

*Микитчук К.Б., Чиж А.Л., Малышев С.А.
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Национальной академии наук Беларуси*

Двухконтурный оптоэлектронный генератор СВЧ с низким уровнем дискретных составляющих в спектре генерации и сверхнизким фазовым шумом

В статье представлен двухконтурный оптоэлектронный генератор СВЧ на линиях задержки с оптическим усилителем на легированном эрбием волокне. Показано, что фазовый шум такого оптоэлектронного генератора X-диапазона на отстройке 10 кГц от СВЧ-несущей составляет величину менее -140 дБн/Гц, при этом уровень дискретных составляющих в спектре сигнала генерации не превышает -91 дБн.

Ключевые слова: оптоэлектронный генератор СВЧ, фазовый шум, волоконно-оптическая линия задержки, оптический усилитель на легированном эрбием волокне.

Генераторы сверхвысокой частоты (СВЧ) с низким уровнем фазового шума имеют важное значение для многих коммерческих и специальных применений, таких как беспроводные и оптические системы связи, системы радиолокации и радиоэлектронной борьбы. Например, оптические системы связи требуют высокой точности частоты синхронизации между оптическими центральными узлами, а радиолокационные системы нуждаются в низком уровне флуктуаций частоты опорных сигналов для отслеживания движущихся объектов. В целом, параметры и характеристики вышеназванных систем улучшаются с уменьшением уровня фазового шума используемых в них генераторов СВЧ. Обычно сигналы с низким фазовым шумом генерируются с помощью электронных схем, содержащих в контуре положительной обратной связи высокочастотные электромагнитные, магнитоэлектрические или акустоэлектрические резонаторы. С увеличением частоты генерации до 10 ГГц и выше добротность практически всех СВЧ-резонаторов уменьшается, что приводит к ограничению максимальной частоты прямой генерации [1]. Альтернативным способом генерации синусоидальных СВЧ-сигналов с низким фазовым шумом являются оптоэлектронные генераторы СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением, которые по принципу своей работы относятся к автогенераторам с положительной обратной связью, реализованной на основе волоконно-оптической линии задержки [2]. Возможность генерации квазигармонического СВЧ-сигнала со сверхнизким фазовым шумом в таких генераторах обусловлена возможностью создания волоконно-оптических линий задержки до 100 мкс, что эквивалентно добротности свыше 10^6 для X-диапазона частот.

Оптическое усиление потенциально позволяет снизить фазовый шум оптоэлектронных генераторов СВЧ на линиях задержки [3]. Конструкцию оптического усилителя на легированном эрбием волокне можно оптимизировать для получения наиболее низкого шума в режиме насыщения при входной мощности оптической несущей более -10 дБм, что является типичным для оптоэлектронных генераторов СВЧ на линиях задержки [4]. Кроме того, при использовании двунаправленной накачки лазерными диодами с распределенной обратной связью возможно достичь величины эквивалентного

коэффициента усиления СВЧ-сигнала в контуре оптоэлектронного генератора свыше 30 дБ, при эквивалентном собственном фазовом шуме менее -150 дБн/Гц [5,6]. На рис. 1 представлена схема двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением. Электрооптическое преобразование в оптоэлектронном генераторе осуществляется путем модуляции по интенсивности излучения лазерного диода с распределенной обратной связью электрооптическим модулятором Маха-Цендера. Задержка оптического сигнала осуществляется в основной волоконно-оптической линии, представляющей собой волоконно-оптическую катушку из одномодового кварцевого оптического волокна длиной 2 км (эквивалентная длительность задержки 10 мкс). Оптический усилитель на легированном эрбием волокне используется для компенсации потерь, возникающих в контуре оптоэлектронного генератора. На выходе оптического усилителя с помощью волоконно-оптического разветвителя включены дополнительные волоконно-оптические линии задержки, необходимые для увеличения частотной селективности контура оптоэлектронного генератора, что позволяет значительно снизить уровень дискретных составляющих в спектре генерации [4]. Оптоэлектронное преобразование модулированного по интенсивности оптического сигнала в СВЧ-сигнал осуществляется с помощью мощного СВЧ-фотодиода Шоттки с балочными выводами на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP [7]. В качестве узкополосного СВЧ-фильтра используется фильтр первого порядка на основе полого металлического резонатора. На рис. 2 приведена фотография модуля двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц. Габаритные размеры модуля составляют $257 \times 197 \times 84$ мм, а вес не более 3 кг.

