# УДК 621.373.1

А.С. Задорин, А.А. Лукина

# Исследование моделей подавления паразитных мод оптоэлектронного СВЧ-автогенератора на основе инжекционной и многоконтурной схем

Рассмотрены возможности повышения спектральной чистоты излучения оптоэлектронных автогенераторов СВЧ-диапазона на основе оптоволоконной линии задержки за счет применения синхронизацией мод на основе инжекционной и многоконтурной схем.

Ключевые слова: оптоэлектронный СВЧ-автогенератор, фазовый шум, программная модель, оптоволоконная линия задержки.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-4-81-84

Известно, что чувствительность, скорость передачи информации, габариты и энергопотребление радиолокационных и измерительных радиотехнических систем во многом зависят от уровня спектральной чистоты и частотной стабильности сигналов, формируемых задающими системными автогенераторами (АГ). Фундаментальные ограничения названных характеристик связаны со стохастическими флуктуациями токов и напряжений, обусловленными тепловым, дробовым и фликкер-шумами в полупроводниковых элементах АГ [1, 2]. Для количественной оценки спектральной чистоты сигнала АГ используется оценка L(f) его спектральной плотности мощности в одиночной боковой полосе для заданной отстройки на величину  $f_m$  от несущей частоты  $f_0$  АГ в одиночной боковой полосе, пересчитанная в полосу 1 Гц. Снижение величины L(f) АГ обычно обеспечивается за счет тщательной частотной селекции сигнала, циркулирующего в петле обратной связи АГ. Эффективность такой селекции, как известно, определяется добротностью Q резонатора АГ, пропорциональной крутизне его фазочастотной характеристики (ФЧХ). Классическая теория влияния шумов и величины Q на динамику нелинейных систем, в том числе и АГ, показывает, что при наличии шумов в спектре L(f) можно выделить составляющие, описывающие амплитудные (АШ) и фазовые (ФШ) шумовые флуктуации [1, 2].

Известно, что для АГ томсоновского типа вблизи рабочей частоты АГ  $f_0$  линия излучения L(f) АГ определяется, в основном, спектральной плотностью фазовых шумов. В указанной области зависимость амплитудной составляющей шума от отстройки практически отсутствует, и ее уровень образует лишь «шумовой пьедестал» линии L(f). Кроме этого, установлено, что основным способом снижения L(f)при заданном уровне шумовых источников АГ являются увеличение добротности Q накопительного элемента АГ. В диапазоне СВЧ фазовый шум (ФШ) является одним из основных факторов, ограничивающих применение сложных сигналов в радиосвязи, радиолокации и в измерительных системах.

Как показано в [3], значительного повышения добротности резонатора *Q* в сантиметровом диапа-

зоне можно достичь за счет использования в схеме АГ медиаконвертеров, т.е. устройств, обеспечивающих промежуточные преобразования энергии СВЧ-колебаний в энергию световой волны. Эта энергия способна эффективно накаливаться в оптоэлектронных резонаторах «бегущей волны», представляющих собой оптоволоконные (OB) линии задержки на время т<sub>d</sub>:

$$\tau_d = nl/c, \tag{1}$$

где *n* – групповой показатель преломления и длина OB, *c* – скорость света в вакууме.

Такие резонаторы используются для построения оптоэлектронных генераторов (ОЭГ), рис. 1 [3–5]. Их эквивалентная добротность  $Q_{rf}$  на несущей частоте  $f_{rf}$  определяется формулой [6]

$$Q_{rf} = Q_{opt} \cdot \frac{f_{rf}}{f_{opt}} \,. \tag{2}$$

Здесь  $Q_{opt}$  – добротность OB-резонатора на оптической частоте  $f_{opt}$ 

$$Q_{opt} = 2\pi f_{opt} \tau_d$$

Передающий



Оценка  $Q_{rf}$  по формуле (2) для  $l \sim 4$  км дает значение ~10<sup>6</sup>. Столь высокая добротность OB-резонатора обеспечивает низкий уровень фазовых шумов ОЭГ. При отстройке от несущей  $f \sim 10$  кГц,  $L(f) \sim -150$  дБ/Гц [3–5].

Недостатком указанного резонатора является большая плотность резонансных частот, характери-

зуемая величиной межмодового частотного интервала  $\Delta f$ , обратно пропорционального добротности Q [6]:

$$\Delta f = 1/\tau_d . \tag{3}$$

Из приведенных формул видно, что для ОЭГ, работающего на частоте 10 ГГц при  $l \sim 4$  км, межмодовый интервал резонатора  $\Delta f$  составляет ~50 кГц. Проблемой, таким образом, является подавление паразитных мод, близко расположенных к частоте генерации ОЭГ.

