

Радиофотонный метод генерации сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов с возможностью перестройки типа частотной модуляции

К.Б. Микитчук, А.В. Колейчик, А.Л. Чиж

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Аннотация: в данной работе предлагается радиофотонный метод генерации сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов с перестраиваемым типом частотной модуляции, реализованный на основе самогетеродинамирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона. Перестройка типа частотной модуляции в сверхширокой полосе частот достигается изменением типа управляющего низкочастотного сигнала. Приводится теоретическое обоснование возможности генерации сигналов с линейной или нелинейной частотной модуляцией, с двойной линейной частотной модуляцией, а также с кодовой модуляцией частоты. Также в работе приводятся результаты экспериментального исследования радиофотонной генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов.

Ключевые слова: оптоэлектронная генерация СВЧ-сигналов, сверхширокополосный СВЧ-сигнал, радиолокационные СВЧ-сигналы с частотной модуляцией, радиофотоника.

1. Введение

В последнее время в системах радиолокации используются все более широкополосные, в том числе сверхширокополосные, СВЧ-сигналы с частотной модуляцией, так как они обеспечивают высокое пространственное разрешение и помехоустойчивость, а также возможность визуализации исследуемых объектов [1]. Для нескольких типов таких СВЧ-сигналов с частотной модуляцией доказан ряд преимуществ при использовании в качестве зондирующих:

- сигналы с линейной частотной модуляцией с длительностью 10 – 200 мкс обеспечивают устойчивость к многолучевым помехам, высокое пространственное разрешение и коэффициент сжатия главного лепестка автокорреляционной функции (значение коэффициента сжатия определяется величиной частотно-временной базы – произведения полной ширины полосы частот сигнала на его длительность) [2-4];
- сигналы с комплиментарной линейной частотной модуляцией, когда частота изменяется с одинаковой по модулю скоростью, но попеременно разным знаком, позволяют снизить неопределенность «дальность – доплеровский сдвиг» [5-6];
- сигналы с нелинейной частотной модуляцией и длительностью до 500 мкс, в которых частота в начале и в конце импульса изменяется более резко, а в центре импульса – более плавно, обеспечивают подавление боковых лепестков автокорреляционной функции и возможность обработки без взвешивания по амплитуде [7-8].
- сигналы с кодовой модуляцией частоты, в которых частота меняется дискретно по заданному коду (Костаса, псевдослучайному, Баркера) внутри одного

импульса, обеспечивают высокую помехозащищенность, снижение неопределенности «дальность – скорость», а также сжатие главного лепестка автокорреляционной функции [9-10].

В современных и перспективных системах многофункциональной радиолокации требуется быстрая перестройка типов модуляции зондирующих сверхширокополосных сложных СВЧ-сигналов различных классов, что значительно осложнено для традиционных электронных систем [1,11]. Более того, из-за присущей традиционной электронной СВЧ-технике узкополосности, генераторы сверхширокополосных сложных СВЧ-сигналов могут быть реализованы только с использованием многоступенчатых электронных преобразований с повышением/понижением частоты. Также традиционные электронные сверхширокополосные устройства генерации характеризуются большими габаритами и весом, а также энергопотреблением. Радиофотонные устройства и системы, напротив, являются сверхширокополосными, так как СВЧ-сигналы в них генерируются, передаются и обрабатываются на оптической несущей, частота которой на несколько порядков больше, чем частота любой СВЧ-огнбающей.

В данной работе предлагается радиофотонный метод генерации сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов с перестраиваемым типом частотной модуляции, реализованный на основе самогетеродинамирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона. При этом перестройка типа частотной модуляции в сверхширокой полосе частот достигается изменением типа управляющего низкочастотного сигнала. Приводятся результаты исследования генерации сверхширокополосных сигналов различных типов.

