

УДК 53.088.23; 535.247.4  
PACS 42.55.Wd, 42.50.Lc

## Измерение шумов волоконно-оптических источников излучения

С. С. Стариков<sup>a</sup>, О. Л. Кель<sup>b</sup>, И. Л. Вольхин<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15  
email: volkhin@psu.ru

<sup>b</sup> ПАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания  
614990, Пермь, ул. 25 Октября, 106  
email: kel@ppk.perm.ru

Разработана методика измерения шумов волоконно-оптических источников излучения. Создана экспериментальная установка для проведения указанных измерений. Анализ источников шума усилителей спонтанной эмиссии показал, что основным источником является фазовый шум спонтанного излучения. При регистрации оптического излучения в фотоприёмнике в выходном электрическом сигнале появляются дополнительные шумы. В нём к шумам источника излучения добавляются дополнительные шумы фотоприёмника: дробовый шум, возникающий при преобразовании оптического сигнала в электрический и тепловой шум элементов преобразователя. Для разделения фазовых шумов спонтанного излучения и шумов фотоприёмника применяется анализатор спектра. При измерениях происходит запись двух спектров шума: суммарного шума усилителя спонтанной эмиссии и фотоприёмника и только одного фотоприёмника. В результате математической обработки выделяется фазовый шум источника излучения. Усилитель спонтанной эмиссии работает в составе волоконно-оптического гироскопа. Для уменьшения шумов применяют интегральный фазовый модулятор и синхронный детектор, работающие на частоте 100 кГц. Поэтому в настоящих исследованиях анализ шумов производится в узком спектральном диапазоне вблизи указанной частоты. Таким образом, были измерены относительные уровни оптических шумов в полосе пропускания 1 Гц нескольких усилителей спонтанной эмиссии. Они оказались на уровне порядка  $-130$  дБ по сравнению с интенсивностью полезного сигнала. Затем были исследованы относительные уровни оптических шумов источников с различной полосой излучения. Установлено, что с увеличением ширины полосы излучения относительная величина оптических шумов уменьшается. Полученные результаты качественно совпадают с результатами теоретических расчётов. Это подтверждает правильность разработанной методики измерения относительного уровня оптических шумов квантовых генераторов.

**Ключевые слова:** шумы; измерение; излучение

*Поступила в редакцию 04.02.2019; принята к опубликованию 12.04.2019*

## Noise measurement of fiber-optical radiation sources

S. S. Starikov<sup>a</sup>, O. L. Kel<sup>b</sup>, I. L. Volkhin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm  
email: volkhin@psu.ru

<sup>b</sup> Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, 25th October St., 106, 614990, Perm  
email: kel@ppk.perm.ru

Noise measurement technique of fiber-optical radiation sources was developed. The experimental device for carrying out the specified measurements was done. The analysis of noise sources in spontaneous emission amplifiers showed that the main source is phase noise of spontaneous radiation. When optical radiation is detected in the photodetector, additional noise appears in the output electrical signal. In it, additional noise of the photodetector is added to the noise of radiation source: shot noise arising from the conversion of optical signal into electrical and thermal noise of the converter elements. Spectrum analyzer is used to separate phase noise of spontaneous emission and noise of photodetector. The measurements record two noise spectra, one – the total noise of spontaneous emission amplifier and photodetector, the other – the noise spectrum of one photodetector. As a result of mathematical processing phase noise of radiation source is allocated. The spontaneous emission amplifier works as a part of fiber-optical gyroscope. The integrated optical phase modulator circuit and synchronous detector operating at frequency of 100 kHz are used to reduce noise. Therefore in these researches noise analysis is performed in the narrow spectral range near the specified frequency. Thus, the relative optical noise levels in of 1 Hz bandwidth for several spontaneous emission amplifiers were measured. They were on the order  $-130$  dB in compared to the intensity of effective signal. Then relative levels of optical noise from sources with different emission bands were investigated. It has been established that with increase in emission bandwidth, the relative magnitude of optical noise decreases. The results obtained qualitatively coincide with results of theoretical calculations. This conforms the correctness of developed methodology for measuring the relative optical noise level of quantum generators.

**Keywords:** noise; measurement; radiation

Received 04.02.2019; accepted 12.04.2019

doi: 10.17072/1994-3598-2019-1-66-73

## 1. Введение

В настоящее время точность определения положения тела в пространстве играет важную роль. С этой целью широко используются навигационные приборы для определения координат в пространстве, такие как акселерометры и гироскопы [1]. Они являются основой инерциальной ориентации и навигации. Наиболее распространенными на данный момент являются оптические гироскопы, действие которых основано на эффекте Саньяка. В данных приборах навигационного класса точности используются суперлюминесцентные волоконные источники оптического излучения (СВИОИ), построенные на основе оптического волокна, легированного ионами эрбия (ЭСВИОИ) [2].