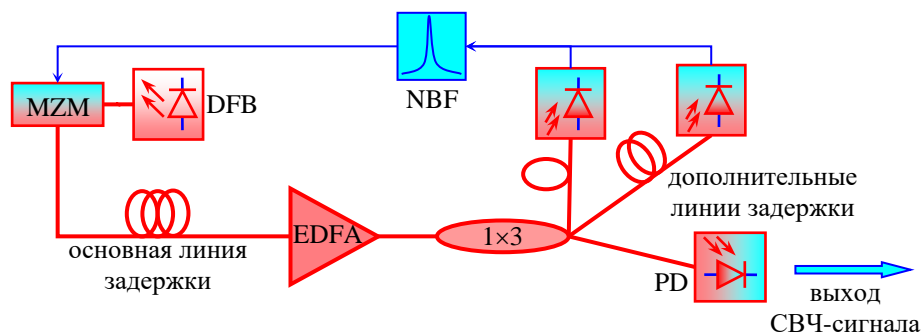


Рис. 1. Схема двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением: DFB – лазерный диод с распределенной обратной связью, MZM – электрооптический модулятор Маха-Цендера, NBF – узкополосный СВЧ-фильтр, PD – мощный СВЧ-фотодиод

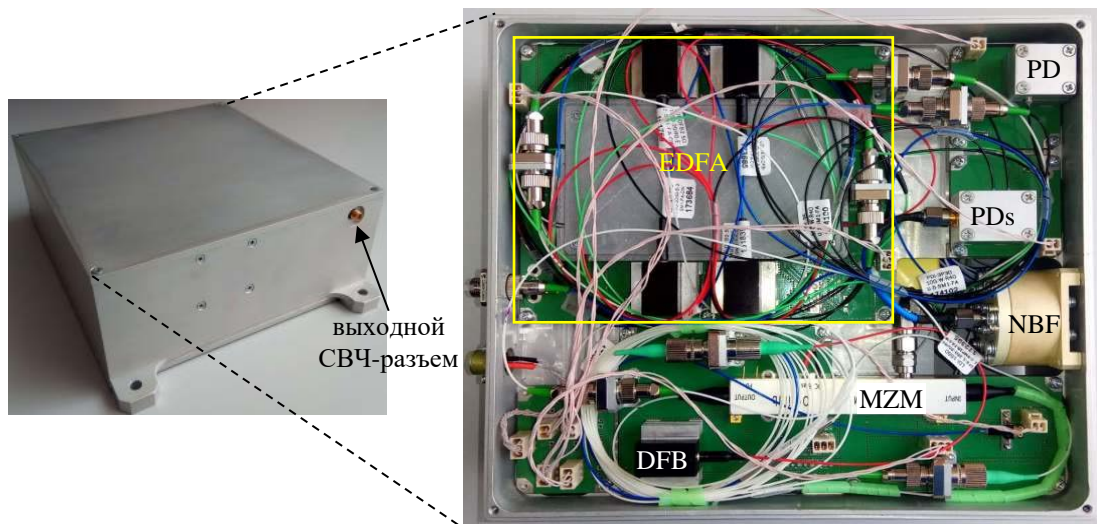


Рис. 2. Фотография модуля двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц. Волоконно-оптические линии задержки находятся с обратной стороны и не видны на фотографии

