

Преобразование шумов в оптоэлектронных генераторах СВЧ на линиях задержки

А.Л.Чиж, К.Б.Микитчук

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования шумов оптоэлектронного генератора сверхвысоких частот (СВЧ) на линиях задержки с оптическим усилением. Рассмотрено влияние различных источников шума на параметры оптоэлектронного генератора СВЧ, при этом помимо шумов отдельных его компонентов учтен целый ряд линейных и нелинейных механизмов преобразования шумов оптической несущей в шум СВЧ-сигнала. Показано, что из-за нелинейности энергетической характеристики мощных СВЧ-фотодиодов в оптоэлектронном генераторе происходит преобразование низкочастотных составляющих относительной интенсивности шума излучения лазера в шум СВЧ-сигналов, в результате чего в контуре генератора появляются источники коррелированных амплитудного и фазового шумов.

Ключевые слова: оптоэлектронный генератор СВЧ, амплитудный шум, фазовый шум, спектральная плотность мощности шума, фликкер-шум.

1. Введение

Использование оптических и оптоэлектронных методов генерации позволяет получать синусоидальные сигналы со сверхвысокой частотой (СВЧ) и с низким фазовым шумом. Наиболее перспективными для реализации таких методов применительно к устройствам в модульном исполнении являются оптоэлектронные генераторы СВЧ [1, 2]. По принципу работы данные генераторы относятся к автогенераторам с положительной обратной связью, осуществляемой на основе волоконно-оптической линии задержки или высокодобротного оптического резонатора [3]. Возможность генерации квазигармонического СВЧ-сигнала со сверхнизким фазовым шумом в оптоэлектронных генераторах СВЧ на линиях задержки обусловлена возможностью создания волоконно-оптических линий задержки сигнала с длительностью в десятки микросекунд, что эквивалентно добротности СВЧ-резонаторов свыше 10^6 для X-диапазона частот. Главными преимуществами оптоэлектронных генераторов СВЧ на линиях задержки являются следующие: уровень их фазового шума не зависит от частоты генерации (при условии использования оптоэлектронных компонентов с соответствующей полосой частот) и они имеют высокую устойчивость к электромагнитным помехам и вибрациям.

В современных системах связи, радиолокации и измерительной СВЧ-техники применяются фазовые детекторы, поэтому наиболее важной характеристикой генератора частоты, входящего в их состав, является спектр фазового шума, в то время как спектр амплитудного шума считается малосущественным [1]. Однако в высокодобротных генераторах частоты может происходить взаимное преобразование амплитудного и фазового шумов, когда

в контуре генератора используется, например, усилитель в режиме компрессии усиления, имеющий спектральную плотность мощности собственного шума, зависящую от частоты как $1/f$ [4]. Поскольку источник возмущений в таком случае – один и тот же низкочастотный шумовой процесс, амплитудный и фазовый шумовы становятся коррелированными, причем оба характеризуются зависящей от частоты примерно как $1/f$ спектральной плотностью мощности. Снижение собственного шума усилителя в контуре оптоэлектронного генератора СВЧ является, таким образом, основным способом уменьшения фазового шума. Ранее демонстрировались оптоэлектронные генераторы СВЧ как с полностью электронным, так и с полностью оптическим усилением [2, 5]. Применение оптического усилителя на основе легированного эрбием волокна, с одной стороны, потенциально может обеспечить низкий собственный шум и, следовательно, снизить фазовый шум оптоэлектронного генератора, а с другой стороны, может привести к взаимному преобразованию амплитудного и фазового шумов. В этом случае особое внимание также должно уделяться подавлению амплитудного и фазового шумов оптической несущей [6–8].

Таким образом, при разработке оптоэлектронного генератора СВЧ со сверхнизким фазовым шумом требуется тщательный учет комплекса источников шума, а также ряда механизмов преобразования шумов оптической несущей в фазовый шум на выходе СВЧ-фотодиода в контуре положительной обратной связи генератора. В настоящей работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования шумов оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением.