### Способы подавления паразитных мод ОЭГ

Одним из способов подавления паразитных мод является использование конкуренции мод в нелинейной среде ОЭГ.

При этом резонансная система образуется из нескольких отрезков ОВ различной длины [5, 7]. На рис. 2 показана одна из таких схем.



Рис. 2. Структурная схема двухконтурного ОЭГ

Длины OB на рис. 2 подобраны так, чтобы в пределах полосы пропускания полосно-пропускающего фильтра только одна резонансная мода является общей для обоих контуров ОЭГ. Этот тип колебаний и должен превалировать над остальными модами.

Альтернативой схеме рис. 1 является представленная на рис. 3 схема ОЭГ с инжекционной синхронизацией (ИС) мод [5, 8]. Данная схема объединяет нелинейную среду двух ОЭГ – ведущего (Master loop) и ведомого (Slave loop). Механизм этой связи основан на инжекции через направленные ответвители (НО) части генерируемой в петлях обратной связи генераторов СВЧ-мощности в контур соседнего генератора. Работа данной схемы также основана на конкуренции мод двух генераторов. Здесь, как и в схеме по рис. 2, конкурентное преимущество имеют моды с близкими частотами. Взаимодействие этих мод в нелинейной среде приводит к фазовой синхронизации основных и подавлению паразитных мод.

Целью данного сообщения является обсуждение результатов исследования на основе компьютерного моделирования эффектов синхронизации и подавления мод в схемах ОЭГ на рис. 2, 3.

# Симуляционная модель ОЭГ

Строгое аналитическое описание работы таких принципиально нелинейных систем, как автогенераторы, как известно, возможно лишь при большом числе упрощающих допущений [1, 2]. Поэтому для разработки модели ОЭГ мы использовали компью-

терное моделирование. Соответствующая программная модель, использованная нами для компьютерной симуляции схем ОЭГ (рис. 1-3), была написана в среде Matlab/Simulink. В качестве прототипа программы использовались разработки авторов [9, 10]. Блок-схема программы соответствовала схемам рис. 1-3. При этом блоки указанных схем дополнялись шумовыми источниками, относительным шумом интенсивности лазеров (Related Intensity Noise), тепловыми, дробовыми и фликкер-шумами усилителей, а также пассивных элементов схемы. Единственным нелинейным элементом в контурах самовозбуждения ОЭГ считались электрооптические модуляторы, связывающие оптическую мощность I<sub>0</sub> на входном и выходном I(t) портах ЭОМ с управляющим напряжением  $V_{in}$  соотношением [3],

$$I(t) = \frac{\alpha I_0}{z} \left\{ 1 - \eta * \left( \sin \pi \left[ V_{\text{in}} / V_{\pi} + V_B / V_{\pi} \right] \right) \right\}, \qquad (4)$$

где  $\alpha$  – вносимые потери ЭОМ;  $\eta$  – параметр, определяемый коэффициентом затухания модулятора  $(1+\eta)/(1-\eta)$ ;  $V_B$  – напряжение смещения;  $V_{\pi}$  – полуволновое напряжение модулятора.



Рис. 3. Структурная схема ОЭГ с инжекционной синхронизацией мод

При разработке алгоритма вычислений L(f) учитывалось, что отсчет односторонней спектральной плотности мощности фазовых шумов ОЭГ производится от несущей частоты лазерного источника v. В этом случае, пренебрегая фемтосекундным масштабом изменений I(t) и рассматривая оптическое волокно лишь как линию задержки радиочастотного сигнала ОЭГ на  $\tau_d$ , можно считать, что v = 0. Такое приближение позволяет существенно сэкономить технические ресурсы и время моделирования L(f).

Далее при моделировании L(f) схем ОЭГ по рис. 1–3 в качестве полосно-пропускающего фильтра (ППФ) рассматривался фильтр с полосой пропускания ~10 МГц. В соответствии с (1) и (2) для указанного межмодового интервала длина ОВ составит l = 20 м. Компенсация потерь сигнала в пассивных компонентах схем рис. 1–3 и медиаконверторах петли обратной связи ОЭГ обеспечивалась линейными усилителями СВЧ-У с коэффициентом усиления ~50 дБ.

Исследование зависимости L(f) одноконтурного ОЭГ проводилось на длинах задержки ОВ 100 и 750 м. При этом рассчитанная по формуле (2) эквивалентная добротность ОВ-резонатора составляла  $1,58\cdot10^4$  и  $1,138\cdot10^5$  соответственно.

