

Автогенерация малошумящего сверхвысокочастотного сигнала в оптоэлектронном генераторе с пассивным оптическим усилением

© И.Ю. Таценко, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197022 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ustinov_rus@yahoo.com

Поступило в Редакцию 11 июля 2023 г.

В окончательной редакции 5 сентября 2023 г.

Принято к публикации 11 сентября 2023 г.

Впервые проведено подробное исследование фазового шума оптоэлектронного сверхвысокочастотного (СВЧ) генератора с пассивным оптическим усилением. Особенностью схемы генератора является отсутствие каких-либо оптических или СВЧ усилителей. Определены параметры схемы, влияющие на фазовый шум. Предложена модифицированная модель Яо-Малеки, более адекватно описывающая спектр фазового шума оптоэлектронного генератора без усилителей. Полученное минимальное значение фазового шума составило -135 dBc/Hz на отстройке 10 kHz от несущей частоты 3.5 GHz для длины оптоволоконной линии 600 m. Определена функциональная зависимость коэффициента пропорциональности фликкер-шума от мощности лазера, которая позволяет более точно охарактеризовать фазовый шум оптоэлектронного генератора с пассивным оптическим усилением.

Ключевые слова: оптоволоконно, оптоэлектронный генератор, фазовый шум, фликкер-шум, модель Яо-Малеки.

DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56497.176-23

Введение

В настоящее время генераторы сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала находят применение в радиолокационных и телекоммуникационных системах, навигационных устройствах и измерительном оборудовании. Повышение стабильности частоты генерируемого сигнала и снижение фазового шума являются основными задачами при разработке СВЧ генераторов. Одним из перспективных решений является разработка оптоэлектронных СВЧ генераторов (ОЭГ).

Для создания малошумящего генератора необходим резонатор с высокой добротностью [1]. Хорошо известно, что добротность — это отношение энергии, запасенной в системе, к энергии, теряемой за один период колебаний. В настоящее время существует два основных способа максимизации добротности, которые лежат в основе разработки ОЭГ. Первый способ основан на использовании оптических резонаторов с модами шепчущей галереи, которые обладают гигантской добротностью [2]. Второй способ основан на использовании кольцевой схемы с оптоволоконной линией задержки (ОВЛЗ) [3–5], которая, по сути, является элементом для накопления энергии оптического излучения.

С позиций радиотехники ОЭГ оказывается сверхмалошумящим благодаря возможности обеспечения большой крутизны фазочастотной характеристики ОВЛЗ (за счет большого времени задержки, исчисляемого единицами—десятками микросекунд) при рекордно низких потерях оптического излучения в оптоволокне (порядка 0.04 dB/μs). Для возникновения автогенерации

необходим постоянный источник энергии, компенсирующий потери в системе [6]. В большинстве разработанных оптоэлектронных генераторов компенсация потерь реализуется либо в СВЧ тракте транзисторными СВЧ усилителями [7], либо в оптическом тракте оптоволоконными или полупроводниковыми оптическими усилителями [8], а ОВЛЗ служит для реализации большого времени задержки.

В ОЭГ для передачи радиосигнала по оптоволокну используется оптоволоконная линия передачи (ОВЛП), основными компонентами которой являются лазер, электрооптический модулятор, непосредственно само оптическое волокно и фотодетектор (рис. 1, а). СВЧ сигнал распространяется в ОВЛП в виде модуляции амплитуды оптического излучения. Потери СВЧ сигнала в ОВЛП (по мощности) определяются стандартным выражением $H_p = 10 \cdot \log(P_{out}/P_{in})$, где P_{in} — мощность СВЧ сигнала на входе ОВЛП (т.е. на управляющем входе электрооптического модулятора), $\log$ — десятичный логарифм, а P_{out} — мощность СВЧ сигнала на выходе фотодетектора, которая рассчитывается по формуле [9]:

$$P_{out} = R \left(P_{las} S J_1 \left(\frac{\pi V_0}{V_\pi} \right) \sin \left(\frac{\pi V_b}{V_\pi} \right) \right)^2. \quad (1)$$

В этой формуле использовались следующие обозначения: R — сопротивление нагрузки фотодетектора, P_{las} — мощность лазера, S — чувствительность фотодетектора, $J_1(\cdot)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка, V_0 — амплитуда модулирующего СВЧ сигнала подаваемого на вход электрооптического модулятора,

V_b — напряжение смещения рабочей точки модулятора, V_π — полуволновое напряжение электрооптического модулятора. Из формулы (1) видно, что выходная мощность ОВЛП P_{out} зависит не только от P_{in} (через значение V_0), но и от других параметров ОВЛП, а именно от мощности лазера P_{las} и полуволнового напряжения модулятора V_π . Поэтому даже при фиксированном значении P_{in} можно получить увеличение значения P_{out} за счет уменьшения V_π и увеличения P_{out} . Так, в нашей недавней работе [10] было экспериментально показано, что увеличение мощности оптического излучения и использование фотодетектора с высоким фототоком позволяет уменьшить потери СВЧ сигнала в ОВЛП. При некотором сочетании параметров V_π и P_{las} можно добиться ситуации, когда коэффициент передачи ОВЛП H_p станет положительным. Такой технический эффект мы будем далее называть „пассивным оптическим усилением“ (в отличие от оптического усиления, реализуемого активным элементом, например полупроводниковым или эрбиевым оптическим усилителем).

