

# Экспериментальное исследование фазового шума перестраиваемого спин-волнового радиофотонного генератора

А.Б.Устинов<sup>1</sup>, А.В.Кондрашов<sup>1</sup>, А.А.Никитин<sup>1</sup>, В.В.Лебедев<sup>2</sup>, А.В.Шамрай<sup>2</sup>, Б.А.Калиникос<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

**Аннотация:** в работе экспериментально измерены спектры фазового шума спин-волнового радиофотонного генератора для разных длин оптического волокна. Результаты показывают, что увеличение длины волокна с 200 м до 4 км уменьшает фазовый шум, стремящийся к предельному значению около -146.5 дБн/Гц на отстройке 10 кГц относительно частоты генерации 10 ГГц.

**Ключевые слова:** радиофотоника, оптоэлектронный генератор, спин-волновой фильтр, железо-иттриевый гранат

## 1. Введение

Разработка радиолокационных и телекоммуникационных систем с улучшенными характеристиками требует использования источников сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала с низким значением фазового шума. Фотонные методы генерации СВЧ-сигнала обеспечили прорыв на пути к снижению фазового шума. Это связано с чрезвычайно высокой добротностью оптических компонентов, таких как резонаторы с модами шепчущей галереи [1] и оптоволоконные линии задержки [2].

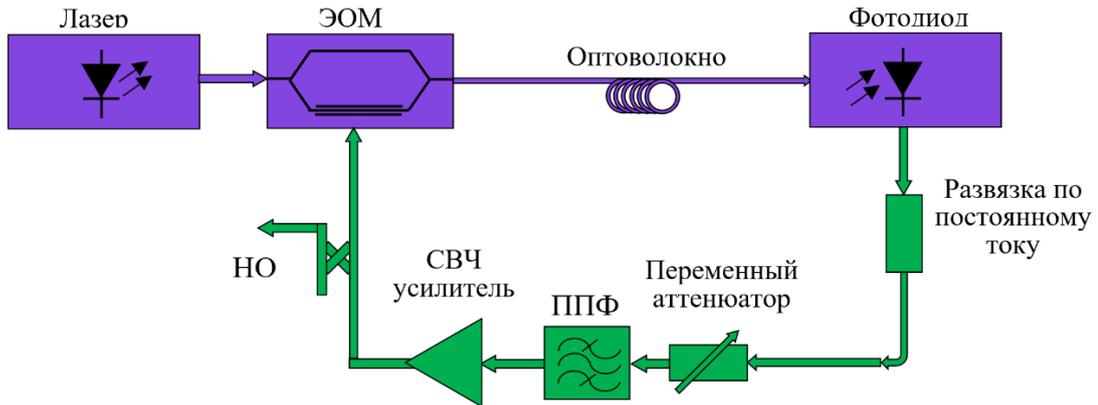
Одним из перспективных устройств для генерации СВЧ-сигналов является оптоэлектронный генератор [2-4]. Такие генераторы обычно имеют кольцевую схему, состоящую из сверхвысокочастотного и оптического трактов. Спектр собственных мод кольцевых генераторов состоит из серии спектральных линий. Перестраиваемые фильтры могут использоваться для управления частотой генерируемого сигнала. Для получения широкого диапазона частотной перестройки ранее обычно использовались ферритовые СВЧ фильтры на сферах железо-иттриевого граната (ЖИГ) [5,6]. Важно отметить, что принцип действия таких фильтров основан на явлении ферромагнитного резонанса. Недавно мы предложили использовать узкополосную СВЧ спин-волновую линию задержки на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ в качестве частотно-избирательного перестраиваемого элемента, то есть в качестве спин-волнового полосового фильтра [7, 8].

Хорошо известно, что увеличение длины оптического волокна уменьшает фазовый шум оптоэлектронных генераторов (см., например, [2, 8]). В то же время наименьшее значение фазового шума зависит от параметров многих других электронных и оптических компонентов генератора. Поэтому значения фазового шума, полученные в разных работах, варьируются от -80 дБн / Гц до -150 дБн / Гц на отстройке 10 кГц. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование фазового шума спин-волнового радиофотонного генератора.

