



VREM YA-CH[®]
RUSSIA

**«ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЕ
И НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ» (КВНО-2015)**

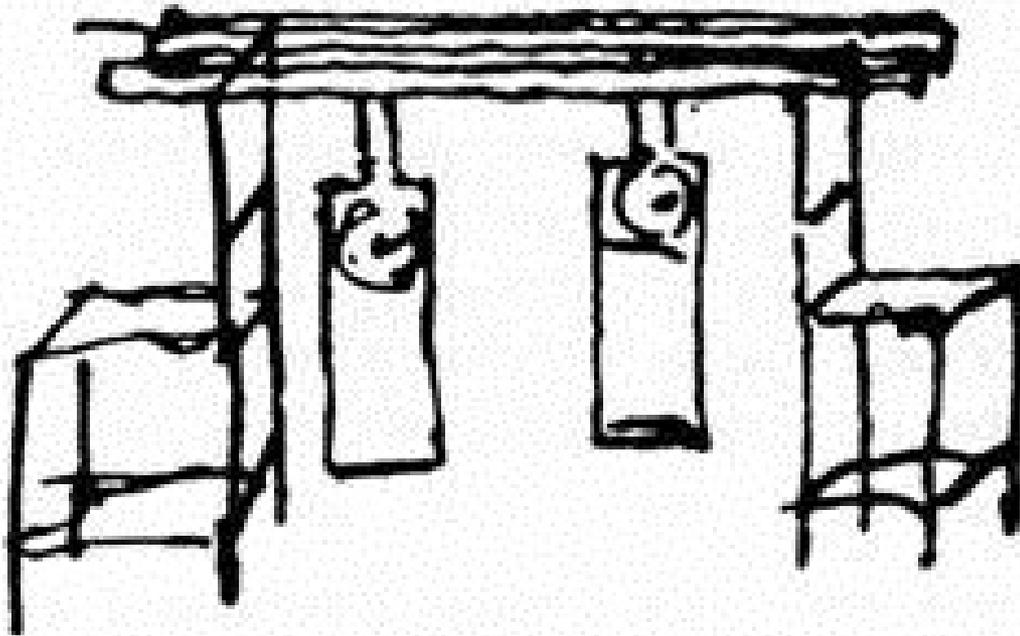
Использование синхронизации для уменьшения фазового шума в группе прецизионных генераторов

***Мишагин К.Г., Чернышев И.Н., Сахаров Б.А.,
Кауркин В.В., Подогова С.Д.***

23 апреля 2015, Санкт-Петербург



- Известные результаты по синхронизации взаимосвязанных автогенераторов
- Моделирование различных ансамблей кварцевых генераторов
- Экспериментальные результаты



1665 г.
Х. Гюйгенс



1000C Ultra High Performance Crystal Oscillator

1000C

Specifications

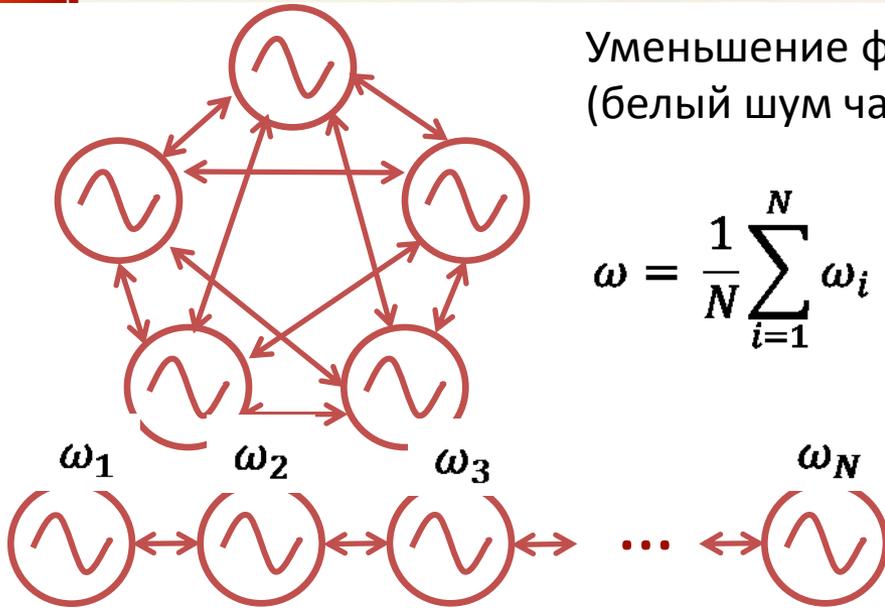
ELECTRICAL SPECIFICATIONS

- Frequency: (4) 5 MHz
- Amplitude of outputs: (2) 1Vrms, (2) 0.5 Vrms
- Harmonic distortion: <-40 dBc
- Spurious signals: <-80 dBc
- Short term stability: 0.1st through 100s <3.0E-13
High Performance version <2.0E-13
Ultra High Performance version <5.0E-9 over operating range
- Aging per day (see note 1) (after 30 days of operation)

Phase noise	Frequency	High Performance	Ultra High Performance
	1 Hz	-120 dBc	-130 dBc
	10 Hz	-145 dBc	-150 dBc
	100 Hz	-156 dBc	-157 dBc
	1 kHz	-160 dBc	-160 dBc
	10 kHz	-160 dBc	-160 dBc
	100 kHz	-160 dBc	-160 dBc



Уменьшение фазового шума при взаимной синхронизации (белый шум частоты)



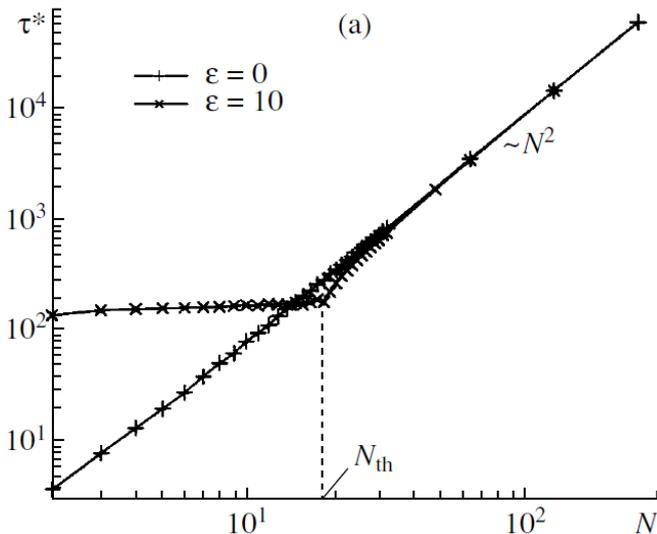
$$\omega = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i$$

$$\sigma^2 \approx \frac{\sigma^2_i}{N}$$

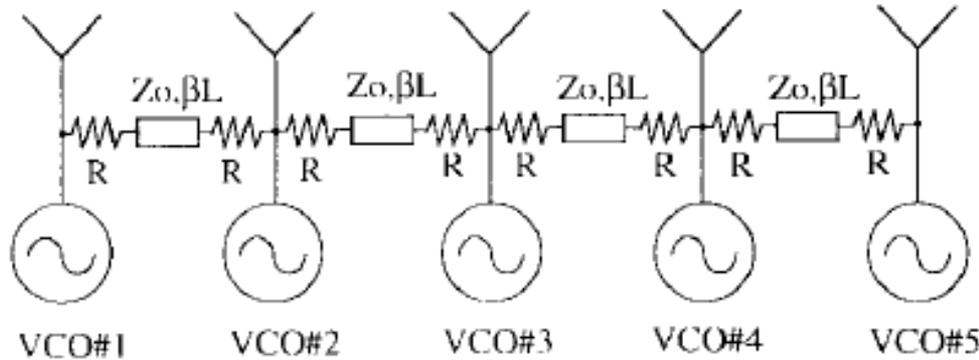
H.C. Chang, X. Cao, U.K. Mishra, R.A. York *Phase Noise in Coupled Oscillators: Theory and Experiment* // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, V. 45, N. 5, 1997