2. Генерация сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов

На рисунке 1 приведена схема устройства генерации сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов с перестраиваемым типом частотной модуляции, реализованного на основе самогетеродинамирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона. Радиофотонное устройство генерации строится на основе одночастотного лазерного диода, ток инжекции которого изменяется во времени, что приводит к частотной модуляции лазерного излучения. Важно отметить, что для перестройки частоты оптического сигнала на 10 ГГц за время 10 – 100 мкс достаточно управлять током накачки в диапазоне частот не более 1 МГц [12]. Волоконно-оптический интерферометр Майкельсона на основе оптического разветвителя 2×2, двух зеркал Фарадея и волоконно-оптической катушки, позволяет сформировать оптический сигнал, в котором в каждый момент времени присутствуют две составляющие, разность частот между которыми детектируется с помощью СВЧ-фотодиода. При этом управление напряжением смещения СВЧ-фотодиода позволяет включать/отключать формирование СВЧ-сигнала биений, что, в свою очередь, обеспечивает возможность реализации временных окон и позволяет «вырезать» требуемые части сигнала.

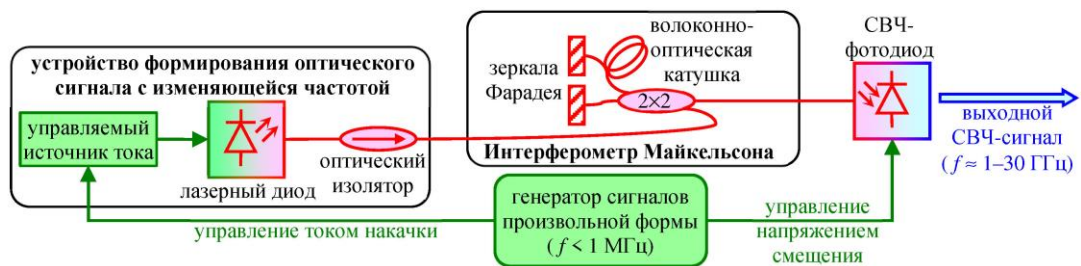


Рисунок 1 – Схема устройства генерации сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов с перестраиваемым типом частотной модуляции, реализованного на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода

На рисунке 2 показан принцип генерации сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов при самогетеродинировании излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона, который заключается в детектировании СВЧ-фотодиодом разностной частоты составляющих оптического сигнала. Видно, что в зависимости от соотношения длительности импульса тока накачки лазерного диода и разностей задержки в плечах интерферометра Майкельсона возможны несколько режимов формирования сверхширокополосных СВЧ-сигналов, которые при соответствующем управлении напряжением смещения фотодиода позволяют получить основные типы сверхширокополосных СВЧ-сигналов. Следует отметить, что скорость изменения частоты генерации ограничена прежде всего тепловой инертностью чипа лазерного диода (для лазерных диодов InGaAsP/InP с распределенной обратной связью характерное время термализации частоты составляет ~ 20 мкс). По этой причине длительность периода нарастания T_1 и спада T_2 частоты должны превышать данную величину. Для формирования биений одной из составляющих оптического сигнала с изменяющейся частотой и другой с постоянной частотой необходимо, чтобы разность длительностей задержки в плечах интерферометра Майкельсона τ совпадала с длительностью периода изменения тока накачки лазерного диода $T_1 + T_2$, за которым следует период такой же длительности с постоянным током накачки. Между указанными типами сверхширокополосной частотной модуляции возможна быстрая перестройка, так как для формирования импульса тока накачки лазерного диода необходимо использование низкочастотных сигналов (< 1 МГц), которые достаточно просто генерируются электронными устройствами формирования сигналов произвольной формы.

