

Микитчук К.Б., Малышев С.А., Чижев А.Л.
Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Оптоэлектронный генератор СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением

В данной работе представлены результаты исследования оптоэлектронного генератора на линиях задержки с оптическим усилением. Фазовый шум и дискретные составляющие в спектре генерации изучены с помощью нелинейной нестационарной модели. Проведены экспериментальные исследования амплитуды, временной стабильности мощности генерации и спектра выходного сигнала.

Ключевые слова: Оптоэлектронный генератор СВЧ, оптическое усиление, временная стабильность, фазовый шум.

Характеристики современных систем радиолокации и измерительной СВЧ-техники в целом улучшаются при уменьшении фазового шума применяемого опорного генератора СВЧ [1]. Оптоэлектронные генераторы (ОЭГ) относятся к автогенераторам, которые обеспечивают генерацию СВЧ-сигнала со сверхнизким фазовым шумом (менее минус 140 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от частоты генерации, максимальная частота генерации – десятки ГГц), и являются альтернативой традиционным электронным генераторам СВЧ по целому ряду причин. Фазовый шум ОЭГ фундаментально не зависит от частоты генерации. Более того, ОЭГ на линиях задержки обладают очень низкой чувствительностью к стационарному ускорению/вибрации [2] и электромагнитным помехам [3], что особенно важно для систем на подвижной платформе. В ОЭГ на линиях задержки сигнал СВЧ с помощью оптического модулятора преобразуется в модулированный по интенсивности оптический сигнал, задерживаемый в длинной волоконно-оптической линии. После волоконно-оптической линии задержки (ВОЛЗ) обратное оптоэлектронное преобразование осуществляется с помощью мощного высокоскоростного фотодиода, сигнал с выхода которого поступает на узкополосный СВЧ-фильтр, через который замыкается контур ОЭГ. Длительность задержки сигнала в контуре ОЭГ может достигать десятков микросекунд, что соответствует эквивалентной добротности 10^5 – 10^7 в частотном диапазоне 8 – 12 ГГц [1].

Для компенсации потерь, возникающих в первую очередь при электрооптическом и оптоэлектронном преобразовании в ОЭГ, применяется как оптическое, так и электронное усиление [1,4]. В ОЭГ с электронным усилением применяемый СВЧ-усилитель является главным источником шума [4], поэтому фазовый шум сигнала генерации ограничен избыточным шумом СВЧ-усилителя [5]. Снижение собственного шума усилителя, таким образом, является основным методом увеличения спектральной чистоты сигнала генерации в случае ОЭГ. Полностью оптическое усиление потенциально позволяет снизить фазовый шум ОЭГ, однако его применение ограничивается рядом факторов. Во-первых, это

компромисс между коэффициентом усиления и шумом, обусловленным биениями усиленного сигнала и спонтанного излучения в оптическом усилителе на волокне, легированном эрбием [6]. Во-вторых, это сравнительно низкое значение максимальной входной оптической мощности высокоскоростных СВЧ-фотодиодов, которые также должны работать в линейном режиме для предотвращения нелинейного искажения сигнала генерации. Для обеспечения линейности оптоэлектронного преобразования в ОЭГ должны применяться мощные СВЧ-фотодиоды [7]. В-третьих, это нелинейные эффекты и рассеяние в длинной ВОЛЗ, которые ограничивают достижимый фазовый шум [8]. Для достижения наименьшего уровня собственного и, следовательно, фазового шума в ОЭГ также необходим тщательный расчет величины мощности оптической несущей и длины ВОЛЗ.

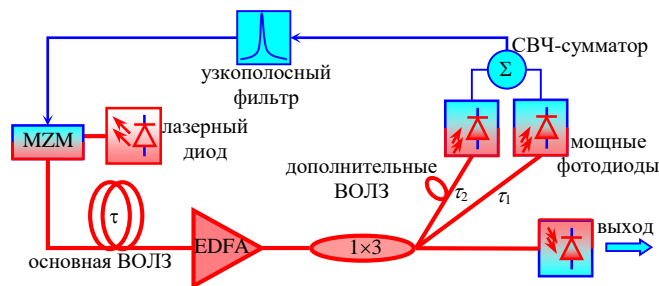


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектронного генератора на линиях задержки с оптическим усилением, где MZM – электрооптический модулятор Маха-Цендера, EDFA – оптический усилитель на волокне, легированном эрбием.