Увеличение длительности переходного процесса, если связь не «все со всеми»

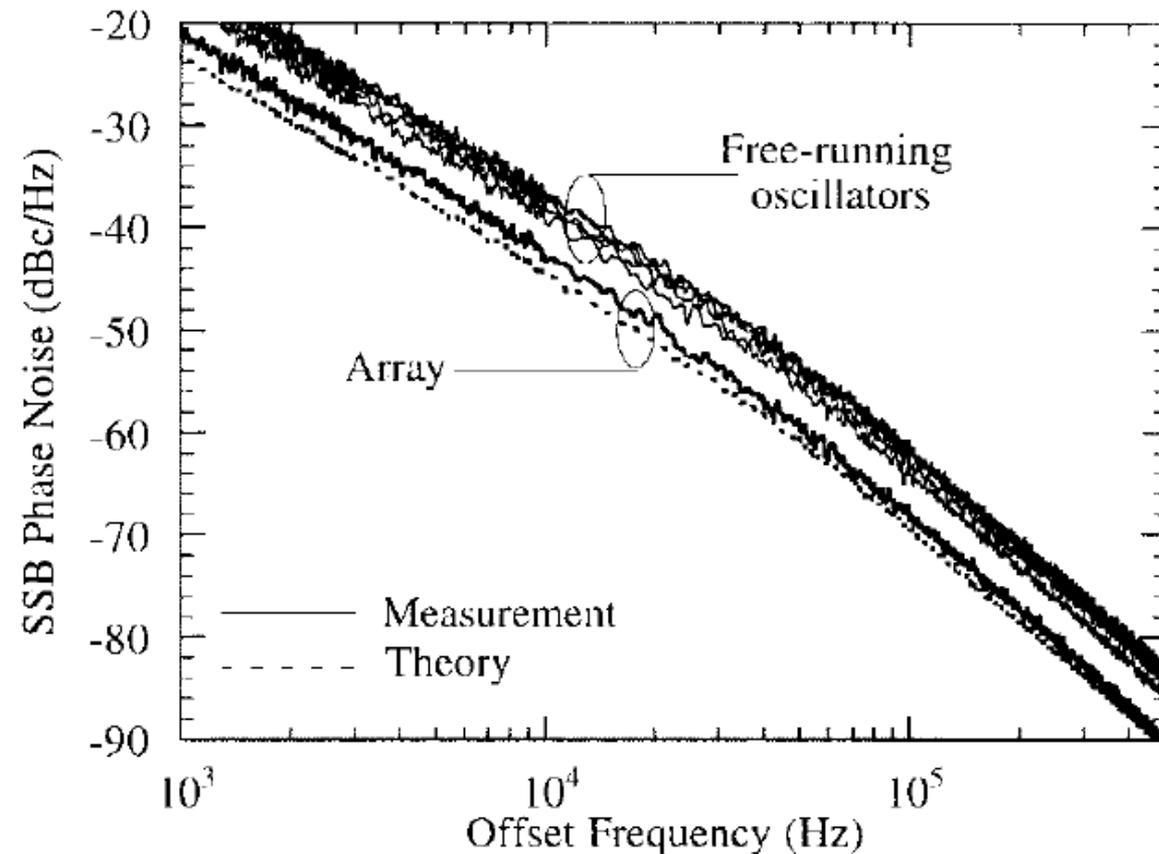
$$\tau \sim N^2$$



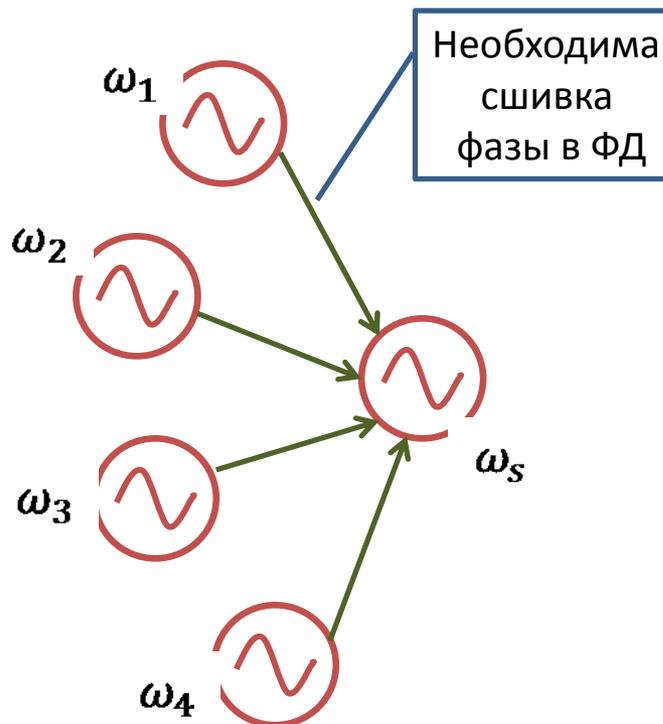
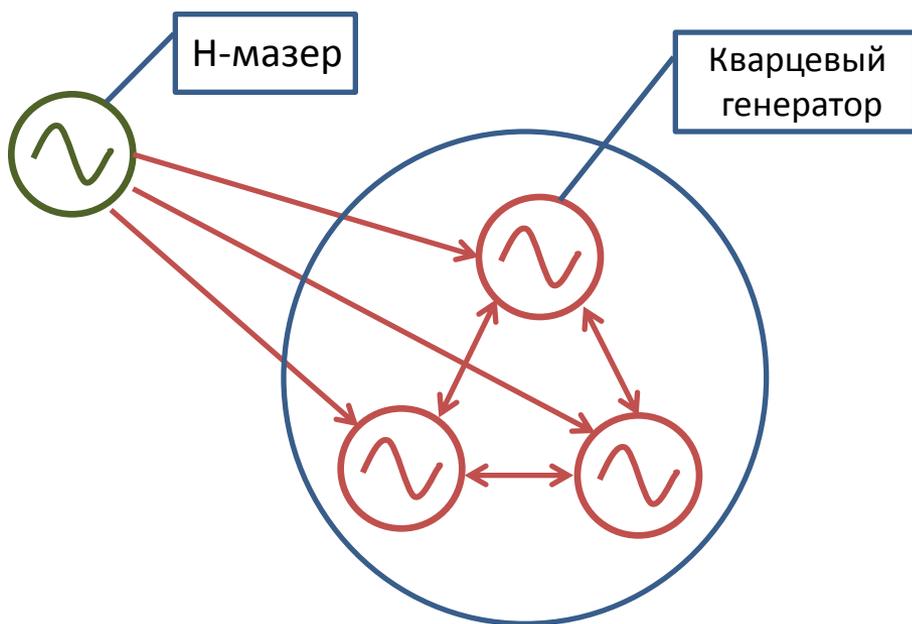
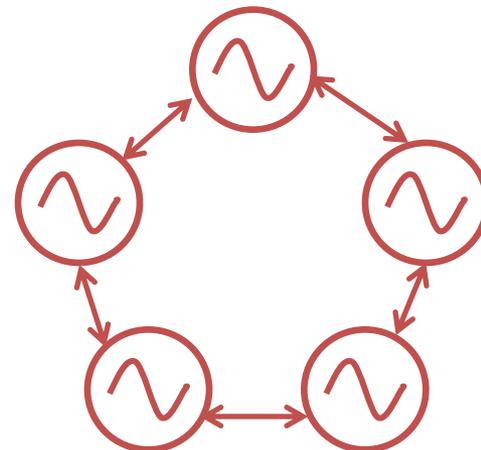
Мишагин К.Г., Шалфеев В.Д. Управление градиентными фазовыми распределениями в модели активной антенной решетки с локальными связями между элементами // Письма в "Журнал технической физики". - 2006. - Т. 32, вып. 23. - С. 32-39