Для стационарной генерации в оптоэлектронном генераторе СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением необходим коэффициент петлевого усиления для малых сигналов в диапазоне от 1 до 3.3 [4]. Такой коэффициент петлевого усиления обеспечивается в контуре оптоэлектронного генератора при использовании рабочей точки электрооптического модулятора Маха-Цендера в диапазоне фаз смещения от 140° до 160° (фаза смещения 180° соответствует точке закрытия модулятора Маха-Цендера), что, в свою очередь, обеспечивает глубину модуляции оптического сигнала более 80% и мощность оптической несущей на входе оптического усилителя в диапазоне от -10 до 0 дБм. На рис. 3 приведены измеренные зависимости эквивалентного коэффициента усиления СВЧ-сигналов и эквивалентной относительной интенсивности шума оптического усилителя на легированном эрбием волокне от входной мощности оптической несущей при 100% глубине оптической модуляции. Из рисунка видно, что разработанный оптический усилитель для оптоэлектронного генератора СВЧ работает в режиме насыщения при входной мощности оптической несущей более -20 дБм, причем даже в режиме насыщения коэффициент усиления оптического сигнала превышает 10 дБ, что соответствует эквивалентному коэффициенту усиления для СВЧ-сигнала свыше 20 дБ. Для мощности оптической несущей свыше 0 дБм обеспечивается эквивалентная относительная интенсивность шума оптического усилителя менее -148 дБн/Гц, что при 100% глубине оптической модуляции соответствует собственному фазовому шуму оптического усилителя менее -145 дБн/Гц. Следует отметить, что для оптоэлектронных генераторов СВЧ с оптическим усилением и длиной волоконно-оптической линии задержки не более 5 км именно собственный шум оптического усилителя на легированном эрбием волокне является основным источником шума [4].

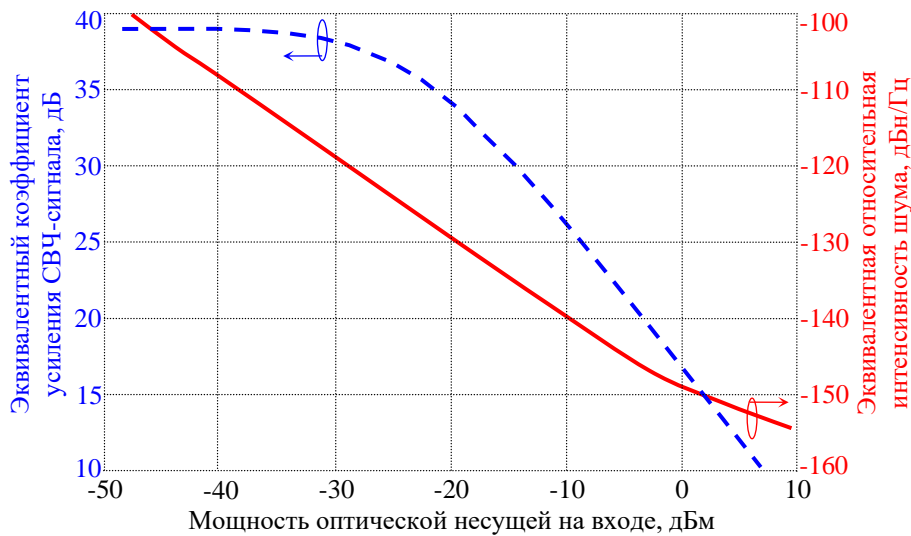


Рис. 3. Измеренные зависимости эквивалентного коэффициента усиления СВЧ-сигналов и эквивалентной относительной интенсивности шума оптического усилителя на легированном эрбием волокне от входной мощности оптической несущей

Для измерения сверхнизкой спектральной плотности мощности фазового шума двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ использовался анализатор фазового шума Rohde&Schwarz FSWP26, в основе работы которого лежит принцип выделения квадратурных компонентов с одновременным понижением частоты и математической обработкой синфазных и квадратурных компонент сигнала. При измерении фазового шума проводилась кросскорреляционная обработка результатов 100 отдельных измерений. На рис. 4 приведен фазовый шум двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц. Из рисунка видно, что фазовый шум на отстройке 10 кГц от СВЧ-несущей равен -142 дБн/Гц, при этом спектральная плотность мощности дискретных составляющих в спектре генерации не превышает -120 дБн/Гц.

