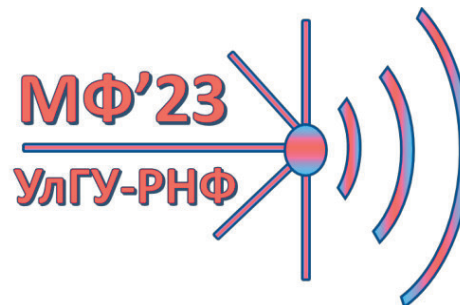


ВКВО-2023

ВСЕРОССИЙСКАЯ ДИАНОВСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

3-6 октября 2023



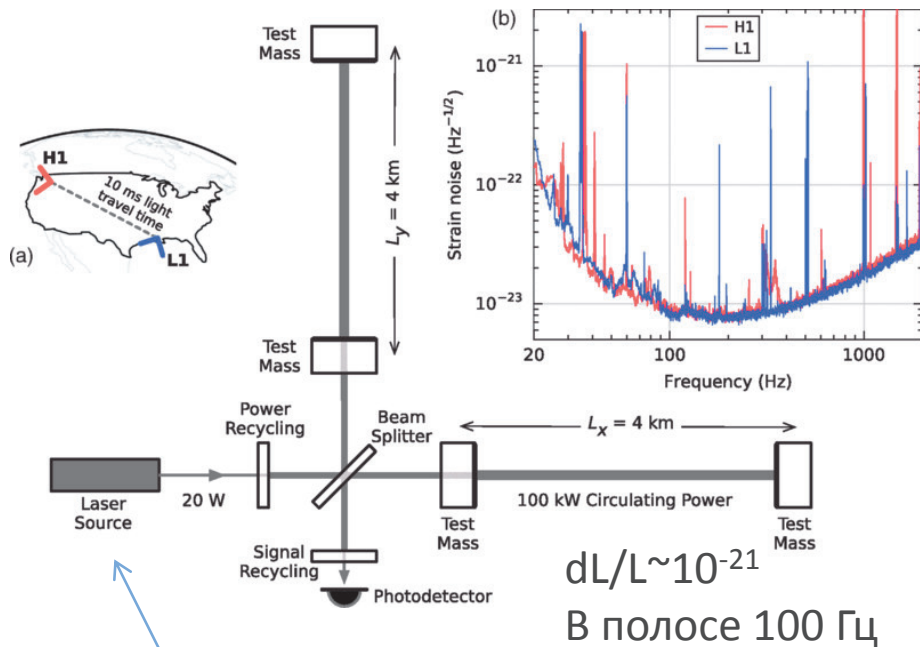
Школа молодых учёных по микроволновой
фотонике
Пермь, 5-6 октября 2023 г.



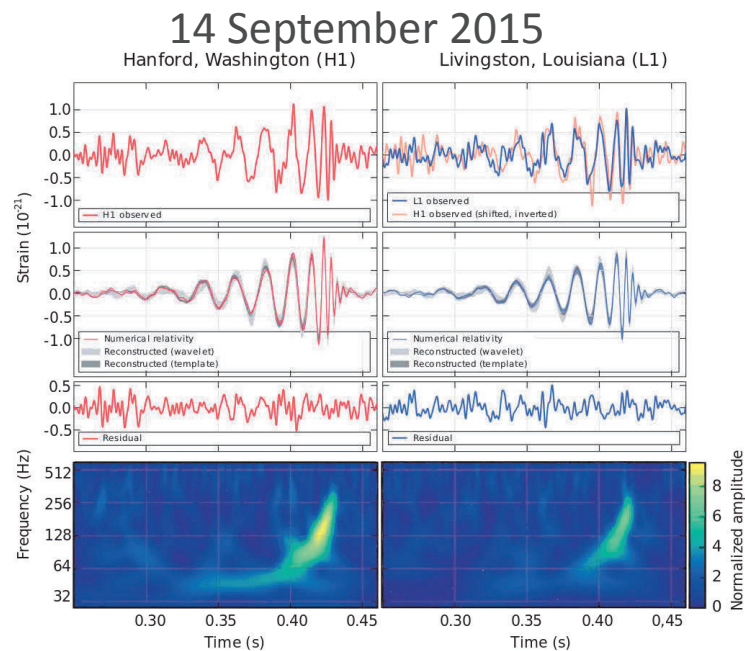
Методы измерения фазовых шумов высококогерентных лазеров

nikitin@t8.ru

LIGO – детектор гравитационных волн



Твердотельный лазер (Nd YAG) 20 Вт

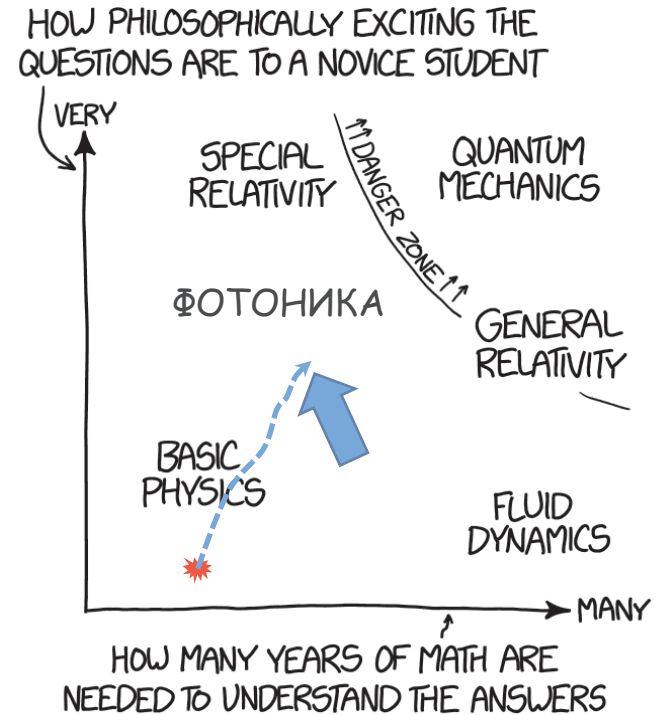


2017

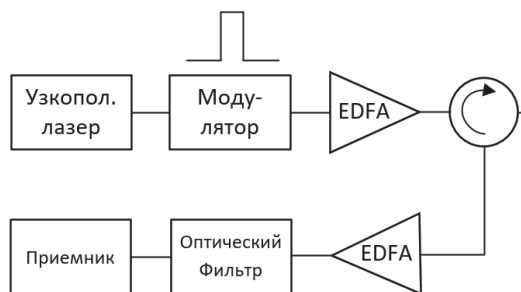
План лекции



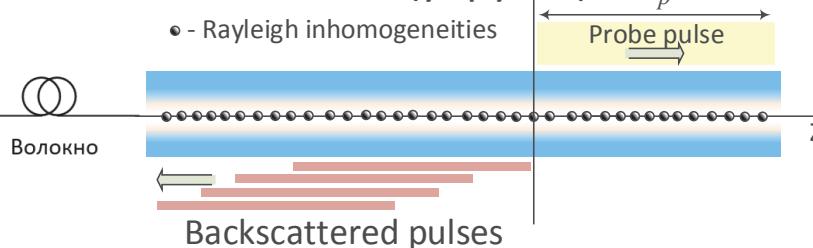
- Чувствительность рефлектометров (интерферометров) и шумы лазера
- Шумы лазера и ширина лазерной линии
- Фазовый шум и его измерение
 - Гетеродинирование
 - Автогетеродинирование
 - Фильтрация эталоном Ф-П
- Измерения узкополосных лазеров
- Выводы



Когерентный временной рефлектометр Рэлея



Рассеяние Рэлея (упругое)



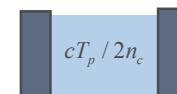
дальность

$$f_p \leq c / 2nL_{\max}$$

$$f_p = 1 \text{ кГц} \quad L_{\max} = 100 \text{ км}$$

COTDR – «случайный распределенный интерферометр»

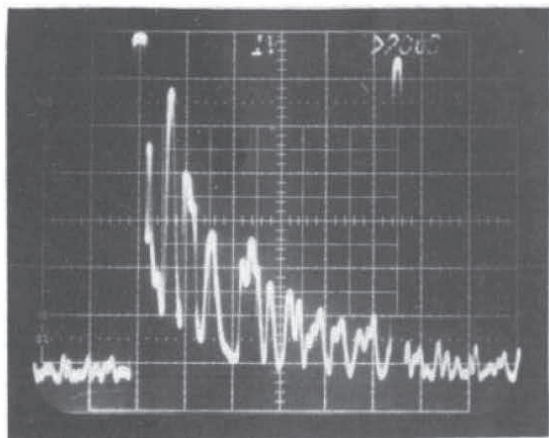
С базой интерференции $L_p = cT_p / 2n_c$ ($T_p = 100 \text{ нс} \rightarrow L_p = 10 \text{ м}$)



- Интенсивность имеет вид случайных пиков
- Отклик на воздействие тоже случайный («нелинейность»)
- Местами нет ни сигнала, ни отклика («замирания»)
- Перестройка лазера на $1/T_p$ полностью меняет форму $I(z)$

Линейность достигается восстановлением фазы

Чувствительность = «толщина шум. дорожки»

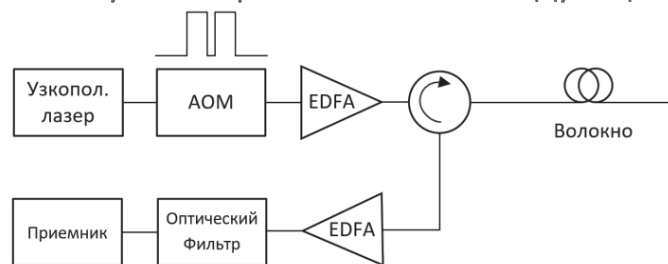


P. Healey, Electr. Lett. **20**, 1 (1984)
Явление «замирания» (fading) сигнала

Варианты как измерить компл. амплитуду

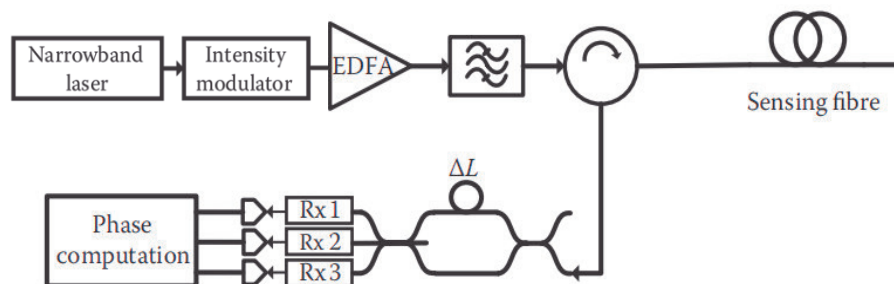


Два импульса с фазо-частотной модуляцией

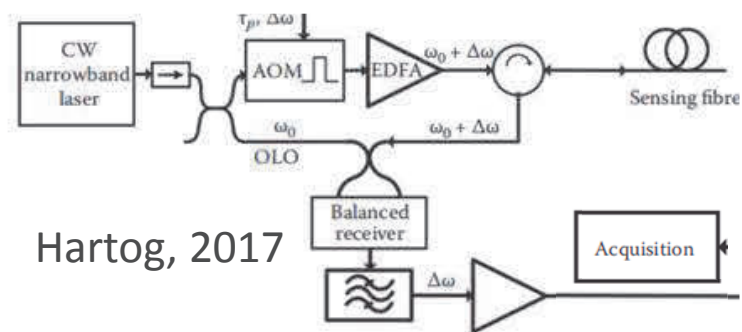


Nikitin et al. *Laser Physics* 28 (2018)
Гетеродинамирование

Интерферометр М-Ц в приёмной части

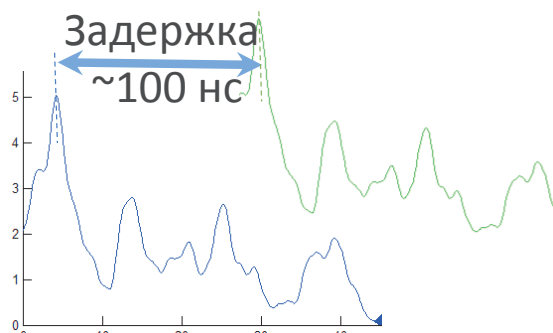


Alekseev, A.E. et al., *Quantum Electron.*, 44, 965, (2018)



Hartog, 2017

И вариации...