Благодаря использованию ЭСВИОИ в качестве широкополосного источника оптического излучения в волоконно-оптическом гироскопе (ВОГ) удастся добиться повышения стабильности масштабного коэффициента волоконного интерферометра и точности за счет снижения дрейфов ВОГ и уменьшения шумов. Источники излучения являются одним из ключевых устройств волоконно-оптических систем. Их работа зависит от многих факторов, одним из которых является наличие шумов – неконтролируемых сигналов, определяющих минимальный уровень оптического сигнала, который может быть воспринят приёмным устройством. Это влияет на максимально дальность передачи сигнала.

В любой области электронной техники значение предельно различимого слабого сигнала опре-

деляется отношением сигнал/шум. Отношение сигнал/шум, равное единице, соответствует порогу обнаружения полезного сигнала в его смеси с шумом [3]. Даже если измеряемая величина не мала, шум снижает точность измерения. Устранение и минимизация шумов в проектируемых схемах и системах – одна из наиболее трудных, но в то же время актуальных инженерных задач. Общих правил для этого не существует, поэтому приходится многие решения проверять опытным путем.

Целью настоящей работы является разработка методики определения шумовых характеристик волоконно-оптических источников излучения.

## 2. Усилитель спонтанной эмиссии

Усилитель спонтанной эмиссии (УСЭМ), использующийся в ВОГ представляет собой квантовый волоконно-оптический генератор, собранный на основе эрбиевого усилителя с цепью оптической положительной обратной связи. Схема энергетических уровней эрбия представлена на рис. 1 [4]. Слева от рисунка приведена шкала энергий в обратных см, справа – энергетические уровни. Показаны резонансные длины волн поглощения и излучения для трёх нижних уровней энергии. Эрбиевые усилители работают по классической трёхуровневой схеме: при интенсивной лазерной накачке с длиной волны 980 нм электроны со стабильного уровня  $^4I_{5/2}$  переходят на уровень  $^4I_{11/2}$ . Время их жизни на этом уровне короткое – порядка 1 мкс, и они переходят на уровень  $^4I_{13/2}$  с испусканием фононов. Этот уровень является метастабильным с большим временем жизни порядка

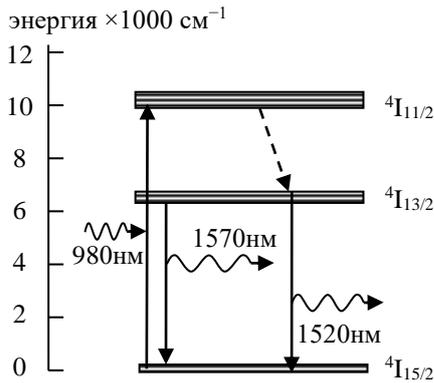


Рис. 1. Схема энергетических уровней эрбия

10 мс. Поэтому при соответствующей мощности накачки возникает инверсная заселённость энергетических уровней ионов эрбия. Следует отметить, что стабильный и метастабильный уровни разделены на штарковские подуровни энергии. В результате при релаксации электронов возникает 56 разрешённых переходов, и спектр испускаемых квантов находится в интервале длин волн  $1570 \div 1520$  нм, как показано на рис. 1.

Основным элементом (активной зоной) волоконно-оптических усилителей является участок оптоволокна из кварцевого стекла ( $\text{Si}^{4+}\text{O}_2^{2-}$ ), легированного ионами эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ) [5]. Длина активного волокна составляет обычно  $5 \div 8$  м. Его продольное сечение показано на рис. 2. Эрбиевое волокно, как и обычное одномодовое оптическое волокно, имеет сердцевину диаметром  $3 \div 6$  мкм, легированную германием и ионами эрбия. Концентрация ионов эрбия составляет  $10^{17} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Сердцевина окружена оболочкой из чистого кварца диаметром 125 мкм. Защитное покрытие волокна диаметром 250 мкм имеет большой коэффициент преломления и эффективно выводит из оболочки постороннее излучение.