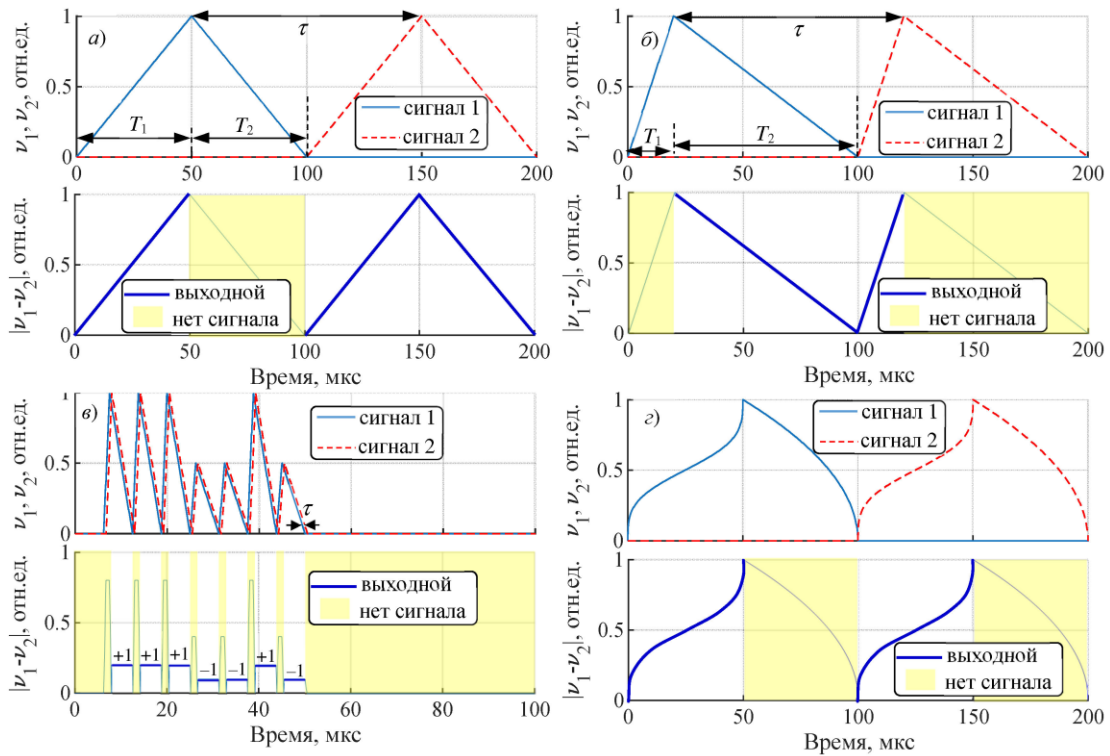


Рисунок 2 – Принцип генерации сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов при самогетеродинировании излучения лазерного диода, где сигналы: *a* – с линейной (0 – 100 мкс, период повторения $T = 100$ мкс) или комплиментарной линейной частотной модуляцией (100 – 200 мкс, период повторения 100 мкс); *б* – с асимметричной линейной частотной модуляцией (0 – 200 мкс, период повторения 200 мкс); *в* – с модуляцией частоты 7-элементным кодом Баркера (период повторения 100 мкс, условно обозначены «-1» и «+1»); *г* – нелинейной модуляцией по форме [8] (0 – 50 мкс, 100 – 150 мкс, период повторения 100 мкс)

Ранее авторами было показана возможность формирования сигнала с комплиментарной линейной частотной модуляцией (рис. 2*a*) для случая, когда длительность импульса тока накачки $T_1 + T_2$ равна половине разности времен задержки между плечами интерферометра Майкельсона τ [12]. При снятии напряжения смещения в момент времени T_1 , когда частота достигает максимума, до момента времени окончания спада частоты $T_1 + T_2$ оказывается возможно сформировать также классический сигнал с линейной частотной модуляцией длительностью от 0 до T_1 и периодом повторения, равным разности времен задержки между плечами интерферометра Майкельсона τ . Аналогично формируется сигнал и с обратной зависимостью частоты от времени. Сигнал с асимметричной линейной частотной модуляцией формируется по принципу симметричного, однако форма импульса тока накачки лазера подбирается так, чтобы обеспечивалась асимметрия временных промежутков с линейной частотной модуляцией $T_1 \neq T_2$ (рис. 2*б*). Важно, чтобы время окончания спада частоты $T_1 + T_2$ было равно периоду повторения τ .