Общая идея:

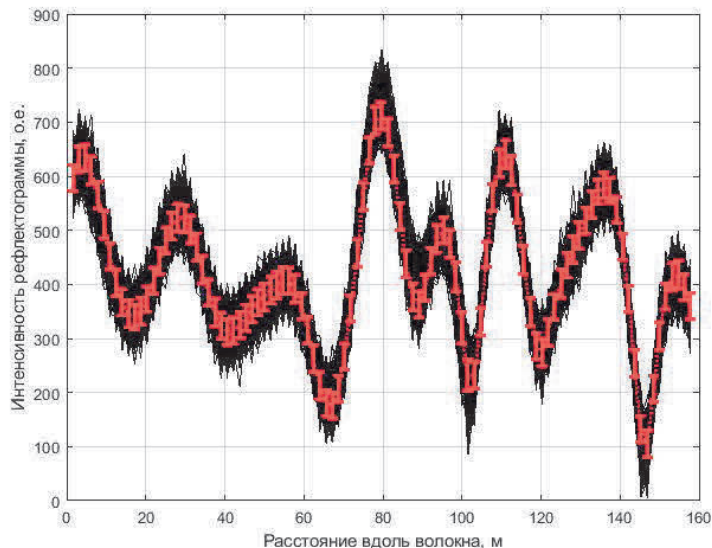
Фаза = из картины интерференции: рефлектограммы со своей репликой, либо с гетеродином.

Φ - OTDR

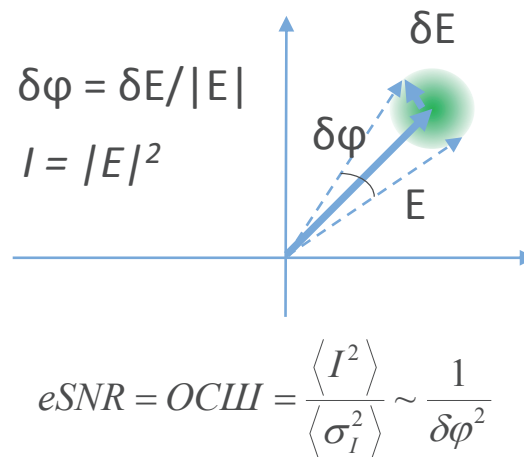
Фазочувствительность и «шумовая дорожка»



Ширина шумовой дорожки



Шум фазы и ширина дорожки



$eSNR = \langle \text{Фототок}^2 \rangle / \langle \text{СКО тока}^2 \rangle$, причём

$$\delta\phi^2 \sim 1 / eSNR$$

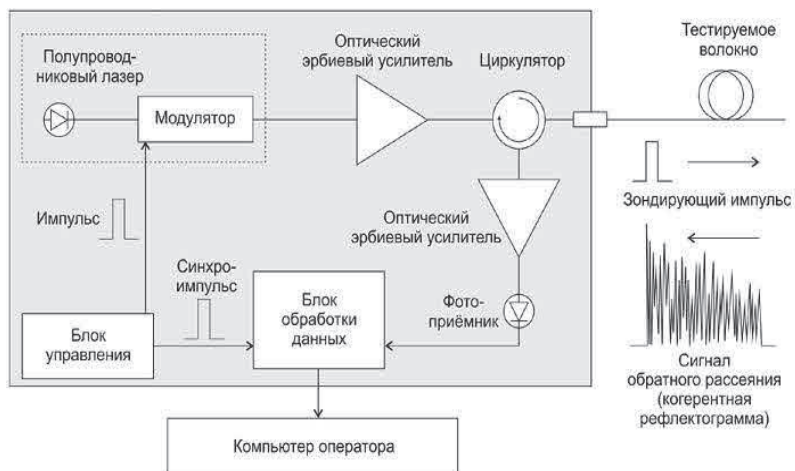
(Nikitin et al
JLT 2019)

Аналогично Н. Gabai, А. Eyal
SPIE Proc 10223 8A-1 (2017)

$$\sigma_\phi|_{\min} = \sqrt{\frac{z_p}{2SNR_{\text{static}}}}$$

минимальный сигнал ϕ , гарантирующий $SNR > 1$ в заданной доле p «каналов OTDR»; z – безразмерный к-т от 0 до 1, определяемый статистическими свойствами рефлектограммы.

Оптический когерентный рефлектометр



Пример распределенного акустического сенсора
«Дунай» (ООО «Т8»)

Блок-схема когерентного рефлектометра

1. Длина волны (~ 1500 nm) – максимальная дальность
2. Длина зондирующего импульса (~ 100 - 200 ns)
3. Частота зондирования (\sim кГц)
4. Чувствительность к вариациям фазы
(< 0.01 рад в полосе 100 Гц)

Чувствительность ограничена:

- 1) Шумом интенсивности (не самое страшное)
- 2) **Флуктуациями фазы на длине импульса**
- 3) **Уходами частоты при зондировании**

Источники фазовых шумов



Белый шум частоты

- Мгновенная ширина лазерной линии (дрейф фазы)

Фундаментальные источники шумов $1/f$

- Термодинамические флуктуации показателя преломления

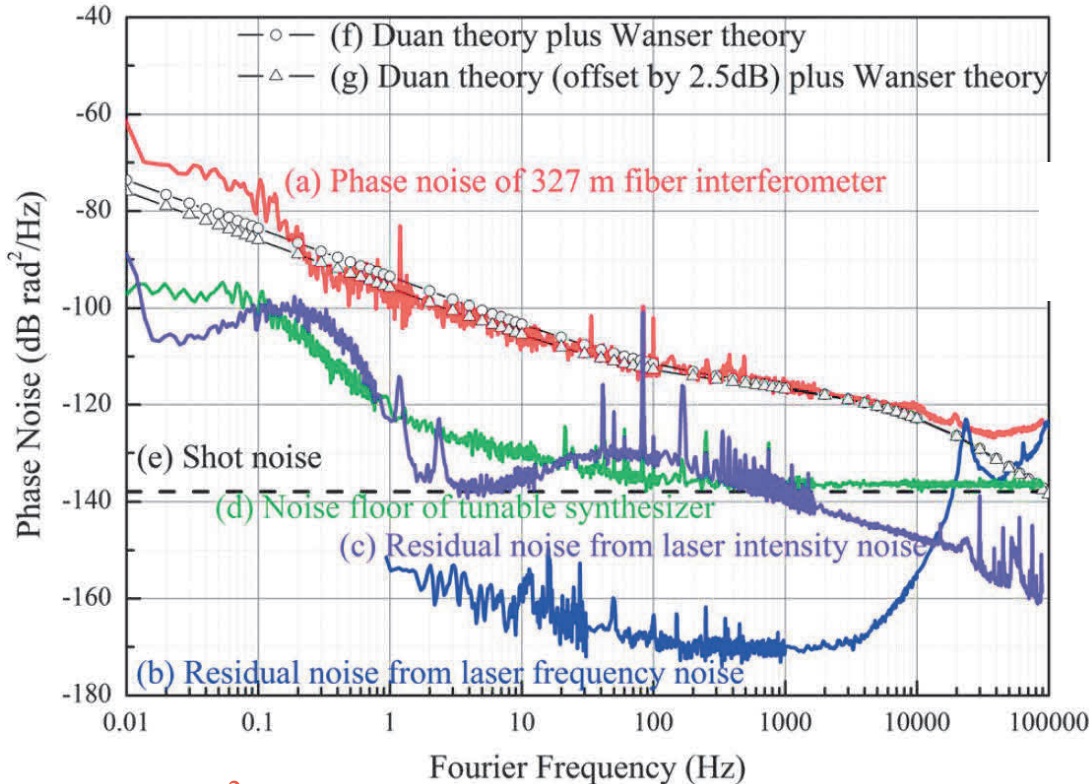
Технические шумы $1/f$ и случайное блуждание частоты

- Механические воздействия на резонатор лазера
- Температурные уходы, атмосферное давление
- Флуктуации тока/мощности накачки
- Долговременные процессы – старение, фотохимия итп
- «Провисание» конструкции под собственным весом
- ...
- Неблагоприятное расположение звезд и планет

Тепловой шум в волокне SMF-28



Dong et al Appl. Phys. Lett. 108, 021108 (2016)



$$S_T(\omega) = \frac{2\pi k_B T^2 L}{\lambda^2 \kappa} \left(\frac{dn}{dT} + n\alpha_L \right)^2 \ln \left(\frac{k_{\max}^4 + \left(\frac{\omega}{D} \right)^2}{k_{\min}^4 + \left(\frac{\omega}{D} \right)^2} \right)$$

Wanser, 1992 – термодин. шум

$$S_M(f) = \left(\frac{2\pi}{\lambda} n \right)^2 \frac{2k_B T L \phi_0}{3\pi E_0 A} \frac{1}{f}$$

Duan, 2010 – термомех. шум

$$S_\varphi(f) \sim 10^{-10} / f \text{ [рад}^2/\text{Гц]}$$

SMF-28, $L = 100 \text{ м}$, $1,5 \text{ мкм}$

$d\varphi \sim 10^{-6} \text{ рад}/\text{Гц}^{1/2}$ на 100 Гц

В $100..1000 \text{ Гц}$ $d\varphi \sim 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$

$$dL/L \sim 10^{-14} \text{ для } L = 100 \text{ м}$$

$$SNR \approx 1 / \delta\varphi^2 \rightarrow 86 \text{ dB}$$

Дробовой фотошум (квантовый предел)

Формула Шотки – мощность шума

Шум $S_{др}(f) = eI \quad \text{А}^2/\text{Гц}$

$$S_{др}(f) = e^2 \eta P_{опт} / h\nu$$

... считаем, что шум белый!

Сигнал $P_{сиг} = I^2 \quad \text{А}^2$

$$SNR = I^2 / eIB = N_e / B = \eta P_{опт} / B h\nu$$

$B = 10 \text{ МГц}$ - полоса приема, $\text{Гц} \sim 1/\tau$

$P_{опт} = 10^{-7} \text{ Вт}$ - оптическая мощность,

$h\nu = 1,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ - энергия фотона,

$\eta = 1$ - кв. эффективность · потери

$$SNR = 1 / \delta\varphi^2 \sim 7 \cdot 10^4 \text{ рад}^{-2}$$

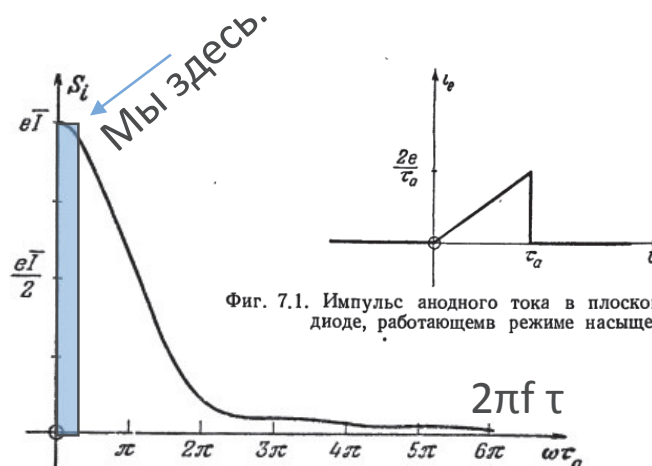
$$\delta\varphi \sim 4 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$$

$$dL/L \sim 4 \cdot 10^{-11}$$

$$L \sim 10 \text{ м}, \lambda = 1,5 \text{ мкм}$$

SNR = 48 dB

В. Давенпорт, В. Рут
«Введение в теорию случайных сигналов и шумов»,
изд. «Иностранная Литература», Москва 1960



Фиг. 7.1. Импульс анодного тока в плоскопараллельном диоде, работающем в режиме насыщения.

