

*Дроздовский А.В., Устинов А.Б., Новиков А.И.*  
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический*  
*университет «ЛЭТИ»*

## **Спектр фазовых шумов генераторов на основе спин-волновых линий задержки**

*Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования генератора, управляемого спин-волновой линией задержки. Спин-волновая линия задержки была изготовлена на основе пленки железо-иттриевого граната, выращенной методом жидкофазной эпитаксии. Продемонстрирована возможность управления спектром фазовых шумов генератора за счет изменения расстояния между возбуждающими приемными антеннами спиновых волн.*

**Ключевые слова:** генератор, спиновые волны.

Возможность использования активных колец, содержащих спин-волновые линии задержки для генерации СВЧ сигнала с управляемыми параметрами была уже продемонстрирована неоднократно. При этом возможна генерация монохроматических сигналов [1-3], периодической последовательности импульсов [4-8] и хаотических сигналов [9-13] с непосредственной перестройкой несущей магнитным полем. Теоретически уровень фазовых шумов генератора на основе спин-волновой линии задержки должен уменьшаться при увеличении времени задержки сигнала или, иными словами, при увеличении крутизны фазо-частотной характеристики спин-волновой линии задержки [14]. Физически ясно, что увеличение времени задержки сигнала одновременно ведет к увеличению потерь внутри спин-волновой линии задержки. Для компенсации потерь требуется использовать усилитель с большим коэффициентом усиления –  $G$ , что в свою очередь должно приводить к увеличению уровня фазовых шумов.

Целью данной работы являлось исследование влияния времени задержки сигнала внутри спин-волновой линии задержки на спектр фазовых шумов спин-волнового генератора.

Для экспериментального исследования был собран макет генератора, блок-схема которого представлена на рис.1. Для возбуждения и приема спиновых волн (СВ) был использован макет спин-волновой линии задержки с двухэлементными антеннами типа меандр (1 на рис.1.). Ширина антенн и расстояние между элементами антенн составляли 50 и 260 мкм, соответственно. Расстояние между возбуждающей и приемной антеннами  $d$  можно было варьировать в диапазоне от 4 до 19 мм. Сверху на микрополосковые антенны накладывался волновод спиновых волн – 2, изготовленный из эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний галлиевого гранта монокристаллической пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Пленка ЖИГ имела толщину 13 мкм и намагниченность насыщения 1950 Гс. Полуширина кривой ферромагнитного резонанса  $\Delta H$ , измеренная на частоте 5.3 ГГц, была равна 0.5 Э. Пленка, имела свободные поверхностные спины. Чтобы избежать отражения СВ от концов волновода, они были сточены под острыми углами. Экспериментальный макет был помещен между полюсами электромагнита 3, в однородное постоянное магнитное поле напряженностью 1150 Э. Поле было направлено в плоскости пленки вдоль антенн спиновых волн. Таким образом, данная ситуация соответствовала случаю распространения поверхностных спиновых волн в пленке феррита. Пример

экспериментально полученной передаточной характеристики спин-волновой линии задержки для случая  $d=4$  мм представлен на рис. 2. Стрелкой на графике отмечена область, где исследовалась генерация сигнала в монохроматическом режиме. Для усиления сигнала использовался усилитель 4 mini-circuits ZX60-8080E-S+. Суммарная длина линии обратной связи 5 оставляла порядка одного метра. Аттенюатор 6 в схеме использовался для управления режимом генерации кольца. Вывод генерируемого кольцом сигнала осуществлялся через направленный ответвитель 7. Для измерения спектра и фазовых шумов, сигнал с выхода генератора 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 задержки зависит от времени задержки сигнала внутри спин-волновой линии задержки и от задержки сигнала в линии обратной связи.

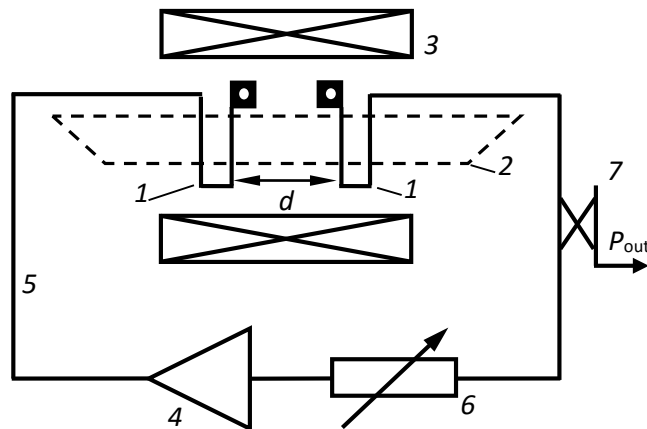


Рисунок 1

Рассмотрим коротко основные факторы, определяющие спектр фазовых шумов в описанном выше генераторе. Формула для спектра фазового шума в одиночной боковой полосе вышеописанной генераторной системы, с учетом теплового шума, может быть записана, как [14]

