

УДК 621.396.96

А. В. Дроздовский, А. Б. Устинов, Б. А. Калиникос  
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Спектр фазовых шумов генератора, управляемого спин-волновой линией задержки<sup>1</sup>

*Экспериментально и теоретически исследован генератор на основе активного кольца, содержащего спин-волновую линию задержки. Экспериментально полученные значения уровня фазового шума, измеренные на частоте 5390 МГц, составили около 105 дБн/Гц при отстройке 10 кГц. Продемонстрирован способ управления уровнем фазовых шумов генерируемого сигнала за счет подбора расстояния между возбуждающими и приемными элементами спин-волновой линии задержки.*

### Спиновые волны, генерация сигнала, фазовый шум

Возможность использования активных колец, содержащих спин-волновые линии задержки (СВ ЛЗ) на основе пленок железиттриевого граната (ЖИГ) для генерации СВЧ-сигналов различных типов была продемонстрирована уже неоднократно. При этом возможна генерация монохроматических сигналов [1]–[3], периодической последовательности импульсов, в частности солитонов [4]–[8] и хаотических сигналов [9]–[13] с непосредственной перестройкой несущей магнитным полем. Теоретически уровень фазовых шумов генератора на основе СВ ЛЗ уменьшается при увеличении времени задержки сигнала или, иными словами, при увеличении крутизны фазочастотной характеристики СВ ЛЗ. Таким образом, теоретически возможно получить значения уровня фазового шума более низкие, чем для генераторов на основе резонаторов. Данный факт делает генераторы на основе СВ ЛЗ привлекательными с точки зрения их применения в устройствах радиоэлектроники.

В настоящей статье описано исследование влияния времени задержки сигнала внутри СВ ЛЗ на спектр фазовых шумов спин-волнового генератора.

Экспериментальное исследование проведено на макете генератора, блок-схема которого представлена на рис. 1. Для возбуждения и приема спиновых волн (СВ) был использован макет СВ ЛЗ с двухэлементными антеннами типа меандр 1 (рис. 1). Ширина антенн и расстояние между элементами антенн составляли 50 и 260 мкм соответственно. Расстояние между возбуждающей и приемной антеннами  $d$  варьировалось в диапазоне от 4 до 19 мм. Сверху на микрополосковые антенны накладывался волновод спиновых волн 2,

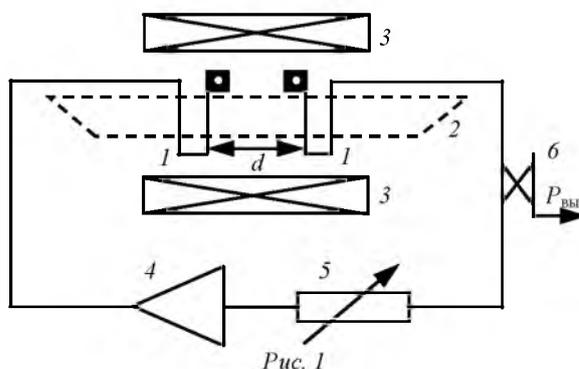


Рис. 1

изготовленный из эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний-галлиевого гранта монокристаллической пленки ЖИГ с толщиной 13 мкм и намагниченностью насыщения 1950 Гс. Полуширина кривой ферромагнитного резонанса  $\Delta H$ , измеренная на частоте 5.3 ГГц, составляла 0.5 Э. Пленка имела свободные поверхностные спины. Чтобы избежать отражения СВ от концов волновода 2, они были сточены под острыми углами. Экспериментальный макет размещался между полюсами электромагнита 3 в однородном постоянном магнитном поле  $H$ , направленном в плоскости пленки вдоль антенн спиновых волн. Описанная конфигурация соответствовала случаю распространения поверхностных СВ в пленке феррита.

Для усиления сигнала использовался усилитель 4 mini-circuits ZX60-8008E-S+. Суммарная длина линии обратной связи составляла порядка 1 м. Аттенюатор 5 в схеме использовался для управления режимом генерации кольца. Сгенерированный кольцом сигнал выводился через направленный ответвитель 6. Для измерения

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом российского научного фонда № 14-12-01296.

спектра и фазовых шумов сигнал с выхода генератора  $P_{\text{вых}}$  подавался на анализатор спектра "Rohde&Schwarz" FSUP26 с опцией измерения фазовых шумов. Подчеркнем, что время задержки сигнала  $\tau_d$  в кольце соответствует времени, которое затрачивает сигнал на совершение одного круга внутри кольца. Для описанного экспериментального макета данное время определяется временем задержки сигнала внутри СВ ЛЗ и задержки сигнала в линии обратной связи.

