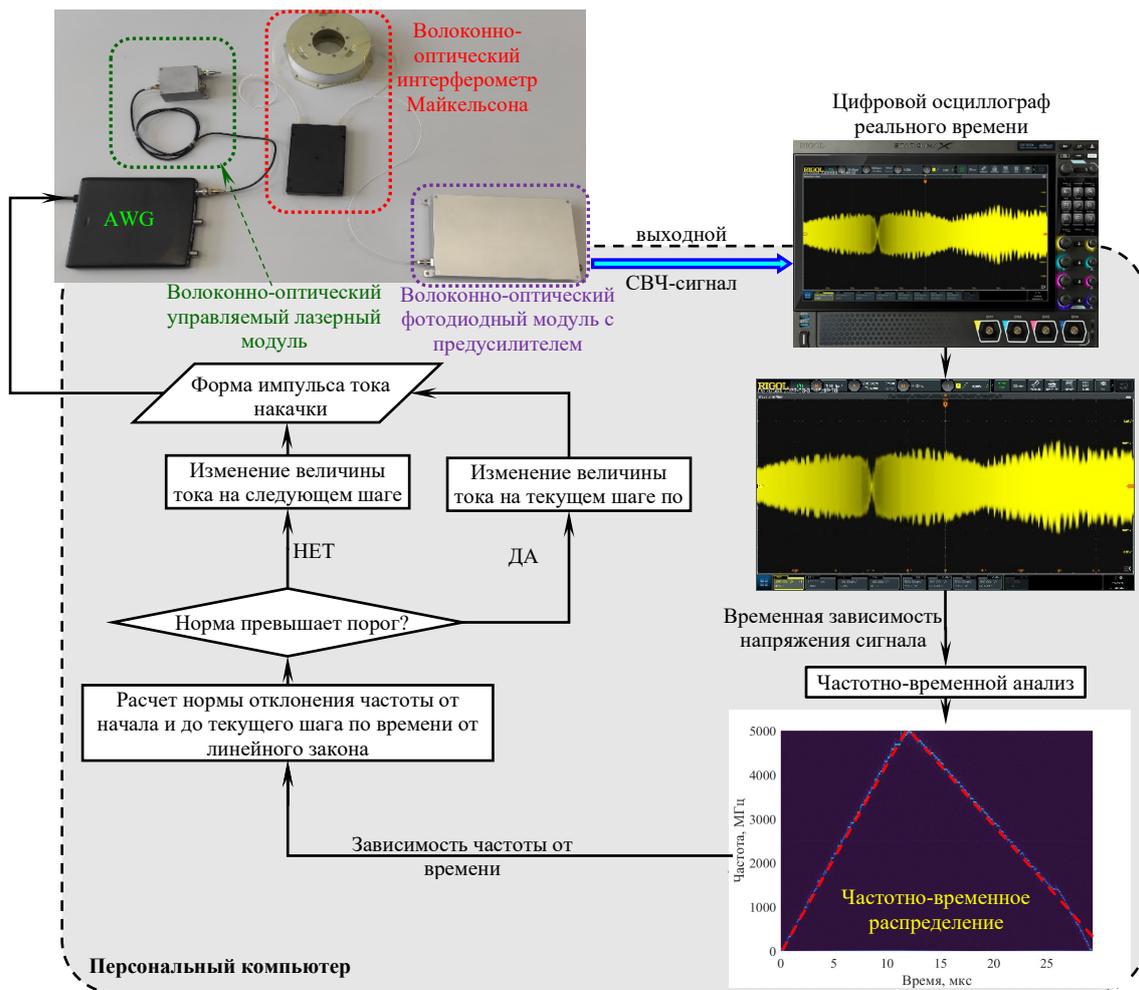
оптического интерферометра подавляются изолятором. Интерферометр Майкельсона суммирует лазерный сигнал и его точную копию с временной задержкой  $\tau$ . Сигнал в виде двух оптических несущих на выходе волоконно-оптического интерферометра Майкельсона усиливается волоконно-оптическим усилителем. Оптоэлектронное преобразование осуществляется мощным СВЧ-фотодиодом. Для управления длительностью выходных СВЧ-импульсов и, как следствие, диапазоном частотной модуляции используется напряжение смещения мощного СВЧ-фотодиода. Следует отметить, что при использовании интерферометра Майкельсона, зеркала Фарадея действуют как сопряженные по фазе зеркала, создавая фазовый сдвиг  $90^\circ$ , 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 [6].