# Фазовые шумы одноконтурного ОЭГ

Результаты расчета односторонней спектральной плотности мощности фазовых шумов L(f) для данного типа ОЭГ и различных длин OB l представлены на рис. 4.



Рис. 4. Односторонняя спектральная плотность мощности фазовых шумов L(f) одноконтурного ОЭГ при  $l = 100 \text{ м} - a; \quad l = 750 \text{ м} - \delta$ 

Сравнительный анализ представленных на рис. 4 данных симуляции L(f) одноконтурных схем ОЭГ подтверждает зависимости (2), (3) эквивалентной добротности и межмодового интервала паразитных мод резонатора  $\Delta f$  от длины волокна *l*.

# Фазовые шумы ОЭГ с инжекционной синхронизацией мод

Как показали авторы [8], взаимодействие колебательных процессов в петлях обратной связи ведущего и ведомого ОЭГ может привести к их синхронизации и подавлению паразитных мод в спектрах рис. 4. На схеме рис. 3 такой обмен энергиями мод в петлях «master» и «slave» обеспечивается направленным ответвителем (HO). Это так называемая инжекционная связь (ИС) контуров ОЭГ [8, 9]. Результат расчета спектров излучения ОЭГ по рис. 1 и 3, а также соответствующего распределения L(f) для схемы ОЭГ-ИС, при длинах ОВ в первом и втором контурах, равных  $l_1 = 75$  м. и  $l_2 = 750$  м соответственно, представлен на рис. 5. Сравнивая данные рис. 4 и 5, видим снижение уровня паразитных мод в схеме ОЭГ-ИС  $\sim$ 10 дБ.



мощности фазовых шумов *L*(*f*) по рис. 3

Заметим далее, что согласно (2) и (3) для длины ОВ  $l_2 = 750$  м оценка эквивалентной добротности колебательной системы ОЭГ будет

$$Q = \pi f_0 \tau = 1,138 \times 10^3$$
.

С другой стороны, аналогичная оценка Q, полученная из спектрограммы рис. 4,  $\delta$  излучения ОЭГ-ИС, равная ~1,22×10<sup>5</sup>, вполне сопоставима с приведенной выше теоретической оценкой.

# Фазовые шумы ОЭГ с многоконтурной синхронизацией мод

Рассмотрим далее результаты расчета L(f) ОЭГ (см. рис. 2) с двумя резонансными контурами, изготовленными из ОВ с длинами  $l_1$ = 83 м и  $l_2$ = 414 м. Расчетный спектр излучения ОЭГ с одиночным ОВ-резонатором приведен на рис. 6. На нем хорошо видны паразитные эквидистантно расположенные моды. Значение межмодового интервала соответствует формуле (3) и равно  $\Delta f \approx 50$  кГц.



Оценку нагруженной добротности Q резонансной системы рассматриваемого генератора можно получить по ширине резонансных пиков спектральных распределений (рис. 6). Эти же данные содержат кривые односторонней спектральной плотности мощности фазовых шумов L(f) на рис. 4–6. Общепринятой здесь является аппроксимация Д. Лисона:

$$L(Q,f) = 10\log\left(\frac{GFkT}{2P}\left(\left(\frac{f_0}{2Q}\right)^2 \frac{f_\alpha}{f^3} + \left(\frac{f_0}{2Q}\right)^2 \frac{1}{f^2} + \frac{f_\alpha}{f} + 1\right)\right),\tag{5}$$

где  $f_0$  – центральная частота; G – коэффициент усиления активного прибора; F – коэффициент шума активного прибора; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; P – номинальная мощность, подводимая к резонатору;  $f_{\alpha}$  – верхняя граница фликкер-шумов.

Из (5) следует, что в зависимости L(f) можно выделить несколько характерных областей, в которых кривая L(f) аппроксимируется спадающими с частотой линиями, характеризующимися наклоном соответственно –30, –20, –10 и 0 децибел на декаду. Из (5) можно видеть, что пересечение первых двух прямых наблюдается на частоте  $f_{\alpha}$ , а второй и третьей – на частоте  $f_0/2Q$ . Указанные соотношения дают возможность оценки границы фликкер-шумов ОЭГ, а также нагруженной добротности Q его резонатора по экспериментальной кривой L(f). Так, например, из графика рис. 6 следует, что  $f_{\alpha}=2,1\cdot10^4$  Гц, а величина  $f_0/2Q = 1,7\cdot10^5$  Гц. Отсюда для  $f_0=10\cdot10^9$  Гц получим  $Q = 2,94\cdot10^4$ .