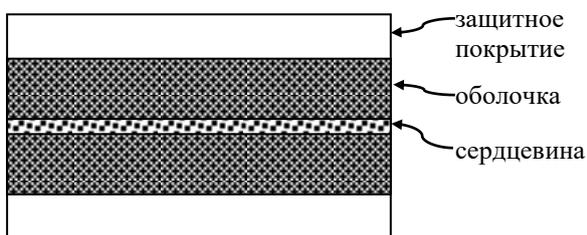


Рис. 2. Структура активного оптического волокна

Процессы, происходящие в активной области оптического волокна, представлены на рис. 3. Электрон может спонтанно перейти с уровня  ${}^4I_{13/2}$  в более низкое энергетическое состояние на уровень  ${}^4I_{15/2}$ , испустив при этом квант света (рис. 3, з). Спонтанные переходы являются случайными и не зависят от внешнего электромагнитного поля. Излученные фотоны имеют случайные

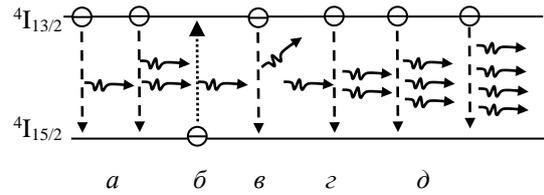


Рис. 3. Процессы в активной области оптического волокна: (а) – затравочная волна; (б) – поглощение; (в) – стимулированное излучение; (г) – спонтанное излучение; (д) – усиленная волна

частоту (в пределах полосы спектра испускания), фазу, поляризацию и направление распространения. Спонтанное излучение некогерентное и создаёт шумы на выходе УСМ.

Другим оптическим процессом является поглощение кванта света, сопровождающееся переходом электрона с уровня  ${}^4I_{15/2}$  на уровень  ${}^4I_{13/2}$  рис. 3, в.

В основе работы УСЭм лежит явление индуцированного излучения [6,7]. Возникшая в результате спонтанного перехода затравочная волна рис. 3, а поляризованная в направлении поляризации оптического волокна и распространяющаяся вдоль него может инициировать процесс вынужденного перехода второго электрона рис. 3, б. Испускаемый фотон идентичен инициирующему фотону – они имеют одинаковые частоту, фазу, поляризацию и направление распространения.

При распространении световой волны вдоль активной среды интенсивность индуцированного излучения экспоненциально возрастает:

$$I = I_0 \exp(\alpha x) \quad (1)$$

Коэффициент  $\alpha$  называют коэффициентом усиления активной среды.

В реальной активной среде происходит также обратный процесс – снижение интенсивности излучения в результате поглощения, а также при рассеянии на неоднородностях или примесях, которые преобразуют энергию излучения в тепло. Эти потери учитываются в коэффициенте  $\beta$ . Тогда интенсивность когерентного излучения в среде определяется как:

$$I = I_0 \exp[(\alpha - \beta)x] \quad (2)$$

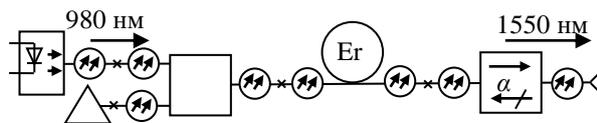
Если  $\alpha > \beta$ , то интенсивность световой волны растёт при прохождении через активную область и на выходе появляется усиленная волна рис. 3, д).

Ширина спектра излучения квантового генератора на уровне половинной мощности  $\Delta\lambda$  определяет монохроматичность его излучения, в том числе время когерентности  $\tau_{\text{ког}} = \lambda^2 / (c\Delta\lambda)$  и длину продольной когерентности  $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$ . Длина продольной когерентности – это максимальная разность хода интерферирующих лучей, при которой ещё наблюдается их интерференция. Таким обра-

зом, чем уже спектр излучения, тем больше время и длина когерентности.

Для УСЭМ  $\Delta\lambda$  составляет порядка 10 нм на  $\lambda = 1550$  нм и  $l_{\text{ког}} \approx 0.24$  мм, что позволяет исключить нежелательную интерференцию оптических волн, уменьшавшую точность определения координат волоконно-оптическими гироскопами.

Схема оптической части УСЭМ приведена на рис. 4. Излучение лазерного диода накачки с длиной волны 980 нм поступает на вход оптического соединителя, который является спектральным мультиплексором длин волн 980 нм и 1550 нм. С его выхода по сердцевине оптического волокна происходит боковая накачка активной области катушки эрбиевого волокна, которая является усилителем. Затравочная волна, возникшая в результате спонтанного перехода после включения УСЭМ усиливается и через оптический вентиль поступает на оптический выход (розетку оптического соединителя). Оптический вентиль пропускает волну в прямом направлении и ослабляет отражённые волны, нарушающие работу генератора. В квантовом генераторе на основе УСЭМ затравочная волна усиливается и проходит через активную область эрбиевого волокна только один раз. Затем происходит усиление другой затравочной волны, кото-



Условные графические обозначения:



Рис. 4. Схема квантового генератора на основе усилителя спонтанной эмиссии

рая отличается от первой своей поляризацией и, в пределах спектра излучения, длиной волны. Таким образом, выходное оптическое излучение является деполаризованным и более широкополосным по сравнению с лазерным. К нижнему по рис. 4 входу оптического соединителя подключается оптическая нагрузка. В зависимости от решаемых задач это может быть либо поглощающая нагрузка (аттенуатор или оптический вентиль), либо зеркало.

