

# Генерация сверхширокополосных СВЧ-сигналов с фазо-кодовой и линейно-частотной модуляцией на основе аналоговой волоконно-оптической линии передачи

К.Б. Микитчук, А.Л. Чиж

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

**Аннотация:** в работе рассматриваются разработанные в лаборатории радиофоники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» результаты исследований устройства для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов с фазо-кодовой и линейной частотной модуляцией, которые обеспечивают сжатие главного лепестка автокорреляционной функции до 10000 раз, на основе аналоговой волоконно-оптической СВЧ-линии передачи.

**Ключевые слова:** сверхширокополосный СВЧ-сигнал, линейно-частотная модуляция, фазо-кодовая модуляция, волоконно-оптическая линия передачи

## Введение

В системах радиолокации существует постоянная необходимость совершенствования методов обнаружения и выделения сигналов из помех, а также изыскания новых подходов к распознаванию объектов из-за улучшения средств современной радиомаскировки, увеличения скоростей движения и маневрирования целей [1,2]. В современных радиолокационных системах важнейшим требованием является гибкость изменения режимов работы, что в свою очередь обеспечивается использованием нескольких классов сигналов, например, прямоугольных импульсов без внутриимпульсной модуляции, импульсов с фазо-кодовой модуляцией и/или с линейной частотной модуляцией [3]. То есть, для обеспечения гибкости адаптации к помеховой обстановке и особенностям цели в современных и перспективных системах радиолокации требуется генерация сложных СВЧ-сигналов, как узкополосных, так и сверхширокополосных.

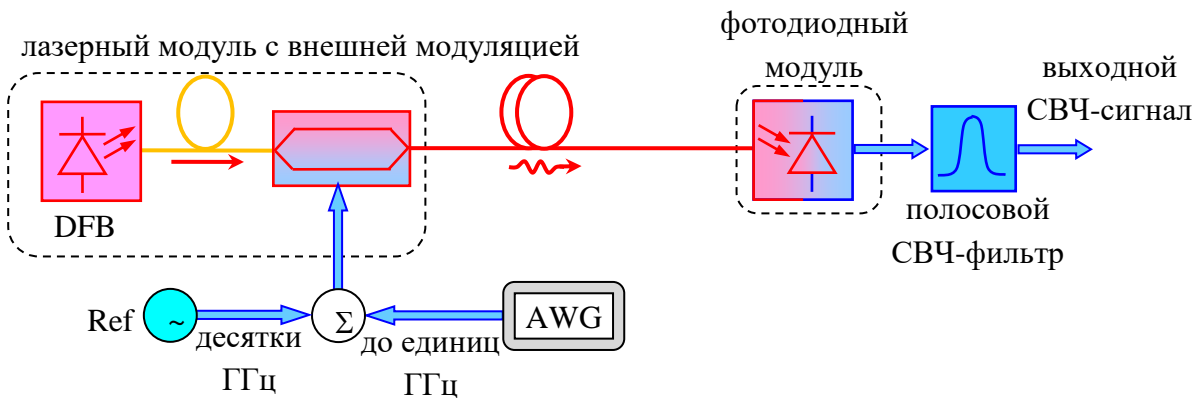
В современных электронных системах генерации СВЧ-сигналов имеется ряд сложностей, обусловленных фундаментальными ограничениями традиционной элементной базы СВЧ-техники [4]. Архитектура систем радиолокации при использовании сверхширокополосных сигналов значительно усложняется по сравнению с узкополосными системами из-за частотной зависимости характеристик как активных, так и пассивных СВЧ-устройств [2,5]. Радиофотонные устройства и системы, такие как волоконно-оптические линии передачи и задержки СВЧ-сигналов, оптоэлектронные генераторы СВЧ, волоконно-оптические системы распределения СВЧ-сигналов и оптоэлектронные системы обработки СВЧ-сигналов, находят применение в современных системах радиолокации и радиоэлектронной борьбы. Основные преимущества устройств и систем радиофоники связаны с уникальными свойствами оптического кварцевого волокна, такими как сверхнизкие потери (менее 0,0004 дБ/м) и дисперсия (для СВЧ-сигнала), невосприимчивость к электромагнитным помехам, полная гальваническая развязка, механическая гибкость, малая масса и размеры [6,7]. Возможность генерации гармонического СВЧ-сигнала со сверхнизким фазовым шумом в оптоэлектронных генераторах, например, обусловлена возможностью создания волоконно-оптических линий задержки до 100 мкс, что