Если выход ОВЛП с положительным коэффициентом передачи соединить с ее входом, то в получившейся кольцевой системе возникнет автогенерация СВЧ сигнала. Для выбора частоты генерации необходимо использовать СВЧ фильтр, который будет вносить потери. Потери СВЧ-сигнала также будут возникать при его выводе из генератора. Эти потери можно скомпенсировать пассивным оптическим усилением ОВЛП. Далее такой автогенератор будем называть ОЭГ с пассивным оптическим усилением.

С физической точки зрения автогенерация СВЧ сигнала в ОЭГ с пассивным оптическим усилением будет происходить за счет энергии оптического излучения, запасенной в оптоволокне. Источниками этой энергии служат питание лазера и фотодетектора. К настоящему моменту автогенерация СВЧ сигнала в ОЭГ с пассивным оптическим усилением изучена крайне недостаточно. Существует всего несколько работ на эту тему [11,12], в которых в основном показана принципиальная возможность возникновения автогенерации СВЧ сигнала в таких системах.

Целью настоящей работы являлось детальное исследование автогенерации СВЧ сигнала в ОЭГ с пассивным оптическим усилением. В результате, впервые установлена взаимосвязь между вносимым фазовым шумом ОВЛП и фазовым шумом ОЭГ. На основе этого модифицирована модель Яо-Малеки, описывающая спектр фазового шума ОЭГ. В первой части настоящей работы описываются результаты измерений характеристик ОВЛП, влияющие на фазовый шум ОЭГ, результаты исследования которого описаны во второй и третьей частях работы. В четвертой части работы проведено сопоставление характеристик исследованного ОЭГ с другими оптоэлектронными генераторами, использующими в своей схеме СВЧ или оптические усилители. В Заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Изучение характеристик оптоволоконной линии передачи в зависимости от мощности лазера

Сначала нами был исследован макет ОВЛП и определены параметры, необходимые для построения оптоэлектронного генератора. Схема оптоволоконной линии передачи СВЧ сигнала показана на рис. 1, а. Она состояла из лазера с длиной волны оптического излучения 1550 nm и мощностью излучения до 1 W, модулятора Маха-Цендера с полуволновым напряжением $V_\pi \approx 1.6$ V, оптоволокна и фотодетектора с чувствительностью 0.8 A/W в частотном диапазоне 0–12 GHz.

Принцип работы ОВЛП заключается в следующем. Непрерывное оптическое излучение лазера, выполняющее функцию несущего сигнала, модулируется по интенсивности входным монохроматическим СВЧ сигналом, подающимся на управляющий порт модулятора Маха-Цендера. Далее модулированное оптическое излучение распространяется по оптоволоконному кабелю и детектируется фотодетектором. В зависимости от коэффициента передачи ОВЛП сигнал на выходе фотодетектора представляет собой СВЧ сигнал, ослабленный или усиленный по сравнению с входным СВЧ сигналом.

Как уже было описано во Введении, с увеличением мощности лазера P_{las} уменьшаются потери в ОВЛП. Поэтому нами в первую очередь были измерены ее амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) при различных значениях P_{las} . Результаты показаны на рис. 1, б, из которого видно, что при мощности лазера $P_{las} = 17.8$ dBm потери в ОВЛП составляют около –13 dB на низких частотах. С ростом частоты они растут из-за уменьшения чувствительности фотодетектора [10]. С увеличением мощности лазера потери в ОВЛП уменьшаются. При мощности лазера выше $P_{las} = 26.7$ dBm коэффициент передачи ОВЛП становится положительным практически во всем диапазоне частот до 10 GHz. При мощности лазера $P_{las} = 28$ dBm коэффициент передачи на низких частотах составляет около 7 dB и около 3 dB на частоте 10 GHz. Такие результаты указывают на возможность возникновения автогенерации СВЧ сигнала в кольцевой схеме, образованной путем замыкания выхода ОВЛП с ее входом.

Далее было проведено измерение вносимого фазового шума ОВЛП. Эти данные будут необходимы в дальнейшем при анализе фазового шума ОЭГ. Кроме того, для обеспечения низкого фазового шума ОЭГ необходимо, чтобы ОВЛП обладала низким вносимым фазовым шумом.

Спектры вносимого фазового шума ОВЛП $\mathcal{L}(f')$, измеренные при различной мощности лазера, представлены на рис. 1, в. Из графиков видно, что ниже граничной частоты фликкер-шума f_c преобладает фликкер-шум (или $1/f$ шум). Его спектральная плотность мощности описывается выражением $S_{1/f} = b_{-1}f^{-1}$ где b_{-1} — коэффициент пропорциональности фликкер-шума, кото-

