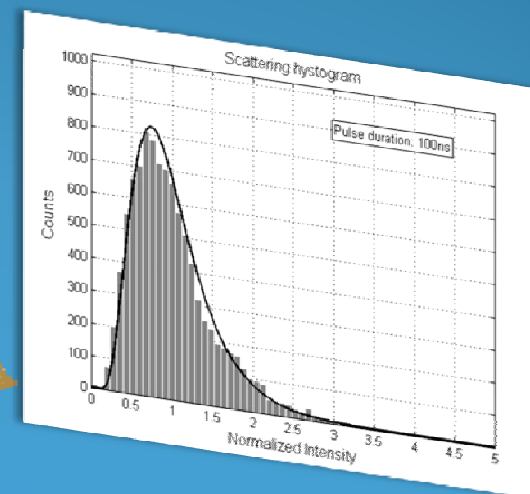
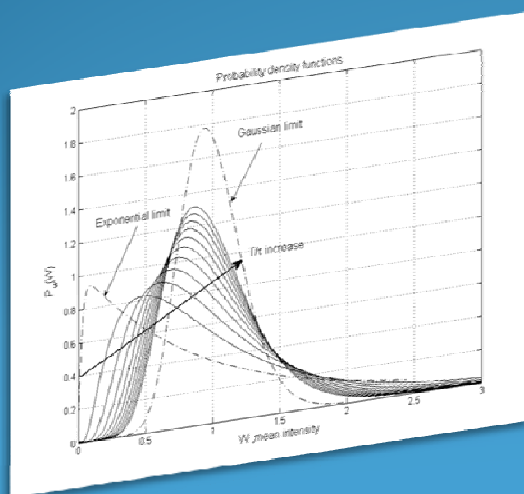
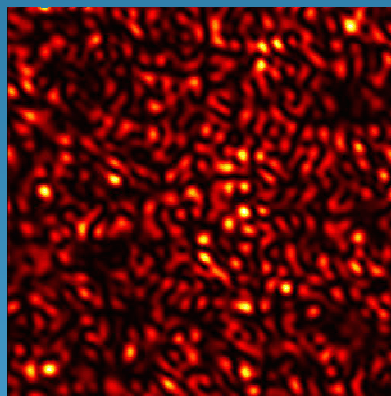


СТАТИСТИКА ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНО-РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА В ОДНОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Алексеев А.Э., Тезадов Я.А., Потапов В.Т.

НТО «ИРЭ-Полюс» - Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс» Фрязино, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл.



Предпосылки работы

Повышенный интерес к волоконным рефлектометрам, использующим эффект рассеяния когерентного излучения:

- 1) *Б.Г. Горшков, В.М. Парамонов, А.С. Курков, А.Т. Кулаков, М.В. Зазирный, "Распределенный датчик внешнего воздействия на основе фазочувствительного волоконного рефлектометра", Квант. электроника, 2006, 36 (10), 963–965.*
- 2) *В.С. Вдовенко, Б.Г. Горшков, М.В. Зазирный, А.Т. Кулаков, А.С. Курков, В.М. Парамонов, «Когерентный рефлектометр с двухволоконным интерферометром рассеянного излучения», Квант. электроника, 2011, 41 (2), 176–178.*
- 3) *R. Juškaitis, A. M. Mamedov, V. T. Potapov, and S. V. Shatalin, "Distributed interferometric fiber sensor system," Opt. Lett. 17, 1623-1625 (1992) .*
- 4) *Juarez, J.C., E.W. Maier, K.N. Choi, and H.F. Taylor, Distributed fiber-optic intrusion sensor system. Journal of Lightwave Technology, . 2005. 23(6): p. 2081-2087.*
- 5) *Yuelan Lu; Tao Zhu; Liang Chen; Xiaoyi Bao; , "Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR," Lightwave Technology, Journal of , vol.28, no.22, pp.3243-3249, Nov.15, 2010*
- 6) *Е.Т. Нестеров, В.Н. Трещиков, А.Ж. Озеров, М.А. Слепцов, В.А. Камынин "Метод увеличения дальности работы когерентного оптического рефлектометра ", ПЖТФ, 2011, том 37, выпуск 9: page 55.*

Предшествующие исследования

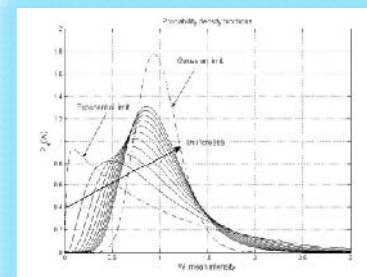
Статистические закономерности рассматривались в предыдущих работах:

