

07

Аномальное подавление шумового сигнала в нелинейном устройстве резонаторной магноники

© Д.Г. Касимцев, С.В. Гришин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
E-mail: sergrsh@yandex.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 6 июня 2026 г.

Принято к публикации 16 июня 2026 г.

Приводятся результаты экспериментального исследования прохождения многочастотных сигналов через нелинейное устройство резонаторной магноники микрополосковый резонатор—полосно-заграждающий фильтр на обратных объемных магнитостатических волнах. Продемонстрирована зависимость величины аномального подавления малых сигналов в виде монохроматического и шумового сигналов от уровня мощности большого монохроматического сигнала.

Ключевые слова: резонаторная магноника, спиновые волны, усилитель отношения сигнал/шум.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.18.63546.20751

В последние два десятилетия активно проводятся исследования взаимодействия резонансных колебаний, а также бегущих магнитостатических спиновых волн (МСВ) (их квантами являются квазичастицы — магнаны), возбуждаемых в магнитоупорядоченных средах (магнитная подсистема), с резонансными колебаниями, возбуждаемыми электромагнитными (фотонными) подсистемами [1–10]. Интерес к такого рода взаимодействиям обусловлен в первую очередь тем, что гибридные состояния, образующиеся в результате связи двух разных подсистем, обладают принципиально новыми свойствами, недоступными каждой подсистеме в отдельности. Такие гибридные состояния интересны для создания квантовых сенсоров [8], перестраиваемых по частоте высокочастотных резонаторов [9,10], а также multifunctional нелинейных устройств для обработки и генерации информационных сигналов [4,6,7]. Изучением таких гибридных систем занимается резонаторная магноника.

В микроволновом диапазоне частот одной из наиболее привлекательных магнитных подсистем является пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ), которая в отличие от ее объемного аналога — ЖИГ-сферы — имеет планарное исполнение. Это дает возможность реализовать в пленке ЖИГ режимы не только стоячих, но и бегущих спиновых волн (СВ), дисперсионные характеристики которых сильно зависят от ориентации внешнего постоянного магнитного поля относительно направления распространения СВ и граничных условий [11]. Пленки ЖИГ, обладая рекордно низкими потерями на распространение СВ, используются для создания на их основе перестраиваемых по частоте частотно-селективных СВЧ-устройств: прямоугольных резонаторов, полосно-пропускающих фильтров и полосно-заграждающих фильтров (ПЗФ) [12]. Одной из разновидностей резонансных

фотонных подсистем микроволнового диапазона является микрополосковый резонатор (МПР) [3–7].

В [5] было показано, что если основная мода МПР взаимодействует с МСВ, бегущими в пленке ЖИГ, то такая гибридная система обладает свойствами системы двух связанных колебательных контуров. Одним из них является МПР, а другим — пленка ЖИГ, которая на частотах возбуждения МСВ является относительно узкополосным ПЗФ. Второй колебательный контур характеризуется нелинейным сопротивлением, наличие которого обусловлено трехволновыми параметрическими процессами распада МСВ. В двухчастотном режиме оно зависит не только от уровня мощности, но и от величины отстройки между большим и малым монохроматическими (МХ) СВЧ-сигналами [7]. В [5–7] было установлено, что при повышенных уровнях мощности МХ СВЧ-сигнала данная система работает как усилитель отношения сигнал/шум [13] в полосе частот возбуждения обратных объемных МСВ (ООМСВ), а вне этой полосы (на собственных частотах системы) — как ограничитель мощности [14]. Переход от одного режима работы к другому сопровождается нелинейным фазовым сдвигом, имеющим наибольшее значение на частоте, на которой коэффициент передачи не зависит от входной мощности. На данной частоте устройство работает как эффективный нелинейный фазовращатель [7].