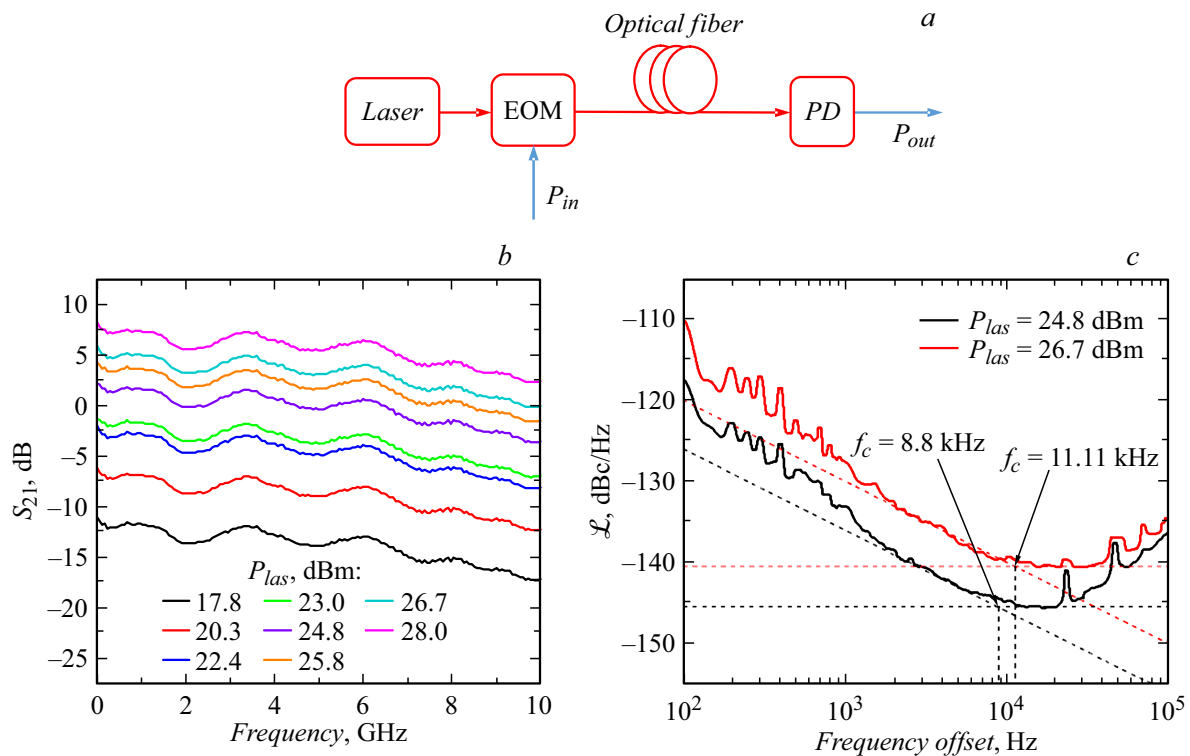


Рис. 1. Блок-схема ОВЛП (а), ее амплитудно-частотные характеристики (b) и спектры вносимого фазового шума на частоте 3.5 GHz (c), измеренные при различных значениях мощности лазера.

рый определяется феноменологически. Напомним, что $\mathcal{L} = \frac{1}{2} \cdot S_\varphi$. Анализ полученных результатов показал, что при мощности лазера $P_{las} = 24.8$ dBm граничная частота f_c составляет 8.8 kHz, а коэффициент b_{-1} равен $2.5 \cdot 10^{-11} \text{ rad}^2/\text{Hz}$. Если увеличить мощность лазера, то при $P_{las} = 26.7$ dBm эти значения равны $f_c = 11.11$ kHz и $b_{-1} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ rad}^2/\text{Hz}$.

На частотах отстройки выше f_c преобладает белый шум. Его спектральная плотность мощности описывается выражением

$$S_\varphi = b_0 f^0. \quad (2)$$

График этой функции представляет собой горизонтальную линию. Однако, экспериментальная зависимость спектра фазового шума, показанная на рис. 1, c, сначала идет горизонтально, а затем демонстрирует рост. Это можно объяснить неоднородностью RIN-шума лазера на более высоких частотах отстройки [13]. Анализируя экспериментальные результаты, можно сделать вывод о том, что при мощности лазера $P_{las} = 24.8$ dBm уровень белого шума в широкополосной ОВЛП составляет около $\mathcal{L} = -145.5$ dBc/Hz, что соответствует $S_\varphi = -142.5$ dBrad²/Hz и $b_0 = 5.34 \cdot 10^{-15} \text{ rad}^2/\text{Hz}$, а при мощности лазера $P_{las} = 26.7$ dBm уровень белого шума составляет около $\mathcal{L} = -141$ dBc/Hz, что соответствует $S_\varphi = -138$ dBrad²/Hz и $b_0 = 1.59 \cdot 10^{-14} \text{ rad}^2/\text{Hz}$.

Используя полученные результаты для $P_{las} = 24.8$ dBm, мы определили RIN-шум лазера N_{RIN} следующим образом. Общую спектральную плотность

мощности белого шума ОВЛП можно определить по формуле

$$\rho_0 = \rho_T + \rho_{shot} + \rho_{RIN}, \quad (3)$$

где $\rho_T = 4kT$ — спектральная плотность мощности теплового шума; $\rho_{shot} = 2qI_{ph}R$ — спектральная плотность мощности дробового шума; $\rho_{RIN} = N_{RIN}I_{ph}^2R$ — спектральная плотность мощности шума, вызванного вкладом RIN-шума лазера; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; q — заряд электрона; $I_{ph} = \alpha P_{las}S/2$ — фототок на выходе фотодетектора; α — потери мощности оптического излучения в оптическом тракте, складывающиеся из потерь в модуляторе Маха-Цендера (когда рабочая точка находится в максимуме коэффициента передачи) и в оптоволокне, выраженные в относительных единицах; N_{RIN} — RIN-шум лазера.