Фиг. 7.2. Спектральная плотность дробового шума в плоскопараллельном диоде, работающем в режиме насыщения.



Шум, конечно, не белый ...
Но этим можно пренебречь

Фазовый шум* лазера (интерферометр Маха-Цендера)

- Спектральная плотность мощности **шума интенсивности** на выходе интерферометра при задержке $T_d \ll \tau_{coh}$ $\tau_{coh} = 1 / \Delta \nu_{МГН}$

$$S(f) = \frac{I_0^2}{4} \frac{2T_d^2}{\tau_{coh}} \text{sinc}^2(fT_d)$$

B. Moslehi, JLT 4 p. 1704 (1986)

- Полная мощность шума интенсивности (т.е. дисперсия случайной интенсивности) :

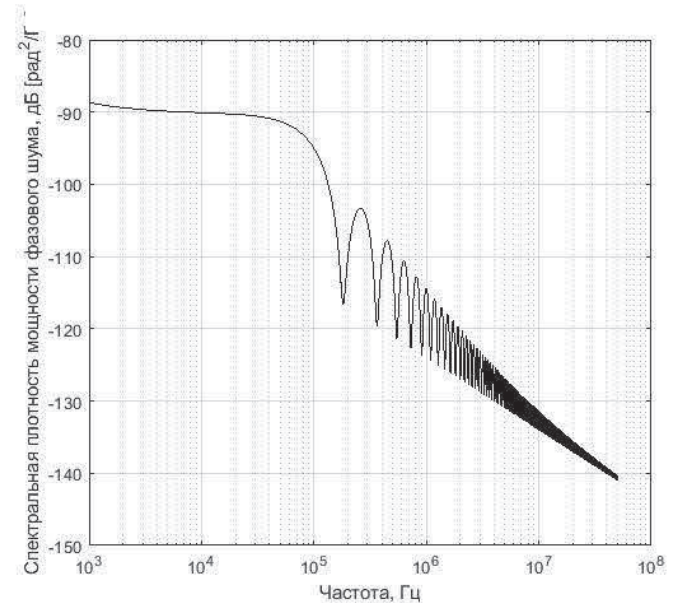
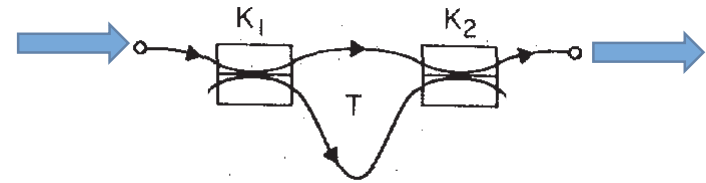
$$P_{int} = \langle I^2 \rangle \frac{|T_d|}{\tau_{coh}}$$

$$\frac{1}{\delta\phi^2} = SNR = \frac{\tau_{coh}}{|T_d|} \sim \frac{1}{|T_d| \Delta \nu_{МГН}}$$

... В рефлектометре также, с точностью до «случайности»

Шум фазы

Шум интенсивности



*Случай белого шума частоты

Фазовые шумы лазера – основной источник шума



$$\tau_p = 100 \text{ нс}$$
$$\Delta\nu \sim 2 - 3 \text{ кГц}$$



$$SNR = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{\tau_p \Delta\nu_{\text{мгн}}}$$

$$SNR \approx 1 / \delta\phi^2 \rightarrow \delta\phi \sim 2.2 \text{ mrad}$$

$$\varepsilon = dL / L_d \sim d\phi \frac{1}{4\pi n} \frac{\lambda}{L_d} \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ (200 p}\varepsilon\text{)}$$

$$\sim 9 \text{ p}\varepsilon / \sqrt{\Gamma\zeta} \text{ если } f_p = 1000 \text{ Гц}$$

Для достижения уровня дроб.шума нужен лазер со спектром «на 15 dB уже» (... то есть в 32 раза $\sim 60 - 100$ Гц)
И надо бы убрать ASE (т.е. выключить усилитель)

SNR = 33 dB

Возникает вопрос: как можно измерить ширину лазерной линии 10 – 1000 Гц ?

Это касается всех интерферометров!



Флуктуации фазы не видны при прямом детектировании,
Но при интерферометрии приводят к шуму интенсивности

Интерферометр = прибор, преобразующий фазу в интенсивность

Фазовые шумы определяют чувствительность рефлектометра

Фазовые шумы определяют форму линии
В рефлектометре

$$OSR_0 = \frac{P_{эл}}{N_{эл}} = \frac{\langle I \rangle^2}{\langle \sigma_I^2 \rangle} = \frac{3}{2\pi T \Delta \nu_{Las}}$$

Ищем лазер с самой узкой линией!

И как ее измерить??

Формула Шавлова-Таунса

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 112, NUMBER 6

DECEMBER 15, 1958



Infrared and Optical Masers

A. L. SCHAWLOW AND C. H. TOWNES*
Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
(Received August 26, 1958)

The extension of maser techniques to the infrared and optical region is considered. It is shown that by using a resonant cavity of centimeter dimensions, having many resonant modes, maser oscillation at these wavelengths can be achieved by pumping with reasonable amounts of incoherent light. For wavelengths much shorter than those of the ultraviolet region, maser-type amplification appears to be quite impractical. Although use of a multimode cavity is suggested, a single mode may be selected by making only the end walls highly reflecting, and defining a suitably small angular aperture. Then extremely monochromatic and coherent light is produced. The design principles are illustrated by reference to a system using potassium vapor.

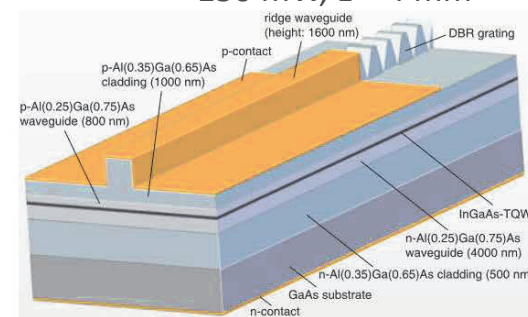
$$\Delta\nu_{las} = 2\pi \frac{h\nu_c}{P_{out}} \Delta\nu_c^2 \longrightarrow = \frac{h\nu_c n_{eff} T_{out} (T_{out} + L)}{P_{out} 4\pi t_{RT}^2}$$

Фундаментальный физический процесс

Выводы:

- Увеличивать число фотонов в моде (интенсивность)
- Увеличивать добротность резонатора
- Увеличивать длину резонатора
- Как уменьшить случайные уходы фазы?

2 kHz @ 1064 nm
150 mW, L = 4 mm



Appl Phys B (2011) 104:813–818

Фактор Генри



IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. QE-18, NO. 2, FEBRUARY 1982

259

Theory of the Linewidth of Semiconductor Lasers

CHARLES H. HENRY

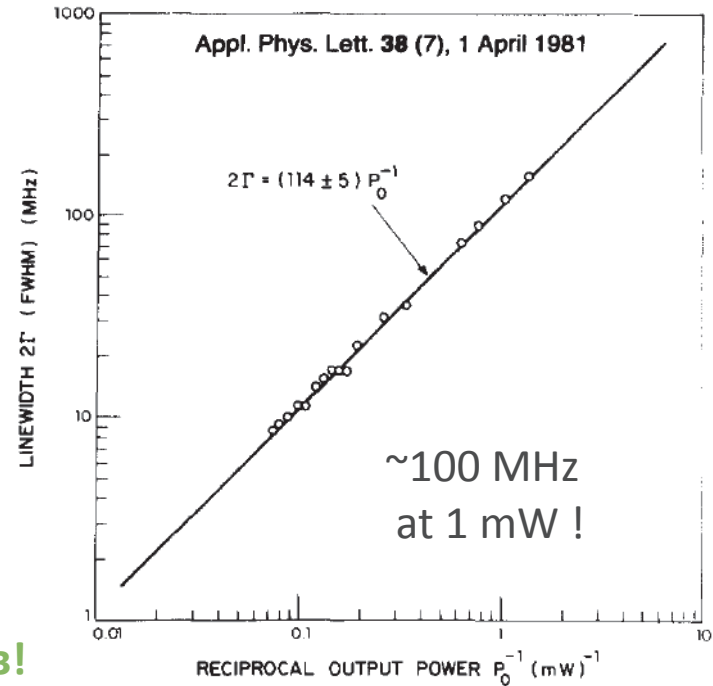
$$\Delta f = \frac{v_g^2 h\nu g n_{sp} \alpha_m (1 + \alpha^2)}{8\pi P_0}$$

$$\alpha = \frac{\Delta n'}{\Delta n''} \quad n = n' + in''$$

$$\alpha \sim 5 - 7 \quad \Delta\phi = \frac{\alpha}{2} \cdot \Delta g$$

Флуктуации интенсивности влияют на концентрацию электронов, что изменяет показатель преломления, что приводит к флуктуациям фазы..

Линия уширена в 50 и более раз!



Дисперсионное обужение линии



December 1, 1990 / Vol. 15, No. 23 / OPTICS LETTERS 1359

Self-quenching of fundamental phase and amplitude noise in semiconductor lasers with dispersive loss

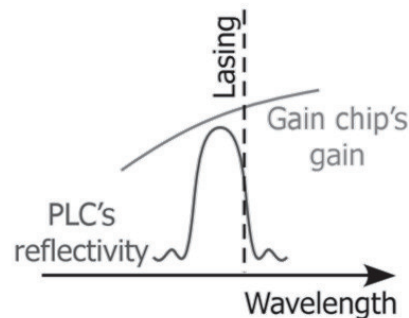
Amnon Yariv, Rashit Nabiev,* and Kerry Vahala

California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

Уход частоты изменяет потери и интенсивность, что влияет на фазу. Частота стабилизируется.

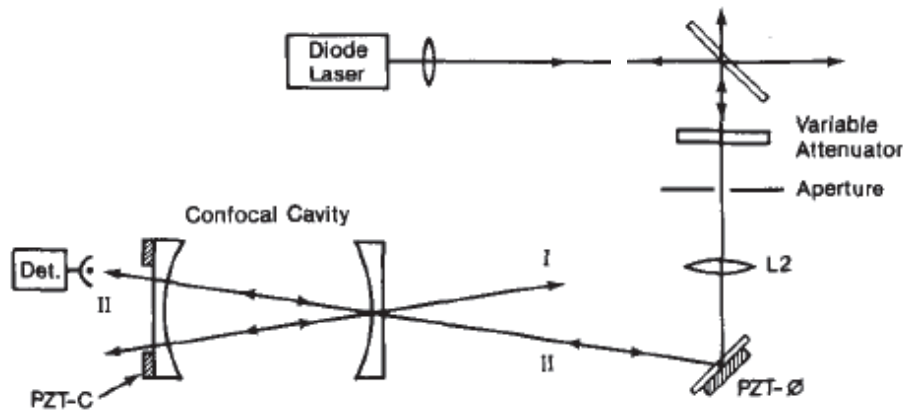
$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\tau_{p0}} + 2C\dot{\phi}$$

$$\Delta\nu \sim (\Delta\nu)_{S-T} \frac{1 + \alpha^2}{(1 + C\alpha)^2}$$



В сочетании с фактором Генри, приводит к стабилизации фазы и обужению линии.