Для экспериментальных исследований в работе использовался созданный ранее модуль двухконтурного оптоэлектронного генератора СВЧ с полностью оптическим усилением [9], обеспечивающий генерацию на частоте 10 ГГц со сверхнизким уровнем фазового шума (-142 дБн/Гц (децибел от несущей на герц)) на частоте отстройки 10 кГц от СВЧ несущей и низким уровнем дискретных составляющих (-91 дБн) [9]. В модуле оптоэлектронного генератора СВЧ в качестве источника

А.Л.Чиж, К.Б.Микитчук. Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАНБ, Беларусь, 220072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: chizh@oelt.basnet.by

Поступила в редакцию 25 сентября 2020 г., после доработки – 8 декабря 2020 г.

оптического излучения использовался лазерный диод с распределенной обратной связью LDI-1550-DFB-2.5G (La-serscom), а в качестве СВЧ-фотодиодов – мощные фотодиоды Шоттки на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP с диаметром фоточувствительной области 20 мкм [10].

Теоретическое исследование рассматриваемого двухконтурного оптоэлектронного генератора на линиях задержки с оптическим усилением проводится с помощью нелинейной нестационарной модели на основе метода комплексной медленно меняющейся амплитуды сигнала генерации [11]. На каждом обходе генератора учитывается влияние на отсчет сигнала последовательного воздействия компонентов генератора: оптического модулятора Маха–Цендера, волоконно-оптических линий задержки, волоконно-оптического усилителя, СВЧ-фотодиодов и СВЧ-фильтра. При этом учитываются шумы отдельных компонентов генератора, линейные и нелинейные механизмы преобразования шумов оптической несущей, нелинейности компонентов генератора, нестационарность взаимодействия сигнала генерации с шумовыми составляющими в спектре, а также совместное действие различных комбинаций источников шума. Следует отметить, что в работе под термином фликкер-шум понимается собственный шум со спектральной плотностью мощности, зависящей от частоты как $b_{-1}f$, где b_{-1} – весовой коэффициент шума [1].

2. Источники шума

На рис.1 приведена классификация источников шума в оптоэлектронном генераторе СВЧ, в которой помимо шумов отдельных компонентов присутствует обусловленное целым рядом линейных и нелинейных механизмов преобразование шумов оптической несущей в шумы СВЧ-сигнала на выходе СВЧ-фотодиода:

– фазовый шум оптической несущей из-за интерференции многократно переотраженного и/или рассеянного оптического излучения (рассеяние Рэлея и Бриллюэна) преобразуется в аддитивный шум на выходе СВЧ-фотодиода;

– из-за дисперсии в оптическом волокне нарушается детерминированная связь между фазами составляющих модулированного по интенсивности оптического сигнала, что также приводит к преобразованию фазового шума оптической несущей в шумовую составляющую СВЧ-сигнала;

– в фотодиоде происходит преобразование флуктуаций интенсивности оптического излучения в шум СВЧ-сигнала как в результате прямого детектирования, так и из-за нелинейности энергетической характеристики СВЧ-фотодиода.

На рис.2 приведены зависимости от длины основной волоконно-оптической линии задержки спектральной плотности мощности фазового шума на частотах отстройки 1 и 10 кГц от СВЧ несущей для оптоэлектронного генератора с оптическим усилением и частотой генерации 10 ГГц, рассчитанные для различных источников шума. Видно, что главными источниками шума являются шум оптического усилителя, шум, обусловленный дисперсией в оптическом волокне, и мультипликативный фликкер-шум. На частоте отстройки 1 кГц фликкер-шум с весовым коэффициентом $b_{-1} = -110$ дБ определяет фазовый шум выходного сигнала оптоэлектронного генератора и из-за свойства мультипликативности не зависит от времени задержки сигнала в волоконно-оптической линии [11]. Для длин волоконно-оптической линии свыше 10 км основной источник шума – шум оптического усилителя или шум, вызванный дисперсией в оптическом волокне. При частоте отстройки 10 кГц от СВЧ несущей главный источник шума для длин волоконно-оптической линии менее 4 км – шум оптического усилителя, а для длин свыше 4 км к нему добавляется шум, обусловленный дисперсией в оптическом волокне. При частоте отстройки 10 кГц фликкер-шум не оказывает существенного влияния на фазовый шум выходного сигнала, при этом имеется такая длина волоконно-оптической линии задержки, при превышении которой фазовый шум перестает уменьшаться из-за увеличения уровня собственного шума, связанного с совместным влиянием шума оптического усилителя, шума из-за дисперсии и/или рассеяния Рэлея в оптическом волокне.