Коэффициент b_0 , входящий в формулу (2), связан с ρ_0 следующим выражением: $b_0 = \rho_0/P_{in}$, где P_{in} — мощность СВЧ сигнала на входе ОВЛП. Подставляя из этого выражения ρ_0 в формулу (3), мы получаем уравнение, в котором единственной неизвестной величиной является N_{RIN} . Используя следующие значения параметров экспериментального макета ОВЛП: $T = 293$ K, $R = 50 \Omega$, $\alpha = 0.171$ (что соответствует потерям в модуляторе Маха-Цендера 4.5 dB, суммарным потерям в оптических волокнах 0.18 dB и суммарным потерям на трех соединениях оптических разъемов ≈ 3 dB), $S = 0.8$ A/W, $P_{las} = 302$ mW (что соответству-

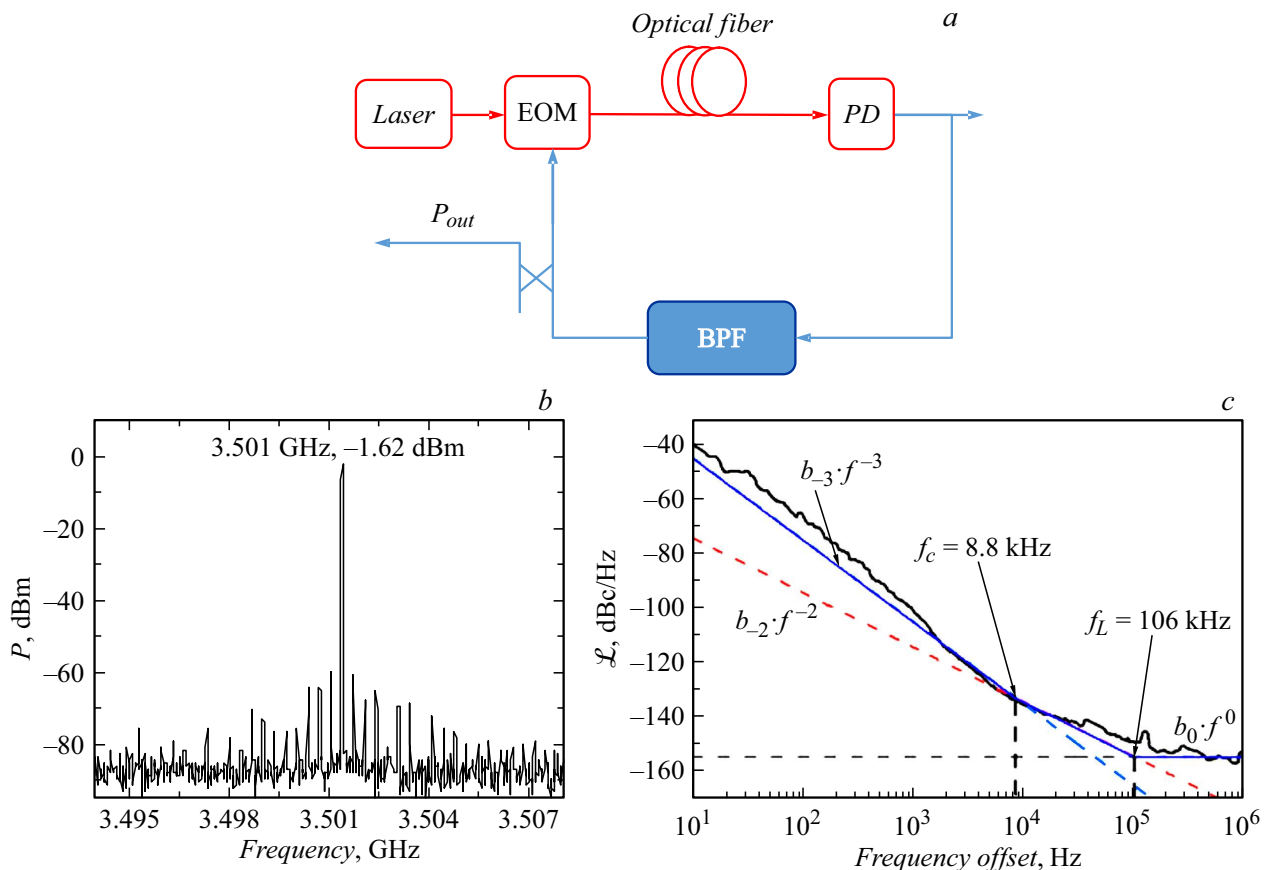


Рис. 2. Схема ОЭГ на основе ОВЛП с положительным коэффициентом передачи (а), спектр генерации ОЭГ (b), спектр фазового шума ОЭГ (c). Измерения проведены при мощности лазера 24.8 dBm.

ет 24.8 dBm); $P_{in} = 10 \text{ dBm}$; а также экспериментально полученное значение $b_0 = 5.34 \cdot 10^{-15} \text{ rad}^2/\text{Hz}$ для $P_{las} = 24.8 \text{ dBm}$, находим значение $N_{RIN} = -146 \text{ dB/Hz}$.

Затем для полученного значения N_{RIN} по формулам (2) и (3) был проведен расчет спектральной плотности белого шума S_ϕ при мощности лазера $P_{las} = 26.7 \text{ dBm}$. В результате расчета были получены значения $b_0 = 1.12 \cdot 10^{-14} \text{ rad}^2/\text{Hz}$ и $S_\phi = -139 \text{ dB rad}^2/\text{Hz}$, что хорошо соответствует результатам измерений (рис. 1, c). Далее это значение N_{RIN} будет использовано для расчета спектра фазовых шумов ОЭГ.