В [7] теоретически и экспериментально было показано, что в двухчастотном режиме, когда частота малого МХ СВЧ-сигнала f_{sm} перестраивается вблизи частоты большого МХ СВЧ-сигнала f_{lg} , соответствующей частоте, на которой в одночастотном режиме устройство работает как эффективный нелинейный фазовращатель (подавление малого сигнала отсутствует), наблюдается аномальное подавление малого сигнала на величину ~ 10 dB. Частота f_{lg} была больше центральной частоты полосы возбуждения ООМСВ f_c ($f_{lg} > f_c$). Данный

эффект регистрировался на частотах $f_{sm} > f_{lg}$, где исследуемая система обладает свойствами ограничителя мощности в одночастотном режиме. В [7] также было установлено, что при $f_{lg} = f_c$, когда отношение большой сигнал/малый сигнал (LSSR) в одночастотном режиме является максимальным, область аномального подавления малого сигнала не наблюдается. В [15] было получено аномальное подавление шумового сигнала, проходящего вместе с МХ СВЧ-сигналом большой амплитуды через микрополосковую линию (МПЛ) типа „меандр“, нагруженную пленкой ЖИГ. Однако в [15] не исследовалось влияние уровня мощности большого МХ СВЧ-сигнала на величину аномального подавления малого МХ СВЧ-сигнала, а одновременное прохождение МХ СВЧ-сигнала большой мощности и шумового сигнала малой мощности через систему МПР–ПЗФ на ООМСВ в [5–7] вообще не рассматривалось.

В настоящей работе экспериментально демонстрируется эффект аномального подавления шумового СВЧ-сигнала малого уровня мощности под воздействием МХ СВЧ-сигнала большого уровня мощности при их одновременном прохождении через систему МПР–ПЗФ на ООМСВ, работающую в режиме усилителя отношения сигнал/шум.

Экспериментальный макет, изображенный на вставке к рис. 1, а, состоит из фотонной и магнетонной подсистем. Фотонная подсистема представляет собой МПР, выполненный методом тонкопленочной фотолитографии на поликоровой подложке с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10.3$. МПР имеет ширину $w = 5 \cdot 10^{-4}$ м и длину $L = 31.84 \cdot 10^{-3}$ м, которая находится из следующего соотношения:

$$L = \frac{\lambda}{2}n,$$

где λ — длина электромагнитной волны, а $n = 1, 2, 3, \dots$ — целое число полувольт, укладывающихся на длине резонатора и определяющих вид его колебаний. МПР соединен с генератором и нагрузкой через микрополосковые элементы связи, которые представляют собой разомкнутые с одного конца отрезки МПЛ шириной $w = 5 \cdot 10^{-4}$ м. Длина обоих элементов связи $t = 7 \cdot 10^{-3}$ м, а величина зазора между ними и МПР $s = 0.625 \cdot 10^{-3}$ м. С учетом указанных геометрических размеров МПР, работающий на основном виде колебаний ($n = 1$), характеризуется резонансной частотой $f_0 = 1774$ МГц, нагруженной добротностью $Q_L = 104$ и ослаблением на резонансной частоте 13 дБ.

В качестве магнетонной подсистемы используется тонкопленочный ЖИГ-волновод толщиной $d = 15 \cdot 10^{-6}$ м, шириной $p = 4 \cdot 10^{-3}$ м, длиной 10^{-2} м с намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 0.175$ Т. ЖИГ-волновод располагается в пучности переменного тока основного вида колебаний МПР. Внешнее постоянное магнитное поле $H_0 = 16313$ А/м прикладывается касательно к поверхности ЖИГ-волновода и ортогонально МПР. При таком виде намагничивания в пленке ЖИГ возбуждаются

ООМСВ вблизи частоты ферромагнитного резонанса $f_{\perp} = \sqrt{f_H(f_H + f_M)}$ (где $f_H = \gamma H_0$, $f_M = 4\pi\gamma M_0$, γ — гиромагнитное отношение). Как показано в [6], пленка ЖИГ при возбуждении в ней ООМСВ микрополосковой линией шириной $w = 5 \cdot 10^{-4}$ м представляет собой относительно узкополосный ПЗФ.