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

здесь  $f_m$  – частота отстройки от частоты генерируемого сигнала;  $G$  – коэффициент усиления усилителя;  $F$  – коэффициент шума усилителя;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $P$  – мощность сигнала;  $f_0$  – частота генерируемого сигнала;  $\tau_d$  – время задержки СВЧ-сигнала внутри активного кольца;  $f_a$  – частота отстройки, на которой возникает фликер-шум активного элемента (усилителя). Множитель  $GFkT/2P$  – фактически определяет порог тепловых шумов генерируемого сигнала и теоретически может быть уменьшен за счет уменьшения необходимого коэффициента усиления и коэффициента шума усилителя [15]. Из данной формулы следует, что теоретически минимально возможное значение уровня фазовых шумов генерируемого в такой системе сигнала определяется величиной времени задержки сигнала внутри активного кольца, тепловым шумом устройства и частотой возникновения фликер-шума активного элемента. Время задержки сигнала в спин-волновой линии задержки определяется расстоянием между возбуждающей и приемной антеннами, как  $\tau_{d\_dl} = L/V_{gr}(\omega)$ , здесь  $V_{gr}(\omega)$  – групповая скорость спиновых волн на частоте генерации сигнала. Теоретически время задержки может принимать любые значения, в отличие от добротности резонатора, и такой генератор оказывается выгоднее генератора, содержащего резонатор в качестве частото задающего элемента.

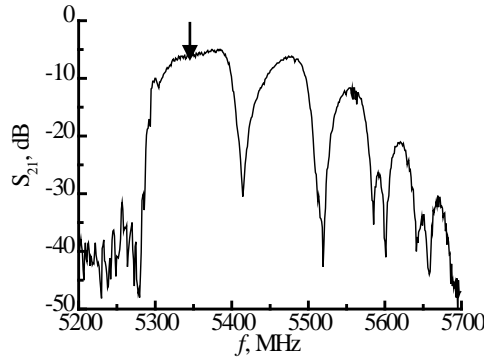


Рисунок 2

Для начала генерации сигнала в подобном активном кольце, описанном выше, необходимо одновременное выполнение двух условий. Условия компенсации потерь в активном кольце усилителем

$$G \geq \exp(\omega_r \tau_d) + M, \quad (2)$$

и условия фазового синхронизма

$$\varphi_e(\omega) + \varphi_{sw}(\omega) = 2\pi n, \quad (3)$$

где  $M$  – суммарные потери на прием/возбуждение спиновых волн,  $\omega_r$  – декремент затухания спиновых волн,  $\varphi_e$  – фазовый набег в линии обратной связи,  $\varphi_{sw}$  – фазовый набег в спин-волновой линии задержки,  $n$  – целое число.

При проведении эксперимента макет, при помощи аттенюатора, переводился в режим монохроматической генерации сигнала, так, чтобы значение  $G$  составляло минимально возможное значение для начала устойчивой генерации. Поскольку фазовый набег внутри линии задержки также зависит от расстояния между приемной и возбуждающей антеннами, то генерация сигнала в активном кольце при различных значениях  $d$  начиналась на различных частотах. Для  $d=10$  мм генерация начиналась на частоте 5390 МГц. Примеры экспериментальных (сплошные линии) и теоретических (пунктирные линии) спектров фазовых шумов для различных времен задержки представлены на рис. 3. Теоретические и экспериментальные значения фазовых шумов для различных значений  $d$ , при отстройке 10 кГц, представлены на рис. 4.

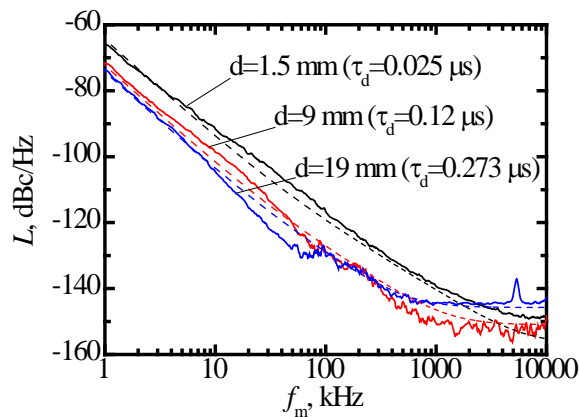


Рисунок 3

Из рисунка видно, что увеличение  $d$  приводит к уменьшению уровня спектра фазовых шумов выше теплового порога. 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 (рис. 4.) видно качественное и количественное совпадение теоретической и экспериментальной зависимостей.