Типичная нормированная спектральная характеристика УСЭМ показана на рис. 5. Форма спек-

тральной характеристики обычно близка к форме гауссовой кривой. Максимальная мощность УСЭМ на основе оптического волокна, легированного эрбием, достигается на длине волны  $\lambda_{\text{max}}=1550$  нм или вблизи неё. Ширина спектра оптического излучения  $\Delta\lambda \sim 10$  нм. Вблизи максимума мощность излучения с течением времени изменяется незначительно, только за счёт шумов. Измерение уровня шумов является важной задачей. Её решение позволяет конструкторам и технологам разработать и создать УСЭМ с минимальным уровнем шума.

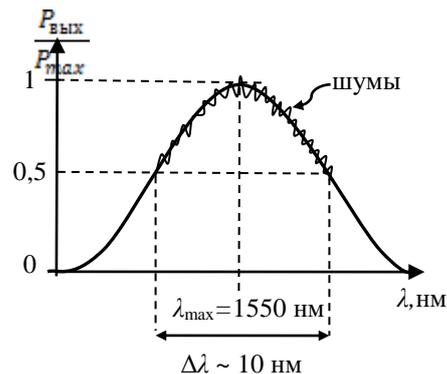


Рис. 5. Нормированная спектральная характеристика усилителя спонтанной эмиссии

### 3. Исследование шумов волоконно-оптических источников излучения

#### 3.1. Основные источники шума в волоконно-оптических гироскопах

Основными источниками шума в ВОГ являются активные элементы с нелинейными характеристиками: источники оптического излучения – усилители спонтанной эмиссии, фотоприёмники и усилитель электрического сигнала с выхода фотоприёмника.

На рис. 6 представлена схема, иллюстрирующая основные составляющие шумов в активных элементах ВОГ. Из рисунка видно, что источника-

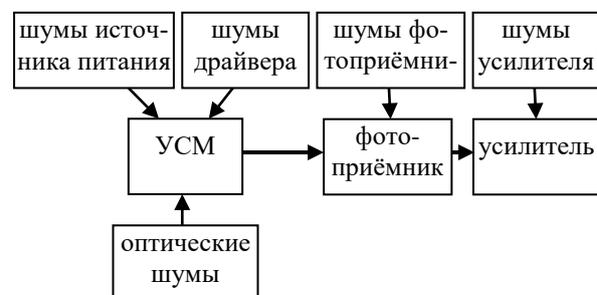


Рис. 6. Источники шума в активных элементах ВОГ

ми шума УСЭМ являются электрические (шумы

источника питания и драйвера) и оптические шумы. Зашумленный сигнал с выхода УСЭМ поступает на фотоприёмник, в котором к нему добавляется шум самого фотоприёмника. Дополнительным источником является шум усилителя электрических сигналов. Таким образом, результирующий спектр шумового сигнала становится очень сложным. Для уменьшения влияния шумов на точность определения места расположения гироскопа в пространстве оптический сигнал модулируется специальным устройством – интегрально-оптическим фазовым модулятором на частоте  $f_{\text{мод}} = 100$  кГц. При применении синхронного детектирования сигнала на этой частоте сужается спектр усиливаемого сигнала и уменьшается уровень шумов по сравнению с таковым при усилении сигнала на постоянном токе. При модернизации ВОГ могут использоваться различные оптические квантовые генераторы с различным спектральным распределением шумов. На работу ВОГ влияют только компоненты, находящиеся вблизи частоты, на которой происходит модуляция и детектирование сигнала в ВОГ. Поэтому в непрерывном спектре шумов необходимо выделить окно измерений вблизи частоты  $f_{\text{мод}}$ , на которой происходит модуляция и детектирование сигнала, так как они мешают работе ВОГ только на этой частоте.

В указанном окне измерений вклад шумов источника питания и драйвера на несколько порядков меньше вклада оптических шумов, и поэтому их можно не учитывать.

В настоящей работе сигнал с выхода фотоприёмника поступал на вход анализатора спектра PXA Signal analyzer N9030A, с малошумящим предварительным усилителем. Средний уровень шумов составляет  $-171$  дБм согласно технической документации на прибор [8]. Это на несколько порядков ниже уровня шумов УСЭМ и фотоприёмника, поэтому их также можно не учитывать.

Таким образом, основной вклад в окне измерений вносят оптические шумы УСЭМ и фотоприёмника, которые присутствуют в измеряемом анализатором спектра электрическом сигнале.

В экспериментах был использован фотоприёмник PIN-FET фотоприёмник фирмы LDI, по характеристикам наиболее подходящий для измерений.