эквивалентно добротности свыше  $10^6$  для X-диапазона частот [8]. Для сверхширокополосной радиолокации применение технологий радиофотоники также является перспективным, поскольку использование оптоэлектронных и оптических методов для передачи, генерации и обработки СВЧ-сигналов позволяет создавать устройства и системы СВЧ-диапазона с параметрами, недостижимыми традиционными электронными средствами [9].

В данной работе рассматриваются результаты исследований устройства для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов на основе аналоговой волоконно-оптической СВЧ-линии передачи, полученные в лаборатории радиофотоники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника».

### Генерация сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов

Устройство для генерации оптоэлектронными методами сложных сверхширокополосных СВЧ-сигналов возможно создать на основе волоконно-оптической линии, на вход которой подается сумма гармонического СВЧ-сигнала, задающего центральную частоту сложного СВЧ-сигнала, и сигнала от генератора сигналов произвольной формы, рабочая частота дискретизации которого составляет меньшую величину, чем полоса частот генерируемого сверхширокополосного СВЧ-сигнала (Рисунок 1). Принцип работы такого устройства основан на том, что электрооптический отклик модулятора Маха-Цендера линеен по фазе, а амплитуда выходного оптического сигнала пропорциональна функции Бесселя от амплитуды входного электрического сигнала, что позволяет реализовать чистую фазовую модуляцию и одновременно обеспечивает возможность нелинейного преобразования сигналов.

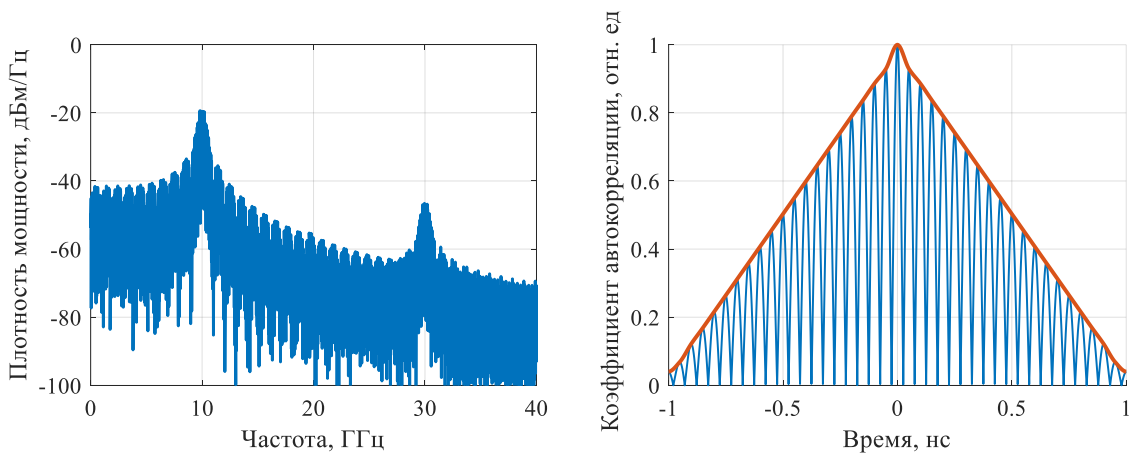


**Рисунок 1.** Структурная схема устройства для генерации сложных сверхширокополосных сигналов в СВЧ-диапазоне оптоэлектронными методами, где Ref – опорный СВЧ-генератор частоты, AWG – генератор сигналов произвольной формы или битовых последовательностей