## 2. Экспериментальный макет и экспериментальные результаты

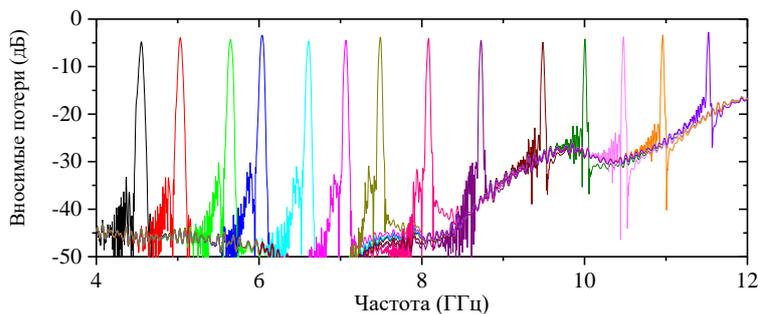
Блок-схема генератора показана на рисунке 1. Основными компонентами генератора являются лазерный диод, электрооптический модулятор (ЭОМ) типа Маха-Цендера, оптоволокно, фотоприемник, блок отсечки постоянного тока, СВЧ

усилитель, вентиль, переменный аттенуатор, спин-волновой полосно-пропускающий фильтр (ППФ) и направленный ответвитель. Коаксиальные кабели соединяют компоненты микроволнового тракта. Длина волны оптического излучения лазера составляла 1.55 мкм. Его мощность составляла 90 мВт. Электрооптический модулятор был изготовлен на основе ниобата лития [9–10]. Он имел ширину полосы модуляции 1–12 ГГц и полуволновое напряжение 3.3 В. Модулятор был смещен к квадратуре, чтобы обеспечить максимальную передачу волоконно-оптической линии задержки [9]. Верхняя рабочая частота фотоприемника составляла 25 ГГц. Полоса пропускания усилителя составляла 6-18 ГГц.



**Рисунок 1.** Блок-схема спин-волнового радиофотонного генератора.

Спин-волновой фильтр был выполнен в виде линии задержки на эпитаксиальной пленке ЖИГ. В фильтре использовалась пленка шириной 2 мм и толщиной 13.6 мкм. Микрополосковые антенны использовались для возбуждения и приема спиновых волн. Расстояние между антеннами составляло 3 мм. Пленка намагничивалась пространственно однородным магнитным полем смещения, направленным в плоскости пленки и перпендикулярно распространению спиновой волны. Такая геометрия обеспечивает условия для возбуждения поверхностных магнитоэлектронных спиновых волн [11]. Магнитное поле варьировалось для того, чтобы обеспечить перестройку полосы пропускания фильтра, как показано на рисунке 2.

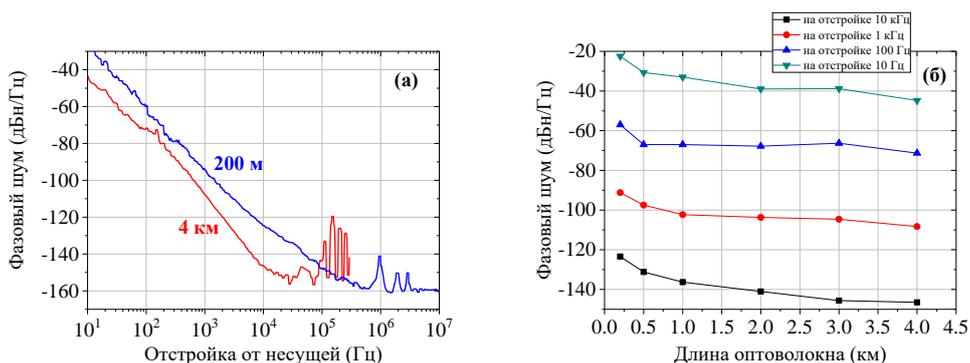


**Рисунок 2.** Амплитудно-частотная характеристика перестраиваемого спин-волнового фильтра, изготовленного на основе пленки ЖИГ толщиной 13.6 мкм с намагниченностью насыщения  $4\pi M_s = 1750$  Гс. Разные характеристики соответствуют различным полям подмагничивания.

Принцип работы генератора заключается в следующем. Лазер излучает непрерывное оптическое излучение, которое используется в качестве несущего сигнала. Электрооптический модулятор модулирует оптическое излучение СВЧ сигналом, приходящим из СВЧ тракта. Модулированный оптический сигнал

распространяется через оптическое волокно. Фотодетектор демодулирует оптический сигнал и передает его огибающую в СВЧ тракт. Блок отсечки постоянного тока убирает постоянную составляющую у выходного фототока. Полученный СВЧ сигнал подается на вход микрополосковой антенны и возбуждает спиновую волну в пленке ЖИГ. Спиновая волна распространяется в соответствии с ее дисперсией. Сигнал с выхода спин-волнового фильтра усиливается СВЧ-усилителем и подается на управляющий порт электрооптического модулятора, замыкая кольцевую цепь. Малощумящий СВЧ усилитель компенсирует общие потери распространения СВЧ-сигнала в кольце. Переменный аттенуатор используется для контроля этих потерь. Небольшая часть сгенерированного СВЧ сигнала извлекается из кольца направленным ответвителем для контроля фазового шума. Такой контроль проводился с помощью анализатора фазового шума Rohde & Schwarz FSWP26.