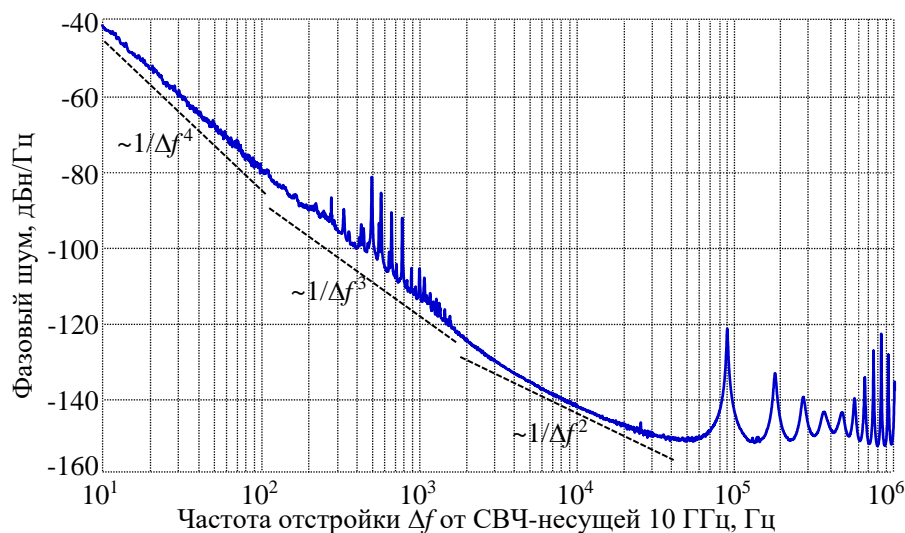


Рис. 4. Фазовый шум двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц, измеренный с помощью анализатора фазового шума Rohde&Schwarz FSWP26

Вблизи СВЧ-несущей можно выделить четыре области частот отстройки:

- до 100 Гц, где фазовый шум определяется мультипликативным фликкер-шумом (белый частотный шум $\sim 1/f^2$), в результате чего фазовый шум оптоэлектронного генератора СВЧ оказывается обратно пропорционален четвертой степени частоты отстройки от несущей ($\sim 1/\Delta f^4$);
- от 100 Гц до 2 кГц, где фазовый шум определяется мультипликативным фликкер-шумом (фликкер-шум фазы $\sim 1/f$), в результате чего фазовый шум оптоэлектронного генератора СВЧ оказывается обратно пропорционален третьей степени частоты отстройки от несущей ($\sim 1/\Delta f^3$);
- от 2 кГц до 50 кГц, где фазовый шум определяется аддитивным белым шумом, в результате чего фазовый шум оптоэлектронного генератора СВЧ оказывается обратно пропорционален квадрату частоты отстройки от несущей ($\sim 1/\Delta f^2$);
- свыше 50 кГц, где в спектре генерации появляются дискретные составляющие на собственных частотах волоконно-оптической линии задержки оптоэлектронного генератора СВЧ, уровень которых определяется полосой СВЧ-фильтра и соотношением длин основной и дополнительных волоконно-оптических линий задержки [4].

Зависимость спектральных составляющих фазового шума от частоты отстройки определяется влиянием различных источников аддитивного и мультипликативного шума в контуре оптоэлектронного генератора. В первых двух областях фазовый шум оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки определяется когерентными оптическими процессами, приводящими к генерации шума с неравномерной спектральной плотностью мощности [8]. В третьей области в соответствии с моделью Лиссона фазовый шум определяется эквивалентным фазовым шумом оптического усилителя на легированном эрбием волокне, который оценивается как минимальный уровень спектральных составляющих в спектре («шумовая полка») и составляет величину порядка -150 дБн/Гц.

На рис. 5 приведен спектр сигнала генерации двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц, измеренный с помощью анализатора спектра Rohde & Schwarz FSW26. Из рисунка видно, что уровень мощности дискретных составляющих в спектре не превышает -91 дБн. Следует отметить, что измеренный спектр генерации вблизи СВЧ-несущей ($\Delta f < 0.5$ МГц) искажен собственным шумом анализатора спектра.