- 1) **Goodman J.W., Statistical properties of laser speckle patterns // Laser speckle and related phenomena. Topics in Applied Physics /Ed. J.C. Dainty, Berlin: Springer-Verlag, 1975.**
Фундаментальный труд по статистике рассеянного сигнала
- 2) Healey, P.; , "Statistics of Rayleigh backscatter from a single-mode optical fibre," *Electronics Letters* , vol.21, no.6, pp.226-228, March 14 1985
Одна из первых работ в которой поднят вопрос о статистике рассеянного излучения в одномодовом волокне, получены приближенные решения для функции распределения
- 3) Gysel, P.; Staubli, R.K.; , "Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.8, no.4, pp.561-567, Apr 1990
- 4) Staubli, R.K.; Gysel, P.; , "Statistical properties of single-mode fiber Rayleigh backscattered intensity and resulting detector current," *Communications, IEEE Transactions on* , vol.40, no.6, pp.1091-1097, Jun 1992
В работах **рассеяние рассматривается как ограничивающий фактор**, приводящих к когерентному шуму, который ограничивает чувствительность и приводит к деградации приема сигнала в когерентных системах связи и гироскопии. Получены выражения для автокорреляционной функции и спектральной плотности мощности интенсивности рассеянного излучения (она имеет лоренцевскую форму и в два раза шире спектра источника). Рассчитываются выражения для функции распределения тока фотодетектора при наличии когерентного шума
- 5) О. Тозони, С.Б. Аксенов, Е.В. Подивилов, С.А. Бабин, "Модель волоконного фазочувствительного рефлектометра и ее сравнение с экспериментом", *Квант. электроника*, 2010, 40 (10), 887-892.
Одна из последних работ по когерентному рассеянию, в ней теоретически и экспериментально **исследовано поведение интенсивности рефлектограммы** в зависимости от времени отклика детектора, длительности импульса и ширины линии.

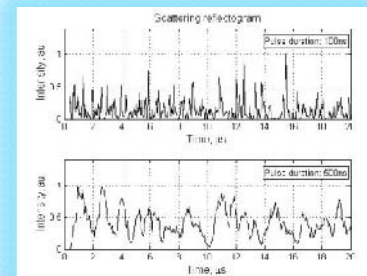
Цель работы

Исследование статистической зависимости интенсивности обратно-рассеянного излучения для полупроводниковых лазеров с различной степенью когерентности в одномодовом волокне

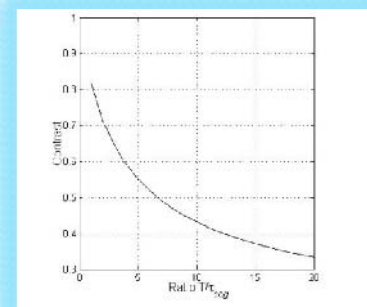
Теоретический вывод функции распределения интенсивности рассеянного квазимонохроматического излучения полупроводникового лазера



Определение оптимальной длительности импульса когерентного рефлектометра при использовании лазеров с различной степенью когерентности при которой реализуется высокая чувствительность

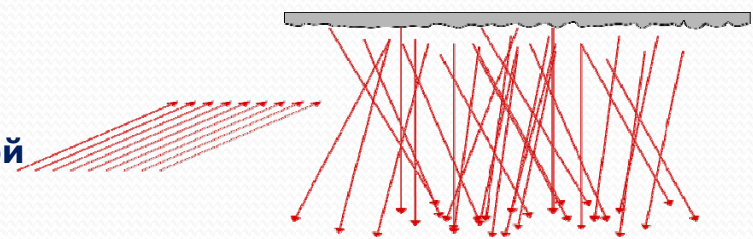


Исследование зависимости контраста рефлектограммы от параметров измерений



Теория

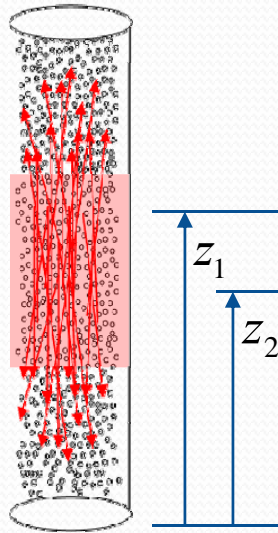
Теоретическое описание процесса когерентного рассеяния аналогично теории образования спекл-картины, возникающей при освещении шероховатой поверхности когерентным излучением



Обратное рассеяние

Суммирование случайных рассеянных полей

Спекл-картина



Поле источника

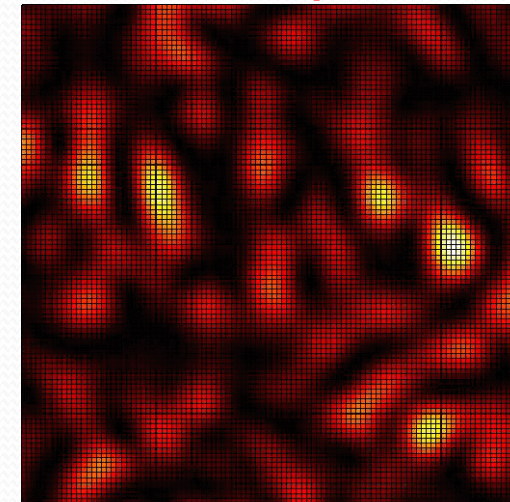
$$\vec{U}_{ист}(t) = \vec{A}_{ист}(t) \cdot \exp(i\omega_0 t)$$

$$\vec{A}_{ист}(t) = \vec{p}_{ист} \cdot \sqrt{I_{ист}} \cdot \exp(i\varphi_{ист}(t))$$

Рассеянное поле

$$\vec{U}_{расс}(t) = \sum_{n=1}^N \vec{U}_{расс}(t, z_n)$$

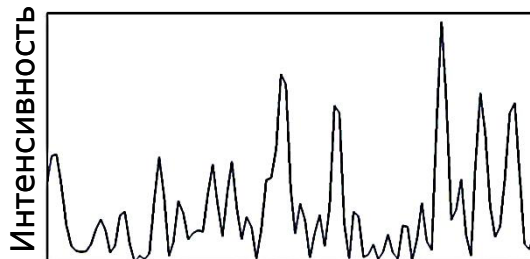
$$\vec{U}_{расс}(t, z_n) = \vec{A}_{расс}(t, z_n) \cdot \exp(i\omega_0 t)$$