Измерения спектров фазового шума проводились для оптических волокон различной длины от 200 м до 4 км. Мы использовали коммерческое оптоволокно SMF с диаметром сердцевины 8 мкм. Предварительные измерения потерь СВЧ сигнала в оптическом тракте показали, что от управляющего входа оптического модулятора до выхода фотодетектора потери составляют примерно 19 дБ в диапазоне частот до 12 ГГц. Тестовые измерения СВЧ усилителя показали в точке компрессии 1 дБ выходную мощность 30 дБм и усиление 34 дБ. Эти значения были почти постоянными в номинальном диапазоне частот 6-12 ГГц. Спин-волновой фильтр обеспечивал в этом диапазоне вносимые потери от 2.5 до 5 дБ.



**Рисунок 3.** Спектры фазового шума оптоэлектронного генератора с различной длиной оптических волокон (а), фазовый шум генератора как функция длины оптического волокна (б).

На рисунке 3 (а) показаны сплошной линией типичные спектры фазового шума, измеренные при 10 ГГц для длин волокна  $L$  равных 200 м и 4 км. Результаты показывают, что минимальные значения фазового шума на отстройке 10 кГц от несущей составляли около -146.5 дБн/Гц для  $L = 4$  км и -123.5 дБн/Гц для  $L = 200$  м. На рисунке 3 (б) показаны сводные данные о фазовом шуме, измеренном для разных значений  $L$ . Видно, что увеличение длины волокна с 200 м до 4 км уменьшает фазовый шум, который стремится к предельному значению около -146.5 дБн/Гц на отстройке 10 кГц. Характеристика фазового шума демонстрирует боковые спектральные линии, соответствующие соседним модам генератора. Аналогичные значения фазового шума были получены в диапазоне перестройки частоты генерации 6-12 ГГц.

### 3. Заключение

В заключение отметим, что в работе был получен низкий фазовый шум -146,5 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей 10 ГГц. При перестройке частоты генерации в диапазоне 6-12 ГГц фазовый шум практически не менялся. Достигнуто очевидное улучшение значений фазового шума спин-волнового радиофотонного генератора по

сравнению с [7, 8]. Наши результаты подтверждают также, что фазовый шум остается низким в широком диапазоне частот. Генератор может найти широкое применение в радиолокационных и телекоммуникационных системах.

Авторы работы выражают благодарность АО «Центр ВОСПИ» за предоставленные оптоволоконные линии задержки, а также НИИ «ПОЛЮС» за предоставленные фотодетекторы.

Работы, проведенные в СПбГЭТУ, выполнены при поддержке **госзадания Минобрнауки РФ**.

#### Список литературы

1. Liang W. et al. High spectral purity Kerr frequency comb radio frequency photonic oscillator //Nature communications. – 2015. – Т. 6. – С. 7957.
2. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator //JOSA B. – 1996. – Т. 13. – №. 8. – С. 1725-1735.
3. Belkin M. E. et al. Tunable RF-band optoelectronic oscillator and optoelectronic computer-aided design model for its simulation //Microwave and Optical Technology Letters. – 2011. – Т. 53. – №. 11. – С. 2474-2477.
4. Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. Modeling and design of delay-line optoelectronic oscillators //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2016. – Т. 52. – №. 10. – С. 1-8.
5. Eliyahu D., Maleki L. Low phase noise and spurious level in multi-loop opto-electronic oscillators //IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003. – IEEE, 2003. – С. 405-410.
6. Zhu D., Pan S., Ben D. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator //IEEE Photonics Technology Letters. – 2012. – Т. 24. – №. 3. – С. 194-196.
7. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically tunable microwave spin-wave photonic oscillator //IEEE Magnetics Letters. – 2015. – Т. 6. – С. 1-4.
8. Ustinov A. B. et al. A Low Phase Noise Tunable Microwave Spin Wave Optoelectronic Oscillator //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1038. – №. 1. – С. 012033.
9. Petrov A. N. et al. An increase in the transmission efficiency of an RF fiber-optic line using the working point of an external modulator //Technical Physics. – 2015. – Т. 60. – №. 5. – С. 761-766.
10. Tronev A. et al. High extinction ratio integrated optical modulator for quantum telecommunication systems //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 951. – №. 1. – С. 012002.
11. Калиникос Б.А., Устинов А.Б. Баруздин С.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. Монография / Под ред. В.Н. Ушакова. - М.: Радиотехника, 2013.