Рассмотрим основные факторы, определяющие спектр фазовых шумов в описанном генераторе. Спектральная плотность мощности фазового шума в одиночной боковой полосе описанной генераторной системы с учетом теплового шума определяется [14] как

$$L(f_m) = 10 \lg \left\{ \frac{GFkT}{2P} \left[ \frac{1}{4\pi^2 \tau_d^2} \left( \frac{f_a}{f_m^3} + \frac{1}{f_m^2} \right) + \frac{f_a}{f_m} + 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $f_m$  – частота отстройки от частоты генерируемого сигнала;  $G$  – коэффициент усиления усилителя;  $F$  – коэффициент шума усилителя;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $P$  – мощность сигнала;  $f_a$  – частота отстройки, на которой возникает фликер-шум активного элемента (усилителя). Множитель  $GFkT$  фактически определяет порог тепловых шумов генерируемого сигнала и теоретически может быть уменьшен за счет уменьшения необходимого коэффициента усиления и коэффициента шума усилителя [15].

Из (1) следует, что теоретически минимально возможный уровень фазовых шумов генерируемого в такой системе сигнала определяется временем задержки сигнала внутри активного кольца, тепловым шумом устройства и частотой возникновения фликер-шума активного элемента. Теоретически время задержки может принимать любые значения, в отличие от добротности резонатора, поэтому такой генератор оказывается выгоднее генератора, содержащего резонатор в качестве частотозадающего элемента.

Для начала генерации сигнала в активном кольце, подобном описанному, необходимо одновременное выполнение двух условий: условия компенсации потерь в активном кольце усилителем

$$G \geq \exp(\omega_T \tau_d) + M$$

и условия фазового синхронизма

$$\varphi_e(\omega) + \varphi_{\text{sw}}(\omega) = 2\pi n,$$

где  $\omega_T$  – декремент затухания спиновых волн;  $M$  – суммарные потери на прием/возбуждение спиновых волн;  $\varphi_e$  – фазовый набег в линии обратной связи;  $\varphi_{\text{sw}}$  – фазовый набег в СВ ЛЗ;  $n$  – целое число.

При помощи аттенуатора 5 экспериментальный макет (рис. 1) переводился в режим монохроматической генерации сигнала так, чтобы значение  $G$  было минимально возможным для начала устойчивой генерации. Пример передаточной характеристики экспериментального макета СВ ЛЗ для  $d = 10$  мм представлен на рис. 2. Стрелкой отмечена частота начала генерации.

Время задержки сигнала внутри активного кольца в основном определялось временем задержки внутри СВ ЛЗ. С учетом этого можно записать  $\tau_d = d/v_{\text{gr}}(\omega)$ , где  $v_{\text{gr}}(\omega)$  – групповая скорость спиновых волн на частоте генерации сигнала. Времена задержки сигнала  $\tau_d$  для экспериментально использованных значений  $d = 1.5, 10, 19$  мм составили 25, 120 и 243 нс соответственно.

Примеры экспериментальных (сплошные линии) и теоретических (штриховые линии) спектров фазовых шумов для различных времен задержки представлены на рис. 3. Теоретические (штриховая линия) и экспериментальные (точки) значения фазовых шумов  $L'$  для различных значений  $d$  при отстройке  $f_m = 10$  кГц показаны на рис. 4.

Заметно, что увеличение  $d$  приводит к уменьшению уровня спектра фазовых шумов. Например, при увеличении  $d$  от 1.5 до 19 мм, фазовый шум при отстройке 10 кГц уменьшается с  $-93$  до  $-106$  дБн/Гц. Из результатов сопоставления фазовых шумов при отстройке 10 кГц видно качественное и количественное совпадение теоретической и экспериментальной зависимостей.

Таким образом, описанное исследование демонстрирует возможность применения активного кольца, содержащего СВ ЛЗ в качестве основы перестраиваемого малошумящего генератора моно-

