

# Влияние потерь в спин-волновой линии задержки на спектр фазовых шумов СВЧ-генератора

А.В. Дроздовский, М.В. Матюшкина, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования генератора, управляемого спин-волновой линией задержки. Продемонстрировано, что наличие диссипации спиновых волн в спин-волновой линии задержки ограничивает минимальный уровень фазовых шумов генератора.

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

## 1. Введение

Возможность создания активных кольцевых генераторов монохроматического сигнала, управляемых спин-волновыми (СВ) линиями задержки, была уже продемонстрирована неоднократно [1-4]. В СВЧ генераторах, управляемых линиями задержки уровень фазовых шумов должен уменьшаться при увеличении времени задержки сигнала или, иными словами, при увеличении крутизны фазо-частотной характеристики линии задержки [5]. В случае, если используемая в генераторе линия задержки является диссипативной, то увеличение времени задержки сигнала должно одновременно приводить к увеличению потерь, вносимых линией 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 СВЧ сигнала в спин-волновой линии задержки с потерями на спектр фазовых шумов спин-волнового генератора.

## 2. Результаты экспериментального и теоретического исследований

Для экспериментального исследования был собран макет генератора, включавший соединенные по кольцевой схеме перестраиваемый аттенюатор, СВЧ усилитель, направленный ответвитель, вентиль, спин-волновую линию задержки. Спин-волновая линия задержки представляла собой возбуждающую и приемную микрополосковые антенны сверху на которые накладывался волновод спиновых волн, изготовленный из эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний галлиевого гранта монокристаллической пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ). Расстояние между возбуждающей и приемной антеннами можно было варьировать в диапазоне от 4 до 20 мм. Пленка ЖИГ имела толщину 5.2 мкм и намагниченность насыщения 1760 Гс. Полуширина кривой ферромагнитного резонанса  $\Delta H$ , измеренная на частоте 5.3 ГГц, была равна 0.5 Э. Пленка, имела свободные поверхностные спины. Спин-волновая линия задержки помещалась между полюсами электромагнита, в однородное постоянное магнитное поле напряженностью 1150 Э. Таким образом, данная ситуация соответствовала случаю распространения поверхностных спиновых волн в пленке феррита. Аттенюатор в схеме использовался для управления режимом генерации кольца. Вывод генерируемого кольцом сигнала осуществлялся через направленный ответвитель. При проведении эксперимента изменялось расстояние между возбуждающей и приемной антеннами спиновых волн. Макет, при помощи

аттенюатора переводился в режим монохроматической генерации сигнала так, чтобы значение  $G$  составляло минимально возможное значение для начала устойчивой генерации.

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.

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 на основе формулы Лиссона, как [5]

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

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 [6]. 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 фликкер-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.

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

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

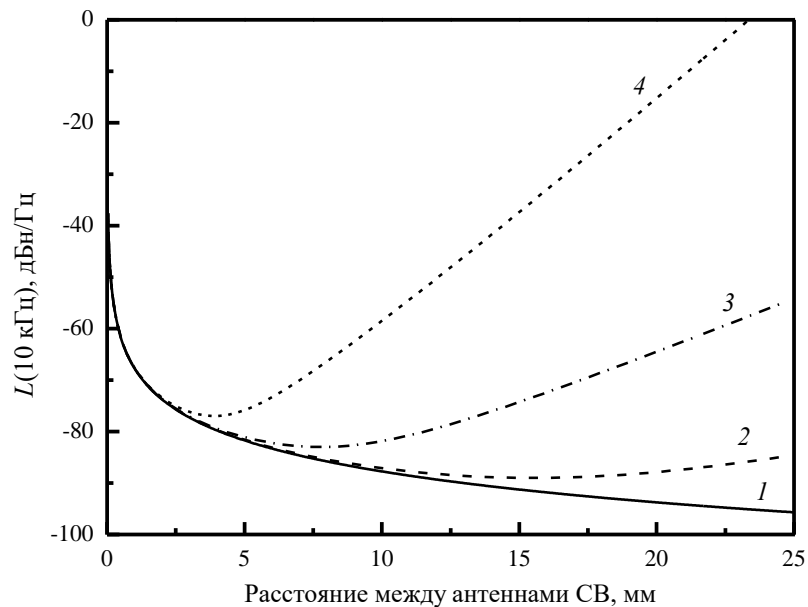
где  $M$  – суммарные потери на прием/возбуждение спиновых волн,  $\omega_r = 2\pi|\gamma|\Delta H$  – декремент затухания спиновых волн,  $\varphi_e$  – фазовый набег в линии обратной связи,  $\varphi_{sw}$  – фазовый набег в спин-волновой линии задержки,  $n$  – целое число.