### 3.2. Относительная интенсивность шума

На рис. 7 представлена временная диаграмма интенсивности электрического сигнала на выходе фотоприёмника. В ней имеется постоянная составляющая  $P_0$  – мощность продетектированного оптического сигнала и флуктуации этой мощности  $\delta P(t)$ . Шумы могут иметь различный спектральный состав, а системы регистрации – различную полосу пропускания. Для устранения неопределённости измерений предположим, что шум является белым, т.е. постоянным для всех частот, а уровень

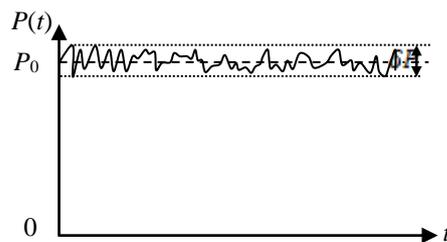


Рис. 7. Временная диаграмма сигнала на выходе фотоприёмника

мощности шума приведём в расчёте на ширину полосы пропускания 1 Гц. Таким образом, вводится понятие относительной интенсивности шума Relative Intensity Noise (RIN) [8,9]:

$$RIN \left[ \frac{1}{\text{Гц}} \right] = \frac{\langle \delta P(t)^2 \rangle}{P_0^2 \Delta f_p}, \quad (3)$$

где  $\Delta f_p$  – полоса пропускания системы регистрации шума.

Величину RIN удобно измерять в единицах дБ/Гц, в этом случае формула (3) преобразуется:

$$RIN \left[ \frac{\text{дБ}}{\text{Гц}} \right] = 10 \lg \left( \frac{\langle \delta P(t)^2 \rangle}{P_0^2} \right) [\text{дБ}] - 10 \lg \Delta f_p [\text{Гц}], \quad (4)$$

Согласно [9], факторы, влияющие на RIN, состоят трёх частей:

1. Шумы фотонов Shot Noise (SN) или так называемый «дробовый шум» возникает в фотоприёмнике при преобразовании оптического сигнала в электрический. Он связан с корпускулярно-волновой природой света. Этот шум зависит только от квадратного корня мощности оптического сигнала:

$$SN \sim \frac{1}{\sqrt{P}}. \quad (5)$$

2. Фазовый шум УСЭМ является шумом спонтанного излучения, а его спектр является автокорреляцией оптического спектра. Она начинается с нулевой частоты, и его ширина имеет тот же поря-

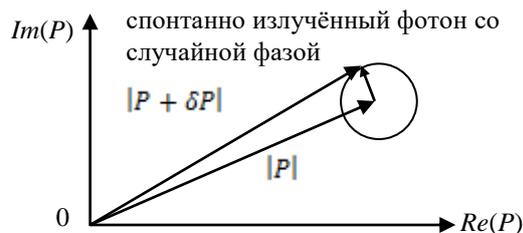


Рис. 8. Диаграмма иллюстрирующая интенсивность и фазовый шум спонтанного излучения

док величины, что и оптический спектр. Это так называемый избыточный оптический шум  $RIN_{opt}$ . На рис. 8 показана диаграмма поясняющая возникновение фазовых шумов.

$RIN_{opt}$  возникает из-за собственных колебаний между частотами оптического спектра, каждое из которых имеет случайную фазу и изменяет  $RIN$ :

$$RIN_{opt} \sim \frac{1}{\sqrt{\Delta f_{oc}}} \quad (6)$$

здесь  $\Delta f_{oc}$  – ширина полосы излучения УСЭМ.

3. Температурные шумы Thermal Noise ( $TN$ ) преобразователя ток–напряжение фотоприёмника

$$TN \sim \frac{1}{P\sqrt{TR}}, \quad (7)$$

где  $T$  – температура в градусах Кельвина,  $R$  – сопротивление резистора нагрузки фотоприёмника.

Все три фактора вносят свой вклад в  $RIN$ . Авторы работы [9] показали, что вклад фазовых шумов в относительную интенсивность оптических шумов на порядок больше, чем вклад дробовых шумов, и на два порядка выше температурных.

Таким образом, при измерении шумов необходимо учитывать ширину излучения  $\Delta f_{oc}$  УСЭМ и ширину полосы пропускания системы регистрации шума  $\Delta f_p$ .

### 3.3. Методика исследования оптических шумов

С учётом изложенного выше,  $RIN_{opt}$  следует находить на частоте работы фазового модулятора  $f_{мод} = 100$  кГц. Окно измерений (полоса пропускания анализатора спектра)  $\Delta f_p = 110 - 90 = 20$  кГц, было выбрано нами с учётом удобства анализа шумов вблизи частоты  $f_{мод}$ . В этой же полосе находится и полоса пропускания усилителя ВОГ. Как было отмечено выше, шумы в остальных частях спектра на работу ВОГ не влияют и их измерение не представляет практического интереса.