Рефлектограмма

Комплексная амплитуда рассеянного поля

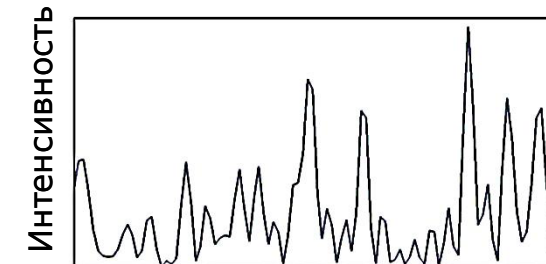
Сечение спекл-картины



Время

$$\vec{A}_{расс}(t) = \sum_{n=1}^N \vec{A}_{расс}(t, z_n)$$

$$\vec{A}_{расс}(t, z_n) = \mathbf{M}(z_n) \cdot \vec{A}_{ист}(t - 2z_n/v_{гп}) \times \exp(-2\alpha z_n) \cdot \exp(-2ikz_n) \Delta\rho(z_n)$$



Координата

Предположения модели

$$\rho_n$$

Комплексный амплитудный коэффициент рассеяния центра n

$$E \langle |\rho_n| \cdot |\rho_m| \rangle = 0$$

$$E \langle \arg(\rho_n) \cdot \arg(\rho_m) \rangle = 0$$

Амплитуда и фаза каждого комплексного коэффициента рассеяния статистически независимы друг от друга, а также от амплитуд и фаз комплексных коэффициентов рассеяния других центров рассеяния

$$n \neq m$$

$$\arg(\rho_n) \in (-\pi, \pi)$$

Фазы распределены равномерно на интервале

$$\Delta\rho(z)$$

Интегральный коэффициент рассеяния для некоторого поперечного сечения волокна

Интегральные коэффициенты рассеяния для разных поперечных сечений волокна некоррелированы друг с другом

$$E \langle \Delta\rho^*(z_1) \cdot \Delta\rho(z_2) \rangle = \rho_0 \cdot \delta(z_1 - z_2)$$

$$\Delta\rho(z)$$

Круговая комплексная гауссовская случайная величина

Статистика интенсивности рассеянного излучения

Полная временная корреляция рассеянных полей
Монохроматическое излучение

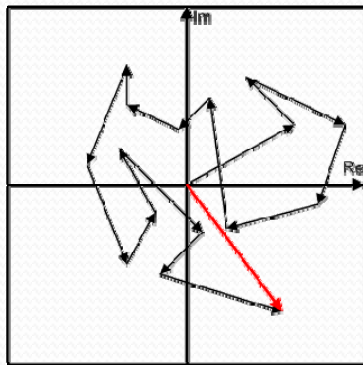
$$\vec{A}_{уст}(t) = \vec{p}_{уст} \cdot \sqrt{I_{уст}} \cdot \exp(i\varphi_{уст}(t))$$

$$\varphi_{уст}(t) = \text{const}$$

Комплексная амплитуда рассеянного поля

$$A_{расс} = \sum_{n=1}^N A_{уст}^0 \cdot \exp(-2ikz_n) \cdot \Delta\rho(z_n)$$

Сумма случайных фазоров



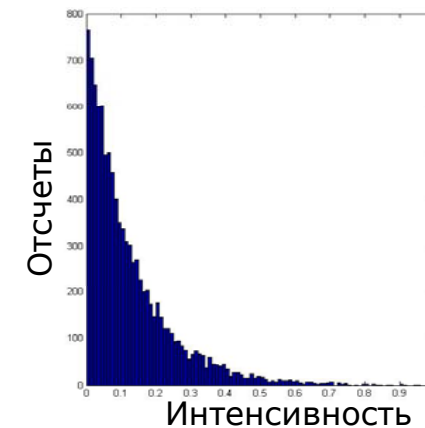
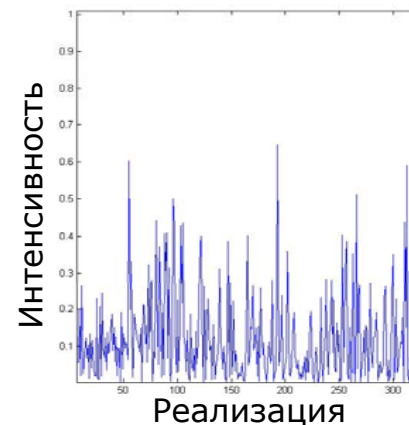
Круговая комплексная гауссовка
случайная величина

*Плотность распределения интенсивности
рассеянного излучения*

Рассматривая независимо различные
участки волокна, занимаемые импульсом



$$p_I(I) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right), \quad I \geq 0$$



Статистика интенсивности рассеянного излучения

Частичная временная корреляция рассеянных полей
Квазимонохроматическое излучение

$$\Delta\omega/\omega_0 \ll 1$$

Узкая спектральная полоса

$$\varphi_{\text{ист}}(t)$$

Случайная величина, зависящая от времени

Случайное изменение фазы излучения

В качестве модели случайного изменения фазы принимается винеровский случайный процесс