Рис.1. Классификация источников шума в оптоэлектронных генераторах.

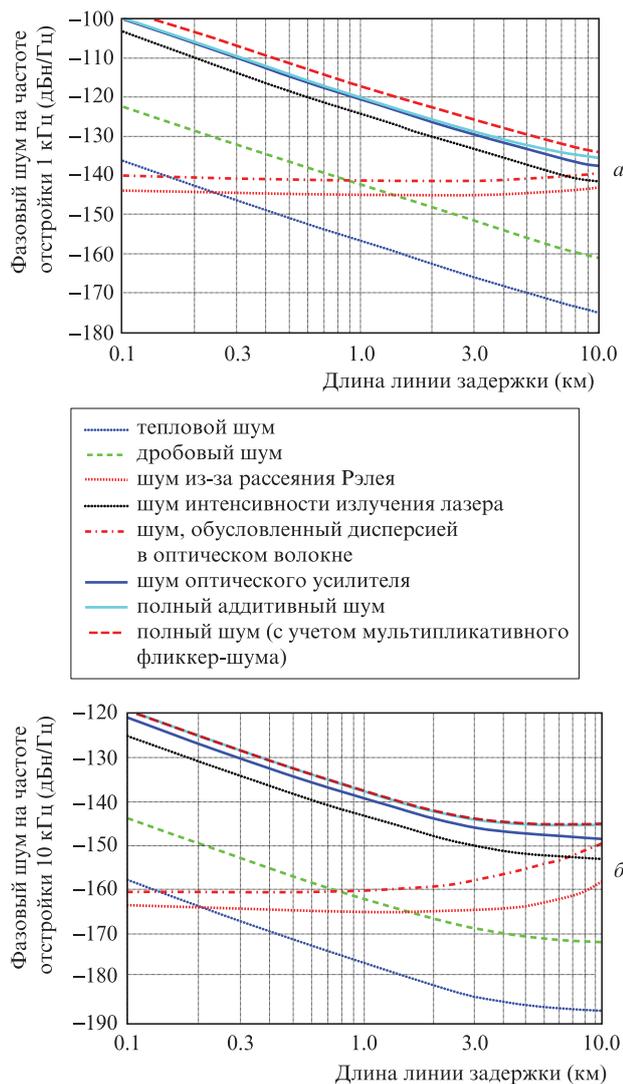


Рис.2. Зависимости от длины волоконно-оптической линии задержки спектральной плотности мощности фазового шума оптоэлектронного генератора на частотах отстройки 1 (а) и 10 кГц (б) от СВЧ несущей для различных источников шума (частота генерации 10 ГГц, ширина полосы пропускания СВЧ-фильтра 2 МГц, весовой коэффициент фликкер-шума $b_{-1} = -110$ дБ). Цветные варианты рис.2, 3, 5 и 7 помещены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

3. Динамические эффекты преобразования шумов

На рис.3 приведены спектральные плотности мощности фазового и амплитудного шумов выходного сигнала оптоэлектронного генератора для различных температур лазерного диода, являющегося источником оптической несущей в контуре оптоэлектронного генератора. В спектре фазового шума на малых частотах отстройки от СВЧ несущей из-за влияния источников мультипликативного фликкер-шума плотность мощности фазового шума обратно пропорциональна третьей степени частоты отстройки, а на больших частотах из-за влияния источников аддитивного шума с равномерной спектральной плотностью плотность мощности фазового шума оказывается обратно пропорциональной второй степени частоты отстройки. Видно, что спектральная плотность мощности фазового шума при отстройке 10 кГц от СВЧ несущей равна -140 дБн/Гц, при этом спектральная плот-