Эксперимент с системой МПР–ПЗФ на ООМСВ проходил в три этапа. На первом этапе измерялись ее амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и мощностные характеристики при подаче на вход системы одночастотного МХ СВЧ-сигнала разного уровня мощности. На втором этапе исследовались АЧХ резонансной системы при подаче на ее вход двух МХ СВЧ-сигналов разных уровней мощности (большого и малого сигналов). И наконец, на третьем этапе измерялись спектральные характеристики большого и малого сигналов на выходе системы МПР–ПЗФ на ООМСВ, где в роли малого сигнала выступал ограниченный по частоте белый шум (далее шумовой СВЧ-сигнал). Для проведения эксперимента на первом этапе использовался анализатор цепей серии PNA E8362C. На втором и третьем этапах вместо анализатора цепей применялся анализатор спектра серии PXA N9030A, который при подаче на него двухчастотного сигнала работал в режиме запоминания максимального значения амплитуды сигнала. Большой МХ СВЧ-сигнал задавался генератором сигналов PSG E8257D, а малый МХ СВЧ-сигнал или шум задавались с помощью генератора сигналов ESG E4438C. Большой и малый СВЧ-сигналы подавались на вход системы МПР–ПЗФ на ООМСВ через микрополосковый направленный ответвитель. Шумовой СВЧ-сигнал характеризовался нормальным (гауссовым) законом распределения, центральной частотой $f_n = 1742$ МГц, шириной полосы частот $\Delta f_n = 80$ МГц и интегральной мощностью $P_n = -24$ дБм на входе системы.

На рис. 1, а приведены АЧХ системы МПР–ПЗФ на ООМСВ, измеренные в одночастотном режиме при малом и повышенном уровнях мощности входного МХ СВЧ-сигнала. Видно, что в линейном режиме $f_c = 1742$ МГц и находится ниже частоты f_0 ($f_c < f_0$). В этом случае АЧХ имеет „двугорбый“ вид при использовании как более тонких [4], так и более толстых [5–7] пленок ЖИГ. Это указывает на наличие сильной связи между двумя подсистемами. С увеличением мощности входного МХ СВЧ-сигнала АЧХ системы становится „одногорбой“, что свидетельствует об уменьшении связи из-за развития в пленке ЖИГ трехволновых параметрических процессов распада ООМСВ [11].

На рис. 1, б представлена частотная зависимость отношения большой сигнал/малый сигнал $LSSR = S_{21}^{lg} - S_{21}^{sm}$ (где S_{21}^{lg} — модуль коэффициента передачи (в децибелах) в режиме большого СВЧ-сигнала, S_{21}^{sm} — модуль коэффициента передачи (в децибелах) в режиме малого СВЧ-сигнала), полученная в одночастотном режиме. Видно, что на частотах от 1708 до 1785 МГц (полоса