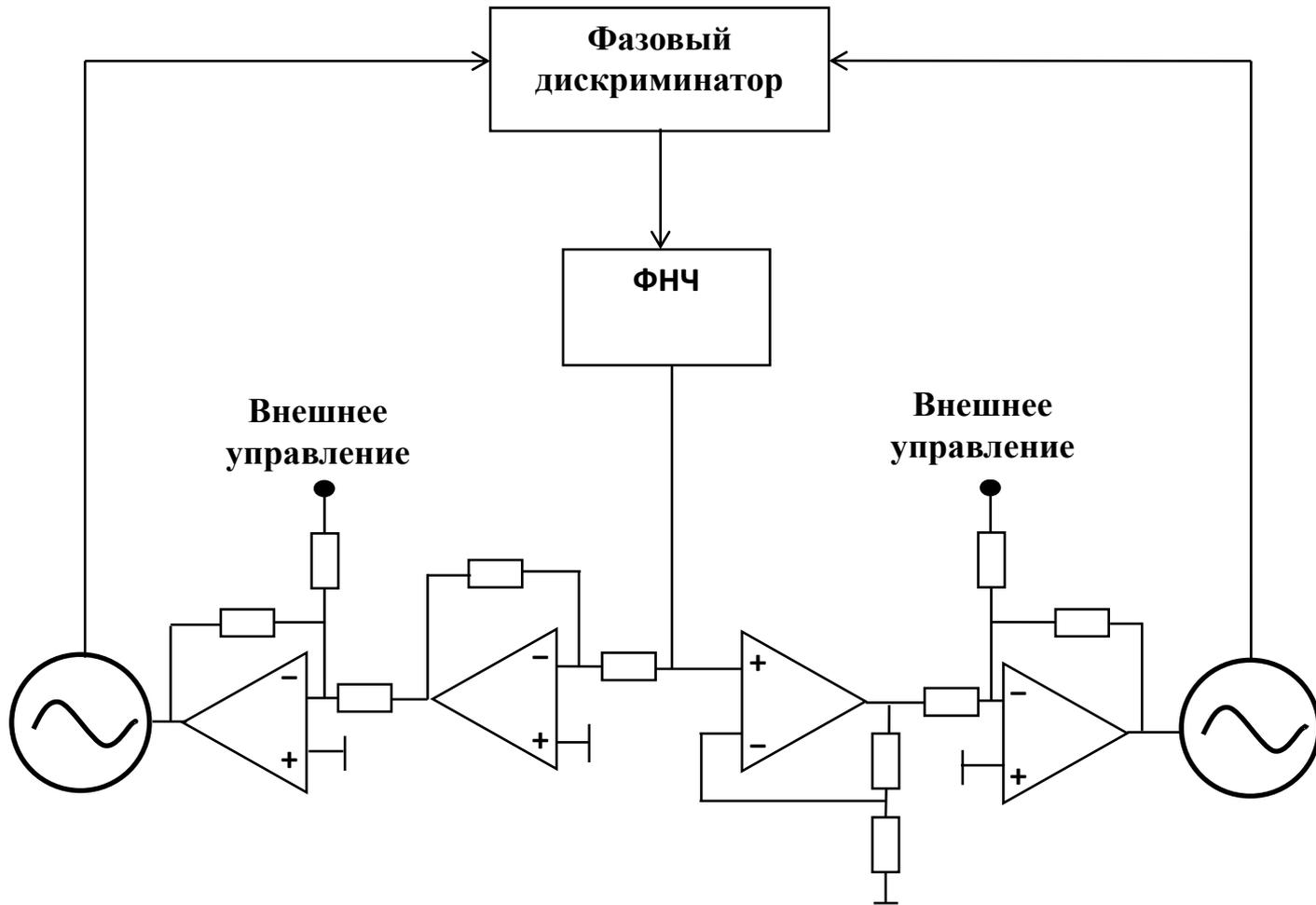


Частота генерации 8-9 ГГц, $N = 5$.
Связь осуществляется с помощью простого инжектирования сигнала.



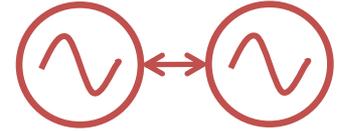
H.C. Chang, X. Cao, U.K. Mishra, R.A. York Phase Noise in Coupled Oscillators: Theory and Experiment // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, V. 45, N. 5, 1997







$$\frac{d\theta_1}{dt} = p\theta_1 = \omega_1(t) + n_1(t), \quad \frac{d\theta_2}{dt} = p\theta_2 = \omega_2(t) + n_2(t),$$



$$n_{1,2}(t) = \xi_{1,2}(t) + \eta_{1,2}(t), \quad \frac{d\eta_{1,2}}{dt} = \zeta_{1,2}(t)$$

$$\langle \xi_{1,2}(t)\xi_{1,2}(t-\tau) \rangle = \frac{1}{2}\sigma_{WF}^2\delta(\tau) \quad \langle \zeta_{1,2}(t)\zeta_{1,2}(t-\tau) \rangle = \frac{1}{2}\sigma_{RW}^2\delta(\tau)$$

$$\langle \xi_1(t)\xi_2(t-\tau) \rangle = 0$$

$$\langle \zeta_1(t)\zeta_2(t-\tau) \rangle = 0$$

$$\omega_1(t) = \omega_1^0 + S_1 U_{VCO1}(t), \quad \omega_2(t) = \omega_2^0 + S_2 U_{VCO2}(t)$$

$$U_{VCO1}(t) = -K(p)E \sin(\theta_1 - \theta_2 + \Phi) + U_{ext},$$

$$U_{VCO2}(t) = K(p)E \sin(\theta_1 - \theta_2 + \Phi) + U_{ext}.$$

В режиме синхронизации:

$$\omega_s = \frac{S_2\omega_1^0 + S_1\omega_2^0 + 2S_1S_2U_{ext}}{S_1 + S_2}$$

$$(\theta_2 - \theta_1)_s = \arcsin\left(\frac{S_1\omega_2^0 - S_2\omega_1^0 - S_1^2U_{ext}}{ES_1(S_1 + S_2)}\right) + \Phi$$

**При симметричной связи
и без внешнего управления:**

$$\omega_s = \frac{\omega_1^0 + \omega_2^0}{2},$$

$$(\theta_2 - \theta_1)_s = \arcsin\left(\frac{\omega_2^0 - \omega_1^0}{2SE}\right) + \Phi.$$



$$\begin{cases} \frac{d\varphi_1}{dt} = y_1 + n_1(t), \\ \frac{dy_1}{dt} = \left[\Delta\omega_1 - y_1 - k_1 \sin\left(\varphi_1 - \varphi_2 + \frac{\pi}{2}\right) \right] / T, \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = y_2 + n_2(t), \\ \frac{dy_2}{dt} = \left[\Delta\omega_2 - y_2 - k_2 \sin\left(\varphi_2 - \varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) \right] / T. \end{cases}$$