В составе устройства использовались следующие волоконно-оптические модули: управляемый лазерный модуль на основе InGaAsP/InP лазерного диода с управляемым напряжением источником тока; волоконно-оптический интерферометр Майкельсона на оптическом разветвителе  $2 \times 2$ , двух зеркалах Фарадея и волоконно-оптической катушке, обеспечивающей разницу времен задержки 140 мкс; фотоприемный модуль на основе мощного InGaAs/InP СВЧ-фотодиода с частично-обедненным поглощающим слоем [7] и малошумящего оптического усилителя на легированном эрбием волокне [8].

### **Метод расчета предискажения формы импульса тока накачки лазерного диода**

При подаче на лазерный диод различных временных зависимостей тока после распространения в обоих плечах интерферометра оптические импульсы сдвигаются на половину периода  $T$  (в случае скважности 2 и периода, равного удвоенной разности задержек плеч волоконно-оптического интерферометра Майкельсона  $T = 2\tau$ ), формируется сверхширокополосный СВЧ-сигнал, частота которого изменяется с периодом  $T_p = T/2 = \tau$ . Чтобы определить параметры предварительного искажения сигнала, ранее предлагалось оценивать переходную [3] или импульсную характеристику частоты лазерного диода [4]. Данные подходы позволяют формировать сверхширокополосные СВЧ-сигналы с линейно-частотной модуляцией, которая содержит значительные нелинейности из-за целого комплекса сложных процессов в лазере [9].

Частота генерации лазера в текущий момент времени зависит как от тока накачки, так и от его формы, длительности и амплитуды импульса. На рисунке 3 приведен алгоритм метода расчета предискажения формы импульса тока накачки лазера в составе волоконно-оптического модуля для формирования сигналов с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника. Следует отметить, что на основе принципа причинности возможно автоматическое формирование предискажения импульса тока накачки лазера в составе волоконно-оптического модуля. Вначале задается приближение формы импульса тока, например, рассчитанное с помощью оценки импульсного отклика частоты лазера [7]. Затем последовательно варьируется величина тока в каждой последующей точке по времени, причем решение о переходе к вариации каждой следующей точки принимается только тогда, когда норма отклонения всех значений частоты от начала и до текущего шага по времени от требуемого линейного закона станет меньше заданной точности.

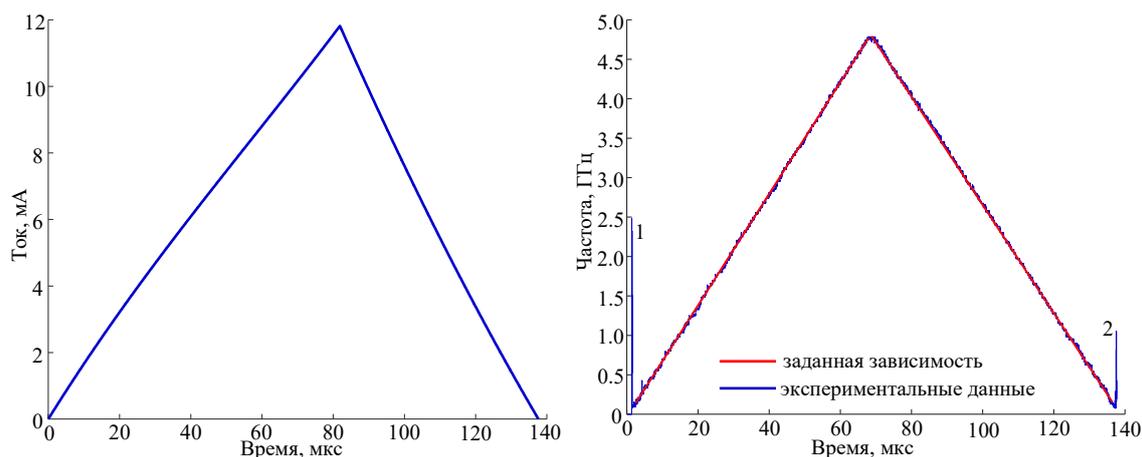


**Рисунок 3.** Алгоритм метода расчета предсказания формы импульса тока накачки лазера в составе волоконно-оптического модуля для формирования линейно-частотной модуляции