С другой стороны, расчетное значение нагруженной добротности двухконтурного ОЭГ определяется как среднее арифметическое добротностей обоих контуров [5, 7]. Для данных рис. 6, воспользовавшись (2), получим оценку  $Q=3,7\cdot10^4$ , близкую к сделанной выше.

### Заключение

Представленные выше результаты расчетных экспериментов показали адекватность разработанных программных моделей, а также эффективность подавления паразитных мод в оптоэлектронных СВЧ-автогенераторах с помощью инжекционной и многоконтурной схем.

При этом лучшие результаты показывает инжекционная схема ОЭГ. В соответствии с (2) здесь, по сравнению с двухконтурным генератором рис. 2, обеспечивается выигрыш  $\zeta$  в нагруженной добротности оптоволоконного резонатора, равный

$$\zeta = 2l_{\max} / (l_{\min} + l_{\max}), \qquad (6)$$

где  $l_{\min}$  и  $l_{\max}$  – длины волокон OB<sub>1</sub> и OB<sub>2</sub> в контурах схем рис. 2, 3.

Отсюда следует, что максимум  $\zeta \rightarrow 2$  достигается при большом различии в длинах волокон.

### Литература

1. Rubiola E. The Leeson Effect: Phase Noise in Feedback Oscillators //2006 IEEE International Frequency Control Symposium Tutorial. – Dept. LPMO FEMTO ST Institute. – Besançon, France. – June 2006 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ieee-uffc.org/frequency-control/ learning/pdf/Rubiola.pdf (дата обращения: 02.12.2016).

2. Анищенко В.С. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций / В.С. Анищенко, В.В. Астахов, Т.Е. Вадивасова. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 312 с.

3. Yao X.S. Optoelectronic oscillator for photonic systems / X.S. Yao, L. Maleki // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1996. – Vol. 32, No. 7. – PP. 1141–1149

4. Lee T.H. Oscillator phase noise: a tutorial / T.H. Lee, A. Hajimir // IEEE J. Solid State Circuits. – Mar. 2000.– Vol. 35, No. 3. – PP. 326–336.

5. Борцов А.А. Оптоэлектронный генератор радиочастотного диапазона с накачкой квантоворазмерным лазерным диодом: дис. ... д-ра техн.-наук. – М., 2014. – 402 с.

6. Царапкин Д.П. Методы генерирования СВЧ-колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов: дис. ... д-ра техн- наук. – М., 2004. – 413 с.

7. Yao X.S. Ultra-low phase noise dual-loop optoelectronic oscillator / X.S. Yao, L. Maleki // In Technical Digest of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit (OFC '98). – San Jose: CA. – Feb. 1998. – PP. 353–354.

8. Zhou W. Injection-locked dual opto-electronic oscillator with ultra-low phase noise and ultra-low spurious level / W. Zhou, G. Blasche // IEEE Trans Microw: Theory Tech. – Mar. 2005. – Vol. 53. – PP. 929–933.

9. Levy E.C. Modeling optoelectronic oscillators / E.C. Levy, M. Horowitz, C.R. Menyuk // JOSA B. – 2009. – Vol. 26, №1. – PP. 148–158.

10. Comprehensive computational model of single– and dual loop optoelectronic oscillators with experimental verification / E.C. Levy, O. Okusaga, M. Horowitz, C.R. Menyuk, W. Zhou, G.M. Carter // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18. – PP. 21461–21476.

11. Zhou W. Injection-Locked Dual Opto-Electronic Oscillator with Ultra-Low Phase Noise and Ultra-Low Spurious Level / W. Zhou, G. Blasche // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – March 2005. – Vol. 53, No. 3. – PP. 929–933

#### Задорин Анатолий Семенович

Д-р физ.-мат. наук, зав. каф. радиоэлектроники и защиты информации (РЗИ) ТУСУРа Тел.: +7-913-820-65-43 Эл. почта: Anatoly.Zadorin@rzi.tusur.ru

# Лукина Анна Андреевна

Аспирант каф. РЗИ Тел.: +7-913-828-67-31 Эл. почта: anna-angel1987@mail.ru

### Zadorin A.S., Lukina A.A. Investigation of the models for spurious modes suppression in optoelectronic microwave oscillator based on

injection-locking and multi-loop schemes

The possibilities for spectral purity enhancement of optoelectronic microwave oscillators with a fiber-optic delay line by applying injection-locking and multi-loop schemes have been considered.

**Keywords:** optoelectronic microwave oscillator, phase noise, programming model, fiber-optic delay line.