Схема проведения измерений оптических шумов УСЭМ приведена на рис. 9.

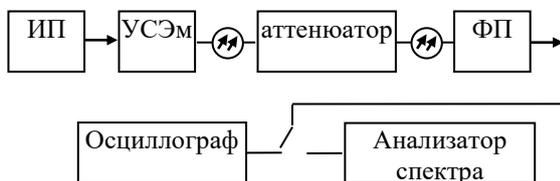


Рис. 9. Схема проведения измерений

Первым этапом измерения оптических шумов УСЭМ является настройка аппаратуры. Задаётся напряжение источника питания ИП1 для УСЭМ равное 5 В и ИП2 модуля фотоприёмника ФП – 24 В. Выход ФП подключается к входу осцилло-

графа. С помощью регулируемого оптического аттенюатора постоянная составляющая напряжения на выходе ФП устанавливается равной 1 В. Затем сигнал с выхода ФП переключается на вход анализатора спектра. Измеряется и записывается в память анализатора спектр шумов в интервале 0÷1 МГц.

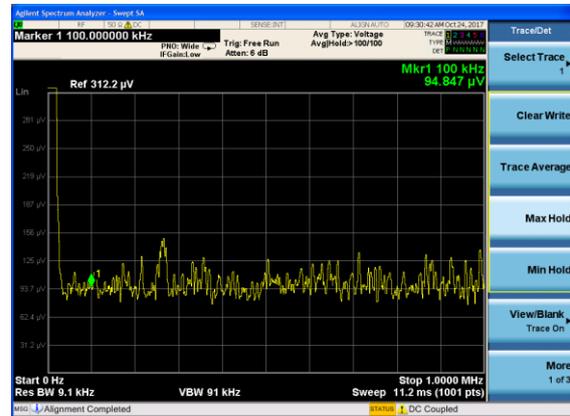


Рис. 10. Спектрограмма распределения максимальных напряжений шумов

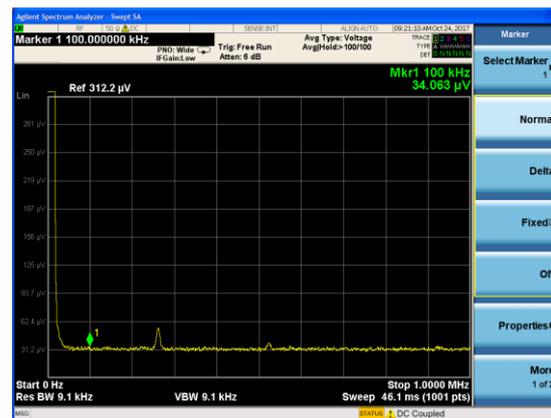


Рис. 11. Спектрограмма распределения среднего уровня напряжений шумов

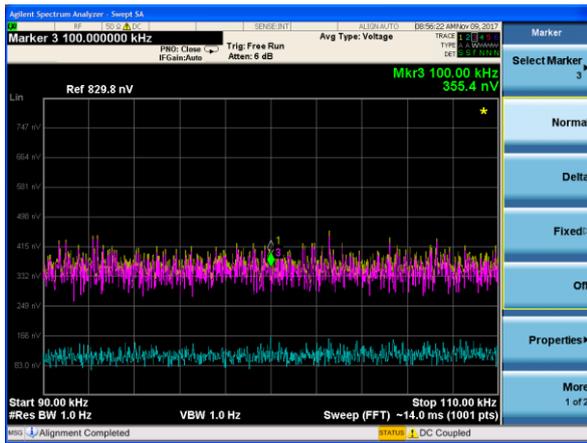
Маркер настраивается на частоту 100 кГц и измеряется напряжение шумов максимальное  $U_{max}$  спектрограмма на рис. 10 и среднее  $U_{ave}$  – рис. 11. Источник питания УСЭМ выключается и снимается спектр шумов фотоприёмника.

Программное обеспечение анализатора спектра позволяет производить различные виды математической обработки полученных спектров, в частности вычитать спектры сигналов. Таким способом на частоте 100 кГц было проведено квадратичное вычитание из смешанного сигнала шума УСЭМ и фотоприёмника сигнала шума одного фотоприёмника. В результате удалось выделить сигнал шума УСЭМ и измерить его напряжение. Так были получены величины  $U_{max}^*$  – максимальное и  $U_{ave}^*$  – среднее напряжение шумов УСЭМ. Результаты измерений для трёх квантовых генераторов приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Результаты измерения шумов УСМэ**

| УСЭМ | $U_{\max}$ , мВ | $U_{\text{ave}}$ , мВ | $U_{\max}^*$ , мВ | $U_{\text{ave}}^*$ , мВ |
|------|-----------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| №498 | 94              | 34                    | 72                | 27                      |
| №451 | 111             | 33                    | 101               | 30                      |
| б/н  | 144             | 41                    | 118               | 38                      |

Результаты показывают, что УСЭМ 120Ц №498 имеет наименьшее значение амплитуды шумов в обоих режимах анализа за счет уменьшенных шумов источника тока лазерного диода накачки. Поэтому шумовые характеристики данного УСЭМ должны быть лучше остальных.