Автокорреляционная функция комплексной огибающей случайного поля рассеянного излучения

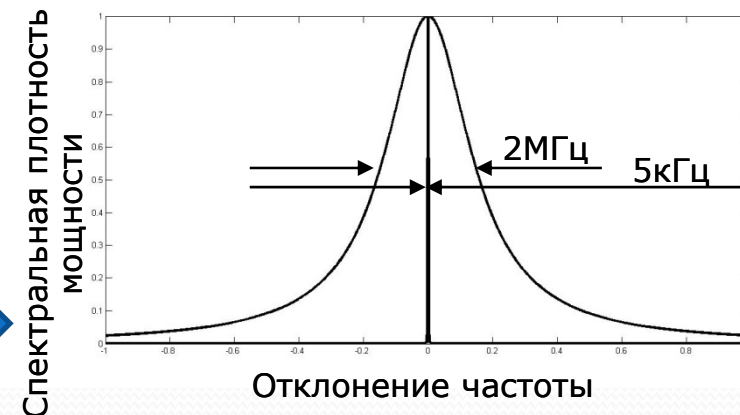
Разность фаз - стационарный в широком смысле процесс, с гауссовской функцией распределения

$$E \langle A_{\text{расс}}(t) \cdot A_{\text{расс}}^*(t+\tau) \rangle = \frac{v_{\text{гп}}^2}{4} \rho_0 \cdot I_0 \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_{\text{ког}}}\right)$$

Лоренцевская форма линии

Автокорреляционная функция комплексной огибающей поля источника

$$E \langle A_{\text{ист}}(t) \cdot A_{\text{ист}}^*(t+\tau) \rangle = I_0 \exp\left(\frac{-|\tau|}{\tau_{\text{ког}}}\right)$$



Сумма случайных полей

Дискретный случай

$$I_{\text{расс}} = S \sum_{k=1}^N I(t_k)$$

Корреляция рассеянных полей учитывается с помощью эрмитовой матрицы когерентности

Диагонализация матрицы когерентности в базисе из собственных векторов

Непрерывный случай

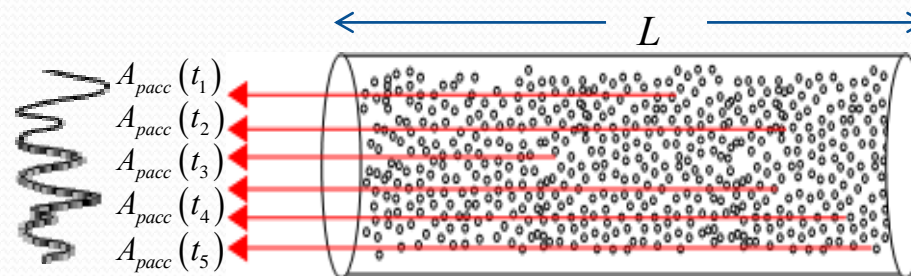
$$I_{\text{расс}} = S \int_0^{2T} I(t) dt$$

Применяется разложение Карунена – Лоэва комплексной огибающей случайного поля рассеянного излучения

Решение интегрального уравнения Фредгольма

Общий ход решения

Случайное рассеянное поле раскладывается в ряд по системе ортонормированных функция на интервале



$$A_{\text{расс}}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cdot \theta_n(t)$$

$$\{\theta_1(t), \theta_2(t) \dots \theta_n(t) \dots\}$$

$$(-T, T) \quad T = L/v_{\text{гp}}$$

Функция распределения интенсивности

Приходим к интегральному уравнению Фредгольма, где в качестве ядра выступает автокорреляционная функция рассеянного излучения

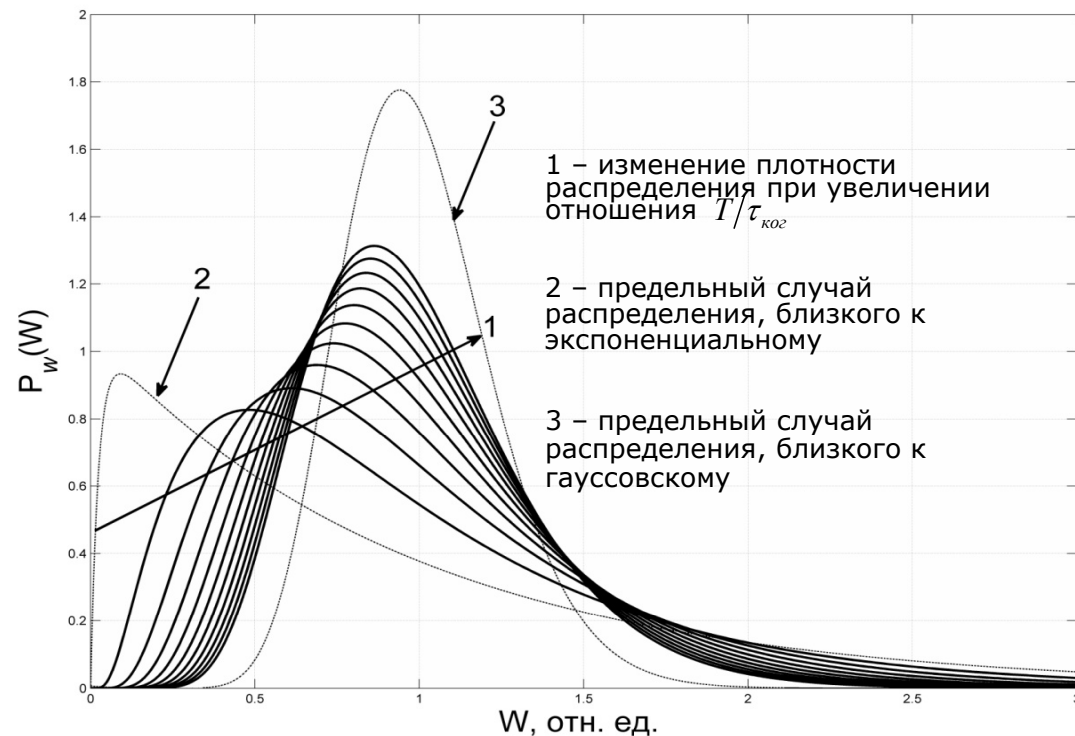
$$\int_{-T}^T P \cdot \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_{\text{ког}}}\right) \cdot \theta_m(t_1) dt_1 = \lambda_m \cdot \theta_m(t_2)$$