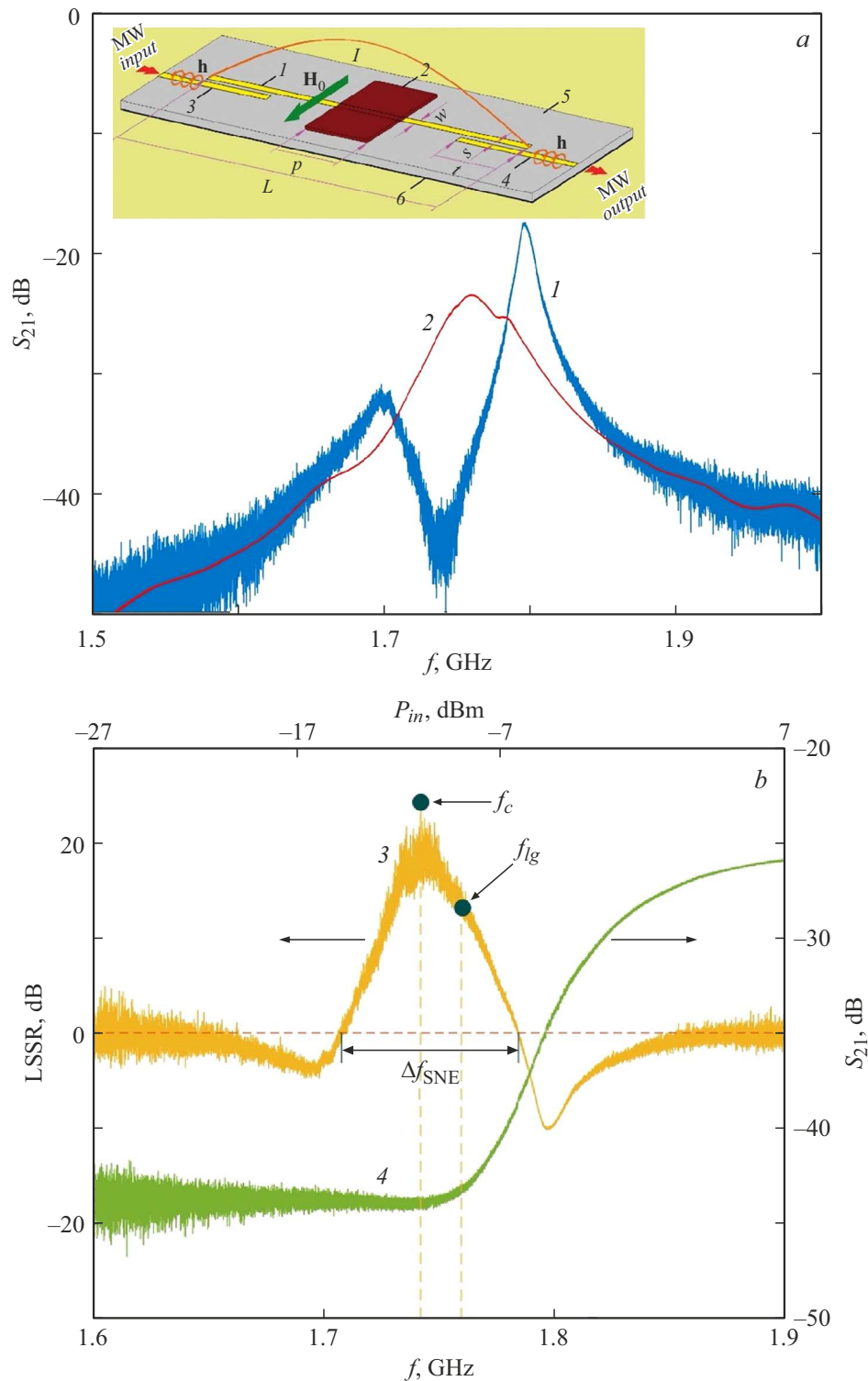


Рис. 1. *a* — АЧХ системы МПР–ПЗФ на ООМСВ, измеренные в линейном режиме при $P_{in} = -27$ dBm (1) и в нелинейном режиме при $P_{in} = +7$ dBm (2). *b* — частотная зависимость отношения большой сигнал/малый сигнал (LSSR) (3) и зависимость модуля коэффициента передачи S_{21} от его входной мощности P_{in} (4), измеренная на частоте $f_c = 1742$ MHz. На вставке — схематическое изображение системы МПР–ПЗФ на ООМСВ: 1 — МПР, 2 — пленка ЖИГ, 3 и 4 — входной и выходной микрополосковые элементы связи, 5 — поликоровая подложка, 6 — металлический экран.