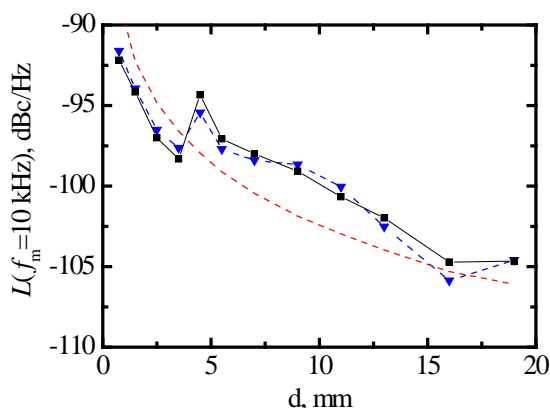


Рисунок 4

Таким образом, вышеописанное исследование демонстрирует, возможность применения активного кольца, содержащего спин-волновую линию задержки в качестве основы перестраиваемого малошумящего генератора монохроматического СВЧ-сигнала. При этом спектром фазовых шумов генератора можно эффективно управлять путем подбора расстояния между возбуждающими приемными антеннами спиновых волн.

#### Библиографический список

1. Castera J. P. Tunable magnetostatic surface-wave-oscillators //IEEE Transactions on Magnetism. – 1978. – Т. 14. – С. 826-828.
2. Carter R. L. et al. Tunable magnetostatic surface wave oscillator at 4 GHz //Microwave Symposium Digest, 1981 IEEE MTT-S International. – IEEE, 1981. – С. 383-385.
3. Ishak W. 4–20 GHz magnetostatic-wave delay-line oscillator //Electronics Letters. – 1983. – Т. 19. – №. 22. – С. 930-931.
4. Fetisov Y. K., Kabos P., Patton C. E. Bistable microwave oscillator with magnetostatic wave signal-to-noise enhancer in the feedback loop //Electronics Letters. – 1996. – Т. 32. – №. 20. – С. 1894-1895.
5. Kalinikos B. A., Kovshikov N. G., Patton C. E. Self-generation of microwave magnetic envelope soliton trains in yttrium iron garnet thin films //Physical review letters. – 1998. – Т. 80. – №. 19. – С. 4301.
6. Kalinikos B. A., Scott M. M., Patton C. E. Self-generation of fundamental dark solitons in magnetic films //Physical review letters. – 2000. – Т. 84. – №. 20. – С. 4697.
7. Scott M. M., Kalinikos B. A., Patton C. E. Self-generation of bright microwave magnetic envelope soliton trains in ferrite films through frequency filtering //Applied Physics Letters. – 2001. – Т. 78. – №. 7. – С. 970-972.
8. Grishin S. V. et al. Self-generation of dissipative solitons in magnonic quasicrystal active ring resonator //Journal of Applied Physics. – 2014. – Т. 115. – №. 5. – С. 053908.
9. Demidov V. E., Kovshikov N. G. Some special features of the transition to chaos in the self-modulation of surface spin waves //Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. – 1997. – Т. 66. – №. 4. – С. 261-265.
10. Wu M., Kalinikos B. A., Patton C. E. Self-generation of chaotic solitary spin wave pulses in magnetic film active feedback rings //Physical review letters. – 2005. – Т. 95. – №. 23. – С. 237202.
11. Kondrashov A. V. et al. Chaotic microwave self-generation in active rings based on ferromagnetic films //Technical Physics Letters. – 2008. – Т. 34. – №. 6. – С. 492-494.
12. Wang Z. et al. Chaotic spin-wave solitons in magnetic film feedback rings //Physical review letters. – 2011. – Т. 107. – №. 11. – С. 114102.
13. Grishin S. V. et al. Generation of chaotic microwave pulses in ferromagnetic film ring oscillators under external influence //Magnetism, IEEE Transactions on. – 2013. – Т. 49. – №. 3. – С. 1047-1054.
14. Rubiola E. 2008 Phase noise and frequency stability in oscillators (Cambridge University Press)
15. Boudot R., Rubiola E. Phase noise in RF and microwave amplifiers //Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on. – 2012. – Т. 59. – №. 12. – С. 2613-2624.