

Результаты моделирования влияния фазовых шумов генератора на качество принимаемого OFDM сигнала

Докладчик:

научный сотрудник АО ОНИИП

Батырев И.А.

Содокладчик:

к.ф-м.н., доцент кафедры математического анализа

старший научный сотрудник АО ОНИИП

Семенов А.М.

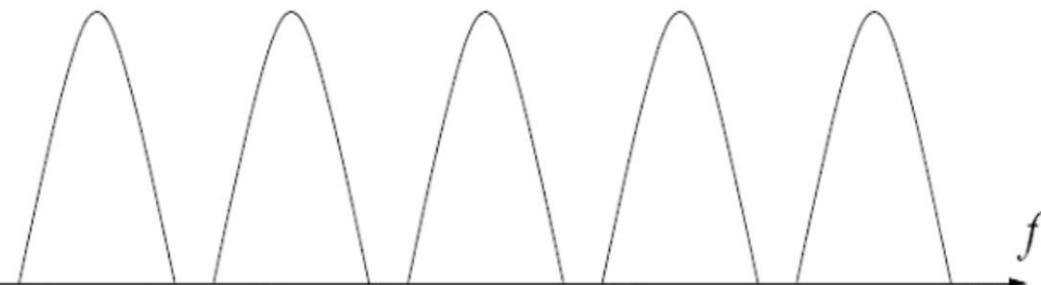
Развитие технологии передачи

Single Carrier (SC)



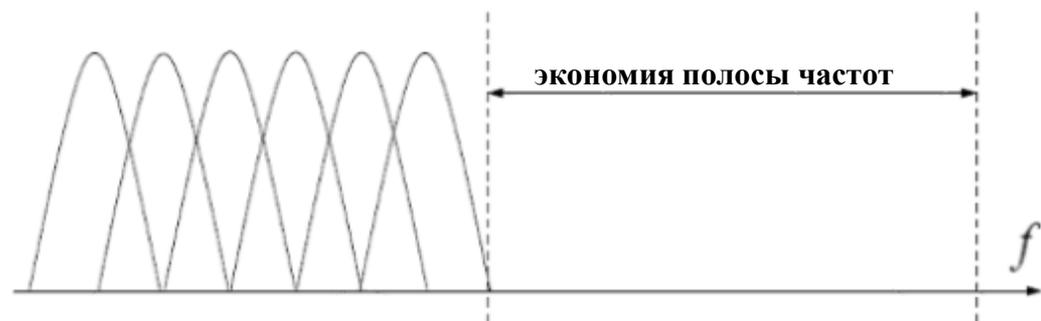
Первые технологии использовали передачу данных путем модуляции несущей

Frequency-Division Multiplexing (FDM)



Первыми системами, использующими технологию FDM, были военные радиоканалы ВЧ-диапазона (в конце **1950-х** и начале **1960-х** годов): Kineplex, Andeft и Kathryn.

Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)



В декабре **1966** года, Robert Chang из «Bell Labs» опубликовал работу по синтезу ортогональных сигналов с ограниченной полосой для многоканальной передачи данных. В **1970** году ему был выдан патент на OFDM

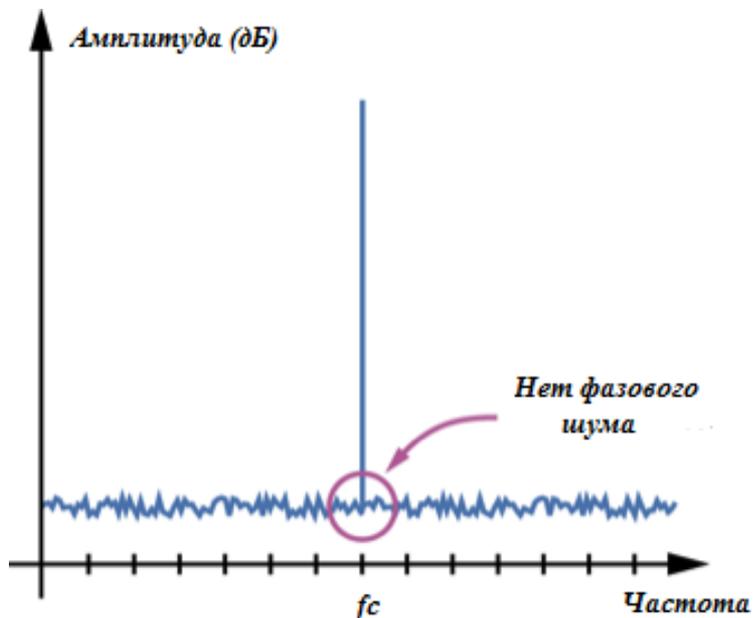
OFDM-сигналы обладают следующими основными преимуществами:

1. Высокая эффективность использования радиочастотного спектра, объясняемая почти прямоугольной формой огибающей спектра при большом количестве поднесущих;
2. Простая аппаратная реализация: базовые операции реализуются методами цифровой обработки;
3. Возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации;
4. Хорошее противостояние межсимвольной интерференции (ISI — intersymbol interference) и интерференции между поднесущими (ICI — intercarrier interference);