Частота $F = 5$ МГц

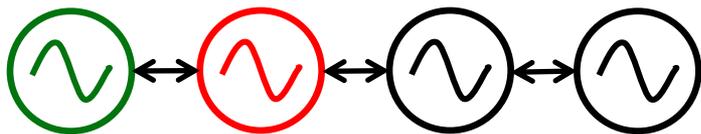
Фильтр первого порядка $T = 0.01$ с

Крутизна характеристики $S = 2 \cdot 10^{-7}$ В⁻¹

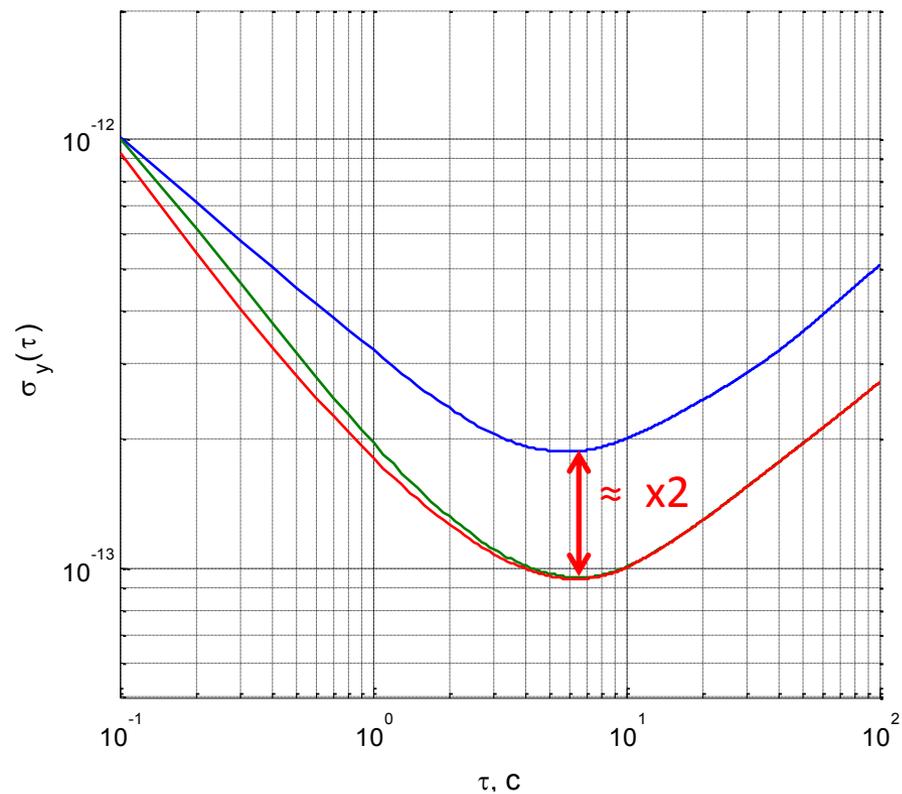
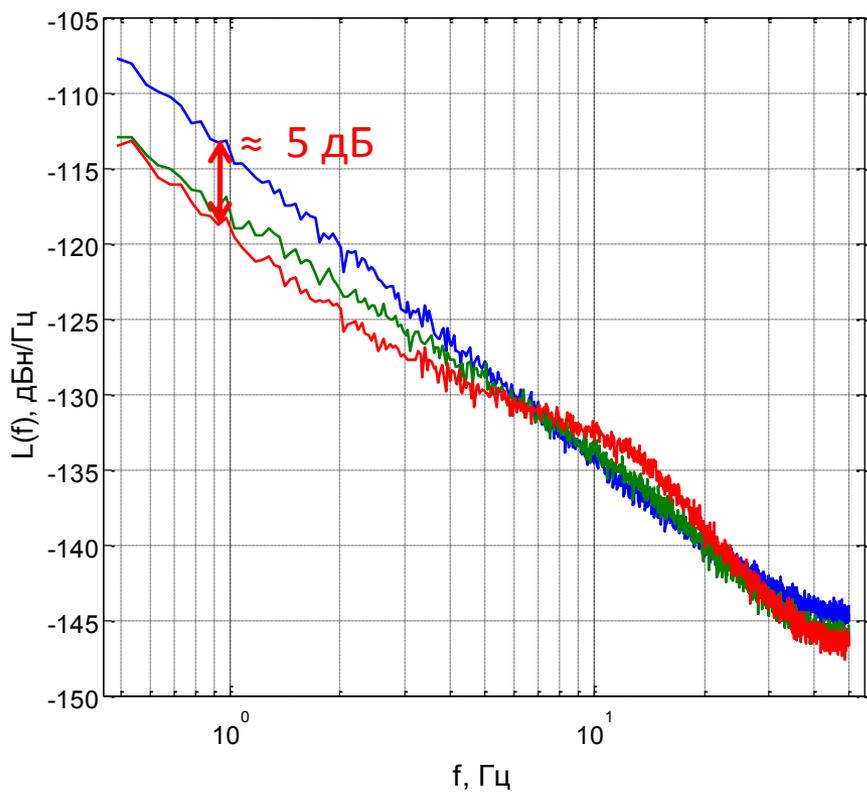
Коэффициенты (при $E = 1$ В) $k_{1,2} = 2\pi$ рад/с.

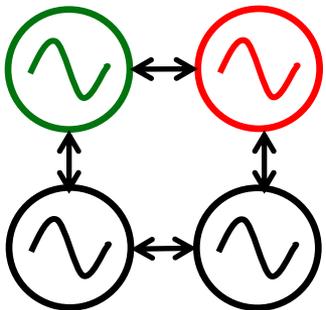
Белый частотный шум $\sigma_{WF} = 10^{-5}$

Шум случайных блужданий частоты $\sigma_{RW} = 3 \cdot 10^{-8}$

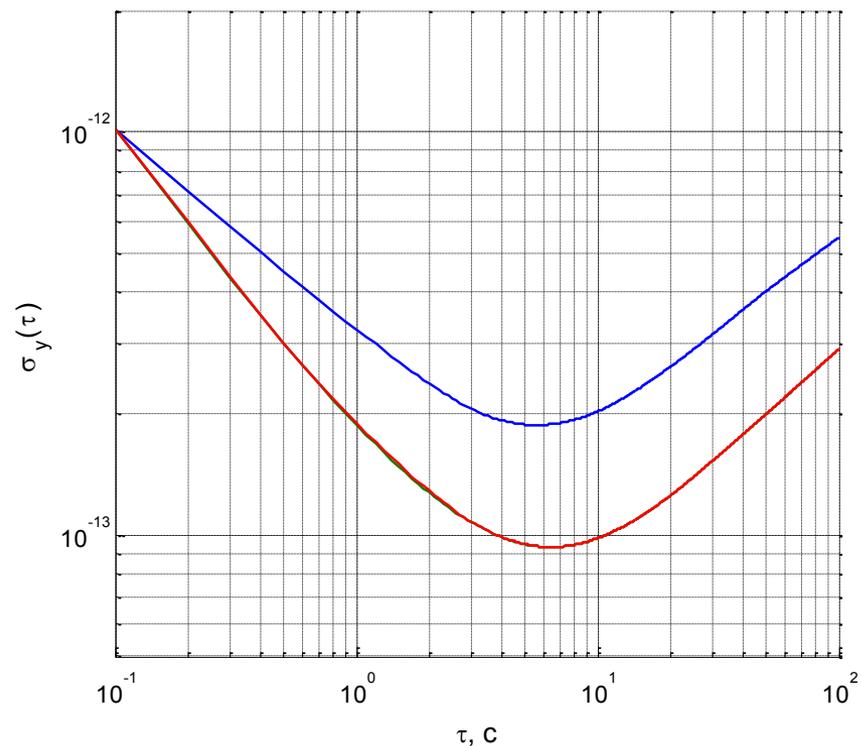
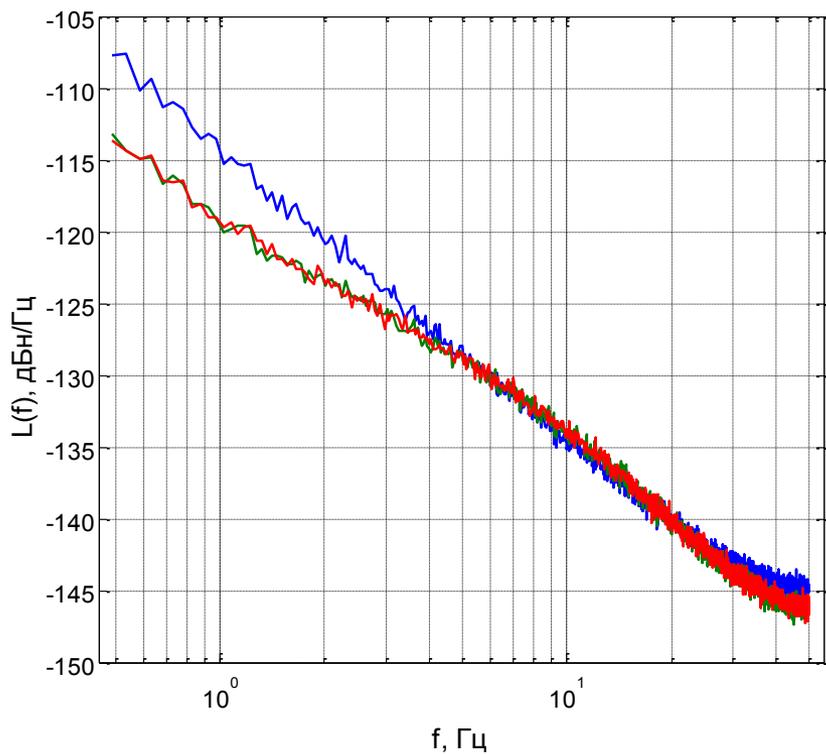