2. Изучение спектров генерации и фазового шума ОЭГ без усилителей

Схема ОЭГ на основе ОВЛП с положительным коэффициентом передачи представлена на рис. 2, а. В ходе измерений использовались оптические волокна SMF-28 длинами от 100 м до 2 км. Мощность лазера изменялась в пределах от 24.8 до 27.1 dBm. Нижний предел обусловлен порогом возникновения автогенерации в кольцевой схеме. Верхний предел обусловлен тем, что при мощности лазера выше 27.1 dBm в ОЭГ квази-

монохроматическая генерация переходила в многочастотную. Для вывода СВЧ сигнала из кольцевой схемы использовался СВЧ направленный ответвитель с коэффициентом отклонения 10 dB. В макете ОЭГ использовался полосно-пропускающий фильтр с центральной частотой 3.5 GHz и полосой пропускания 30 MHz, измеренной по уровню 3 dB. Такая частота была обусловлена тем, что АЧХ ОВЛП имеет локальный максимум на частоте 3.5 GHz (рис. 1, b). Поэтому автогенерация СВЧ сигнала возникала на частоте 3.5 GHz.

Остановимся сначала на результатах, полученных для длины оптоволокна 600 м, потому что при такой длине оптоволокна генератор продемонстрировал самый низкий фазовый шум. На рис. 2, b показан спектр автогенерации, возникавший чуть выше порога при мощности лазера $P_{las} = 24.8 \text{ dBm}$. Видно, что вокруг основной существуют дополнительные шумовые гармоники с мощностью, пониженной примерно на 60 dB. Кроме того, необходимо отметить, что мощность основной гармоники генерации составляла -1.62 dBm . Это означает, что мощность, входящая в управляющий порт модулятора Маха-Цендера, составляет примерно 10 dBm, как и при измерении вносимого фазового шума в ОВЛП. Таким образом, ОВЛП в схеме ОЭГ работает в том же режиме, что и при измерении вносимого фазового шума.

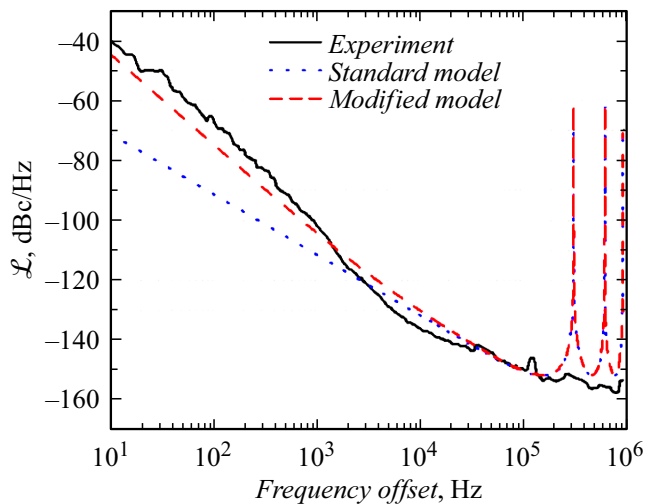


Рис. 3. Спектр фазового шума ОЭГ с пассивным оптическим усилением (сплошная линия), спектр фазового шума, промоделированного по стандартной модели Яо-Малеки (пунктирная линия), спектр фазового шума, промоделированного по модифицированной модели Яо-Малеки (штриховая линия).

На рис. 2, с изображен спектр фазового шума ОЭГ. Из графика видно, что при частоте отстройки 10 kHz фазовый шум ОЭГ оказался достаточно низким и составил -135 dBc/Hz. Этот спектр сначала был проанализирован с помощью феноменологической модели Лисона [14,15]. Спектр был аппроксимирован следующим полиномом: $S_\varphi = \sum_{i=-3}^0 b_i \cdot f^i$, где $b_0 = 3.16 \cdot 10^{-16}$, $b_{-1} = 0$ (так как наклон f^{-1} отсутствует), $b_{-2} = 3.56 \cdot 10^{-6}$, $b_{-3} = 0.031$. Видно, что выше частоты Лисона (которая для ОЭГ рассчитывается как $f_L = 1/\pi\tau$, где τ — время задержки сигнала в „разорванном“ кольце) спектр фазового шума имеет нулевой наклон f^0 , а величина шума составляет $\mathcal{L} = -155$ dBc/Hz (что соответствует $S_\varphi = b_0 \cdot f^0 = -152$ dBrad²/Hz). Эта величина достаточно хорошо согласуется с минимальным фазовым шумом ОВЛП, определенным в предыдущем разделе. Для длины оптоволокна 600 м частота Лисона оказывается равной $f_L = 106$ kHz, как показано на рис. 2, с. Ниже частоты f_L наклон спектра фазового шума изменяется с f^0 на f^{-2} и описывается выражением $S_\varphi = b_{-2} \cdot f^{-2}$. Наклон спектра фазового шума изменяется с f^{-2} на f^{-3} на частоте отстройки $f_c = 8.8$ kHz, что хорошо согласуется с граничной частотой фликкер-шума ОВЛП, определенной в предыдущем разделе. Спектр на таких отстройках описывается выражением $S_\varphi = b_{-3} \cdot f^{-3}$.