$$p_I(I) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda_n^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{I}{\lambda_n}\right)}{\prod_{\substack{m=0, \\ m \neq n}}^{\infty} \left(1 - \frac{\lambda_m}{\lambda_n}\right)}$$

$$d_n = \frac{1}{\prod_{\substack{m=0, \\ m \neq n}}^{\infty} \left(1 - \frac{\lambda_m}{\lambda_n}\right)}$$

$$p_I(I) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d_n}{\lambda_n} \cdot \exp\left(-\frac{I}{\lambda_n}\right)$$

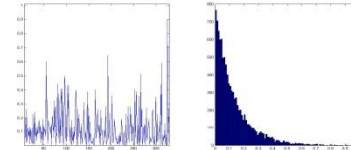
Плотности распределения вероятностей, нормированные на среднее значение



Контраст рефлектограммы

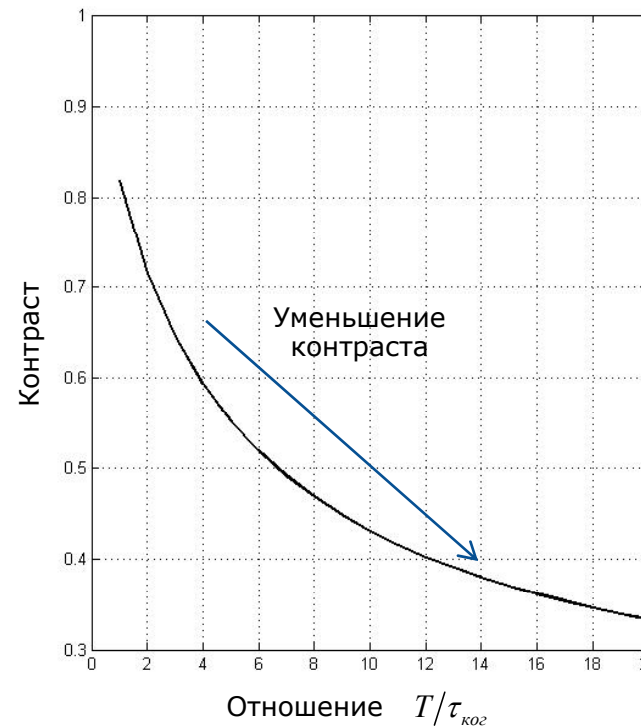
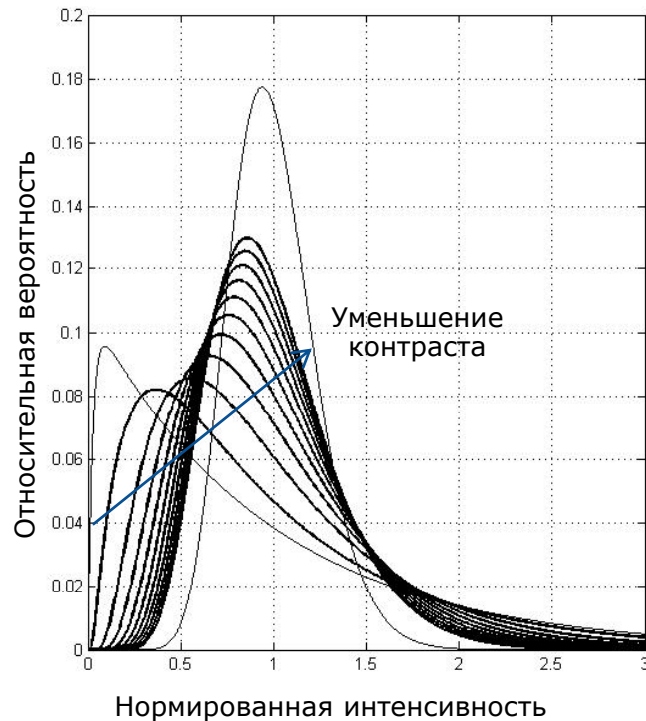
Контраст рефлектограммы в случае экспоненциального распределения.
Монохроматическое излучение

$$C = \frac{\sigma}{E\langle I \rangle} = 1$$



Контраст рефлектограммы в случае найденного распределения.
Квазимонохроматическое излучение

$$C = \frac{\sigma_I}{E\langle I \rangle} = \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} 2 \cdot d_n \cdot \lambda_n^2 - \left(\sum_{n=0}^{\infty} d_n \cdot \lambda_n \right)^2}}{\sum_{n=0}^{\infty} d_n \cdot \lambda_n}$$