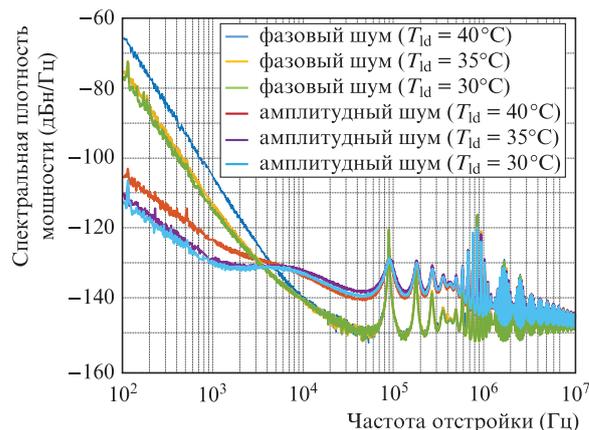


Рис.3. Измеренные спектральные плотности мощности фазового и амплитудного шумов выходного сигнала оптоэлектронного генератора при различных температурах лазерного диода T_{ld} , являющегося источником оптической несущей в контуре оптоэлектронного генератора.

ность мощности дискретных составляющих в спектре генерации не превышает -120 дБн/Гц. При уменьшении рабочей температуры лазера спектральная плотность мощности амплитудного шума на частоте отстройки, близкой к СВЧ несущей, также снижается, что обусловлено уменьшением относительной интенсивности шума излучения лазерного диода, используемого для генерации оптической несущей.

Фазовый и амплитудный шумы оптоэлектронного генератора на частоте отстройки, близкой к СВЧ несущей, определяются преобразованием низкочастотных составляющих относительной интенсивности шума излучения лазера в шумы выходного СВЧ-сигнала. Если более подробно остановиться на механизмах этого преобразования, то требуется рассмотреть комплекс электрооптическое преобразование – оптоэлектронное преобразование. Преобразование интенсивности шума лазерного излучения в СВЧ-фотодиодах является следствием совместного влияния нелинейности зависимости импеданса фотодиода и времени переноса носителей заряда от распределения электрического поля в полупроводниковой структуре СВЧ-фотодиода. По этой причине низкочастотные составляющие относительной интенсивности шума лазерного излучения $RIN_{ld}(\Delta f)$ при малых отстройках от оптической несущей Δf преобразуются в фазовый шум при таких же отстройках Δf от частоты выходного СВЧ-сигнала фотодиода f_{osc} . Спектральные плотности мощности избыточных фазового и амплитудного шумов на выходе СВЧ-фотодиода могут быть представлены в виде [12]

$$L_{\varphi}(\Delta f) = RIN_{ld}(\Delta f)K_{\varphi}(f_{osc}), \quad (1)$$

$$L_a(\Delta f) = RIN_{ld}(\Delta f)K_a(f_{osc}), \quad (2)$$

где $K_{\varphi}(f_{osc})$ – коэффициент преобразования шума интенсивности оптического излучения в фазовый шум СВЧ-сигнала на выходе фотодиода, т.е. коэффициент амплитудно-фазового преобразования шума для частоты f_{osc} (АМ-РМ преобразование); $K_a(f_{osc})$ – коэффициент преобразования шума интенсивности оптического излучения в амплитудный шум СВЧ-сигнала на выходе фотодиода (АМ-АМ преобразование).

Коэффициенты АМ-АМ и АМ-РМ преобразований в СВЧ-фотодиоде были оценены с помощью специально созданной установки для измерения зависимости фазы φ_{pd} и амплитуды A_{pd} выходного СВЧ-сигнала на частоте f от постоянной составляющей оптической мощности P_{opt} следующим образом [9]:

$$K_{\varphi} = P_{opt}^2 \left(\frac{\partial \varphi_{pd}}{\partial P_{opt}} \right)^2 = I_{dc}^2 \left(\frac{\partial \varphi_{pd}}{\partial I_{dc}} \right)^2, \quad (3)$$

$$K_a = \left[\frac{1}{2} \frac{P_{opt}}{A_{pd}} \left(\frac{\partial A_{pd}}{\partial P_{opt}} \right) \right]^2 = \left[\frac{1}{4} \frac{I_{dc}}{P_{mw}} \left(\frac{\partial P_{mw}}{\partial I_{dc}} \right) \right]^2, \quad (4)$$

где P_{mw} – мощность СВЧ-сигнала на выходе СВЧ-фотодиода; I_{dc} – сила постоянного фототока.