Использовать внешний резонатор.



Времена жизни:
во внешнем рез.

$$\Delta\nu \cong \frac{\Delta\nu_{S.T.}}{\beta \frac{\tau_s^2}{t_d^2}}$$

К-Т СВЯЗИ
ПО МОЩНОСТИ

в лазерном рез.
 $\beta \frac{\tau_s}{t_d} \gg 1$

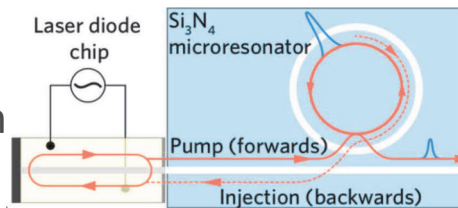
IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 25, NO. 6, JUNE 1989

Frequency Noise Analysis of Optically Self-Locked Diode Lasers

PH. LAURENT, A. CLAIRON, AND CH. BRÉANT

Внешний резонатор «помнит» фазу лазера
Нужна высокая добротность, чтобы $\tau_s \gg \tau_d$

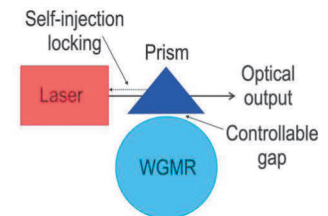
$Q \sim 10^6$
 $L < 1 \text{ mm}$



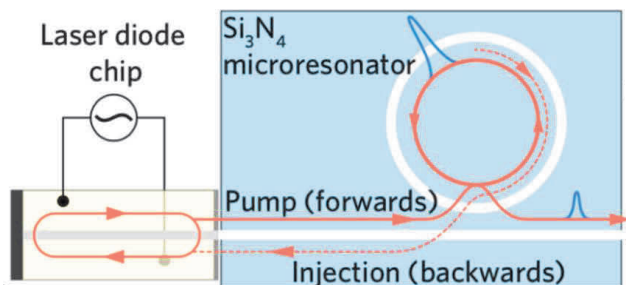
$Q \sim 10^6$
 $L = 100 \text{ mm}$



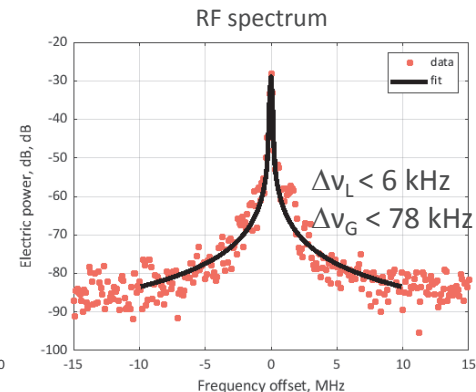
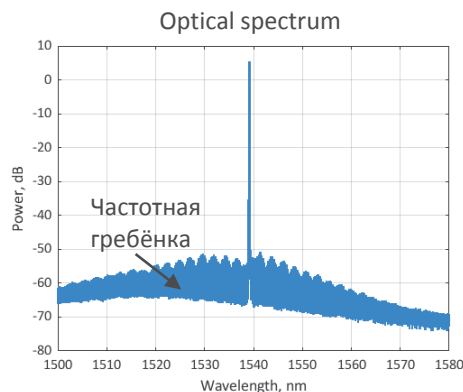
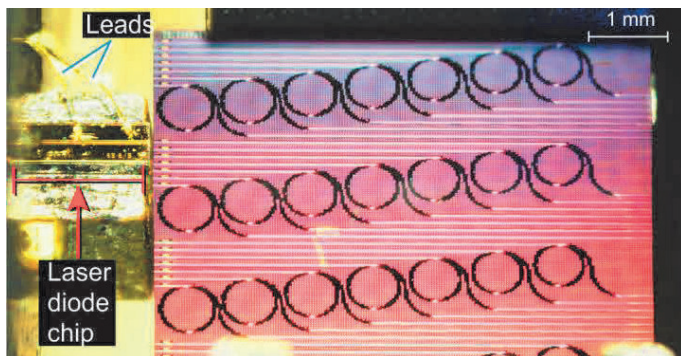
$Q \sim 10^9$
 $L \sim 1 \text{ mm}$



Диодный лазер с кольцевым микрорезонатором



Self-injection locking of Fabry-Perot LD (Seminox, < 300 mW) to the high-Q microresonator (Ligentech, $Q > 10^6$)



Методы описания шумов (лазерных в том числе)



Способ № 1 (хорошо известный в широких кругах)

Спектр мощности шума частоты (фазы):

$$S_v(f) = S_\phi(f) \cdot f^2$$

$S(f)$ имеет размерность «х²/Гц»

Полезный факт: $\sigma_B^2(x) = \int_{f_1}^{f_2} S(f) df$

Способ № 2 (хорошо известный в кругах метрологов)

Дисперсия Аллана частоты:

$$\sigma_v^2(\tau) \equiv \frac{1}{2} \left\langle (\bar{v}(t_2) - \bar{v}(t_1))^2 \right\rangle_t$$

$\sigma_v^2(\tau)$	τ	На практике:
$\sigma_v^2(2\tau)$ <td>2τ</td> <td></td>	2τ	
$\sigma_v^2(4\tau)$ <td>4τ</td> <td></td>	4τ	

GIVEN A PROBLEM OF THE FORM:
 $\int f(x)g(x)dx = ?$
CHOOSE VARIABLES u AND v SUCH THAT:
 $u = f(x)$
 $dv = g(x)dx$
NOW THE ORIGINAL EXPRESSION BECOMES:
 $\int u dv = ?$
WHICH DEFINITELY LOOKS EASIER.
ANYWAY, I GOTTA RUN.
BUT GOOD LUCK!

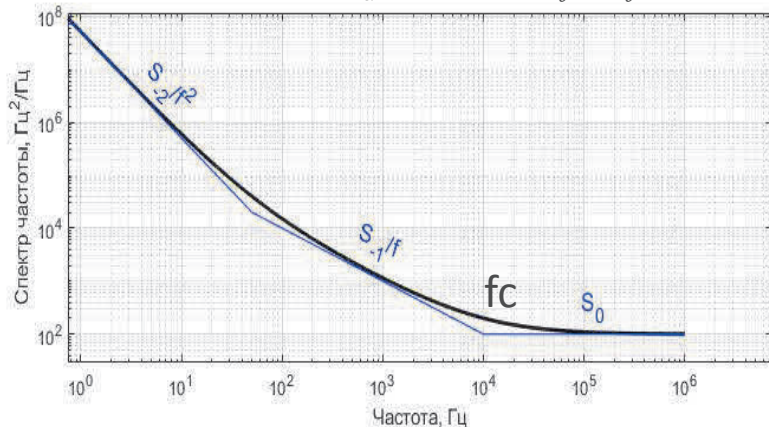
$$\sigma_v^2(\tau) = 2 \int_0^\infty S_v(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df$$

Ф. Риле, «Стандарты частоты. Принципы и приложения».

Дисперсия Аллана и спектр шума частоты



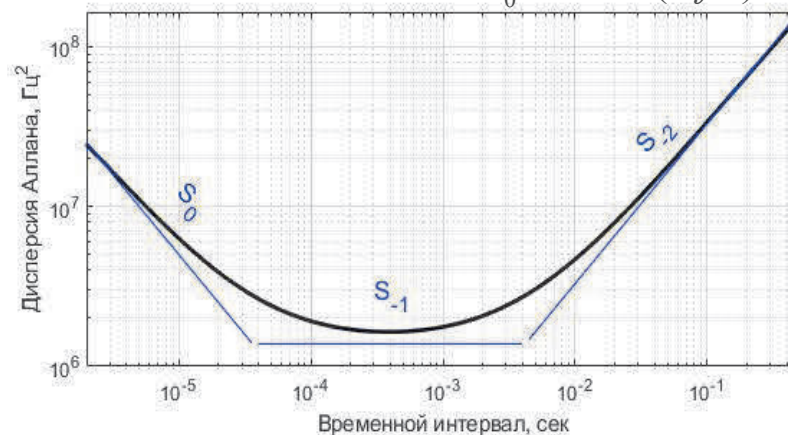
$$S_v(f) = S_\phi(f) \cdot f^2 = \sum_{\alpha} S_{\alpha} f^{\alpha} = S_0 + \frac{S_{-1}}{f} + \frac{S_{-2}}{f^2} + \dots$$



Тип шума	$S_v(f)$	$\sigma_v(\tau)$
Случайные уходы частоты	$\frac{S_{-2}}{f^2}$	$\frac{2\pi^2 S_{-2} \tau}{3}$
Фликкер-шум частоты	$\frac{S_{-1}}{f}$	$2S_{-1} \ln 2$
Белый шум частоты	S_0	$\frac{S_0}{2\tau}$



$$\sigma_v^2(\tau) \equiv \frac{1}{2} \left\langle (\bar{v}(t_2) - \bar{v}(t_1))^2 \right\rangle_t = 2 \int_0^{\infty} S_v(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df.$$



Параметр	Формула
Частота перегиба (среза)	$f_c = \frac{S_{-1}}{S_0}$
Мгновенная ширина линии	$\Delta\nu_L = \pi S_0$

Плюсы и минусы $S(f)$ и дисперсии Аллана



Плюсы спектрального рассмотрения:

- Дает полный спектральный анализ шума;
- В спектре шумов хорошо видны «помехи»
- Позволяет вычислить дисперсию Аллана (обратно в общем случае решения нет).

Плюсы использования дисперсии Аллана:

- Исключительно удобна с точки зрения экспериментальных измерений
- Удобно описывает линейные уходы частоты a
- Позволяет получить коэффициенты вкладов шумов со степенной зависимостью
- Дает более надежную оценку для S -параметров при автогетеродинаровании (когда спектр частоты “замыливается” синусоидальной передаточной функцией интерферометра)

$$a = df / dt$$

$$S_v(f) = S_0 + \frac{S_{-1}}{f} + \frac{S_{-2}}{f^2} + \dots$$

Параметры,
характеризующие лазер

Спектр интенсивности лазера для $S(f) = S_0$



$$E(t) = [E_0 + \cancel{\epsilon(t)}] e^{i[\omega_0 + 2\pi\nu(t)]t}$$

$$S_\nu(f)$$

Общий случай.

$$R_{Las}(\tau) = \langle E(t+\tau)E^*(t) \rangle$$

$$R_{Las}(\tau) = E_0^2 \exp[i\omega_0\tau] \exp\left(-\int_0^\infty \frac{S_\nu(f)[1 - \cos 2\pi f\tau]}{f^2} df\right)$$

Теорема Винера-Хинчина:

спектральная плотность мощности случайного процесса есть образ Фурье его автокорреляционной функции.*

(*процесс стационарный)

$$S_{Las}(\nu) \sim \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega\tau) R_{Las}(\tau) d\tau$$

Частный случай.

Пусть $S_\nu(f) = S_0$, тогда

$$R_{Las}(\tau) = E_0^2 \exp[i\omega_0\tau] \exp[-\tau / \tau_{coh}]$$

откуда по теореме Винера-Хинчина сразу получаем:

$$S_{Las}(f) = 2E_0^2 \frac{\pi^2 S_0}{(\pi^2 S_0)^2 + 4\pi^2 f^2}$$

т.е. спектр интенсивности лазерного излучения - профиль Лоренца с шириной по полувысоте

$$\Delta\nu_L = \frac{1}{\tau_{coh}} = \pi S_0$$

Ф. Риле

«Стандарты частоты.