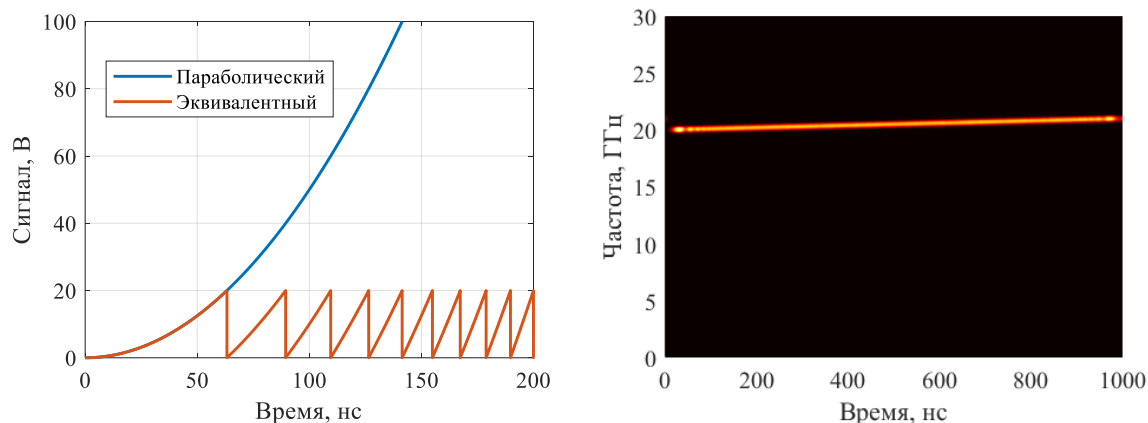
Сигнал на выходе модулятора Маха-Цендера зависит от его фазы смещения. Фазо-кодированную модуляцию без паразитной амплитудной модуляции возможно получить, последовательно смещая модулятор Маха-Цендера между квадратурными точками, для этого СВЧ-сигнал опорного генератора модулируется с помощью псевдослучайной битовой последовательности с уровнями амплитуд 0 и  $V_\pi$ , где  $V_\pi$  – полуволновое напряжение модулятора. В результате численного моделирования установлено, что для обеспечения наибольшей мощности на основной частоте, задаваемой опорным генератором, необходимо, чтобы амплитуда сигнала последнего не превышала  $V_\pi/2$ . В этом случае уровень гармонических составляющих в спектре сигнала не превышает  $-30$  дБн, а ширина главного лепестка автокорреляционной функции уменьшается в  $N$  раз, где  $N$  – длительность псевдослучайной

последовательности. Изменение амплитуды сигнала опорного генератора в диапазоне от 0.1 до 1.2 полуволнового напряжения, а также изменение амплитуды сигнала генератора битовой последовательности в диапазоне от 0.8 до 1.2 полуволнового напряжения модулятора, не приводит к увеличению ширины главного лепестка автокорреляционной функции более, чем на 25%.

При подаче СВЧ-сигнала на вход модулятора Маха-Цендера мгновенная частота модуляционной составляющей оптического сигнала пропорциональна производной от фазы на входе модулятора Маха-Цендера. Для обеспечения линейной зависимости частоты выходного сигнала от времени необходимо, чтобы фаза смещения модулятора Маха-Цендера квадратично изменялась во времени. Так как максимальная амплитуда сигнала, подаваемого на вход модулятора Маха-Цендера, ограничена напряжением пробоя, не превышающим 20–30 В, а фаза СВЧ-сигнала имеет период  $2\pi$ , то для расширения полосы линейной частотной модуляции возможно использование эквивалентного кусочно-непрерывного сигнала, обеспечивающего квадратичное изменение фазы модулятора во времени. Рисунок 3 показывает частотно-временное представление сигнала на выходе устройства для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов без полосового СВЧ-фильтра, сформированное при подаче указанного эквивалентного сигнала. Видно, что на выходе присутствуют по меньшей мере неперекрывающиеся три суммарные и три разностные гармоники сигналов на входе, селекция которых осуществляется полосовым СВЧ-фильтром. Следует отметить, что ширина полосы частот кусочно-непрерывного сигнала, обеспечивающая в конечном итоге генерацию непрерывного во времени сигнала с линейной частотной модуляцией, может быть меньше требуемой ширины полосы частот генерируемого сигнала в 8 раз.