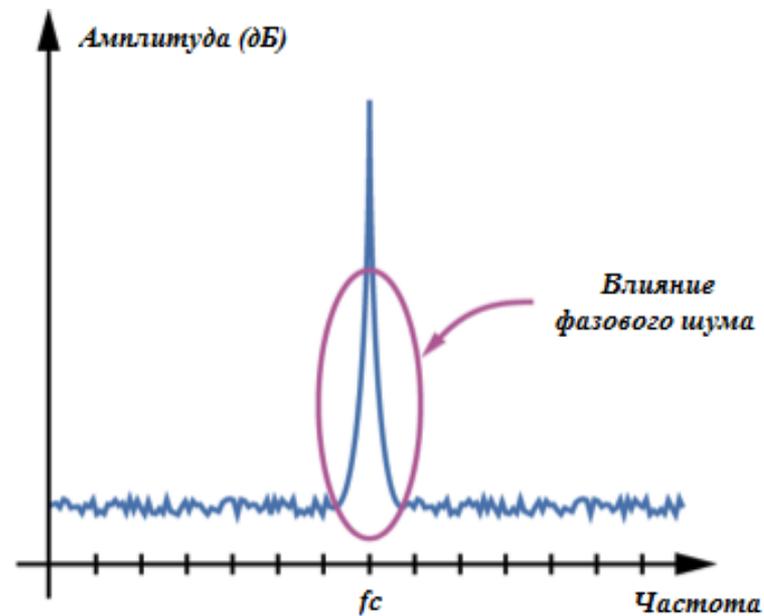
Недостатки OFDM-сигнала:

1. Высокое значение пик-фактора ;
2. Более чувствительны к эффекту Доплера чем системы с одной несущей;
3. Требуется точная частотная и временная синхронизации;
4. **Не идеальность современных приёмников и передатчиков вызывает фазовый шум, что ограничивает производительность системы;**
5. Защитный интервал, используемый в OFDM для борьбы с ISI, снижает спектральную эффективность сигнала.

ФАЗОВЫЙ шум



$$e^{j(2\pi \cdot f_c \cdot t)}$$



$$e^{j(2\pi \cdot f_c \cdot t + \varphi_N(t))}$$

где f_c частота несущего сигнала, а $\varphi_N(t)$ фазовый шум генератора

Влияние фазового шума при передаче OFDM сигнала

При передаче OFDM сигнал переносится на несущую частоту:

$$r^{\varphi}(t) = e^{j(2\pi f_c t + \varphi_{TX}(t))} \cdot r(t) \quad (1)$$

При приеме сигнал переносится обратно:

$$\begin{aligned} r^{\varphi}(t) &= e^{j(2\pi f_c t + \varphi_{TX}(t))} e^{j(-2\pi f_c t + \varphi_{RX}(t))} \cdot r(t) = \\ &= e^{j\varphi_{RX+TX}(t)} \cdot r(t) \end{aligned} \quad (2)$$

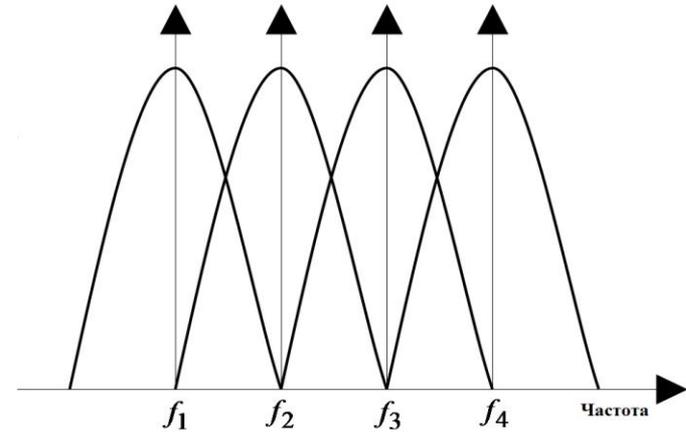
В дискретном представлении формула (2) примет вид:

$$r^{\varphi}(n) = e^{j\varphi_{RX+TX}(n)} \cdot r(n) \quad (3)$$

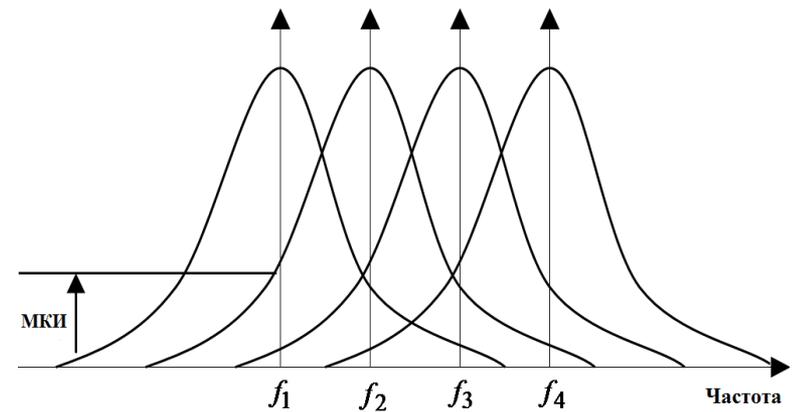
Влияние фазового шума при передаче OFDM сигнала