Принципы и приложения»

Спектр интенсивности лазера для $S(f) = S_{-1}/f$



$$R_E(\tau) = E_0^2 \exp[i\omega_0\tau] \exp\left(-\int_0^\infty \frac{S_v(f)[1 - \cos 2\pi f\tau]}{f^2} df\right)$$

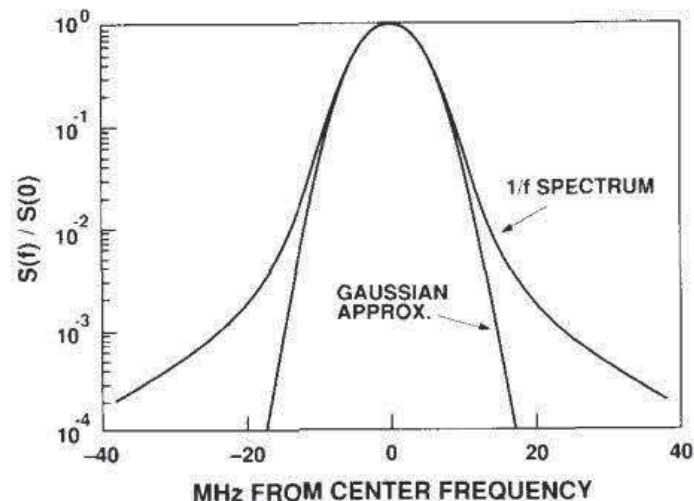
Но теперь $S_v(f) = S_{-1}/f$, и интеграл расходится ...

Но время измерения ограничено, урежем интеграл!

Результат аппроксимируется профилем Гаусса с шириной:

$$\Delta\nu_G \approx \sqrt{8 \ln 2 S_{-1} \left[1 + \ln \left(T_{\text{изм}} \sqrt{2 S_{-1}} \right) \right]}.$$

Ширина линии зависит от времени измерения!



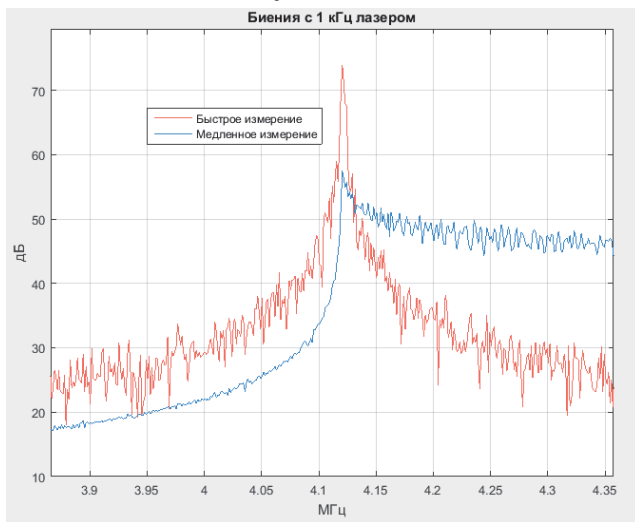
Ф. Риле
«Стандарты частоты.
Принципы и приложения».

Поясним на примере «болтанки» частоты лазера

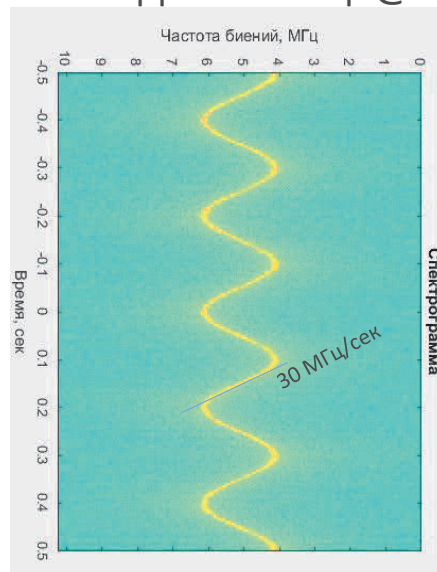


Спектр зависит от времени измерения

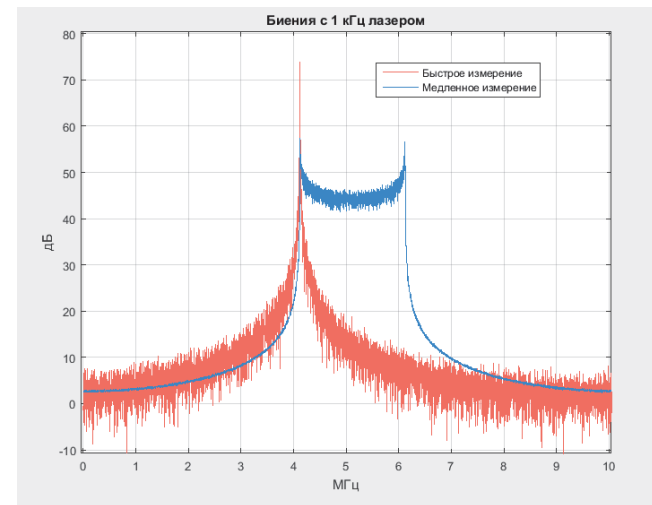
Быстрое измерение
~ Лоренц, 1 кГц



Уход на 1 МГц @ 5 Гц



Длительное измерение
~ 2 МГц «чемодан»



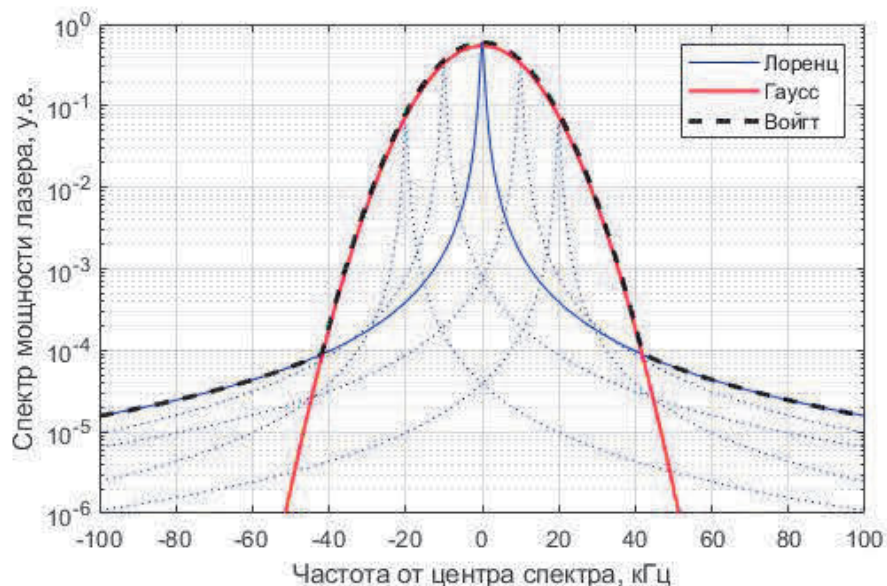
Численная модель

Спектр интенсивности: белый шум + шум 1/f



Если $S_\nu(f) = S_{-1} / f + S_0$, то спектр мощности -
профиль Войгта - свертка профилей Гаусса и Лоренца.
Ширина линии Войгта аппроксимируется, как:

$$\Delta \nu_V \approx 0.535 \cdot \Delta \nu_L + \sqrt{0.217 \cdot \Delta \nu_L^2 + \Delta \nu_G^2}.$$



«Вершина» - профиль Гаусса
«Крылья» - профиль Лоренца

Ф. Риле
«Стандарты частоты.
Принципы и приложения».

Численное моделирование лазерного шума



Белый шум частоты

$$\Delta\phi(t_i) = \sqrt{2\pi \Delta\nu_0 \Delta t} A(t_i)$$

$A_i \sim N(0, 1)$ – норм. распр случайные числа

$$f_{white}(t_i) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi(t_i)}{\Delta t}$$

Фликкер-шум (1/f) частоты

$$w \sim N(0, \pi S_{-1});$$

$$\tilde{w} = FFT(w);$$

$$\tilde{h} = FFT(h); \quad \leftarrow \text{Фильтр } 1/f$$

$$\tilde{F} = \tilde{h} \otimes \tilde{w};$$

$$f_{flicker} = IFFT(\tilde{F});$$

$$\begin{cases} h(t_0) = 1; \\ h(t_i) = h(t_{i-1}) \frac{0,5 \cdot \alpha + i - 2}{i - 1}; \\ \alpha = -1; \end{cases}$$

N. J. Kasdin, Proceedings of the IEEE, vol. 83, №5, pp 802-827, 1995.

E. Fomiryakov et al., Journal of Lightwave Technology, vol. 39, no. 15, pp. 5191-5196, Aug.1, 2021

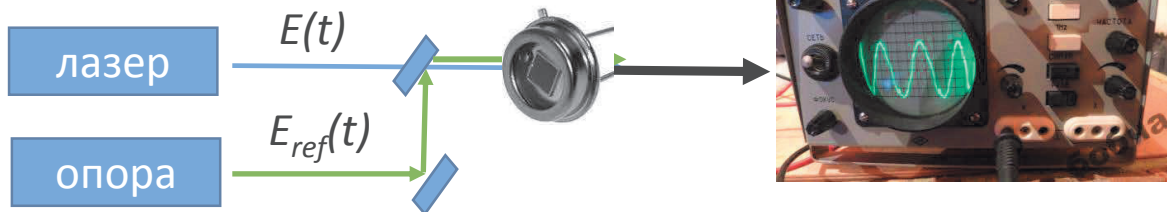
Гетеродинирование разных лазеров

«Переносит» оптический спектр в радио диапазон

Сигнал биений (фототок):

$$I(t) = |E(t) + E_{ref}(t)|^2 = \dots + 2|E(t)E_{ref}^*(t)|$$

Если $E_{ref}(t)$ - идеальная синусоида, то $I(t) \sim E(t)$, и смещена на разницу частот - в радио диапазон!