Далее нами был проведен численный расчет спектра фазового шума. Такой расчет обычно проводят по модели Яо-Малеки [9]. В этой модели считается, что источниками фазового шума в ОЭГ являются только тепловой шум, дробовый шум и RIN-шум лазера, поэтому спектр

фазового шума рассчитывается по формуле

$$S(f') = \frac{\delta}{(2 - \delta/\tau) - 2\sqrt{1 - \delta/\tau} \cos(2\pi f'\tau)}, \quad (4)$$

где $\delta = \rho_0 \cdot G_A/P_{osc}$ — отношение шум-сигнал ОЭГ, ρ_0 определяется из формулы (3), G_A — коэффициент усиления СВЧ усилителя по мощности (в случае ОЭГ без СВЧ усилителей $G_A = 1$), P_{osc} — мощность генерируемого СВЧ сигнала. Спектр фазового шума, промоделированного по стандартной модели Яо-Малеки, показан пунктирной линией на рис. 3. Видно, что стандартная модель достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами на больших частотах отстройки, однако на частотах отстройки ниже 1 kHz расхождение с экспериментальной кривой достаточно велико. Мы модифицировали модель Яо-Малеки, добавив в модель фликкер-шум ОВЛП. В результате коэффициент шум-сигнал принял следующий вид $\delta = \rho_0 \cdot G_A/P_{osc} + b_{-1} \cdot f^{-1}$, b_{-1} — коэффициент пропорциональности фликкер-шума ОВЛП, который был определен в предыдущем разделе. Результат моделирования спектра фазового шума с помощью модифицированной модели Яо-Малеки представлен штриховой линией на рис. 3. Из рисунка видно, что модифицированная модель описывает спектр фазового шума гораздо лучше, чем стандартная модель из работы [9].

3. Влияние параметров конструкции ОЭГ без усилителей на фазовый шум

Рассмотрим сначала, как влияет мощность лазерного излучения на фазовый шум ОЭГ. На рис. 4, а значками показаны результаты измерений фазового шума на различных отстройках от частоты генерации $f_0 = 3.501$ GHz при различных мощностях лазера. Результаты показывают, что с ростом мощности лазера фазовый шум ОЭГ возрастает. Например, с увеличением мощности лазера от 24.8 до 27 dBm фазовый шум на отстройке 10 kHz увеличивается от -135 до -118 dBc/Hz. Такое поведение фазового шума объясняется тем, что с ростом мощности лазера P_{las} растут шумы ρ_{shot} и ρ_{RIN} , которые входят в формулу (3). В результате растет коэффициент шум-сигнал, который входит в формулу (4).

Для подтверждения полученных экспериментальных результатов был проведен расчет фазового шума ОЭГ по формуле (4) с учетом введенной нами модификации (т.е. учитывая фликкер-шум ОВЛП). Кроме того, отметим, что при проведении расчета нами дополнительно была учтена зависимость коэффициента b_{-1} от мощности лазера P_{las} . Эту зависимость мы нашли из анализа спектров вносимого фазового шума ОВЛП, показанных на рис. 1, с, исходя из того, что при мощности лазера 24.8 dBm (302 mW) значение коэффициента $b_{-1} = 2.5 \cdot 10^{-11}$ rad²/Hz, а при мощности 26.4 dBm (468 mW) коэффициент $b_{-1} = 1 \cdot 10^{-10}$ rad²/Hz. По эти

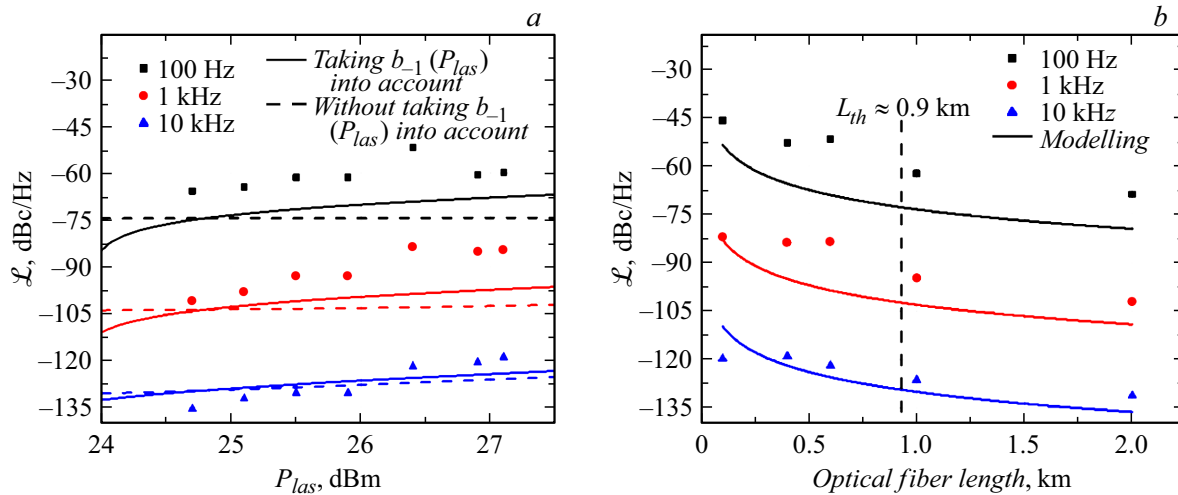


Рис. 4. *a* — зависимости фазового шума от мощности лазера при длине оптоволокна 600 м; *b* — зависимости фазового шума от длины оптоволокна при мощности лазера $P_{las} = 26.4$ dBm.