**Рис. 12. Спектрограмма распределения среднего уровня напряжения шумов: верхняя – УСЭМ и фотоприёмника; нижняя – фотоприёмника**

Для вычисления  $RIN_{\text{opt}}$  окно измерений было сужено до  $\Delta f_p = 110 - 90 = 20$  кГц, вблизи  $f_p = 100$  кГц. На рис. 12 приведены две спектрограммы: верхняя  $U_{\text{ave}}$  при включенном УСЭМ №498, нижняя – при выключенном. Измерено напряжение шумов  $U_{\text{ave}}^*$  для полосы частот  $\Delta f_p = 1$  Гц. Аналогичные исследования выполнены с УСЭМ №451. Следует отметить, что фотоприёмник работал на квадратичном участке своей вольт-амперной характеристики, поэтому измеренные напряжения пропорциональны мощности сигнала шумов. Тогда в формуле (4) второй член  $10\lg(\Delta f_p)$  обращается в ноль при  $\Delta f_p = 1$  Гц. Первый член  $10\lg(\langle \delta P(t)^2 \rangle / P_0^2)$  упрощается до  $10\lg(U_{\text{avr}}^*)$ , поскольку при настройке постоянная составляющая напряжения на выходное фотоприёмника была установлена равной 1 В и поэтому  $P_0^2 = 1$ . Результаты расчётов представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты измерения  $RIN_{\text{opt}}$  УСМэ**

| УСЭМ | $U_{\max}^*$ , нВ | $\Delta f_p$ , Гц | $RIN_{\text{opt}}$ [дБ/Гц] |
|------|-------------------|-------------------|----------------------------|
| №498 | 361.0             | 1                 | -128                       |
| №451 | 355.4             | 1                 | -129                       |

Из табл. 2 видно, что наиболее малошумящим является УСЭМ 120-Ц №498. Измерения проводились анализатором спектра PXA Agilent technologies N9030A, который согласно инструкции по эксплуатации имеет погрешность измерений  $\pm 0.19$  дБ [8]. Таким образом, сравнение результатов измерений  $RIN_{\text{opt}}$  является корректным.

### 3.4. Исследование зависимости оптических шумов от полосы спектра излучения источника

В работе [9] показано, что относительная интенсивность шума  $RIN_{\text{opt}}$ , являясь фазовым шумом, не зависит от мощности по сигналу, однако ширина полосы излучения источника согласно (6) может влиять на значение его величины. Она обратно пропорциональна ширине полосы излучения источника. Для проверки данной теоретической зависимости определены значения  $RIN_{\text{opt}}$  для источников излучения с разными  $\Delta\lambda$ . Результаты приведены в табл. 3.

**Таблица 3. Результаты измерения  $RIN$  источников излучения с различными  $\Delta\lambda$**

| УСЭМ           | $U_{\max}^*$ , нВ | $\Delta\lambda$ , нм | $RIN$ [дБ/Гц] |
|----------------|-------------------|----------------------|---------------|
| EXFO FLS-2600B | 3071.0            | 0.13                 | -110          |
| УСЭМ №451      | 355.4             | 7                    | -129          |
| УСМ б/н        | 324.77            | 10                   | -130          |
| SLD            | 229.79            | 30                   | -133          |

Как и предполагалось, с увеличением ширины полосы излучения величина  $RIN_{\text{opt}}$  уменьшается, однако данный эксперимент проводился при отсутствии эталона. Следовательно, оценка результатов измерений выполнена только качественно.

На рис. 13 сплошной линией приведена зависимость  $RIN_{\text{opt}} = f(\Delta\lambda)$ , рассчитанная по формуле (6). Здесь же точками отмечены экспериментально определённые величины  $RIN_{\text{opt}}$  из табл. 3. Следует отметить, что полученные экспериментальные результаты схожи с теоретической зависимостью, тем самым качественно было доказано, что  $RIN_{\text{opt}}$  зависит от ширины полосы излучения источника. Установлено, что с увеличением ширины полосы излучения относительная величина оптических шумов уменьшается. Полученные результаты в целом качественно совпадают с результатами теоретических расчётов. Для широкополосных источников излучения с  $\Delta\lambda = 7 \div 30$  нм наблюдается и количественное совпадение. Это подтверждает правильность разработанной методики измерения относительного уровня оптических шумов квантовых генераторов. Для УСЭМ с  $\Delta\lambda \sim 10$  нм методика является верифицированной. Для более узкополосных источников лазерного излучения с  $\Delta\lambda \sim 0.1$  нм необходимо провести дополнительные ис-

следования на большем числе источников с различной полосой оптического излучения для выяснения отличия экспериментальных и теоретических результатов.