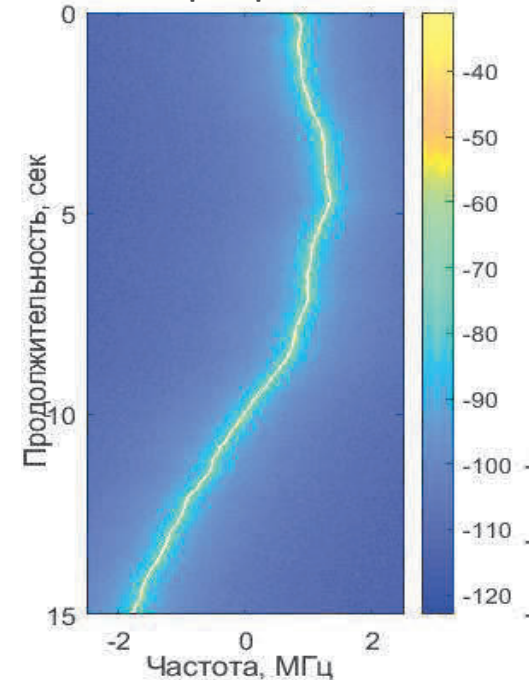


Опорный лазер (не хуже тестируемого!)
Близкий по оптич. частоте
(Вблизи 1.5 мкм 1 ГГц = 0.008 нм)
Широкая (ГГц) частотная полоса приема

Осциллограф
или
анализатор
спектра



Спектрограмма биений

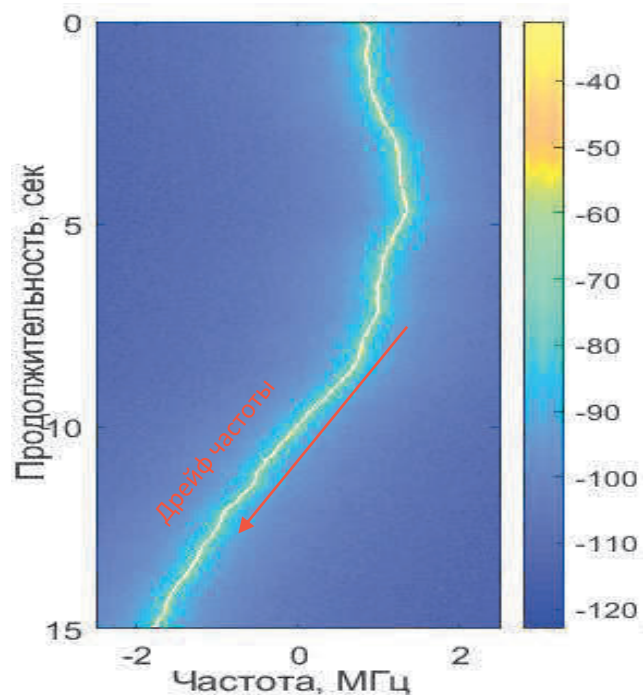


Спектрограмма лазерного излучения

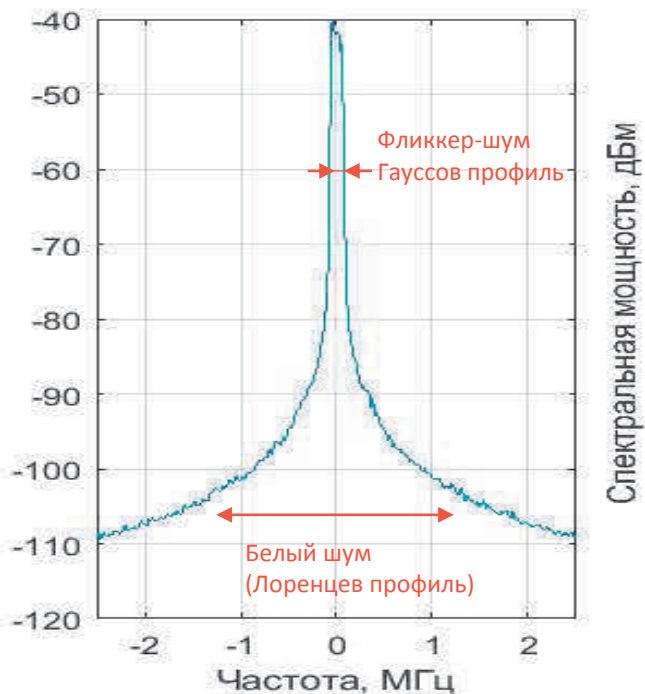
Фазовые шумы:

- Белый шум частоты - мгновенная ширина линии $\Delta\nu_L = \pi S_0$, Гц;
- Фликкер-шум частоты - частота среза $f_c = S_{-1}/S_0$, Гц;
- Уходы частоты – a , МГц/с (в случае линейных уходов) – **трудно описывается $S(f)$**

Спектрограмма

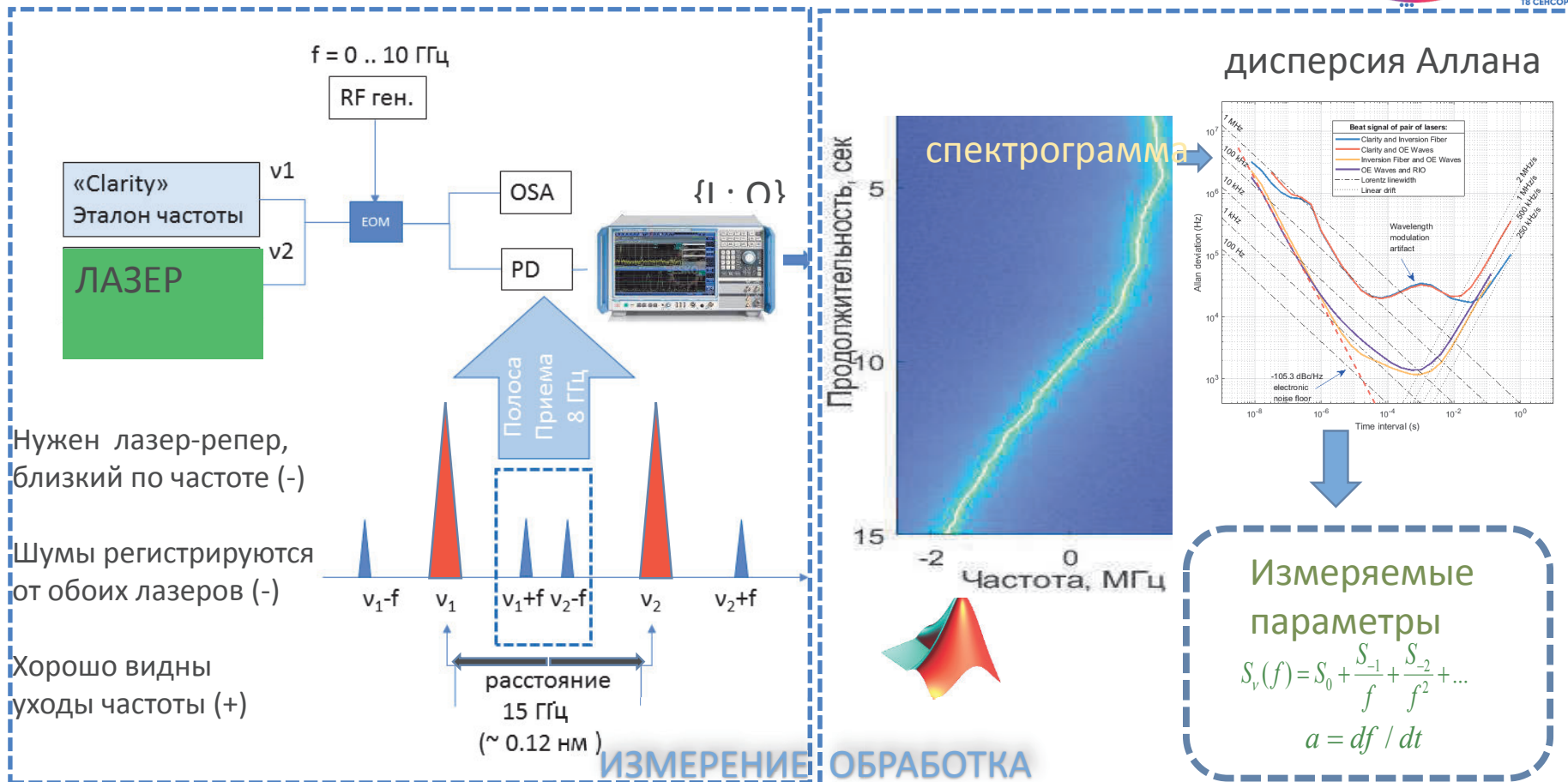


Спектр мощности



Войгт = свертка двух профилей

Гетеродинирование 2 разных лазеров



Нужен лазер-репер,
близкий по частоте (-)

Шумы регистрируются
от обоих лазеров (-)

Хорошо видны
уходы частоты (+)

дисперсия Аллана

Измеряемые
параметры

$$S_v(f) = S_0 + \frac{S_{-1}}{f} + \frac{S_{-2}}{f^2} + \dots$$

$$a = df / dt$$

Соотношение неопределённости

$\Delta\nu\delta t \sim 1$



Нужно ли ждать секунды, чтобы убедиться что ширина линии 1 Гц?

$$f(\omega) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

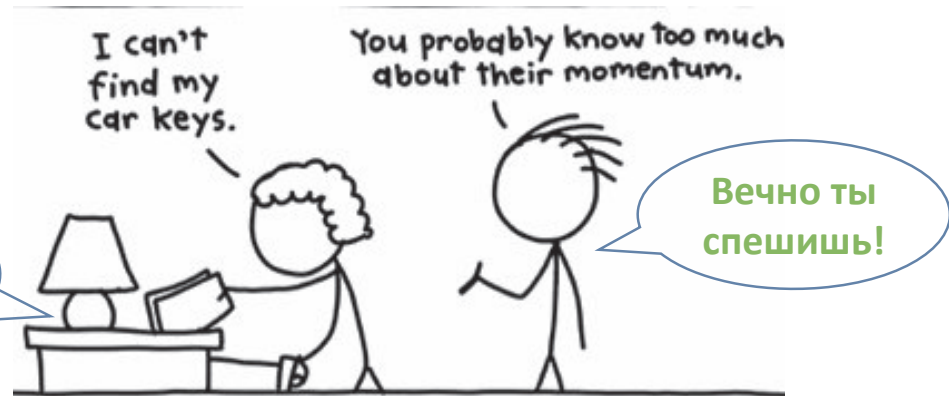
$$f_T(\omega) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-T/2}^{+T/2} f(t)W(t)e^{-i\omega t} dt$$

Интеграл Фурье требует бесконечно долгого измерения

На практике, время «ограничено»: $W(t)$ – «окно», в пределах от $-T/2$ до $T/2$.

Спектральное разрешение ограничено
Временем измерения $\sim 1/T$ и зависит от конкретной формы $W(t)$

Не вижу узкой линии!



Вам шашечки или ехать ?

- Ширина линии зависит от продолжительности измерения
- Способов пересчёта $S(f)$ в ширину линию много

Расхождение в разы!

- Шум интерферометрии вычисляется из $S(f)$

$$\sigma^2(\phi) = \int_{f_1}^{f_2} \frac{S_v(f)}{f^2} df$$

- Так давайте $S(f)$ и использовать!

$$S_v(f) = S_0 + \frac{S_{-1}}{f} + \frac{S_{-2}}{f^2} + \dots$$

Как «параметризовать» $S(f)$?

есть еще уходы частоты!

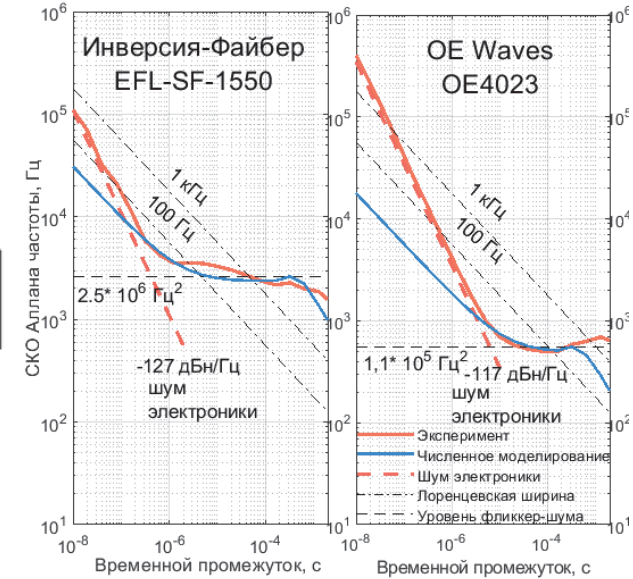
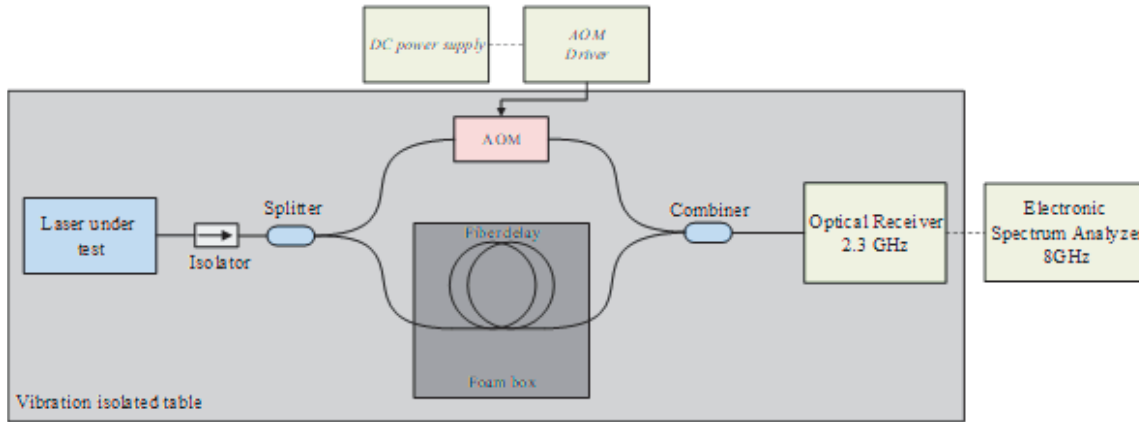


Авто-гетеродирование лазера



- Автогетеродинамирование лазера с линией задержки (10 – 100 км)

Ishida O. JLT (1991) – Т. 9. – №. 11. – С. 1528-1533.