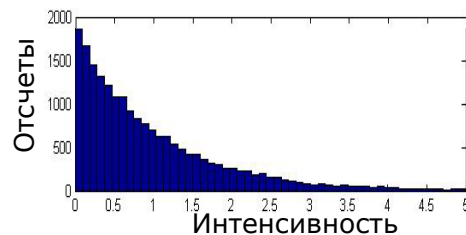
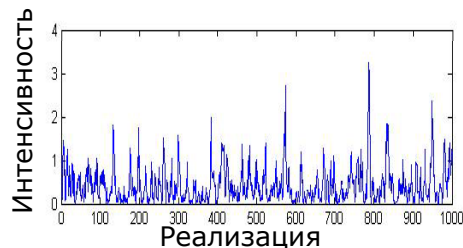


Контраст можно связать с чувствительностью рефлектометра к внешним воздействиям.

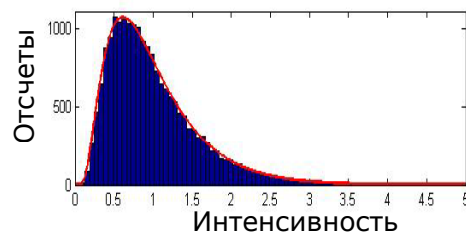
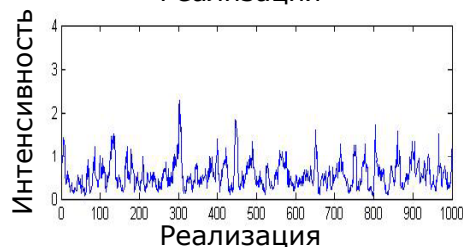
При максимальном контрасте максимально используется факт когерентности излучения

Максимальный контраст соответствует максимальному относительному отклонению интенсивности от среднего значения

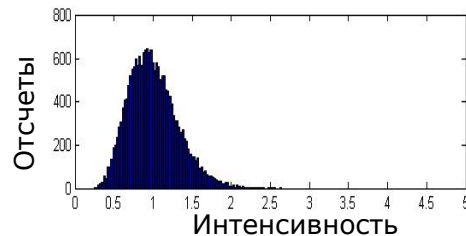
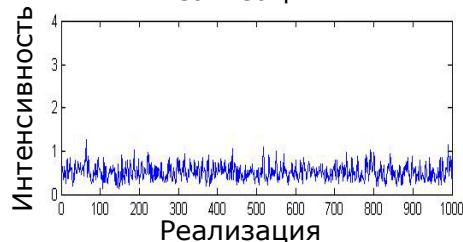
Численное моделирование статистического распределения



Случай полностью
монохроматического рассеянного
излучения



Случай квазимонохроматического
рассеянного излучения- длина
когерентности в два раза меньше
области рассеяния



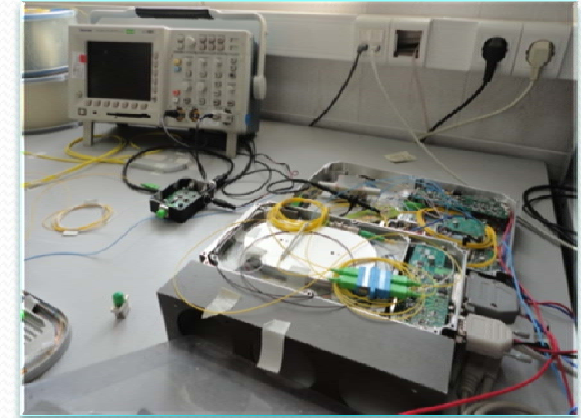
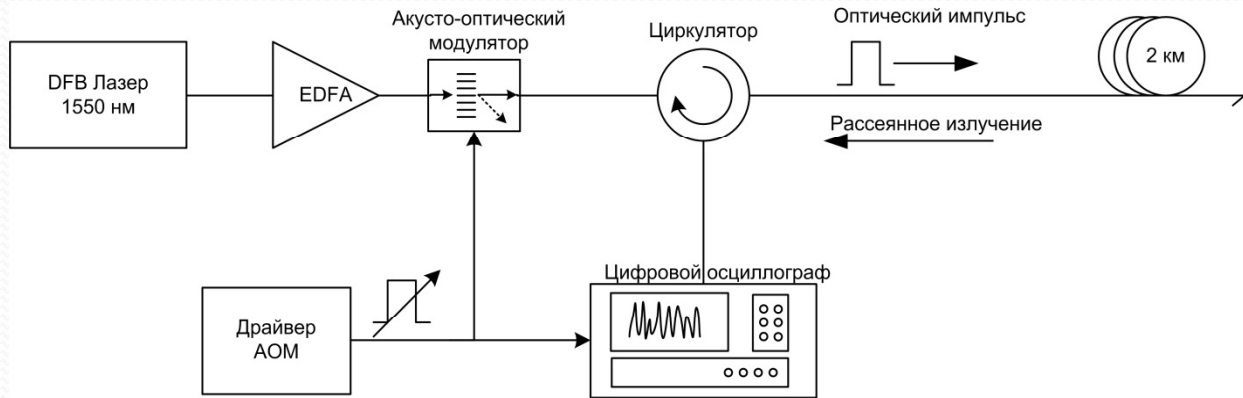
Случай рассеяния излучения с
широким спектром, длина
когерентности в 1000 раз меньше
области рассеяния

В когерентной рефлектометрии временем интегрирования следует считать половину длительности зондирующего импульса

Время когерентности импульсного излучения не может превышать длительности импульса, в соответствии с теоремой свертки анализа Фурье.