На рисунке 1 приведены результаты расчета уровня фазовых шумов активного генератора, управляемого спин-волновой линией задержки на отстройке 10 кГц от несущей. Расчет производился по формуле (1) с учетом соотношения (2). Из рисунка видно, что наличие потерь внутри линии задержки ведет к ограничению минимального уровня фазовых шумов, достигаемого путем изменения времени задержки. При этом

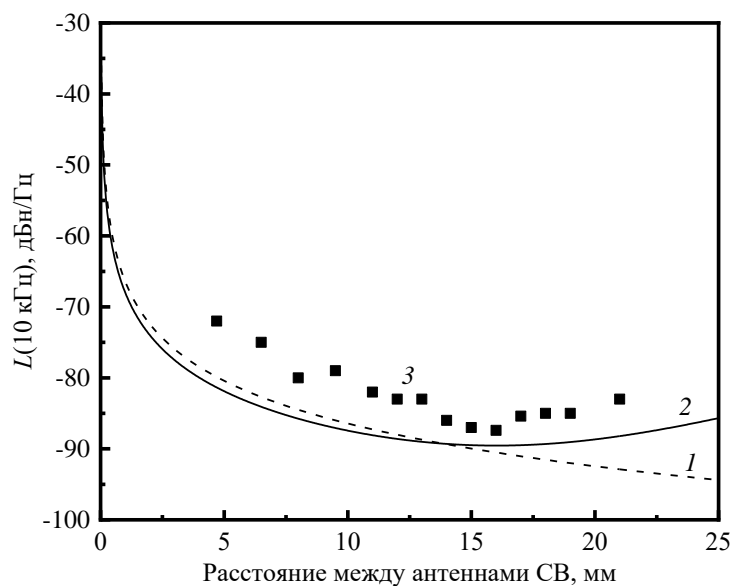
увеличение параметра магнитной диссипации ведет к увеличению минимально достижимого уровня фазового шума.

На рисунке 2 приведены результаты экспериментального исследования уровня фазовых шумов генерируемого генератором сигнала для различных расстояний между антеннами спиновых волн. Дополнительно на графике приведены результаты теоретического моделирования: кривая 1 соответствует моделированию в рамках которого не учитывался рост вносимых линией задержки потерь; кривая 2 получена с учетом роста потерь при увеличении расстояния между антеннами.

Из полученных экспериментальных результатов видно, что по мере увеличения расстояния между антеннами уровень фазовых шумов генерируемого сигнала сначала снижается до расстояния 15 мм, после начинает увеличиваться. Такое же поведение демонстрирует теоретическая зависимость уровня фазового шума, полученная с учетом соотношения (2). Таким образом, наши результаты показывают, что существует оптимальная длина линии задержки, которая минимизирует уровень фазового шума генератора.



**Рисунок 1.** Влияние расстояния между антеннами на значение уровня фазовых шумов при отстройке 10 кГц, посчитанное для различных значений параметра ширины линии ферромагнитного резонанса: 1 –  $\Delta H=0$  Э; 2 –  $\Delta H=0.5$  Э; 3 –  $\Delta H=1$  Э; 4 –  $\Delta H=2$  Э.



**Рисунок 2.** Значение уровня фазовых шумов на отстройке 10 кГц: 1 – теоретическая зависимость, полученная без учета потерь в линии задержки; 2 – теоретическая зависимость, полученная с учетом потерь в линии задержки; 3 – результаты эксперимента.

### 3. Заключение

Таким образом, вышеописанное исследование демонстрирует, возможность применения активного кольца, содержащего спин-волновую линию задержки в качестве основы перестраиваемого малошумящего генератора монохроматического СВЧ-сигнала. Продемонстрировано, что наличие потерь внутри линии задержки ведет к ограничению минимально возможного уровня фазовых шумов генерируемого СВЧ сигнала.

Исследование выполнено при поддержке **Министерства науки и высшего образования РФ (проект “Госзадание” № 0788-2020-0005 (FSEE-2020-0005))**

#### Список литературы

1. Castera J. P. Tunable magnetostatic surface-wave-oscillators //IEEE Transactions on Magnetics. – 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. Bankowski, E. et al. Magnonic crystal as a delay line for low-noise auto-oscillators // Applied Physics Letters. – 2015. – V. 107(12). – P. 122409.
5. Rubiola E 2008 Phase noise and frequency stability in oscillators (Cambridge University Press)
6. 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.