- Измерение без реперного лазера (+)
- Измеряются шумы только одного лазера (+)
- Нужна скромная (<1 ГГц) частотная полоса приема (+)
- Не обнаруживаются уходы частоты (-)
- Длина задержки < c/nΔν, но обычно >10 км

Fomiryakov et al, JLT (2020)

$$a = df / dt \qquad S_v(f) = S_0 + \frac{S_{-1}}{f} + \frac{S_{-2}}{f^2} + \dots$$

Измеряемые параметры

Длина линии задержки при автогетеродинамировании



- Спектр интенсивности $S_E(f)$

Линия задержки больше длины когерентности $\tau_{coh} \sim c/\Delta\nu_{las}$

- Спектр фазы $S_\phi(f)$ или частоты $S_\nu(f)$

Можно использовать короткую линию задержки, для того чтобы отфильтровать $1/f$ шум и получить только вклад от Лоренцевской ширины линии

- Дисперсия Аллана частоты $\sigma_\nu^2(\tau)$

Линия задержки порядка обратной угловой частоте f_c в спектре S_ν

Можно измерить и $1/f$ шумы (даже S_{-2}), и Лоренцевскую ширину линии.

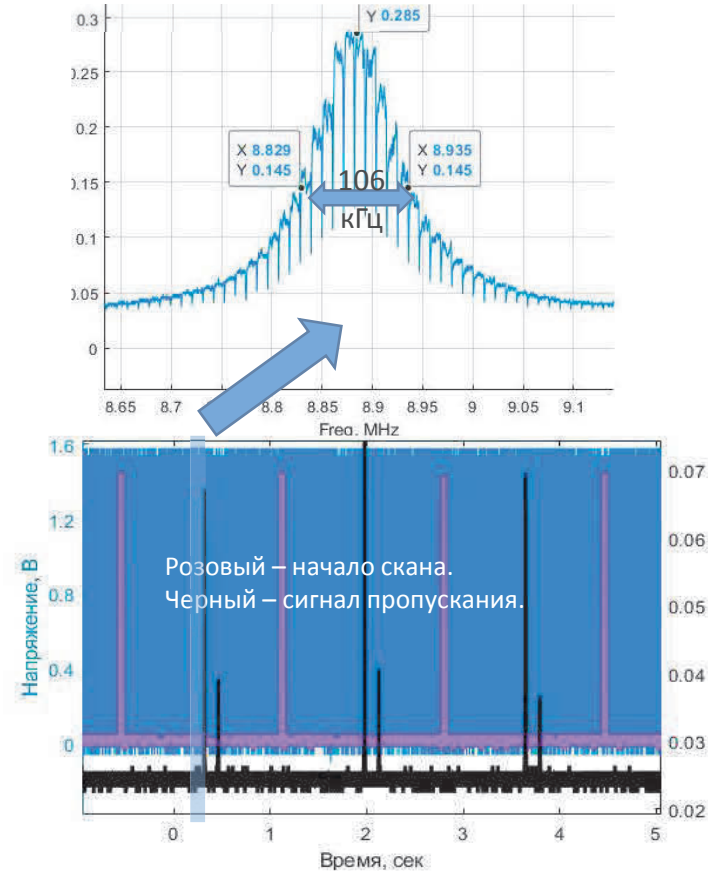
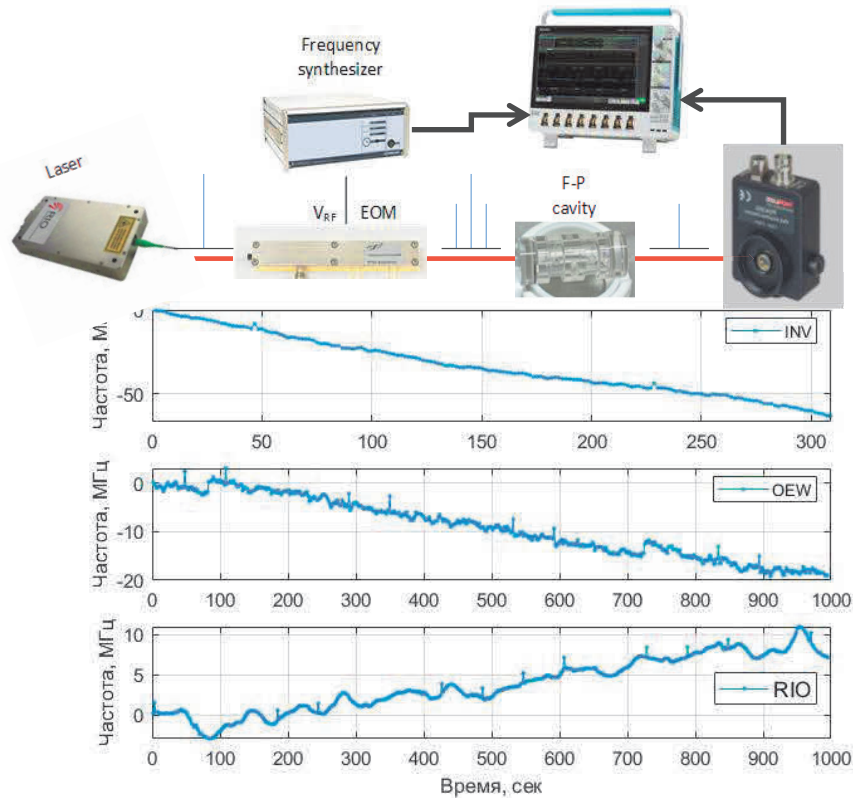
L. Mercer, J. Lightw. Technol., vol. 9, no. 4, pp. 485–493, 1991

H. Ludvigsen et al., Opt. Commun., vol. 155, no. 1-3, pp. 180–186, 1998.

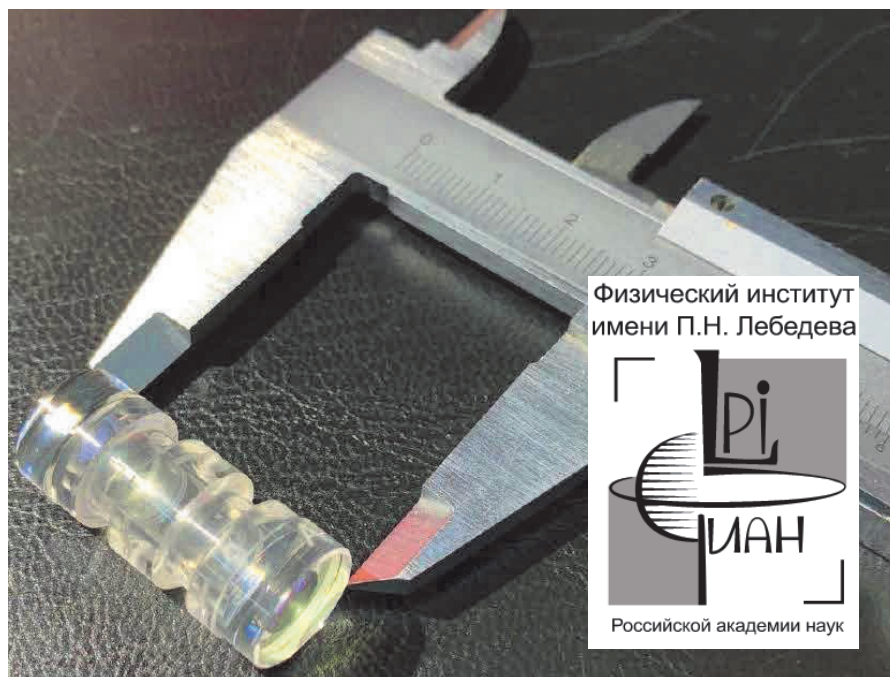
E. Fomiryakov et al., J. Lightw. Technol., vol. 39, no. 15, pp. 5191-5196, Aug.1, 2021

O. Ishida, J. Lightw. Technol., vol. 9, no. 11, pp. 1528–1533, 1991.

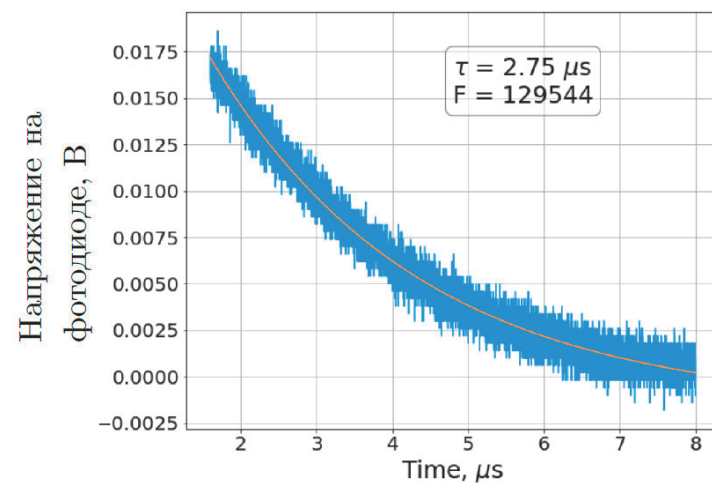
Что делать на минутах-часах? Эталон Ф-П!