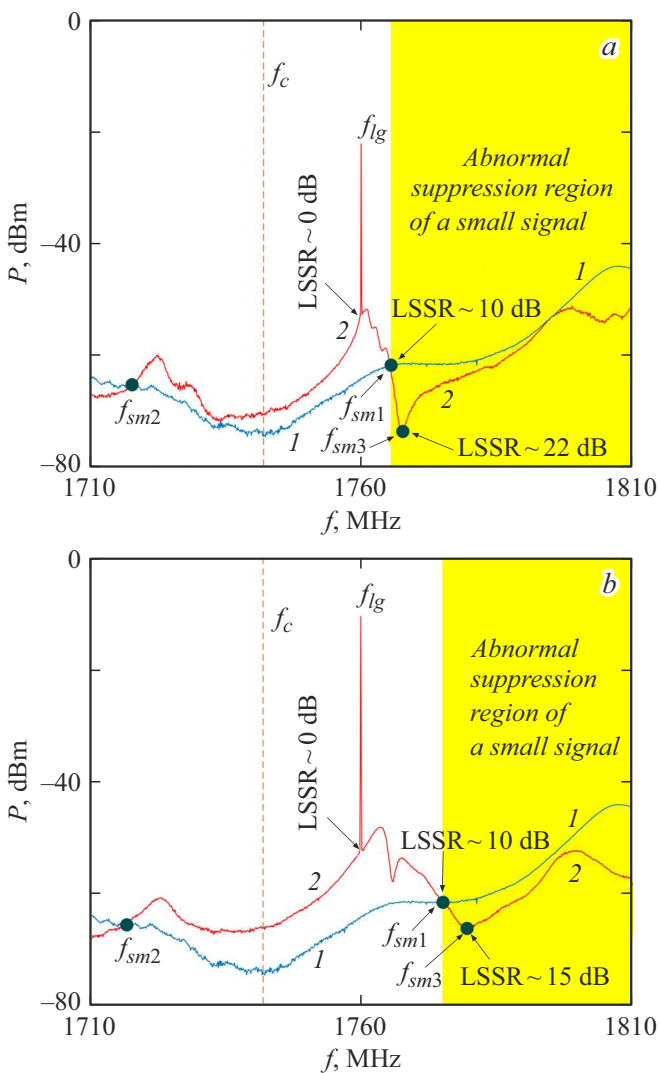


Рис. 2. Спектры мощности двухчастотного СВЧ-сигнала, измеренные на выходе системы МПР–ПЗФ на ООМСВ при уровнях мощности большого МХ СВЧ-сигнала $P_{lg} = +7$ (a) и $+17$ dBm (b). В обоих случаях частота большого сигнала $f_{lg} = 1760$ MHz, частота малого сигнала перестраивается, а его мощность $P_{sm} = -24$ dBm. Кривые 1 и 2 получены в отсутствие и в присутствии большого СВЧ-сигнала соответственно.

частот $\Delta f_{SNE} = 77$ MHz) отношение $LSSR > 0$, и система МПР–ПЗФ на ООМСВ работает как усилитель отношения сигнал/шум. В полосе Δf_{SNE} , соответствующей полосе возбуждения ООМСВ, максимальное значение $LSSR = 24$ dB наблюдается на частоте f_c . По обе стороны от указанной полосы частот располагаются две другие полосы частот, в которых отношение $LSSR < 0$. Здесь система МПР–ПЗФ на ООМСВ работает как ограничитель мощности. На рис. 1, b также приведена зависимость модуля коэффициента передачи от входной мощности P_{in} , измеренная на частоте f_c . Видно, что нелинейный порог наблюдается при $P_{in} = -8.5$ dBm, а начало насыщения коэффициента передачи в нелинейном режиме происходит при $P_{in} \cong +7$ dBm.

На рис. 2 приведены зависимости спектрального уровня мощности малого МХ СВЧ-сигнала, измеренные при перестройке его частоты f_{sm} вблизи частоты большого МХ СВЧ-сигнала $f_{lg} = 1760$ MHz, которая больше частоты f_c . Исходя из результатов теоретического моделирования, проведенного в [7] для двухчастотного воздействия, было установлено, что при $f_{lg} > f_c$ на частотах $f_{sm} > f_{lg}$ появляется область аномального подавления малого сигнала. С позиций эквивалентных колебательных контуров [7] появление данной области обусловлено влиянием реактивной части комплексного сопротивления параметрического колебательного контура, описывающего узкополосный фильтр на параметрически возбуждаемых СВ, на реактивную часть комплексного сопротивления колебательного контура, описывающего узкополосный фильтр на ООМСВ.

На рис. 2, a отношение мощностей двух сигналов на входе системы $[10\lg(P_{lg}/P_{sm})]_{in}$ равно 31 dB, а на рис. 2, b — 41 dB (P_{lg} — мощность большого сигнала, P_{sm} — мощность малого сигнала). На выходе системы отношение $[10\lg(P_{lg}/P_{sm})]_{out}$ может быть либо больше ($LSSR = [10\lg(P_{lg}/P_{sm})]_{out} - [10\lg(P_{lg}/P_{sm})]_{in} > 0$), либо равно ($LSSR = 0$), либо меньше ($LSSR < 0$) отношения на входе. Из представленных на рис. 2 результатов видно, что в двухчастотном режиме $LSSR \sim 0$ на частотах $f_{sm} \cong f_{lg}$, а на частотах $f_{sm} > f_{lg}$ и $f_{sm} < f_{lg}$ величина $LSSR$ начинает возрастать, но при этом она не соответствует величине $LSSR$, полученной на этих частотах в одночастотном режиме (меньше ее). Однако на частотах f_{sm1} и f_{sm2} амплитуда малого сигнала не меняется под воздействием большого сигнала, а величина $LSSR$ на этих частотах приблизительно соответствует величине, полученной в одночастотном режиме. Так, при $P_{lg} = +7$ dBm (рис. 2, a) для одной из характерных частот $f_{sm1} = 1765$ MHz $LSSR \sim 10$ dB. При $f_{sm} > f_{sm1}$ малый сигнал начинает ослабляться сильнее под воздействием большого сигнала, чем в его отсутствие. Возникает область аномального подавления малого сигнала, в которой величина $LSSR$ увеличивается на 12 dB на частоте $f_{sm3} = 1768$ MHz, отстроенной от f_{lg} на $\Delta f = 8$ MHz. С увеличением мощности большого сигнала до $P_{lg} = +17$ dBm (рис. 2, b) область аномального подавления малого сигнала сохраняется, но максимальная величина $LSSR$ уменьшается на 7 dB на частоте f_{sm3} , отстроенной от f_{lg} на $\Delta f = 20$ MHz.