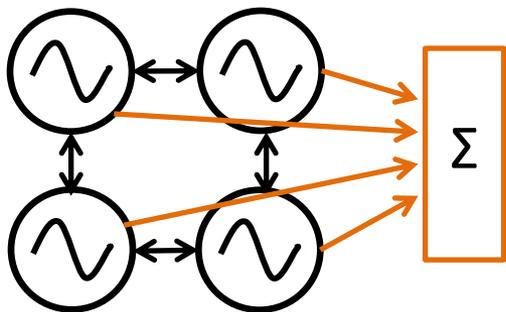
Характеристики сигналов на выходе отдельных генераторов



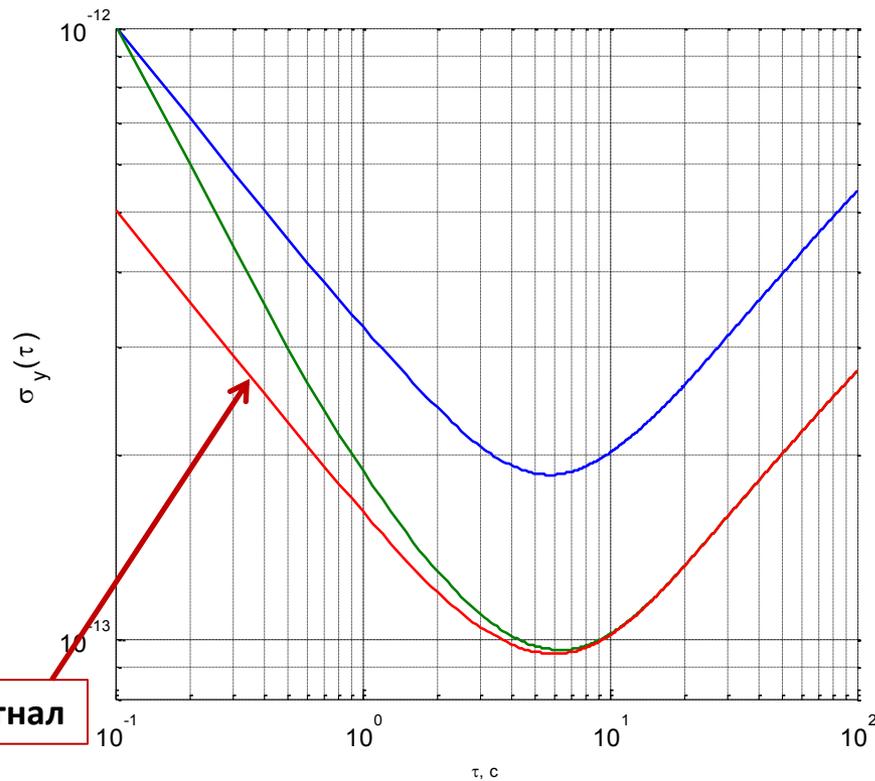
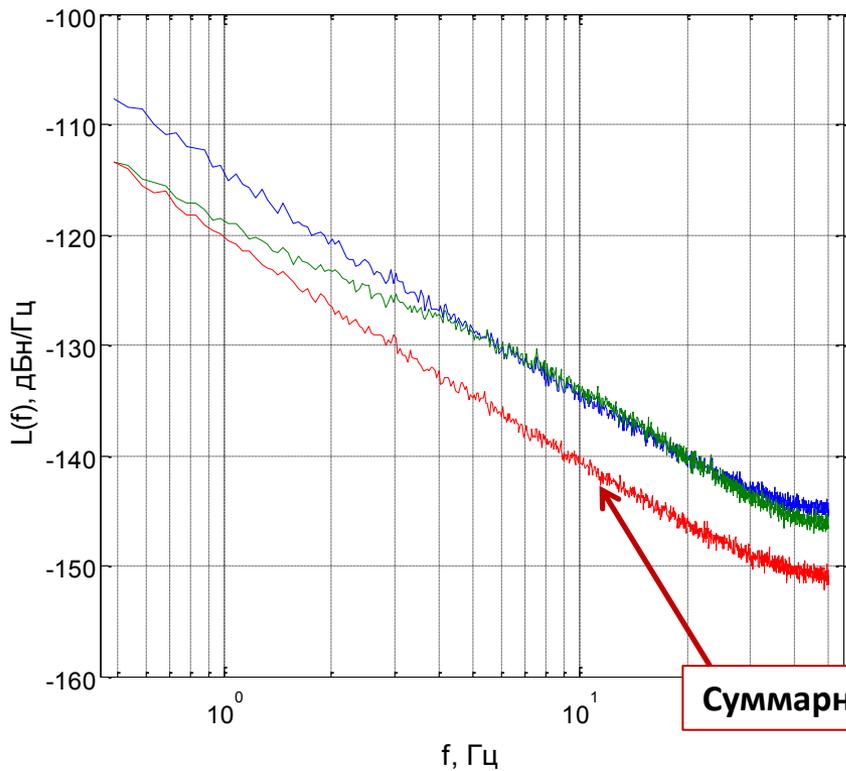


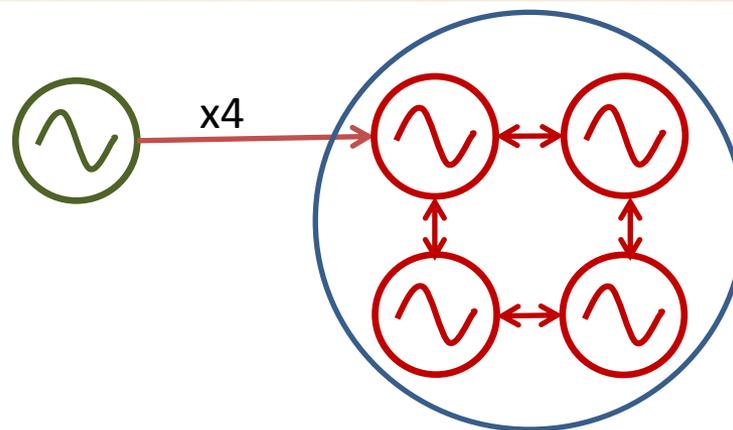
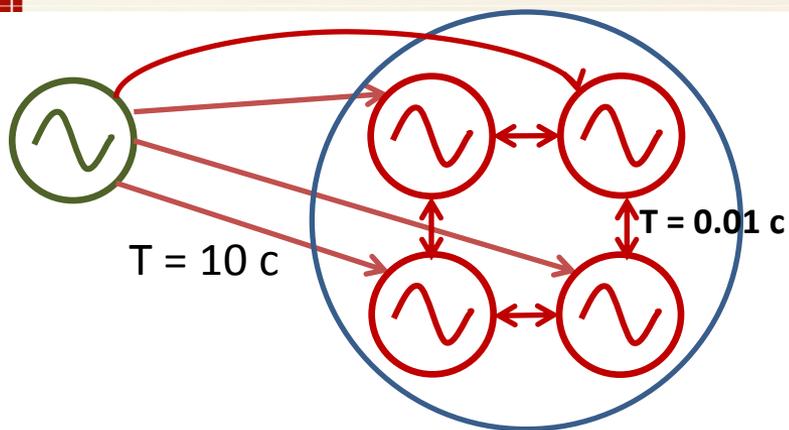
Характеристики сигналов на выходе отдельных генераторов