### Процесс формирования сигналов с линейно-частотной модуляцией

На рисунке 4 приведена форма импульса тока накачки, обеспечивающая формирование сигналов с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника для случая, когда период повторения равен удвоенной разности длительностей задержки в плечах интерферометра Майкельсона  $T = 2\tau$ , длительность импульса сигнала с изменением частоты равна разности длительностей задержки в плечах интерферометра Майкельсона  $T_p = \tau$ , а также значительно превосходит характерное время термализации частоты лазерного диода, которое составляет единицы микросекунд. В ходе эксперимента выходной СВЧ-сигнал регистрируется с помощью осциллографа реального времени с полосой пропускания 5 ГГц и разрешением 8 бит. Затем численно рассчитывается частотно-временное распределение СВЧ-сигнала, которое позволяет анализировать произвольные сигналы с изменяющейся во времени частотой и одновременно представляет сигнал во временной и в частотной областях.

На рисунке 5 приведена соответствующая зависимость частоты от времени для сверхширокополосного СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника. Видна высокая степень линейности изменения частоты в диапазоне от 0 до 4.8 ГГц. Следует отметить, что на графике присутствуют артефакты метода измерения из-за неопределенности постоянной составляющей для метода оценки вероятности распределения энергии сигнала в частотно-временной плоскости.



**Рисунок 4.** Форма импульса тока накачки (слева) и зависимость частоты от времени (справа) для сверхширокополосного СВЧ-сигнала с линейно-частотной модуляцией в форме треугольника: 1, 2 – артефакты из-за неопределенности постоянной составляющей для метода оценки вероятности распределения энергии сигнала в частотно-временной плоскости

## Заключение

В данной работе предложено использовать радиофотонные лазерные и фотодиодные модули для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов на основе продемонстрированного ранее метода самогетеродинамирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона. На основе созданного метода предсказания импульса тока накачки лазерного диода реализован алгоритм для управления генератором сигналов произвольной формы и осциллографом реального времени, позволяющий в автоматическом режиме определять форму импульса тока накачки, обеспечивающую формирование сигналов с линейно-частотной модуляцией. Экспериментально продемонстрирована генерация с линейно-частотной модуляцией от 0 до 4.8 ГГц при полной длительности сигнала с треугольной формой изменения частоты 140 мкс.

## Список литературы

1. Luo X. et al. Microwave photonic video imaging radar with widely tunable bandwidth for monitoring diverse airspace targets // *Optics Communications*. – 2019. – Т. 451. – С. 296-300.
2. Serafino G. et al. Toward a new generation of radar systems based on microwave photonic technologies // *Journal of Lightwave Technology*. – 2019. – Т. 37, №2. – С. 643-650.
3. Herrera L. et al. Photonic generation and transmission of linearly chirped microwave pulses with high TBWP by self-heterodyne technique // *Journal of Lightwave Technology*. – 2018. – Т. 36, №19. – С. 4408-4415.
4. Микитчук К.Б., Лебедев А.С., Чиж А.Л. Метод генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией на основе самогетеродинамирования излучения лазерного диода. *Журнал радиоэлектроники*. – 2022. – №12.
5. Mikitchuk K., Chizh A., Lebedev A. Self-heterodyne generation of ultrawideband linear frequency modulated microwave signals based on fiber-optic michelson interferometer // *IEEE 8<sup>th</sup> All-Russian Microwave Conference (RMC)*. – 2022. – С. 63-66.
6. Pistoni N., Martinelli M. Polarization noise suppression in retracing optical fiber circuits // *Optics Letters*. 1991. – Т. 16, № 10. – С. 711-713.
7. Malyshev S., Chizh A., Vasileuski Y. High-power InGaAs/InP partially depleted absorber photodiodes for microwave generation // *Journal of Lightwave Technology*. – 2008. – Т. 26, №15. – С. 2732-2739.
8. 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. – С. 1-4.
9. Vankwikelberge P. et al. Analysis of the carrier-induced FM response of DFB lasers: theoretical and experimental case studies // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1989. – Т. 25, №11. – С. 2239-2254.