На рис.4 приведены коэффициенты АМ-АМ и АМ-РМ преобразований для мощных InGaAs-фотодиодов, входящих в состав оптоэлектронного генератора СВЧ, в зависимости от силы постоянного фототока. Следует отметить, что при использовании одночастотных лазерных диодов LDI-1550-DFB-2.5G (Laserscom) с мощностью генерации 13 дБм на длине волны 1.55 мкм превышение коэффициентом петлевого усиления g_{ss} порогового значения (0 дБ) обеспечивается при фазе модулятора Маха–Цендера 140° – 170° . Это является причиной того, что на входе оптического усилителя формируется сигнал с мощностью ~ 0 дБм и глубиной модуляции $\sim 100\%$, что, в свою очередь, обеспечивает постоянный фототок в диапазоне 10–20 мА. Видно, что коэффициент АМ-АМ преобразования находится в диапазоне от -2 до -6 дБ, при этом коэффициент АМ-РМ преобразования составляет менее -40 дБ для типичных рабочих фототоков в оптоэлектронном генераторе с полностью оптическим усилением.

Из соотношений (1) и (2) следует, что избыточные фазовый и амплитудный шумы возникают из одного источника (низкочастотный шум интенсивности лазерного излучения). Для лазерных диодов с распределенной обратной связью спектральная плотность мощности шума относительной интенсивности излучения зависит от частоты как $1/f$ при малых отстройках от оптической несущей [5]. Принимая во внимание различие более чем в 30 дБ между спектральными плотностями избыточных

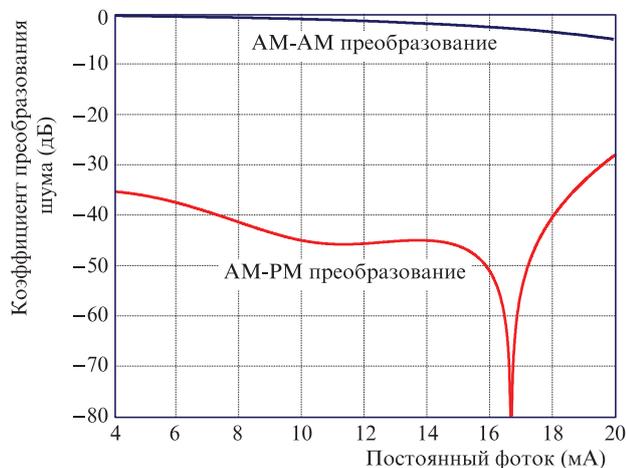


Рис.4. Коэффициенты АМ-АМ и АМ-РМ преобразований шума на частоте 10 ГГц для мощных pin-фотодиодов из InGaAs в зависимости от силы постоянного фототока.

амплитудного и фазового шумов, можно утверждать, что в оптоэлектронном генераторе с оптическим усилением, построенном с использованием рассматриваемых СВЧ-фотодиодов, присутствует достаточно мощный источник амплитудного фликкер-шума. Как показывает моделирование, имеет место нелинейное нестационарное взаимодействие амплитудного и фазового шумов в контуре генератора и их взаимное преобразование.

Для иллюстрации взаимной связи амплитудного и фазового шумов проводилось моделирование оптоэлектронного генератора во временной области с учетом источника мультипликативного фазового фликкер-шума. После расчета реализации комплексной огибающей сигнала генерации вычислялась корреляционная функция флуктуаций амплитуды и фазы. Следует отметить, что при описании динамического режима оптоэлектронного генератора с оптическим усилением удобно пользоваться коэффициентом петлевого усиления в режиме малых сигналов [5, 11]. Для обеспечения стационарной генерации в таком генераторе необходимо, чтобы коэффициент петлевого усиления в режиме малых сигналов g_{ss} находился в диапазоне 0–10.3 дБ, т. к. при $g_{ss} < 0$ дБ не выполняется амплитудное условие генерации, а при $g_{ss} > 10.3$ дБ наступает режим динамических неустойчивостей [11].

На рис.5 показаны взаимные корреляционные функции флуктуаций амплитуды и фазы, рассчитанные для различных значений коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов. Видно, что в режиме стационарной генерации, когда $g_{ss} = 4$ дБ, взаимная корреляционная функция представляет собой монотонно спадающий от нуля шумовой «пьедестал». В случае коррелированных амплитудных и фазовых флуктуаций эта функция должна быть квазипериодической [11]. Видно, что вблизи порога генерации оптоэлектронного генератора взаимная корреляционная функция флуктуаций амплитуды и фазы сигнала генерации немонотонна. Другими словами, флуктуации амплитуды и фазы являются коррелированными. Например, в оптоэлектронном генераторе уровень собственного фазового шума зависит от амплитуды колебаний, которая, в свою очередь, из-за нелинейности модулятора Маха–Цендера зависит от флуктуаций амплитуды.