**Рисунок 2.** Спектральная плотность мощности и главный лепесток автокорреляционной функции сигнала с фазо-кодовой модуляцией псевдослучайной последовательностью фаз  $[0, \pi, \dots]$ , где скорость битовой последовательности  $\sim 1$  Гбит/с, полная длительность сигнала 1 мкс, частота опорного генератора 10 ГГц



**Рисунок 3.** Часть временного представления параболического сигнала и эквивалентного ему сигнала и частотно-временное представление сигнала на выходе устройства для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов без полосового СВЧ-фильтра, где обеспечивается полоса частот сигнала с линейной частотной модуляцией 2 ГГц

## Заключение

В работе установлено, что устройство для генерации сверхширокополосных СВЧ-сигналов, состоящее из опорного СВЧ-генератора, генератора сигналов произвольной формы и/или импульсных последовательностей и волоконно-оптической линии передачи, обеспечивает генерацию с фазо-кодированной и линейной частотной модуляцией. При генерации сигналов с фазо-кодированной модуляцией ширина главного лепестка автокорреляционной функции уменьшается пропорционально скорости псевдослучайной битовой последовательности и может достигать 1 нс и менее для СВЧ-сигналов с частотой 10 ГГц длительностью 1 мкс. При генерации СВЧ-сигналов с линейной частотной модуляцией необходимо на вход волоконно-оптической линии в составе устройства генерации подавать сумму гармонического СВЧ-сигнала, основная частота или гармоника которого с порядком до 4 определяет центральную частоту выходного сигнала, и кусочно-непрерывный сигнал из отрезков параболы, ширина полосы частот которого может быть в 2–8 раз меньше ширины полосы частот генерируемого сигнала.

## Список литературы

1. Microwave photonics / A.J. Seeds, K.J. Williams // *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*. – 2006. – Vol. 24, № 12. – pp. 4628-4641.
2. Microwave photonics / Janping Yao // *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*. – 2009. – Vol. 27, № 3. – P.314-335.
3. Photonics for RF front ends / T.R. Clark, R. Waterhouse // *IEEE Microwave magazine*. – 2011, № 3. – Vol. 12. – P. 87-95.
4. Microwave photonics – a historical perspective / T. Berceli, P. Herczfeld // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. – 2010. – Vol. 58, № 11. – pp. 2992-3000.
5. Microwave Photonics Programs at DARPA / R. W. Ridgway, Carl L. Dohrman, and Joshua A. Conway // *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*. – 2014. – Vol. 32, № 20. – pp. 3428-3439.
6. Analog optical link operating at the gain peak wavelength of an erbium-doped fiber amplifier / K. Mikitchuk, A. Chizh, and S. Malyshev // *Proceedings of 44th European Microwave Conference (EuMC)*. – Rome, Italy. – 6-9 October 2014. – P. 679-683.
7. High-speed high-power InAlAs/InGaAs/InP Schottky photodiode/ A.Chizh, S. Malyshev, K. Mikitchuk // *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2015)* – Paphos, Cyprus, 24-29 October, 2015. – 4 p.

8. Double-loop all-optical gain optoelectronic oscillator with low phase noise and spurs level / A. Chizh, S. Malyshev, K. Mikitchuk // Proc. of IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP-2018) – Toulouse, France, 22-25 October, 2018.– P. 124-127.
9. Моделирование передачи сверхширокополосных СВЧ-сигналов с линейно-частотной модуляцией по аналоговым волоконно-оптическим линиям / А.Л. Чиж, К.Б. Микитчук, С.А. Малышев // Сборник статей 7-ой Всероссийской научной конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург, Россия. – 28-30 мая 2018. – С. 302-306.