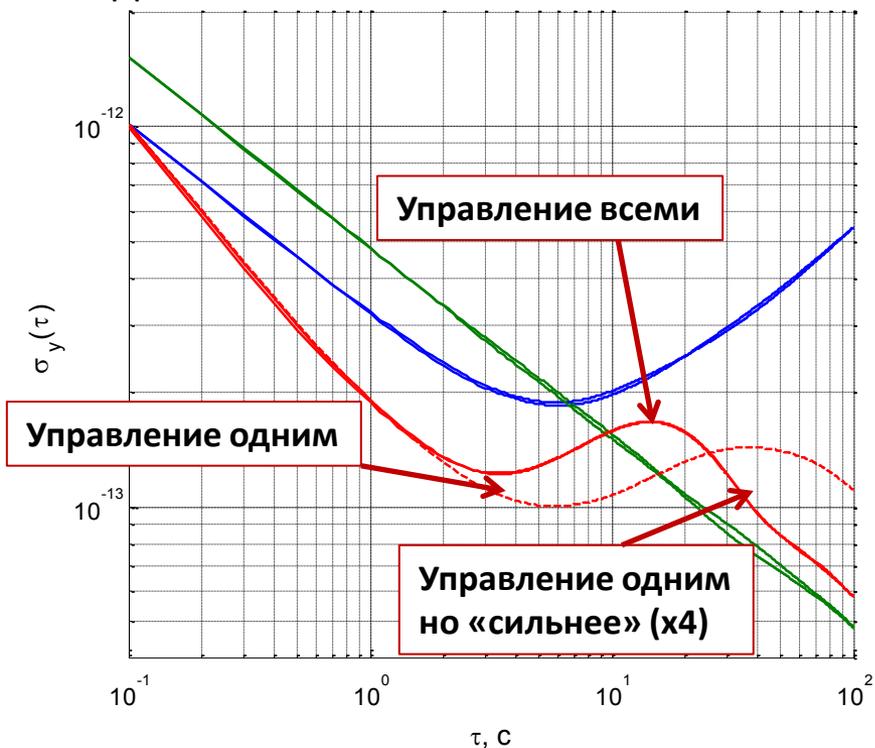
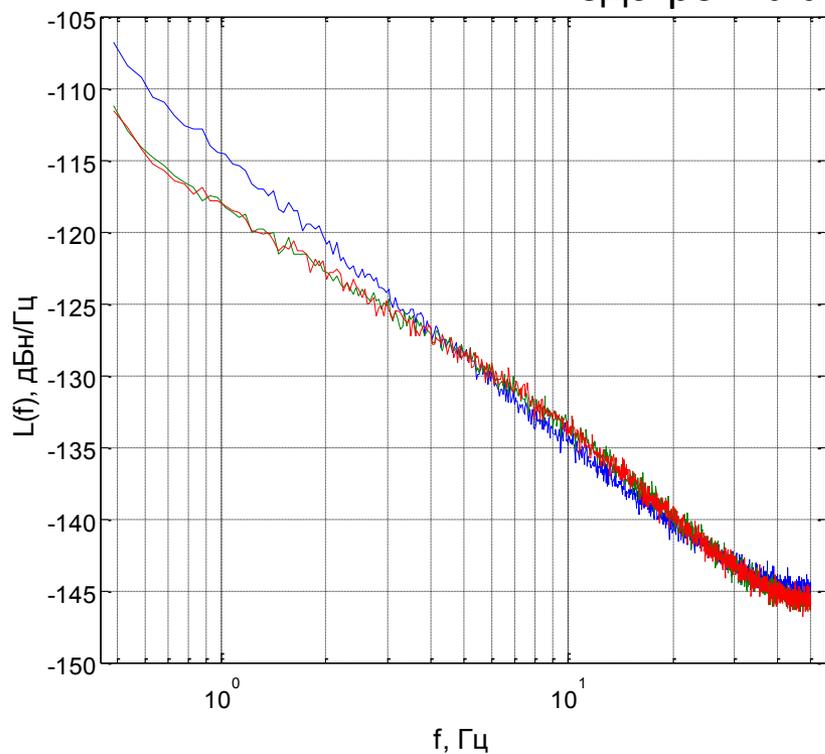


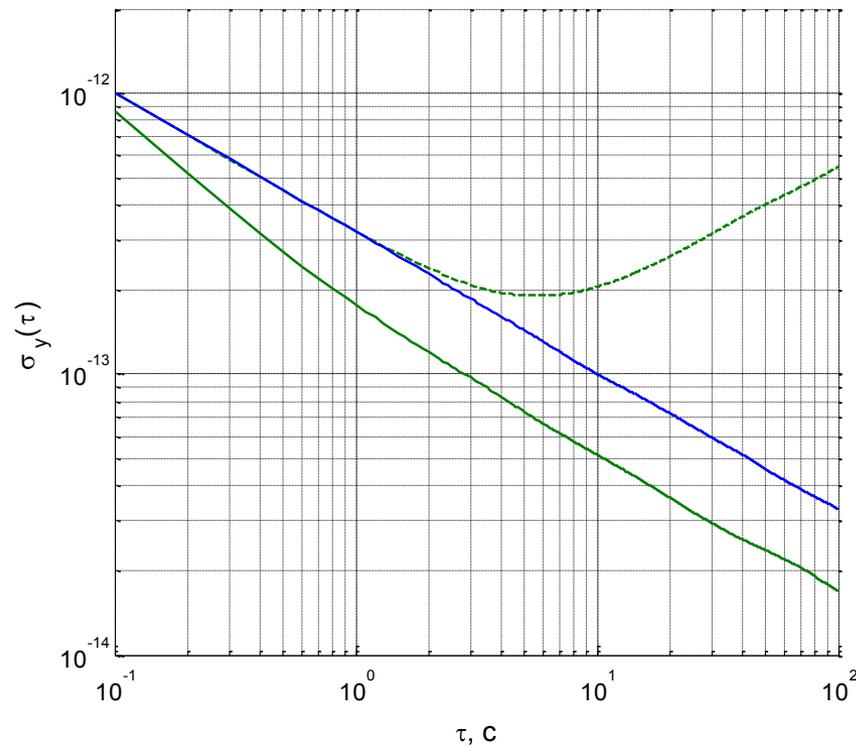
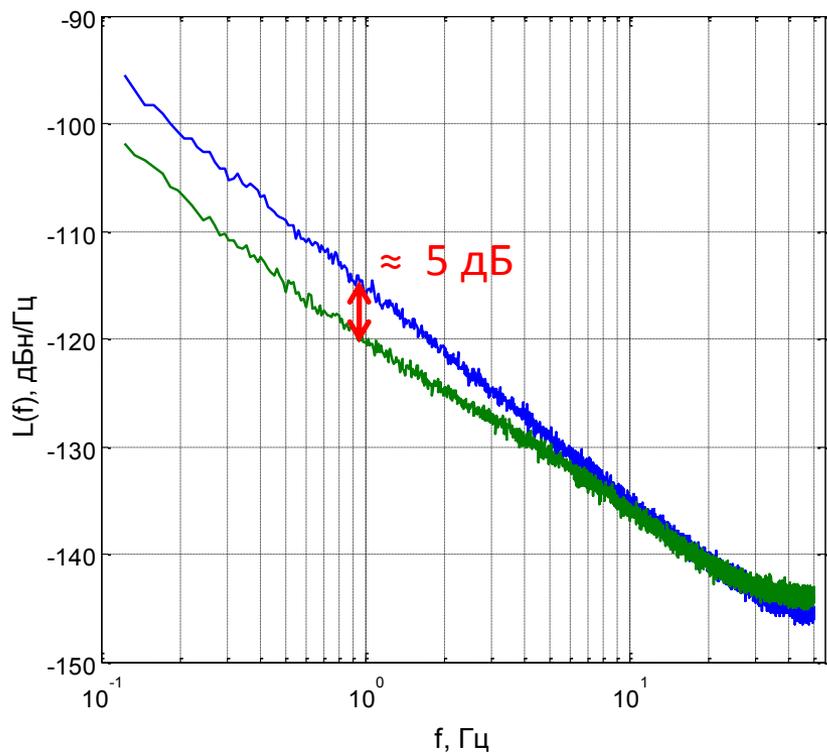
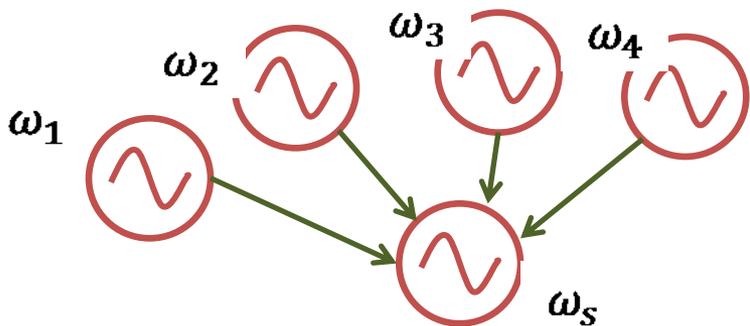
Суммарный сигнал 4-х генераторов