На рис. 3 показаны спектры мощности двух СВЧ-сигналов (малого шумового и большого монохроматического), одновременно прошедших через систему МПР–ПЗФ на ООМСВ. В таком многочастотном режиме $LSSR = [10\lg(P_{lg}/P_{sn})]_{out} - [10\lg(P_{lg}/P_{sn})]_{in}$, где P_{sn} — мощность шума на заданной частоте. Из представленных результатов следует, что с высокочастотной стороны от большого сигнала образуется область аномального подавления шумового сигнала, причем, как и в случае с двумя МХ СВЧ-сигналами разного уровня мощности, при $P_{lg} = +7$ dBm (рис. 3, a) частота f_{sm3} также имеет значение ~ 1768 MHz, при котором

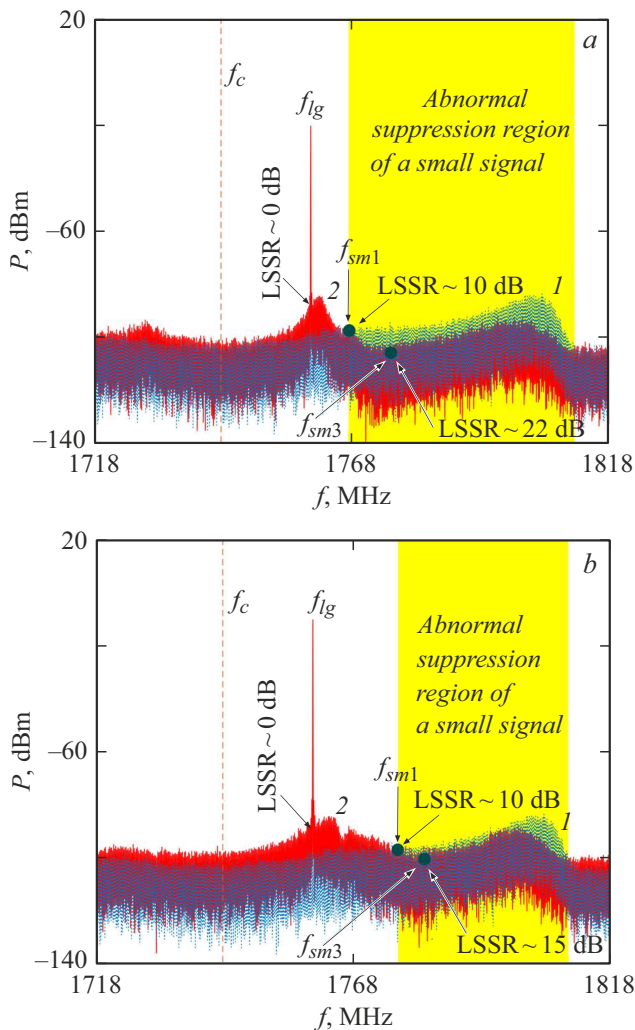


Рис. 3. Спектры мощности шумового СВЧ-сигнала, находящегося вблизи частоты МХ СВЧ-сигнала, измеренные на выходе системы МПР–ПЗФ на ООМСВ при значениях мощности МХ СВЧ-сигнала $P_{lg} = +7$ (a) и $+17$ dBm (b). В обоих случаях частота большого сигнала $f_{lg} = 1760$ MHz, полоса шумового СВЧ-сигнала $\Delta f_n = 80$ MHz, а его интегральная мощность $P_n = -24$ dBm. Кривые 1 и 2 получены в отсутствие и в присутствии большого СВЧ-сигнала.