Для генерации сигналов с частотно-кодовой модуляцией используются «пачки» импульсов тока накачки (при условии, что длительность каждого периода нарастания T_1 и спада T_2 частоты превышает характерное время тепловой инертности лазерного диода), за которыми следует промежуток с постоянным током накачки такой же суммарной длительности. Важно, что для формирования временных интервалов, в пределах которых частота остается постоянной, необходимо, чтобы разность времен задержки между плечами интерферометра Майкельсона τ не превышала времени нарастания T_1 и спада T_2 частоты. При этом с помощью управления напряжением смещения фотодиода «вырезаются» переходные процессы между отдельными

промежутками времени с постоянной частотой (рис. 2в). Сигналы с нелинейной частотной модуляцией, в которых высокая скорость изменения частоты обеспечивается на краях импульса, а более низкая в центре импульса, формируются путем подбора формы импульса тока накачки. Например, частотная модуляция на основе модифицированного окна Блэкмана [8], формируется как часть более сложного сигнала, в котором процессы термализации лазерного диода вырезаются с помощью временного окна, накладываемого на напряжение смещения фотодиода (рис. 2з).

На рисунке 3 приведена временная форма импульса тока накачки и соответствующие ей экспериментальные зависимости частоты от времени.

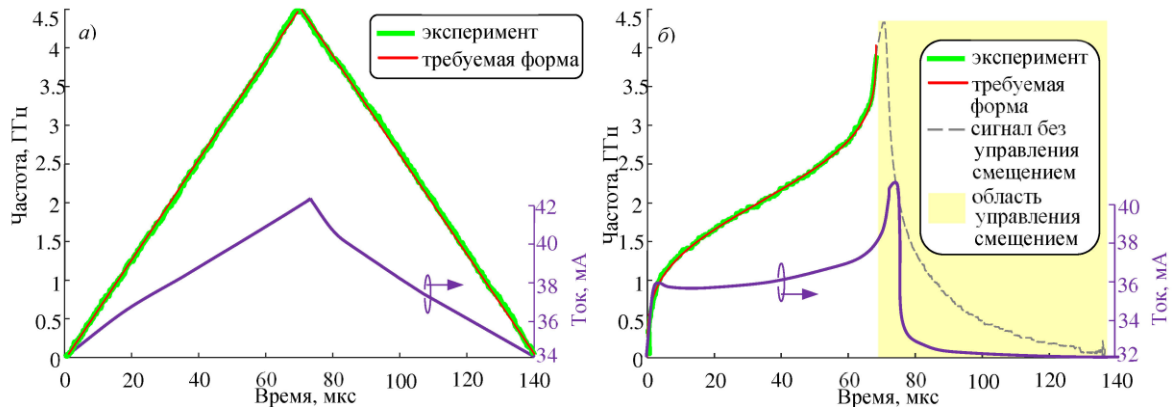


Рисунок 3 – Временная форма импульса тока накачки и соответствующие ей экспериментальные зависимости частоты от времени: *а* – сигнал с двойной комплиментарной линейной частотной модуляцией; *б* – сигнал нелинейной модуляцией частоты по форме [8]

При экспериментальном исследовании в составе устройства генерации использовались лазерный модуль на основе InGaAsP/InP лазерного диода с управляемым напряжением источником тока; волоконно-оптический интерферометр Майкельсона на оптическом разветвителе 2×2, двух зеркалах Фарадея и волоконно-оптической катушке, обеспечивающей разницу времен задержки 140 мкс; фотоприемный модуль на основе мощного СВЧ-фотодиода Шоттки [13] и малошумящего оптического усилителя на легированном эрбием волокне [14]. Перестройка типа модуляции с линейной (рис. 3а, длительность 140 мкс, диапазон частот от 0 до 4.5 ГГц) на нелинейную (рис. 3б, длительность 70 мкс, диапазон частот от 0 до 4.0 ГГц) в данном случае осуществляется путем изменения формы импульса тока накачки от импульса к импульсу, так как для их формирования оказывается достаточно генератора сигналов произвольной формы в диапазоне частот до 1 МГц.