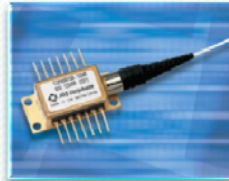
При длительности импульса порядка времени когерентности функция распределения имеет выраженный экспоненциальный участок, при длительности импульса превышающей время когерентности функция распределения стремится к гауссовской.

Эксперимент

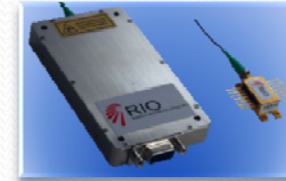


Использовались два типа лазеров

Стандартный телекоммуникационный лазер JDSU. Спектральная ширина полосы 2 МГц. Время когерентности 160 нс

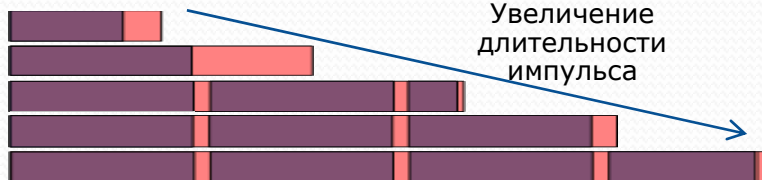


Узкополосный лазер RIO. Спектральная ширина полосы 5 КГц. Время когерентности 64 мкс

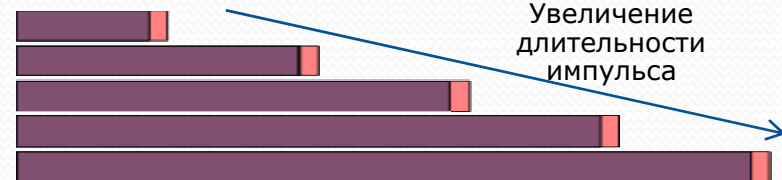


Длительность зондирующего импульса менялась от 100 нс до 500 нс

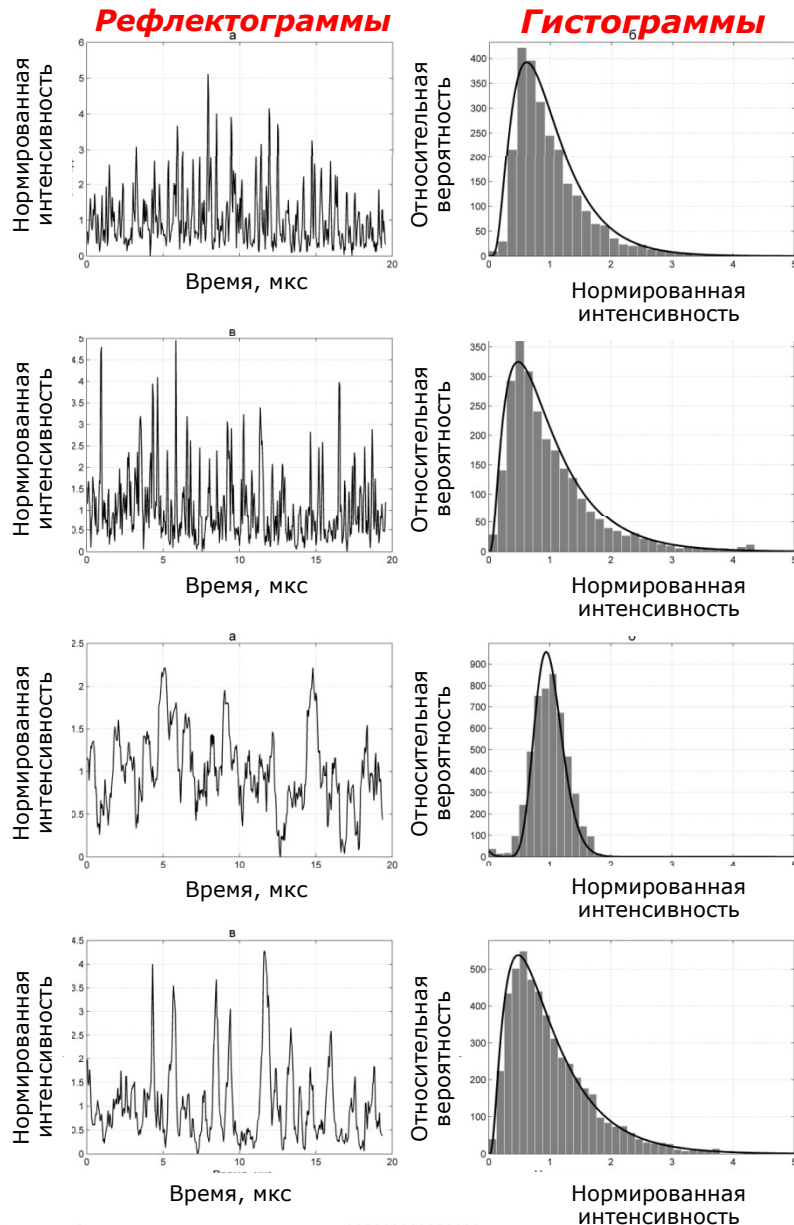
Отношение $T/\tau_{\text{ког}}$ увеличивается