максимальный уровень аномального подавления шума ~ 12 dB. При $P_{lg} = +17$ dBm (рис. 3, b) максимальный уровень аномального подавления шума ведет себя так же, как и в двухчастотном режиме. Он уменьшается на 7 dB на частоте f_{sm3} , отстроенной от f_{lg} на $\Delta f = 20$ MHz.

Полученные результаты представляют интерес для разработки усилителей отношения сигнал/шум, работающих на принципах резонаторной магноники.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-30027).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B.Z. Rameshti, S.V. Kusminskiy, J.A. Haigh, K. Usami, D. Lachance-Quirion, Y. Nakamura, C.M. Hu, G.E.W. Bauer, Y.M. Blanter, Phys. Rep., **979**, 1 (2022). DOI: 10.1016/j.physrep.2022.06.001
- [2] M. Harder, B.M. Yao, Y.S. Gui, C.-M. Hu, J. Appl. Phys., **129** (20), 201101 (2021). DOI: 10.1063/5.0046202
- [3] К.Д. Самойленко, Д.А. Габриелян, А.Р. Сафин, С.А. Никитов, Письма в ЖЭТФ, **122** (9), 572 (2025). DOI: 10.31857/S0370274X25110082 [K.D. Samoilenko, D.A. Gabrielyan, A.R. Safin, S.A. Nikitov, JETP Lett., **122** (9), 592 (2025). DOI: 10.1134/S0021364025608188].
- [4] С.В. Гришин, Письма в ЖТФ, **52** (2), 37 (2026). DOI: 10.61011/PJTf.2026.02.62070.20362 [S.V. Grishin, Tech. Phys. Lett., **52** (1), 85 (2026). DOI: 10.61011/TPL.2026.01.62828.20362].
- [5] С.В. Гришин, В.С. Гришин, В.В. Гурзо, Ю.П. Шараевский, Радиотехника и электроника, **48** (6), 724 (2003). [S.V. Grishin, V.S. Grishin, V.V. Gurzo, Yu.P. Sharaevskii, J. Commun. Technol. Electron., **48** (6), 660 (2003).]
- [6] С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский, Письма в ЖТФ, **31** (2), 77 (2005). [S.V. Grishin, Yu.P. Sharaevskii, Tech. Phys. Lett., **31** (1), 81 (2005). DOI: 10.1134/1.1859509].
- [7] С.В. Гришин, А.Р. Давоян, Ю.П. Шараевский, Радиотехника и электроника, **55** (1), 95 (2010). [S.V. Grishin, A.R. Davoyan, Yu.P. Sharaevskii, J. Commun. Technol. Electron., **55** (1), 88 (2010). DOI: 10.1134/S1064226910010122].
- [8] D. Lachance-Quirion, S.P. Wolski, Y. Tabuchi, S. Kono, K. Usami, Y. Nakamura, Science, **367**, 425 (2020). DOI: 10.1126/science.aaz923
- [9] A.B. Ustinov, V.S. Tiberkevich, G. Srinivasan, A.N. Slavin, A.A. Semenov, S.F. Karmanenko, B.A. Kalinikos, J.V. Mantese, R. Ramer, J. Appl. Phys., **100** (9), 093905 (2006). DOI: 10.1063/1.2372575
- [10] A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos, V.S. Tiberkevich, A.N. Slavin, G. Srinivasan, J. Appl. Phys., **103** (6), 063908 (2008). DOI: 10.1063/1.2895006
- [11] А.В. Вашковский, В.С. Стальмахов, Ю.П. Шараевский, Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот (Изд-во Саратов. ун-та, 1993).
- [12] В. Геворкян, В. Кочемасов, А. Устинов, Компоненты и технологии, № 3 (188), 16 (2017).
- [13] J.D. Adam, S.N. Stitzer, Appl. Phys. Lett., **36** (6), 485 (1980). DOI: 10.1063/1.91516
- [14] K. Davídková, K. Levchenko, F. Bruckner, R. Verba, F. Majcen, Q. Wang, M. Lindner, C. Dubs, V. Vlamincik, J. Klíma, M. Urbánek, D. Suess, A. Chumak, Phys. Rev. Appl., **23** (3), 034026 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.23.034026
- [15] Ю.П. Шараевский, В.С. Гришин, В.В. Гурзо, А.В. Дерунов, А.А. Шахат, Радиотехника и электроника, **40** (7), 1064 (1995).