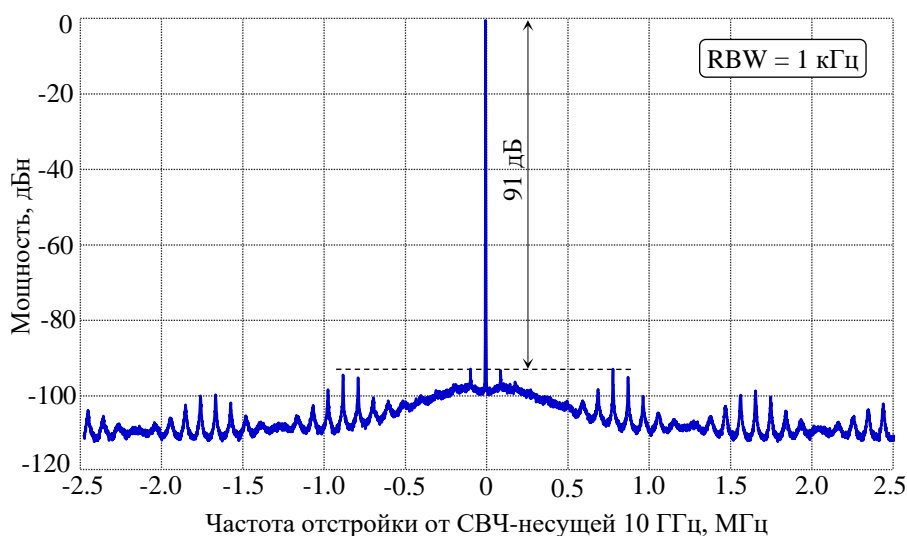


Рис. 5. Спектр сигнала генерации двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц, измеренный с помощью анализатор спектра Rohde & Schwarz FSW26

Таким образом, разработанный двухконтурный оптоэлектронный генератор СВЧ с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц одновременно обеспечивает и сверхнизкий фазовый шум менее -142 дБн/Гц на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ-несущей, и низкий уровень дискретных составляющих в спектре генерации, который не превышает -91 дБн.

Библиографический список

1. E. Rubiola, Phase noise and frequency stability in oscillators, Cripps, S.C., Ed. Cambridge, UK: Cambridge Univ. 2008.
2. X. S. Yao, "Opto-electronic oscillators", in RF photonic technology in optical fiber links, W. S. C. Chang, Ed. New York: Cambridge Univ. Press, 2002, pp. 255-293.
3. P. S. Devgan, V. J. Urlick, J. F. Diehl, and K. J. Williams, "Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photonic gain," J. Lightwave Technol., vol. 27, no. 15, pp.3189–3193, 2009.
4. K. Mikitchuk, A. Chizh and S. Malyshev, "Modeling and Design of Optoelectronic Oscillators," IEEE J. of Quant. Electronics, vol. 52, no. 10, pp. 1-8, Oct. 2016.
5. Микитчук К.Б., Оптический усилитель на легированном эрбием волокне для оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки / К.Б. Микитчук, А.Л. Чиж, С.А. Малышев // Материалы 6-ой Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 29 мая – 1 июня 2017. : в 2 т. / Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» ; ред. Б.А. Калиникос [и др.]. – Санкт-Петербург, 2017. – Т. 1. – С. 333–337.
6. Mikitchuk, K. Noise and gain of an erbium-doped fiber amplifier for delay-line optoelectronic oscillator / K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev // Proc. of 24th int. conf. on noise and fluctuations, Vilnius, 20–23 June 2017. / The Institute of electrical and electronics engineers ; ed. : W. Belzig [et al.]. – Vilnius, 2017. – P. 1–4.
7. Chizh, A. High-speed high-power InAlAs/InGaAs/InP Schottky photodiode / A. Chizh, S. Malyshev, K. Mikitchuk // Proc. of IEEE international topical meeting microwave photonics, Paphos, 26–28 October 2015 / The Institute of electrical and electronics engineers ; ed. : S. Iezekiel [et al.]. – Paphos, 2015. – P. 1–4.
8. D. Eliyahu, D. Seidel, and L. Maleki "RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an optoelectronic oscillator," Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, no. 2, pp. 449–456, 2009.