На рис. 1 приведена структурная схема ОЭГ на линиях задержки с оптическим усилением. В оптоэлектронном генераторе электрооптическое преобразование осуществляется путем модуляции по интенсивности излучения полупроводникового лазера с распределенной обратной связью с помощью электрооптического модулятора Маха-Цендера, вход которого подключен к оптоволоконному выходу лазера с помощью оптического волокна, сохраняющего поляризацию. Задержка модулированного по интенсивности оптического сигнала осуществляется в длинном отрезке оптического волокна, которой представляет собой плоскую катушку (длина 1 км). Для усиления модулированного по интенсивности оптического сигнала используется оптический усилитель на легированном эрбием волокне [6], подключенный к выходу волоконно-оптической катушки. На выходе оптического усилителя с помощью волоконно-оптического разветвителя могут включаться корректирующие ВОЛЗ для дополнительной частотной селекции. Электрооптическое преобразование осуществляется путем детектирования сигнала с помощью мощного СВЧ-фотодиода Шоттки с балочными выводами на основе гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP [7]. В качестве узкополосного СВЧ-фильтра используется фильтр первого порядка на основе полого металлического резонатора с коаксиальными выводами. Следует отметить, что вывод сигнала генерации непосредственно из линии задержки с помощью мощного СВЧ-фотодиода позволяет реализовать полную гальваническую развязку СВЧ-выхода.

Для моделирования подпорогового состояния, переходных процессов, дискретных составляющих в спектре, а также динамических нестабильностей в ОЭГ принципиально

подходят только нелинейные нестационарные модели. Для моделирования ОЭГ с одной/несколькими ВОЛЗ с оптическим/электронным усилением авторами была предложена новая нелинейная нестационарная модель, основанная на одновременном моделировании эволюции отсчета комплексной огибающей и частоты генерации [9,10]. Данная модель учитывает шум интенсивности оптического излучения, дробовый шум, шум, обусловленный биениями усиливаемого сигнала и спонтанного излучения в оптическом усилителе, а также позволяет учесть шум, обусловленный многократным рассеянием Рэлея в оптическом волокне [11].

В случае, если ширина полосы пропускания узкополосного СВЧ-фильтра превышает несколько расстояний между собственными частотами ОЭГ, динамика генерации определяется только энергетическим балансом в контуре ОЭГ [12,13], а зависимость амплитуды генерации от конструктивных параметров удобно описывать с помощью коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов [13,14]. В данной работе проводится прямое измерение коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов, а соответствующая мощность генерации оценивается следующим методом. Если контур ОЭГ разомкнуть на входе электрооптического модулятора Маха-Цендера, то с помощью векторного анализатора цепей, настроенного на минимальную мощность зондирующего сигнала, становится возможно определить частоту генерации ОЭГ как частоту сигнала, наиболее близкую к максимуму абсолютной величины коэффициента петлевого усиления, фаза которого равна нулю. Далее, на вход разомкнутого контура ОЭГ подается зондирующий СВЧ-сигнал, частота которого равна частоте генерации, а мощность увеличивается до величины, соответствующей коэффициенту петлевого усиления менее 1. Мощность генерации оценивается как мощность, при которой коэффициент петлевого усиления на найденной выше частоте генерации становится единичным.

Значение мощности стационарной генерации для конкретного оптоэлектронного генератора зависит от целого ряда параметров как отдельных компонентов, так и генератора в целом (коэффициент петлевого усиления в режиме малых сигналов). Наиболее широко для количественного описания амплитуды стационарной генерации используется нормированная амплитуда генерации, которая рассчитывается из мощности генерации на входе модулятора Маха-Цендера [14]. На рис. 2 приведена зависимость нормированной амплитуды генерации от коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов, измеренная с помощью векторного анализатора цепей Anritsu MS4645B. Как видно из рисунка, результаты моделирования с помощью нелинейной нестационарной модели [9,10] хорошо согласуются с результатами эксперимента. Из анализа рисунка следует, что порогом генерации является величина коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов, равная единице. Также, во всем изученном экспериментально диапазоне коэффициентов петлевого усиления в режиме малых сигналов имеет место монотонное увеличение амплитуды генерации, что свидетельствует об отсутствии динамических нестабильностей. На рис. 3 приведена временная нестабильность выходной мощности генерации ОЭГ. Видно, что на протяжении одного часа выходная мощность изменяется не более чем на ± 0.02 дБ. Остаточная нестабильность мощности генерации объясняется

дрейфом пассивных компонентов и отсутствием термостабилизации лазера накачки оптического усилителя.