Компактный термостабильный эталон ФП



ULE 7972 Premium grade



$L = 20 \text{ mm}$
 $Q \sim 1.2 \cdot 10^5$

Компактные лазерные источники

Лаз. диод с
дисперсией
потерь:

1 RIO

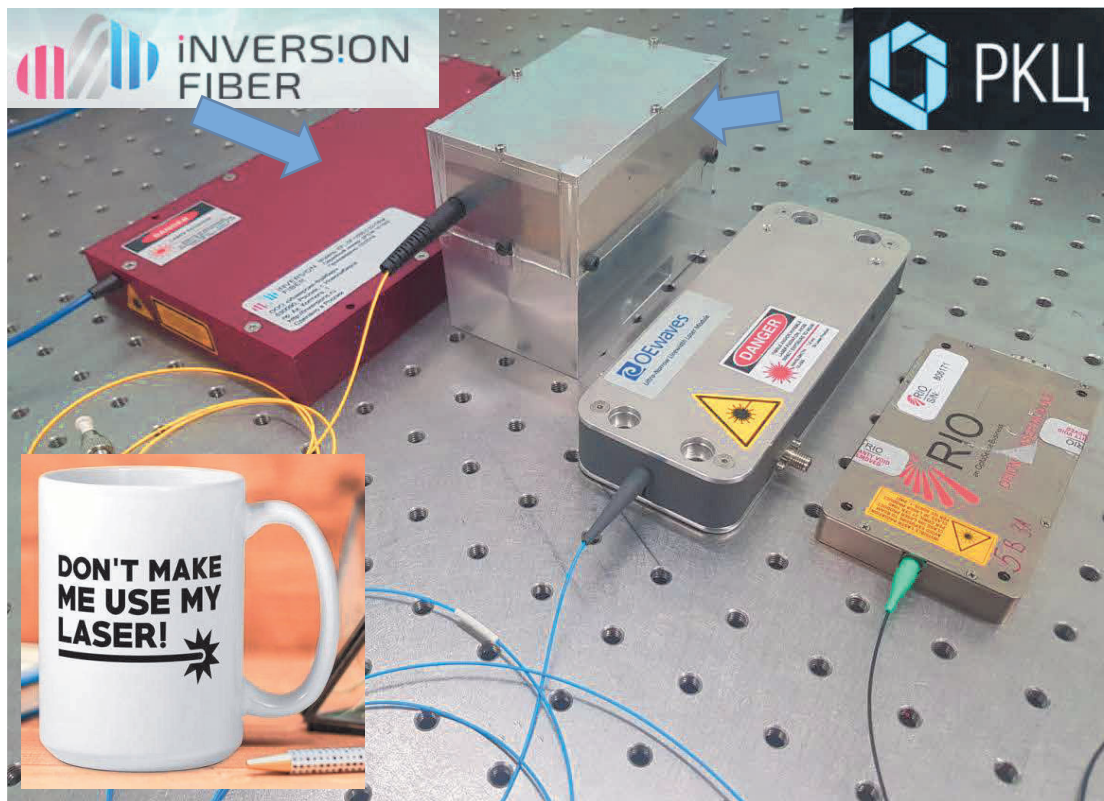
Лаз диод с
внешним МШГ

2 OE Waves

3 РКЦ - Т8

Волоконный DFB
лазер

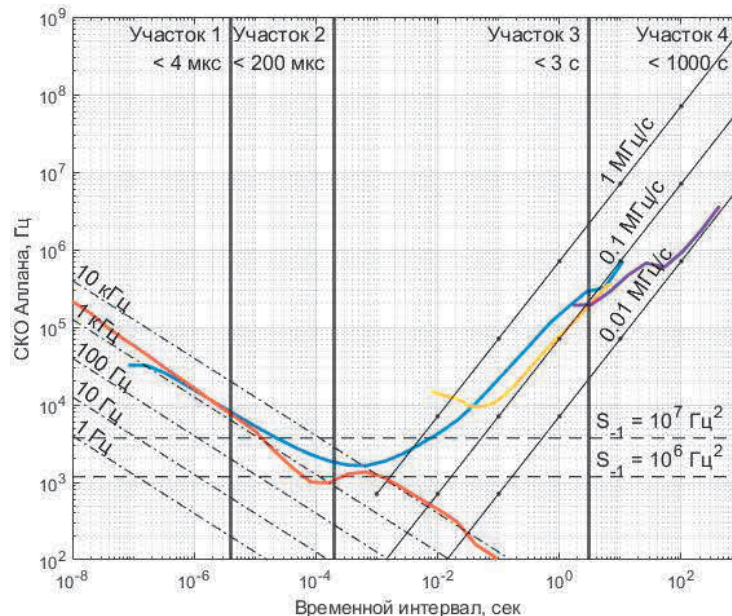
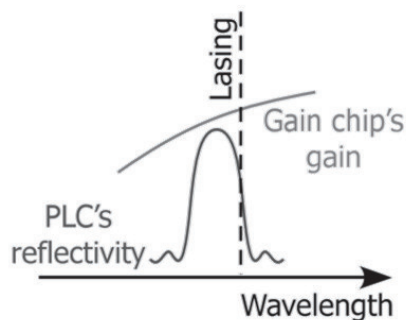
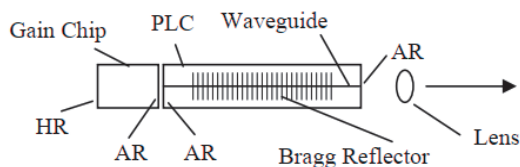
4. Inversion Fiber



Узкополосный лазерный источник



RIO Orion - Диодный лазер с планарной брэгговской решеткой
Гетеродин + автогетеродин + сканирование эталона Ф-П



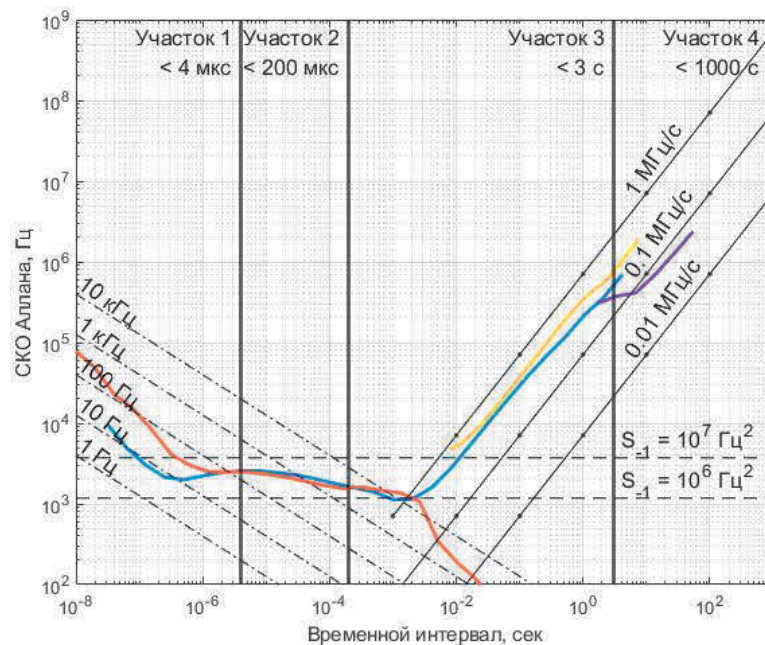
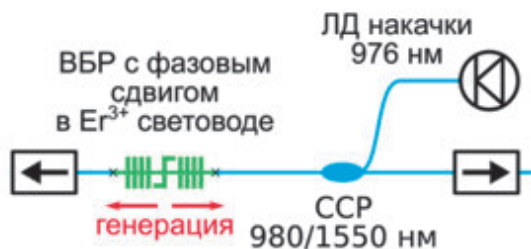
- Гетеродин и автогетеродин показывают Лоренцевскую ширину 2 кГц.
- Практически не виден уровень фликкер-шума: $S_{-1} > 10^6 \text{ Гц}^2$.
- Гетеродин и сканирование эталона показывают линейные уходы частоты $< 100 \text{ кГц/с}$.

Узкополосный лазерный источник



Inversion Fiber Волоконный РОС-лазер

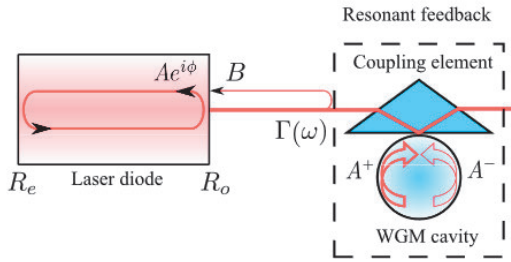
Гетеродин + автогетеродин + сканирование эталона Ф-П



- Гетеродин и автогетеродин показывают, что Лоренцевская ширина 10 - 50 Гц.
- Уровень фликкер-шума $S_{-1} \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ Гц}^2$.
- Гетеродин и сканирование эталона показывают линейные уходы частоты от 100 до 600 кГц/с, меняющийся при нагреве лазера.

Узкополосный лазерный источник

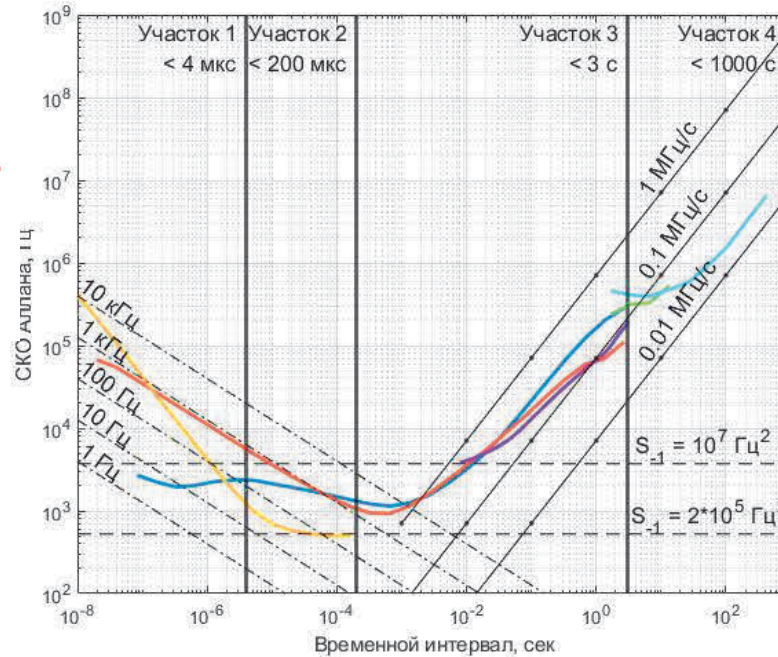
OE Waves - Диодный лазер с внешним МШГ-резонатором
Гетеродин + автогетеродин + сканирование эталона Ф-П



Research Article, Vol. 25, No. 23 | 13 Nov 2017 | OPTICS EXPRESS 28167
Optics EXPRESS

Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator

N. M. KONDRATIEV,¹ V. E. LOBANOV,¹ A. V. CHERENKOV,^{1,2}
A. S. VOLOSHIN,¹ N. G. PAVLOV,^{1,3} S. KOPTYAEV,⁴ AND
M. L. GORODETSKY^{1,2,*}



- Гетеродин OEW + INV показывает уровень фликкер-шума INV и Лоренцевская ширину не более 10 Гц.
- Автогетеродин на $\tau \sim 10^{-5}$ с показывает уровень фликкер-шума $S_{-1} = 2 \cdot 10^5$ Гц².
- Гетеродин и сканирование эталона показывают линейные уходы частоты ~ 100 кГц/с.

Сравнение лазерных источников

Лазер	Схема лазера	$\Delta\nu_L$, Гц	S_{-1} , Гц ²	a , кГц/с
OE Waves		< 10	$2 \cdot 10^5$	~600
RIO Orion		2000	10^6	100
Inversion Fiber		< 50	$2,5 \cdot 10^6$	100

Выводы



- Для сенсорики и телекома достаточно иметь узкой «мгновенную» ширину линии
- Интегральная ширина линии – вещь сложная, зависит от T измерения
- Для многих задач достаточно измерить **уровни белого и фликкер-шумов**
- Можно использовать автогетеродинирование с задержкой $< T$ когерентности
- Не нужно долго ждать, чтобы убедиться что мгновенная ширина мала!
- Использование дисперсии Аллана удобнее и в нем легче «разделить» шумы электроники от лазерных
- На секундных масштабах – запись данных осциллографом
- **Долговременные уходы** важны при суб-Гц измерениях
- На долгих масштабах – удобно использовать эталон ФП
- **Мы всегда рады новым лазерам – приносите!**



Спасибо за внимание!

nikitin@t8.ru

Нет. Только рассказываю ...