двум точкам была сделана линейная аппроксимация и определена функциональная зависимость b_{-1} от P_{las} : $b_{-1}(P_{las}) = 4.52 \cdot 10^{-10} \cdot P_{las} - 1.11 \cdot 10^{-10}$, где P_{las} — мощность лазера в ваттах. Далее полученную зависимость коэффициента $b_{-1}(P_{las})$ использовали для расчета зависимости фазового шума от мощности лазера по формуле (4). Результаты расчета показаны на рис. 4, *a* сплошными линиями. Для сравнения был проведен расчет зависимости фазового шума от мощности лазера без учета зависимости коэффициента b_{-1} от P_{las} , результаты которого показаны на рис. 4, *a* пунктирными линиями. Видно, что учет зависимости b_{-1} от P_{las} при моделировании дает лучшее совпадение с экспериментальными результатами. При частоте отстройки 100 Hz результаты моделирования хуже согласуются с экспериментальными результатами, так как при частоте отстройки ниже 1 kHz экспериментально полученный спектр фазового шума имеет наклон немного больше, чем f^{-3} (рис. 3).

Далее было проведено исследование влияния длины оптоволокна на фазовый шум ОЭГ. Необходимо отметить, что мощность лазера P_{las} , при которой начиналась автогенерация, зависела от длины оптоволокна, потому что с ростом длины оптоволокна возрастают потери в ОЭГ, и необходимо увеличивать коэффициент передачи ОВЛП за счет увеличения мощности лазера.

Для измерения фазового шума была выбрана мощность P_{las} , обеспечивающая автогенерацию при всех длинах оптоволокна от 100 м до 2 км. Она составила $P_{las} = 26.4$ dBm. Результаты показаны на рис. 4, *b*. Из графиков видно, что увеличение длины оптоволокна приводит к снижению фазового шума так же, как и у стандартных ОЭГ с усилителями [16].

В настоящей работе используются сравнительно высокие мощности лазерного излучения и большие длины оптического волокна, поэтому оценим порог вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). При

мощности лазера $P_{las} = 26.4$ dBm мощность излучения на входе в оптоволокно составляет $P_{opt} = 18.9$ dBm (77.6 mW). Для такой мощности нетрудно вычислить значение граничной длины оптоволокна SMF-28, выше которого может возникать ВРМБ. Оно показано на рис. 4, *b* вертикальной штриховой линией и составляет $L_{th} \approx 900$ м.

4. Обсуждение результатов

Полученные минимальные значения фазового шума ОЭГ с длиной оптоволокна 600 м были сопоставлены с другими работами по ОЭГ. Результаты сопоставления приведены в таблице. Из таблицы видно, что ОЭГ без усилителей в работе [11] демонстрировал фазовый шум -133 dBc/Hz при отстройке 10 kHz от несущей 1.25 GHz и -130 dBc/Hz при той же отстройке от несущей 10 GHz. Для снижения фазового шума в этой работе использовалось оптоволокно длиной 6 км и частотная модуляция лазера. Кроме того, в этом ОЭГ использовалась дополнительная электронная схема подавления RIN-шума лазера. В работе [12] был сконструирован двухкольцевой ОЭГ с длинами волокон 2.3 и 1.4 км. Генератор демонстрировал фазовый шум -120 dBc/Hz при отстройке 10 kHz от несущей 10 GHz. Сопоставление результатов показывает, что исследуемый в настоящей работе ОЭГ (последняя строчка таблицы) обладает более низким фазовым шумом на отстройке 10 kHz при более простой конструкции и значительно более короткой длине оптоволокна. Однако на частотах отстройки 100 Hz и 1 kHz фазовый шум генератора из работы [10] оказывается немного ниже из-за использования более длинного оптоволокна.

Исходя из данных, взятых из обзорной статьи [3], самый малошумящий ОЭГ с СВЧ усилителем обладает фазовым шумом -143 dBc/Hz на отстройке 10 kHz от

Фазовый шум оптоэлектронных СВЧ генераторов

Длина оптоволоконна/Частота генерации	Фазовый шум, dBc/Hz		
	100 Hz	1 kHz	10 kHz
[11] (6 km)/(1.25 GHz), без усилителей	–80	–105	–133
[11] (6 km)/(10 GHz), без усилителей	–70	–100	–130
[12] (2.3 km)/(10 GHz), без усилителей	–70	–105	–120
[17] (2.2 km)/(4 GHz), с СВЧ усилителем	–	–100	–143
[17] (600 m)/(4 GHz), с СВЧ усилителем	–	–75	–112
[18] (3.2 km)/(4 GHz), с оптическим усилителем	–	–115	–139
[18] (55 m)/(4 GHz), с оптическим усилителем	–	–80	–108
Настоящая работа (600 m)/(3.5 GHz), без усилителей	–65	–101	–135

несущей 4 GHz [17]. В нем использовано оптоволоконно длиной 2.2 km. В той же работе было показано, что при использовании в том же ОЭГ оптоволоконна длиной 600 m фазовый шум на отстройке 10 kHz возрастает до –112 dBc/Hz. Сопоставление этих результатов с результатами настоящей работы, полученными для длины оптоволоконна 600 m, показывает, что исключение СВЧ усилителя из схемы ОЭГ значительно снижает фазовый шум.