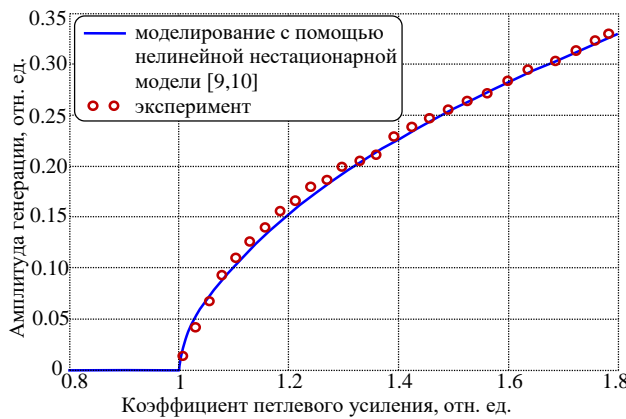


Рис. 2. Амплитуда генерации в зависимости от коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов.

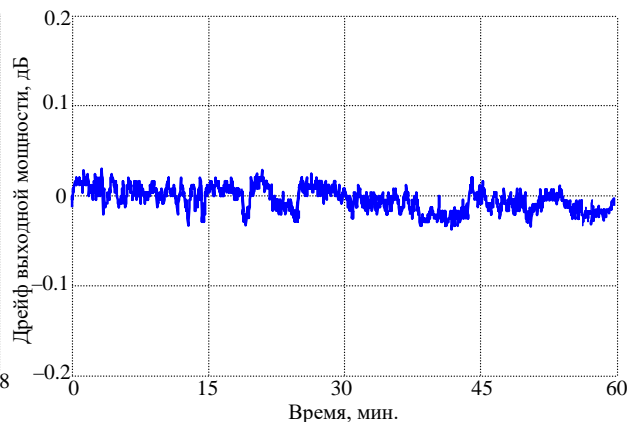


Рис. 3. Временная нестабильность мощности генерации.



Рис. 4. Спектр ОЭГ на линиях задержки с полностью оптическим усилением.

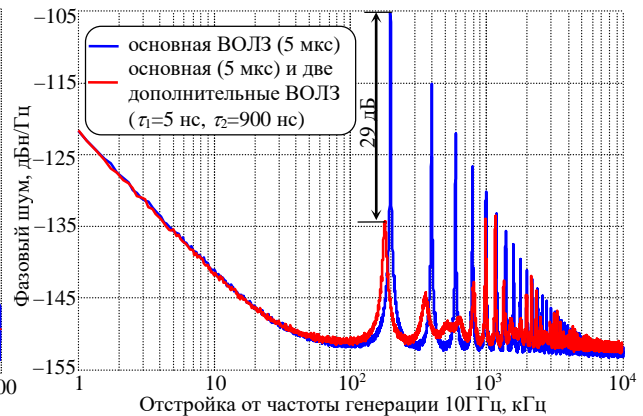


Рис. 5. Фазовый шум ОЭГ с/без дополнительных корректирующих ВОЛЗ.

На рис. 4 приведен спектр генерации ОЭГ на линиях задержки с оптическим усилением, измеренный с помощью анализатора спектра Rohde-Schwarz FSP40. Из анализа рисунка видно, что уровень собственного шума в представленном спектре полностью определяется шумом анализатора спектра, при этом мощность генерации на частоте 10 ГГц составляет 1.32 дБм. Таким образом, корректная оценка фазового шума с помощью используемого анализатора спектра невозможна, но по крайней мере, фазовый шум сигнала генерации значительно меньше собственного шума анализатора спектра -90 дБн в полосе 100 Гц, что эквивалентно -110 дБн/Гц. Из анализа рисунка также видно, что в полосе анализа 100 Гц дискретные составляющие в спектре имеют уровни -50 дБн и -60 дБн на отстройках от частоты генерации ± 197 кГц and ± 394 кГц соответственно. Следует отметить, что введением дополнительных корректирующих ВОЛЗ в контур ОЭГ можно добиться значительного снижения уровня дискретных составляющих в спектре. На рис. 5 приведен результат моделирования фазового шума ОЭГ с/без дополнительных корректирующих ВОЛЗ, из анализа которого видно, что уровень дискретных составляющих в спектре может

быть снижен на 29 дБ, при этом фазовый шум на отстройке 10 кГц от частоты генерации 10 ГГц не изменяется и составляет – 140 дБн/Гц.