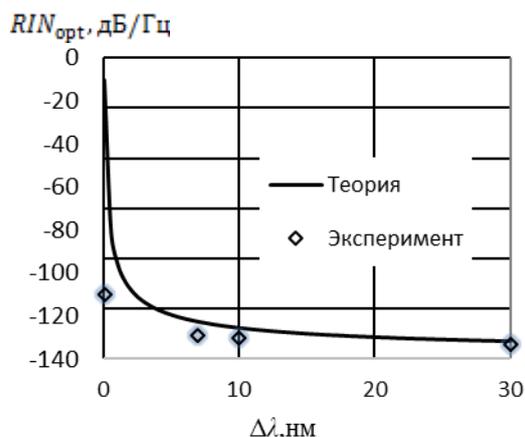


Рис. 13. Зависимость  $RIN_{opt}$  от ширины полосы излучения источника  $\Delta\lambda$ .

### Список литературы

1. Lefèvre Hervé C. *The fiber optic gyroscope*. Boston-London: Artech House, 2014. 407 p.
2. Алейник А. С., Кикилич Н. Е., Козлов В. Н., Власов А. А., Никитенко А. Н. Методы построения высокостабильных эрбиевых суперлюминесцентных волоконных источников оптического излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 593–607. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-593-607
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Т. 2. М.: Мир, 1993. 371 с.
4. Курков А. С. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства. Ульяновск: УлГУ, 2012. 184 с.
5. Стройков И. И., Скворцов А. М. Применение редкоземельных элементов в квантовой электронике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 29. С. 60–66.
6. Карпов Н. В., Маненков А. А., Квантовые усилители. М.: Радио и связь, 1966. 234 с.
7. Штейнлиейгер В. Б., Мисежников Г. С., Лифанов П. С. Квантовые усилители СВЧ (мазеры). М.: Радио и связь, 1971. 452 с.

8. Hashemi S. E. Relative intensity noise (RIN) in high-speed, VCSELs for short reach communication. Master Thesis. Chalmers University of Technology. Göteborg: Sweden, 2012. P. 9–22.
9. Guattari F., Chouvin S., Moluçon C., Lefèvre H. A Simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope // 2014 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS). P. 2–5.
10. Agilent Technologies PXA N9030A User Manual, 175 p.

### References

1. Lefèvre Hervé C. *The fiber optic gyroscope*. Boston-London: Artech House, 2014, 407 p.
2. Aleynik A.S., Kikilich N.E., Kozlov V.N., Vlasov A.A., Nikitenko A.N. High-stable erbium superluminescent fiber optical sources creation methods. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 593-607. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-593-607
3. Horowitz P., Hill W. *The art of electronics*. Cambridge: New Rochelle, 1980, 585 p.
4. Kurkov A.S. Fiber lasers: principles of construction and basic properties. Ulyanovsk: *UISU*, 2012. 184 p. (In Russian).
5. Stroykov I. I., Skvortsov A. M. The usage of rare earth elements in quantum electronics, 2006, no. 29, pp. 60–66. (In Russian).
6. Karpov N. V., Manenkov A. A. *Quantum amplifiers*. Moscow: Radio and Communication, 1966. 234 p. (In Russian).
7. Steinschleiger V. B., Mizezhnikov G. S., Lifanov P. S., *Quantum microwave amplifiers (masers)*. Moscow: Radio and Communication, 1971. 452 p.
8. Hashemi S. E. *Relative intensity noise (RIN) in high-speed, VCSELs for short reach communication*. Master of Science. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2012. pp. 9–22.
9. Guattari, F., Chouvin, S., Moluçon, C., Lefevre H. A simple optical technique to compensate for excess RIN in a fiber-optic gyroscope. *2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, pp. 2–5.
10. Agilent Technologies PXA N9030A User Manual, Inc. 175 p.

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Стариков С. С., Кель О. Л., Вольхин И. Л. Измерение шумов волоконно-оптических источников излучения // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 1. С. 66–73. doi: 10.17072/1994-3598-2019-1-66-73

**Please cite this article in English as:**

Starikov S. S., Kel O. L., Volkhin I. L. Noise measurement of fiber-optical radiation sources. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 1, pp. 66–73. doi: 10.17072/1994-3598-2019-1-66-73