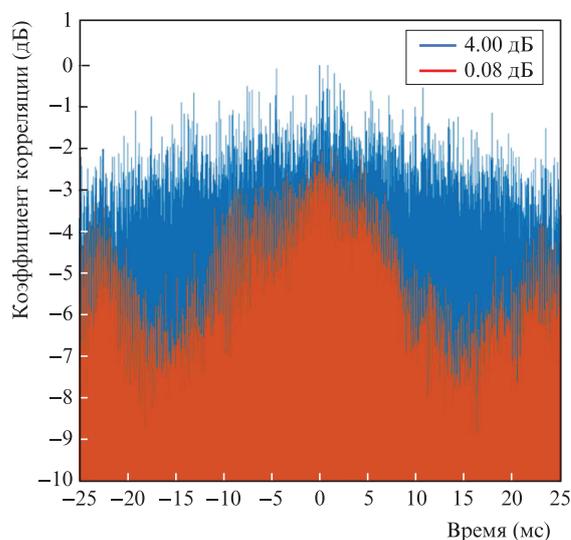


Рис.5. Взаимные корреляционные функции флуктуаций амплитуды и фазы, рассчитанные для различных значений коэффициента петлевого усиления в режиме малых сигналов.

Таким образом, вблизи порога генерации оптоэлектронного генератора ($g_{ss} = 0-3$ дБ) имеет место нелинейное нестационарное взаимодействие амплитудного и фазового шумов в контуре генератора и их взаимное преобразование. Данный динамический эффект генерации усиливается при увеличении весового коэффициента b_{-1} шума с зависящей от частоты как $1/f$ спектральной плотностью мощности.

Принимая во внимание, что относительная интенсивность шума излучения лазера при малых отстройках от несущей преобразуется в основном в амплитудный шум СВЧ-сигнала, наблюдаемое уменьшение амплитудного шума при снижении шума излучения лазера можно считать причиной уменьшения фазового шума. Механизмы взаимного преобразования амплитудного и фазового шумов в оптоэлектронном генераторе с полностью оптическим усилением иллюстрирует рис.6. Видно, что возможны два основных способа уменьшения взаимного влияния амплитудного и фазового шумов. Во-первых, следует использовать оптоэлектронный генератор в режиме стационарной генерации с коэффициентом петлевого усиления свыше 3–4 дБ, т.е. при значительном превышении его порогового значения. Во-вторых, необходим комплекс мер по подавлению источников амплитудного шума (например, использование лазера с низкой относительной интенсивностью шума).

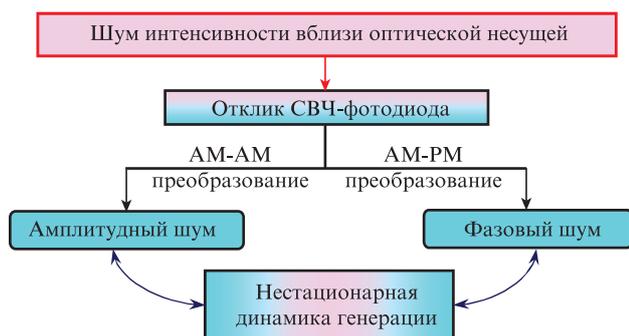


Рис.6. Механизмы взаимного преобразования амплитудного и фазового шумов в оптоэлектронном генераторе с полностью оптическим усилением.