Что касается ОЭГ с оптическим усилителем, то, основываясь на данных из того же обзора [3], можно заключить, что самый малошумящий ОЭГ демонстрирует фазовый шум –139 dBc/Hz на отстройке 10 kHz от несущей 4 GHz при длине оптоволоконна 3.2 km [18]. Исследуемый в настоящей работе генератор демонстрирует сопоставимый уровень фазового шума при значительно меньшей длине оптоволоконна.

Заключение

Из проведенного исследования следует, что исключение усилителей из схемы ОЭГ, т.е. использование пассивного оптического усиления, позволяет снизить фазовый шум ОЭГ. Показано, что для снижения фазового шума необходимо уменьшать мощность лазера и увеличивать длину оптоволоконна. Однако при снижении мощности лазера пропадает эффект пассивного оптического усиления в ОВЛП, и автогенерация СВЧ сигнала в ОЭГ становится невозможной. Поэтому мощность лазера и длина оптоволоконна являются конкурирующими параметрами, вследствие чего для построения ОЭГ с низким фазовым шумом необходим правильный подбор этих параметров.

Для описания спектров фазового шума ОЭГ нами была предложена модифицированная модель Яо-Малеки, которая учитывает влияние фликкер-шума ОВЛП и его зависимость от мощности лазера. Такая модификация

позволила более точно описать спектр фазового шума ОЭГ, а также влияние на него мощности лазера.

Таким образом, ОЭГ с пассивным оптическим усилением является малошумящим и имеет перспективы применения в радиолокационных и телекоммуникационных системах.

Финансирование работы

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект „Госзадание“, грант FSEE-2020-0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.A. Savchenkov, V.S. Ilchenko, W. Liang, D. Eliyahu, A.B. Matsko, D. Seidel, L. Maleki. *Opt. Lett.*, **35** (10), 1572 (2010). DOI: 10.1364/OL.35.001572
- [2] М.Л. Городецкий. *Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью* (Физматлит, М., 2011)
- [3] Y.K. Chembo, D. Brunner, M. Jacquot, L. Larger. *Rev. Modern Phys.*, **91** (3), 035006 (2019). DOI: 10.1103/RevModPhys.91.035006
- [4] А.Б. Устинов, И.Ю. Таценко, А.А. Никитин, А.В. Кондрашов, А.В. Шамрай, А.В. Иванов. *Фотоника*, **15** (3), 228 (2021). DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.3.228.237
- [5] А.Б. Устинов, И.Ю. Таценко, А.А. Никитин, А.В. Кондрашов, А.В. Шамрай, А.В. Иванов. *Фотоника*, **15** (4), 334 (2021). DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.4.334.346
- [6] X.S. Yao, L. Maleki. *Electron. Lett.*, **30** (18), 1525 (1994). DOI: 10.1049/el:19941033
- [7] M.E. Belkin, A.V. Loparev, Y. Semenova, G. Farrell, A.S. Sigov. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **53** (11), 2474 (2011). DOI: 10.1002/mop.26304

- [8] K. Mikitchuk, A. Chizh, S. Malyshev. *IEEE J. Quant. Electron.*, **52** (10), 5000108 (2016).
DOI: 10.1109/JQE.2016.2600408
- [9] X.S. Yao, L. Maleki. *JOSA B*, **13** (8), 1725 (1996).
DOI: 10.1364/JOSAB.13.001725
- [10] И.Ю. Таценко, Т.К. Легкова, А.В. Иванов, А.Б. Устинов. *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*, **23** (4), 48 (2020).
DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56
- [11] C.W. Nelson, A. Hati, D.A. Howe, W. Zhou. In: *2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum* (Geneva, Switzerland, 2007), DOI: 10.1109/FREQ.2007.4319233
- [12] W. Zhou, O. Okusaga, C.W. Nelson, D.A. Howe, G. Carter. *Optoelectron. Integrated Circuits X*, **6897**, 68970Z (2008).
DOI: 10.1117/12.760479
- [13] В.Д. Урик, Д.Д. МакКинни, К.Д. Вилльямс *Основы микроволновой фотоники* (Техносфера, М., 2017), с. 376.
[Пер. с англ. V.J. Urick, J.D. McKinney, K.J. Williams. *Fundamentals of Microwave Photonics*. (John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2015)]
- [14] D.B. Leeson. *Proceed. IEEE*, **54** (2), 329 (1966).
DOI: 10.1109/PROC.1966.4682
- [15] E. Rubiola. *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators* (Cambridge University Press, 2008)
- [16] A.B. Ustinov, A.V. Kondrashov, A.A. Nikitin, V.V. Lebedev, A.N. Petrov, A.V. Shamrai, B.A. Kalinikos. *J. Phys.: Conf. Series*, **1326** (1), 012015 (2019).
DOI: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
- [17] A.B. Ustinov, A.A. Nikitin, V.V. Lebedev, A.A. Serebrennikov, A.V. Shamray, A.V. Kondrashov, B.A. Kalinikos. *J. Phys.: Conf. Series*, **1038** (1), 012033 (2018).
DOI: 10.1088/1742-6596/1038/1/012033
- [18] Y. Liu, T. Hao, W. Li, J. Capmany, N. Zhu, M. Li. *Light: Sci. Applications*, **7** (1), 38 (2018).
DOI: 10.1038/s41377-018-0035-8