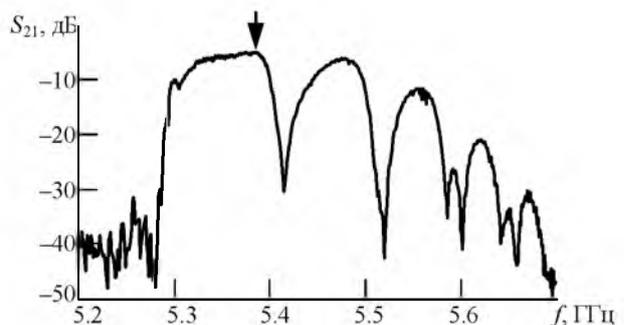


Рис. 2

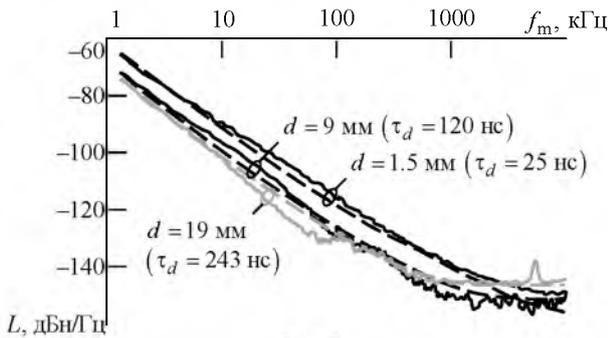


Рис. 3

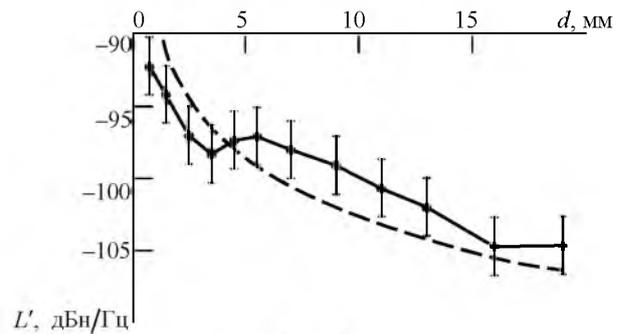


Рис. 4

хроматического СВЧ-сигнала. При этом спектром фазовых шумов генератора можно эффективно уп-

равлять подбором расстояния между возбуждающими приемными антеннами спиновых волн.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pozar D. M. Microwave engineering. New York: John Wiley & Sons, 2009. 758 p.
2. <http://www.microlambdawireless.com/YIG-oscillator> (дата обращения: 17.11.2015).
3. Henaff J. Application of SAW-Oscillators to Digital Communications // 1979 Ultrasonics Symposium (IEEE). New Orleans, 26–28 Sept. 1979. P. 855–860. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=Henaff%20J.%20Application%20of%20SAW-Oscillators%20to%20Digital%20Communications>
4. 2 GHz surface transverse wave oscillator with low phase noise / L. Eichinger, B. Fleischmann, P. Russer, R. A. Weigel // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1988. Vol. MTT-36, iss. 12. P. 1677–1684.
5. AlGaIn/GaN-based SAW delay-line oscillators / J. Grajal, F. Calle, J. Pedrós et al. // Microwave and Optical Technology Letters. 2008. Vol. 50, iss. 11. P. 2967–2970.
6. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic oscillator for photonic systems // IEEE J. of Quantum Electronics. 1996. Vol. 32, iss. 7. P. 1141–1149.
7. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature Photonics. 2007. Vol. 1, № 6. P. 319–330.
8. Stancil D. D., Prabhakar A. Spin waves: Theory and applications. New York: Springer, 2009. 530 p.
9. Castera J. P. Tunable magnetostatic surface-wave oscillators // IEEE Trans. on Magnetics. 1978. Vol. M-14, iss. 5. P. 826–828.
10. Adam J., Daniel M. R. The status of magnetostatic devices // IEEE Trans. on Magnetics. 1981. Vol. 17, iss. 6. P. 2951–2956.
11. Ishak W. 4–20 GHz magnetostatic-wave delay-line oscillator // Electronic Letters. 1983. Vol. 19, № 22. P. 930–931.
12. Chen C. L., Mahoney L. J. Tunable magnetostatic-wave oscillator employing a single GaAs MMIC chip // Electronic Letters. 1989. Vol. 25, № 3. P. 196–197.
13. Ishak W. S., Chang K. W. Tunable Microwave Resonators Using Magnetostatic Wave in YIG Films // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1986. Vol. MTT-34, iss. 12. P. 1383–1393.
14. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear Auto-Oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current // IEEE Trans. on Magnetics. 2009. Vol. M-45, iss. 4. P. 1875–1918.
15. Rubiola E. Phase noise and frequency stability in oscillators. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 228 p.

A. V. Drozdovskii, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

### Phase Noise Spectrum of Microwave Active Ring Oscillators Based on Spin-wave Delay Lines

*A phase noise of microwave oscillators having an active ring circuitry with a spin-wave delay line is theoretically and experimentally investigated. The delay line was made with yttrium iron garnet (YIG) film epitaxially grown on gadolinium gallium garnet substrate. Obtained results demonstrate a management of the oscillator phase noise with a variation of the distance between antennas used for excitation and reception of spin waves in the YIG film.*

Spin waves, microwave generation, phase noise

Статья поступила в редакцию 5 октября 2015 г.