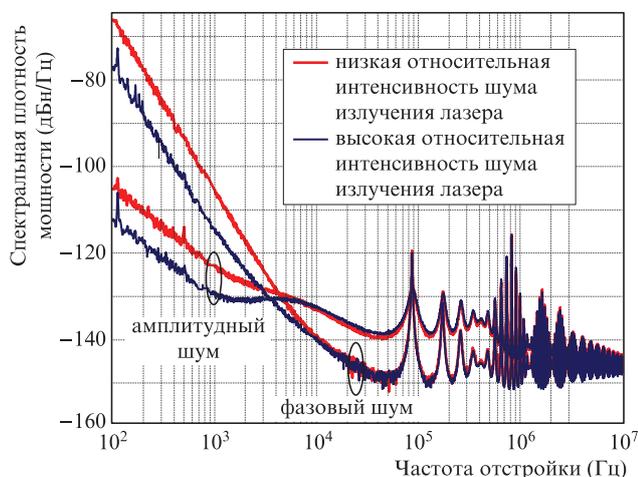


Рис.7. Спектральные плотности мощности фазового и амплитудного шумов, измеренные для оптоэлектронных генераторов с полностью оптическим усилением для случаев без подавления и с подавлением взаимного преобразования амплитудного и фазового шумов.

На рис.7 приведены спектральные плотности мощности фазового и амплитудного шумов, измеренные для оптоэлектронных генераторов с оптическим усилением для случаев без подавления и с подавлением взаимного преобразования амплитудного и фазового шумов. Видно, что одновременное уменьшение относительной интенсивности шума излучения лазерного диода и увеличение коэффициента петлевого усиления посредством увеличения мощности накачки в оптическом усилителе на основе легированного эрбием волокна позволяет снизить фазовый шум выходного сигнала оптоэлектронного генератора на 8–9 дБ для отстроек от СВЧ несущей до 2 кГц.

4. Заключение

Для получения генерации с наиболее низким фазовым шумом в оптоэлектронном генераторе на линиях задержки с оптическим усилением необходимо тщательно учитывать целый ряд источников шума и механизмов преобразования шумов в компонентах генератора. Установлено, что из-за нелинейности энергетической характеристики мощных СВЧ-фотодиодов в оптоэлектронном генераторе происходит преобразование низкочастотных составляющих относительной интенсивности шума излучения лазера в шум СВЧ-сигналов, в результате чего в контуре генератора появляются источники коррелированных амплитудного и фазового шумов. Более того, нелинейное нестационарное взаимодействие амплитудного и фазового шумов в контуре генератора и их взаимное преобразование могут происходить в оптоэлектронном генераторе вблизи порога генерации. Подавление взаимного преобразования шумов достигается снижением относительной интенсивности шума излучения лазерного диода и увеличением коэффициента петлевого усиления посредством увеличения мощности накачки в оптическом усилителе на основе легированного эрбием волокна. Экспериментально показано, что подавление преобразования шумов в оптоэлектронном генераторе позволяет снизить фазовый шум выходного сигнала оптоэлектронного генератора на 8–9 дБ для отстроек от СВЧ несущей до 2 кГц.

- Rubiola E., Cripps S.C. *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008).
- Yao X.S., Chang W.S.C. *Opto-Electronic Oscillators, in RF Photonic Technology in Optical Fiber Links* (New York: Cambridge Univ. Press, 2002).
- Chembo Y. *Rev. Mod. Phys.*, **91**, 035006 (2019).
- Boudot R., Rubiola E. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **59**, 12 (2012).
- Devgan P., Urlick V., Diehl J., Williams K. *J. Lightwave Technol.*, **27**, 15 (2009).
- Крючков Д.С., Жаднов Н.О., Кудяров К.С., Вишнякова Г.А., Хабарова К.Ю., Колачевский Н.Н. *Квантовая электроника*, **50**, 6 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 6 (2020)].
- Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. *Proc. 2017 Int. Conf. on Noise and Fluct.* (Vilnius, 2017).
- Афоненко А.А., Дорогуш Е.С., Мальшев С.А., Чиж А.Л. *Квантовая электроника*, **45**, 11 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 11 (2015)].
- Чиж А.Л., Микитчук К.Б., Скоторенко И.В. *Квантовая электроника*, **51**, 254 (2021) [*Quantum Electron.*, **51**, 254 (2021)].
- Chizh A., Malyshev S., Mikitchuk K. *Proc. 2015 Int. Topical Meeting on Microwave Photonics* (Pahos, 2015).
- Mikitchuk K., Chizh A., Malyshev S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **52**, 10 (2016).
- Eliyahu D., Seidel D., Maleki L. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, **56**, 2 (2008).