Отношение $T/\tau_{\text{ког}}$ не изменяется



Эксперимент



Рефлектограммы, функции распределения, контраст - одинаковы для двух лазеров

Рефлектограмма, функция распределения, контраст - изменились

Рефлектограмма, функция распределения, контраст - остались неизменными

Рефлектограммы сгладились

Эксперимент

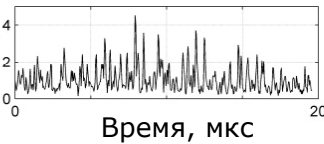
Лазер с шириной линии 2 МГц

Лазер с шириной линии 5 КГц

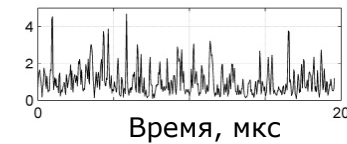
100 нс

Нормированная интенсивность

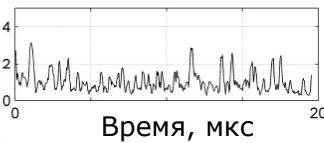
500 нс



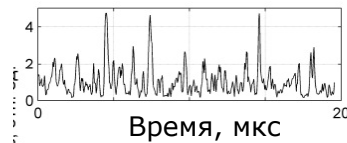
Время, мкс



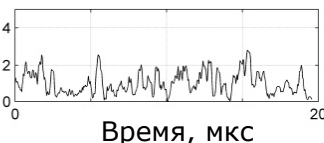
Время, мкс



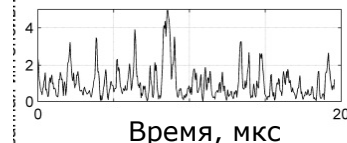
Время, мкс



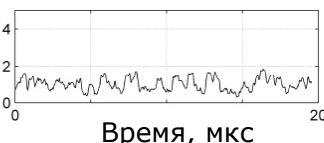
Время, мкс



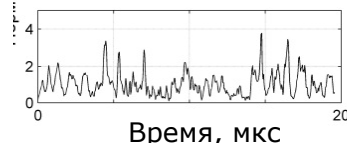
Время, мкс



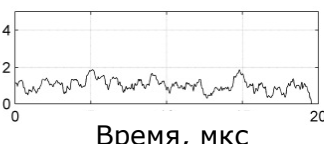
Время, мкс



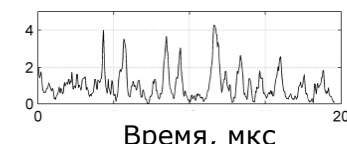
Время, мкс



Время, мкс



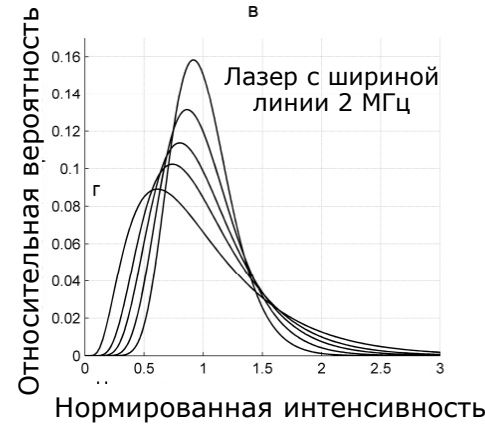
Время, мкс



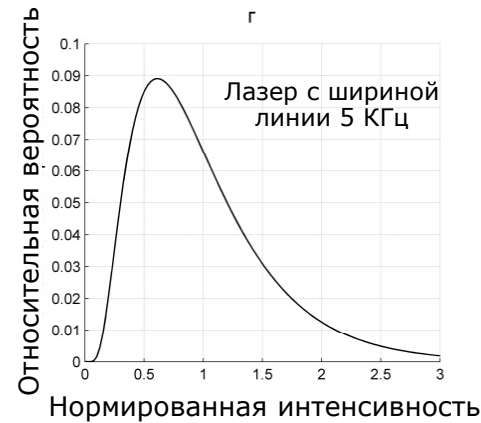
Время, мкс

Контраст уменьшается

Контраст не изменяется



Функция распределения приближается к гауссовской



Функция распределения не изменяется

Выводы

Рассмотренная модель статистического распределения интенсивности рассеянного квазимонохроматического излучения соответствует экспериментальным данным с хорошей точностью

Экспоненциальная статистики интенсивности рассеянного излучения более предпочтительна так как позволяет достичь максимального контраста рефлектограммы. При этом максимально используется факт когерентности излучения

Максимальный контраст (или максимальная относительная дисперсия) распределения интенсивности рассеянного излучения, можно сопоставить с максимальным относительным отклонением интенсивности рефлектограммы при внешнем воздействии – максимальной чувствительностью

При использовании в рефлектометре импульсов длительностью 100 нс, что соответствует разрешению рефлектометра порядка 10 м, экспоненциальная статистика может быть получена как с высоко-когерентным лазером, так и со стандартным телекоммуникационным лазером невысокой когерентности

В случае необходимости использовать импульсы большей длительности 200 – 500 нс, что соответствует области чувствительности 20- 50 м, для получения максимальной чувствительности нужно применять высококогерентный лазерный источник

Благодарю за Внимание!