В работе исследован оптоэлектронный генератор на линиях задержки с оптическим усилением. Установлено, что во всем изученном экспериментально диапазоне коэффициентов петлевого усиления в режиме малых сигналов от 0 до 1.8 имеет место монотонное увеличение амплитуды генерации, а на протяжении одного часа выходная мощность изменяется не более чем на ± 0.02 дБ, что свидетельствует об отсутствии динамических нестабильностей. Показано, что фазовый шум сигнала генерации по крайней мере значительно меньше собственного шума анализатора спектра –110 дБн/Гц (теоретическая оценка – минус 140 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от частоты генерации 10 ГГц). Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования с помощью нелинейной нестационарной модели.

Библиографический список

1. 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.
2. A. Hati, C. Nelson, D. Howe, Vibration-induced PM noise in oscillators and its suppression, in Aerial Vehicles, Thanh Mung Lam, Ed. Vienna: In-Tech, pp. 259–286, 2009
3. K. Mikitchuk, A. Chizh and S. Malyshev Theoretical investigation of external influences on delay-line optoelectronic oscillator, Proc. of Microwave photonics conf., pp. 1–4, Oct. 26 – 29, 2015.
4. P. S. Devgan, V. J. Urick, J. F. Diehl, and K. J. Williams, Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photonic gain, J. of Lightwave Technol., vol. 27, no. 15, pp.3189–3193, 2009.
5. E. Salik, N. Yu, and L. Maleki, An ultralow phase noise coupled optoelectronic oscillator, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, no. 6, pp. 444–446, Mar. 2007.
6. K. Mikitchuk, A. Chizh and S. Malyshev Analog optical link operating at the gain peak wavelength of an erbium-doped fiber amplifier, Proc. of European microwave conf., pp. 1–4, Oct. 6 – 9, 2014.
7. A. Chizh, S. Malyshev and K. Mikitchuk, High-Speed high-power InAlAs/InGaAs/InP Schottky photodiode, Proc. of Microwave photonics conf., pp. 1–4, Oct. 26 – 29, 2015.
8. O. Okusaga, J. Cahill, J. Cahill, W. Zhou, A. Docherty, G.M. Carter and C. Menyuk Optical scattering induced noise in RF-photonic systems, Proc. of Frequency control symp., pp. 1–6, May 2–5, 2011.
9. K. Mikitchuk, A. Chizh and S. Malyshev Numerical nonlinear time-varying model of delay-line optoelectronic oscillator, Proc. of Numerical electromagnetic modelling and optimization, pp. 1–4, May 14 – 16, 2014.
10. К.Б. Микитчук, С.А. Малышев, А.Л. Чиж Численная модель волоконно-оптического оптоэлектронного генератора СВЧ с полностью оптическим усилением. Прилож. к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі «Молодежь в науке – 2013». – 2014. – Ч. 2. – С. 46 – 51.
11. D.A. Atlas, R. Pidgeon, and F. Little Rayleigh backscatterer effects on 1550-nm CATV distribution systems employing optical amplifiers, J. of Lightwave Technol., vol. 13, no. 5, pp. 933–946, 1995.
12. Y. K. Chembo, L. Larger, R. Bendoula, and P. Colet “Effects of gain and bandwidth on the multimode behavior of optoelectronic microwave oscillators, Opt. express, vol. 16, no. 12, pp.9067–9072, 2008.
13. К.Б. Микитчук, С.А. Малышев, А.Л. Чиж Стационарная генерация в оптоэлектронном генераторе СВЧ с оптическим усилением. Прилож. к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі «Молодежь в науке – 2014». – 2015. – Ч. 3. – С. 89 – 95.
14. К.Б. Микитчук, С.А. Малышев, А.Л. Чиж Режим одночастотной генерации в оптоэлектронном генераторе СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением. Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі серіі Фізіка-матэматычныя навукі. – 2015. –№ 3. – С. 111 – 118.