3. Заключение

В данной работе предлагается радиофотонный метод генерации сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов с перестраиваемым типом частотной модуляции, реализованный на основе самогетеродинирования излучения лазерного диода с помощью волоконно-оптического интерферометра Майкельсона. Перестройка типа частотной модуляции в сверхширокой полосе частот достигается изменением типа управляющего низкочастотного сигнала. В работе экспериментально показана возможность перестройки типа частотной модуляции с линейной на нелинейную от импульса к импульсу, когда длительность и импульса составляет 140 мкс, а диапазон частот – от 0 до 4.5 ГГц (для линейной частотной модуляции) или 4.0 ГГц (для нелинейной частотной модуляции), при этом для перестройки оказывается достаточно генератора сигналов произвольной формы в диапазоне частот до 1 МГц.

Список литературы

1. Taylor J. D. (ed.). Advanced ultrawideband radar: signals, targets, and applications. – CRC press, 2016.
2. Zhang P., Liu H. An ultra-wide band system with chirp spread spectrum transmission technique // 2006 6th International Conference on ITS Telecommunications. – IEEE, 2006. – С. 294-297.
3. Chi H., Wang C., Yao J. Photonic generation of wideband chirped microwave waveforms // IEEE journal of microwaves. – 2021. – Т. 1. – №. 3. – С. 787-803.
4. Zhao H., Ma J. Photonics-assisted multi-band dual linear/nonlinear chirp waveform generation based on optical phase modulation //IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – С. 151278-151284.
5. Xu Y. et al. Photonic generation of dual-chirp waveforms with improved time-bandwidth product // IEEE Photonics Technology Letters. – 2017. – Т. 29. – №. 15. – С. 1253-1256.
6. Zhu D., Yao J. Dual-chirp microwave waveform generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator //IEEE Photonics technology letters. – 2015. – Т. 27. – №. 13. – С. 1410-1413.
7. Tovar P. et al. Photonic generation of NLFM microwave pulses from DFB-laser chirp // IEEE Photonics Technology Letters. – 2019. – Т. 31. – №. 17. – С. 1417-1420.
8. Yue W., Zhang Y. A novel nonlinear frequency modulation waveform design aimed at side-lobe reduction //2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). – IEEE, 2014. – С. 613-618.
9. Yang H. et al. Sinusoidal frequency-modulated waveforms generated by a phase-modulated frequency-shifting loop //Journal of Lightwave Technology. – 2021. – Т. 39. – №. 10. – С. 3112-3120.
10. Wang S. R. et al. Manipulations of multi-frequency waves and signals via multi-partition asynchronous space-time-coding digital metasurface //Nature Communications. – 2023. – Т. 14. – №. 1. – С. 5377.
11. Li R. et al. Demonstration of a microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing //Optics express. – 2017. – Т. 25. – №. 13. – С. 14334-14340.
12. Mikitchuk K., Chizh A., Lebedev A. Self-Heterodyne Generation of Ultrawideband Linear Frequency Modulated Microwave Signals Based on Fiber-Optic Michelson Interferometer //2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2022. – С. 63-66.
13. Chizh A., Malyshev S., Mikitchuk K. High-speed high-power InAlAs/InGaAs/InP Schottky photodiode // 2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). – IEEE, 2015. – С. 1-4.
14. Микитчук К. Б., Чиж А. Л., Малышев С. А. Оптический усилитель на легированном эрбием волокне для оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки //Материалы 6-й Всероссийской научной конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург. – 2017. – С. 104-108.