Подстройка ансамбля под внешний сигнал







Ч7-317 (ОСХО8788), 4 активных стандарта Ч1-1003М (ГК-75)

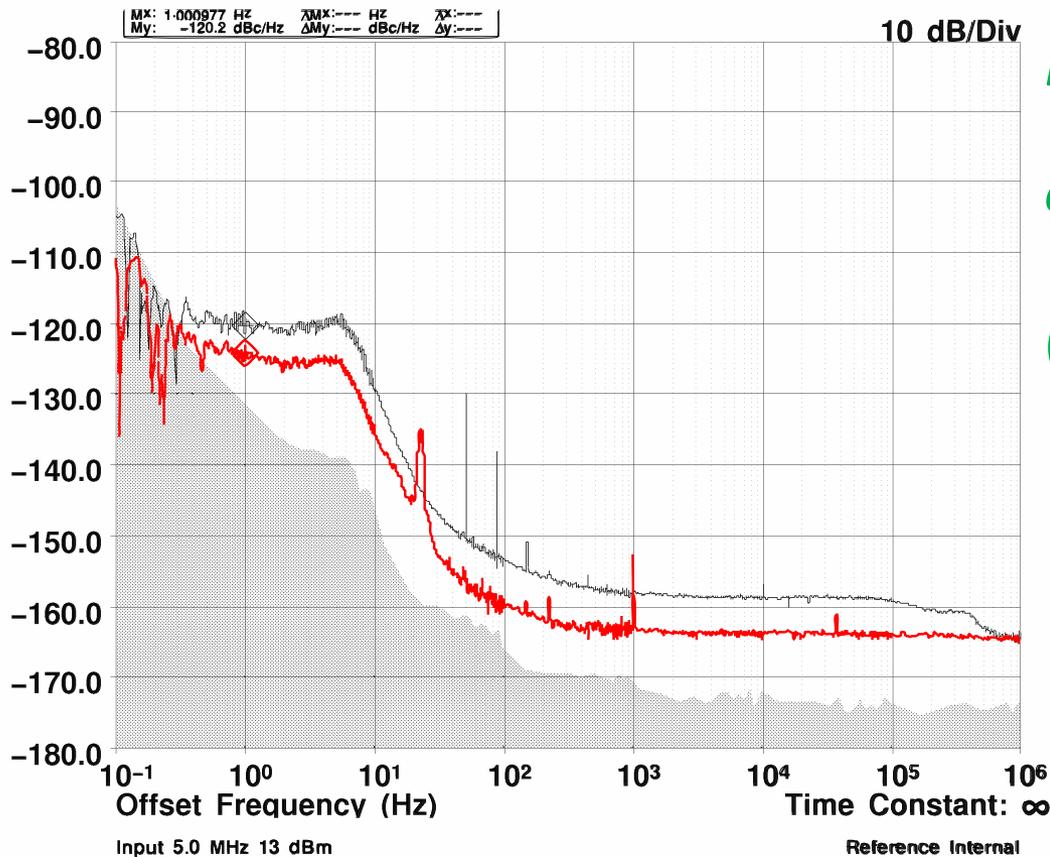
$L_{\text{Ч1-1003М/5120}}(1 \text{ Гц}):$ -120.2; -122.2; -121.7; -118.8

$\sigma_{\text{Ч1-1003М/5120}}(1 \text{ с}):$ $1.85 \cdot 10^{-13}$; $1.59 \cdot 10^{-13}$; $1.4 \cdot 10^{-13}$; $1.89 \cdot 10^{-13}$

Mar 2015 15:22:39

$\mathcal{L}(f)$ Phase Noise at 5.0 MHz (dBc/Hz)

Symmetricom
5120A-01



$L_{\text{Ч7-317/5120}}(1 \text{ Гц}) = -124.1 \text{ дБн/Гц}$

$\sigma_{\text{Ч7-317/5120}}(1 \text{ с}) = 1.15 \cdot 10^{-13}$

(одинаковые веса)

Оценка для

оптимальных весов:

$L_{\text{Ч7-317/5120}}(1 \text{ Гц}) = -125.4 \text{ дБн/Гц},$

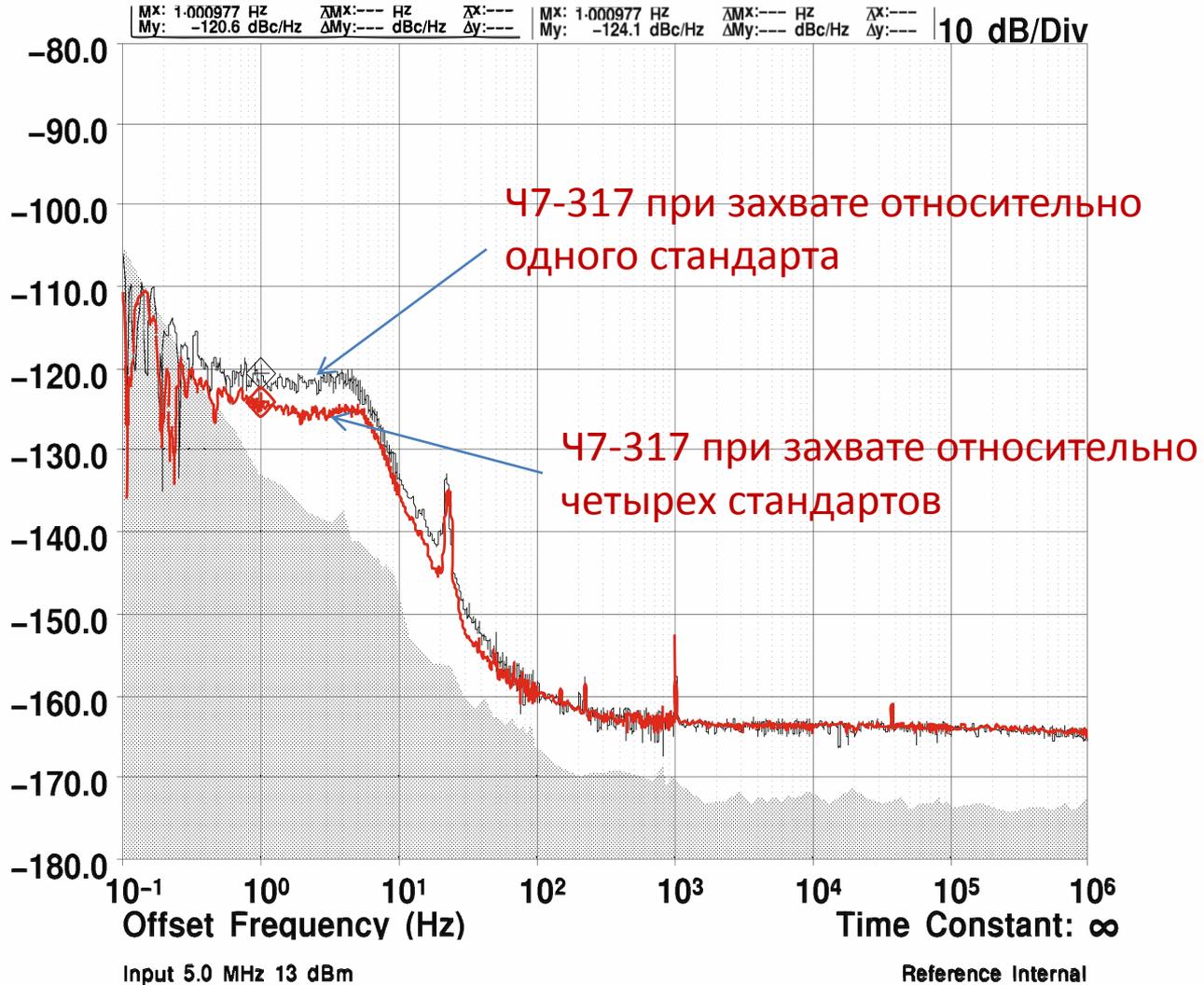
$\sigma_{\text{Ч7-317/5120}}(1 \text{ с}) = 9.87 \cdot 10^{-14}$



19 Mar 2015 14:25:03
45m

$\mathcal{L}(f)$ Phase Noise at 5.0 MHz (dBc/Hz)

Symmetricom
5120A-01

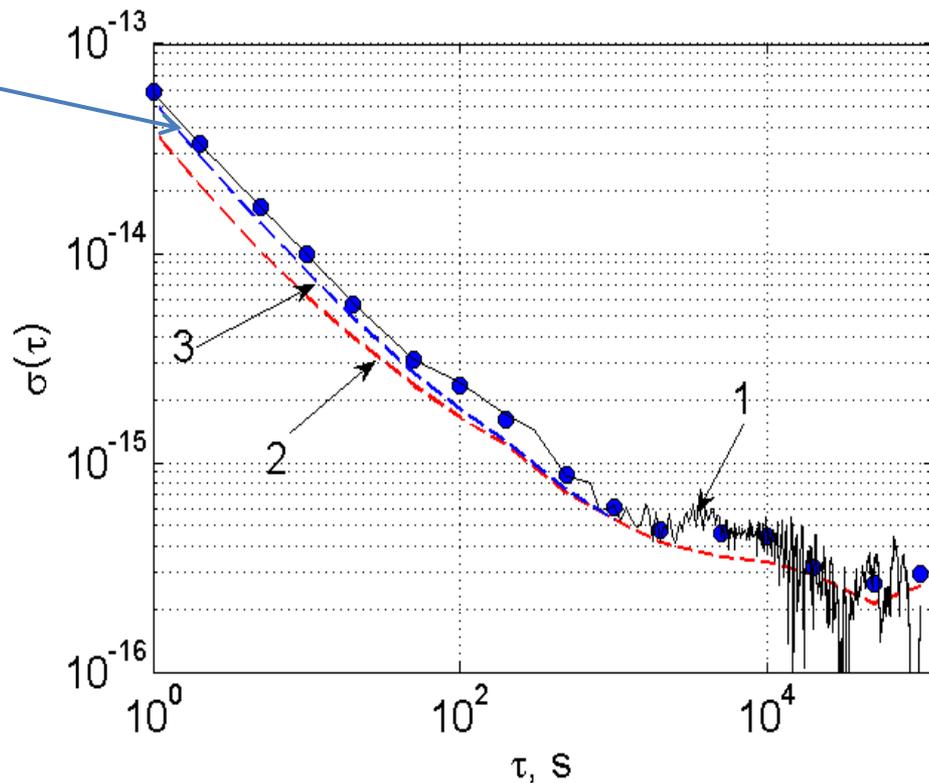
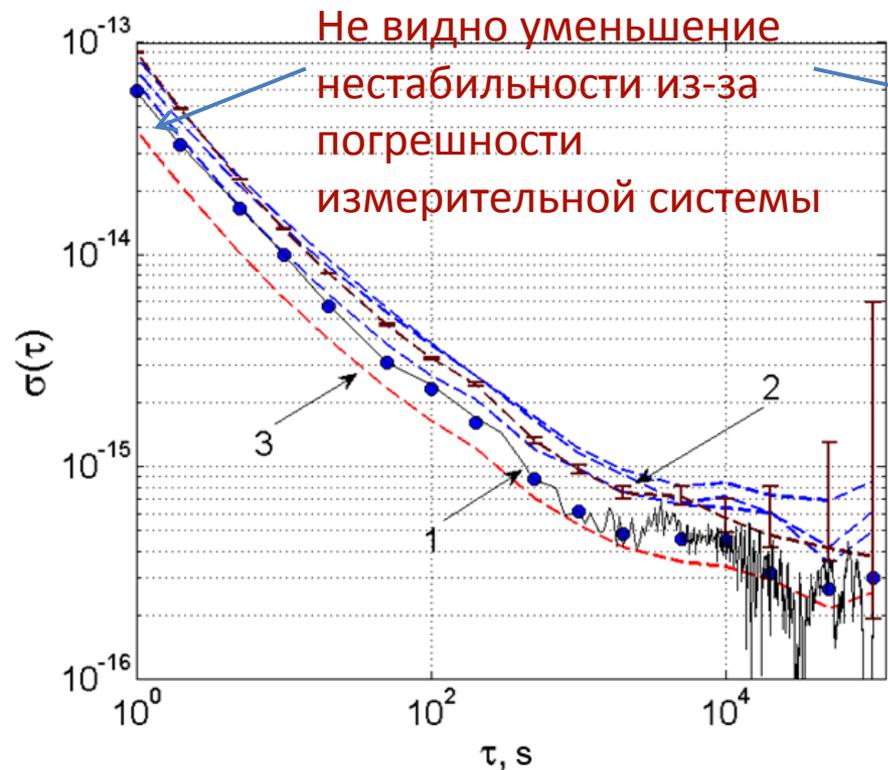




- В критичных приложениях использование группы кварцевых генераторов позволит уменьшить уровень фазового шума
- Имеет смысл использовать суммарный сигнал группы
- В группе 4-х генераторов можно ожидать снижение фазового шума на ~5 дБ
- Инерционность группы из 4-х генераторов мала и не влияет на внешнее управление. Возможно управление только одним генератором ансамбля
- В эксперименте с Ч7-317 демонстрируется уменьшение фазового шума на 3-4 дБ
- Ч7-317 позволяет уменьшить кратковременную нестабильность частоты! (было не заметно в предыдущем эксперименте)



Спасибо за внимание!



$\sigma_{\text{Ч1-1003M/5120}}(1 \text{ c}): 1.85 \cdot 10^{-13}; 1.59 \cdot 10^{-13}; 1.4 \cdot 10^{-13}; 1.89 \cdot 10^{-13}$



$\sigma_{\text{Ч7-317/5120}}(1 \text{ c}) = 1.15 \cdot 10^{-13}$

Ч7-317 позволяет улучшить кратковременную стабильность тоже!!!