После преобразования Фурье принятый сигнал (3) можно записать как:

$$\begin{aligned}
 R^\varphi(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r^\varphi(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}n \cdot k} = \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}n \cdot k} \cdot e^{j\varphi_{RX+TX}(n)} = \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} R(l) e^{-j\frac{2\pi \cdot n}{N}(k-l)} \cdot e^{j\varphi_{RX+TX}(n)} = \quad (4) \\
 &= R(k) \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\varphi_{RX+TX}(n)} + \\
 &+ \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq k}}^{N-1} R(l) e^{-j\frac{2\pi \cdot n}{N}(k-l)} \cdot e^{j\varphi_{RX+TX}(n)}}_{\text{Межканальная интерференция (МКИ)}}
 \end{aligned}$$



(a)



(б)

Межканальная интерференция (МКИ)

Математическое описание фазовых шумов генератора во временной области

Винеровский процесс:

$$\varphi(t) = \int_0^t \mu(\tau) d\tau. \quad (5)$$

В дискретном виде данное выражение примет вид:

$$\varphi(n) = \sum_{i=0}^n \mu(i) \quad (6)$$

$$\varphi(n) = \varphi(n-1) + \mu(n) \quad (7)$$

где μ являются независимым случайным приращением, имеющим Гауссовское распределение с нулевым средним и дисперсией:

$$\sigma_{\mu}^2 = 4\pi\beta_{\varphi}T, \quad (8)$$

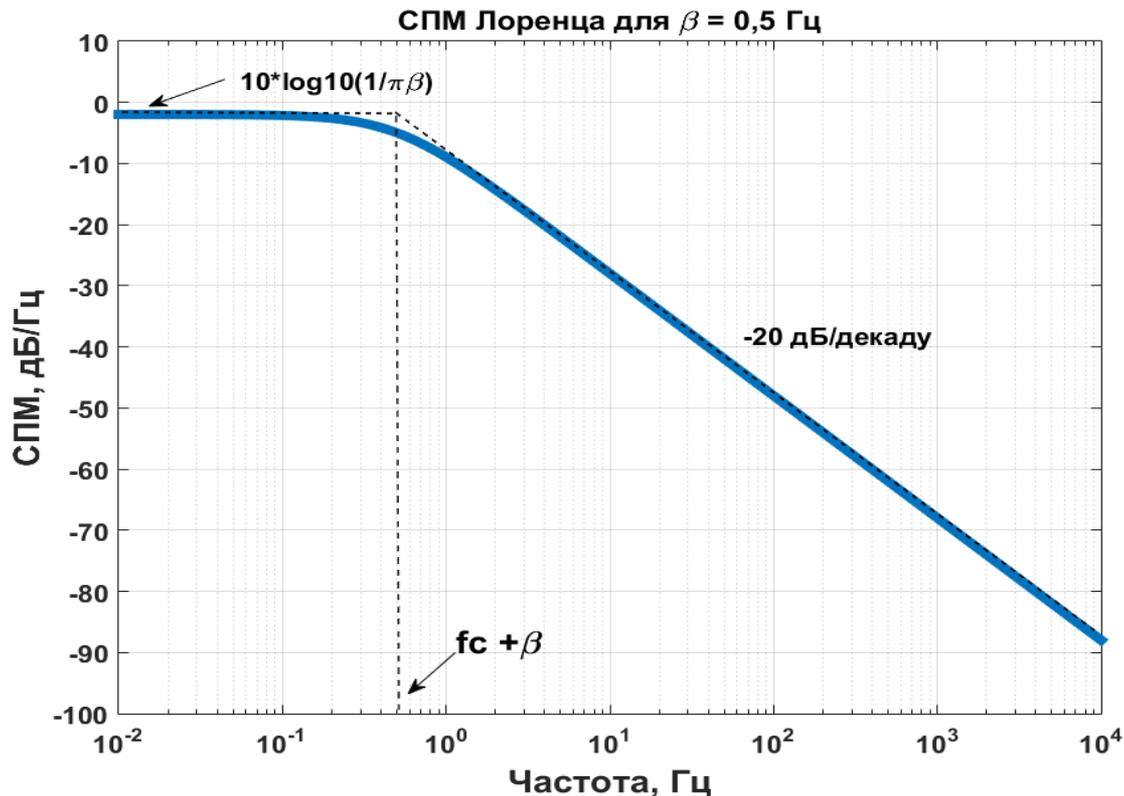
Ширина линии генератора β_{φ} определяется следующим образом :

$$\beta_{\varphi} = f_c / Q, \quad (9)$$

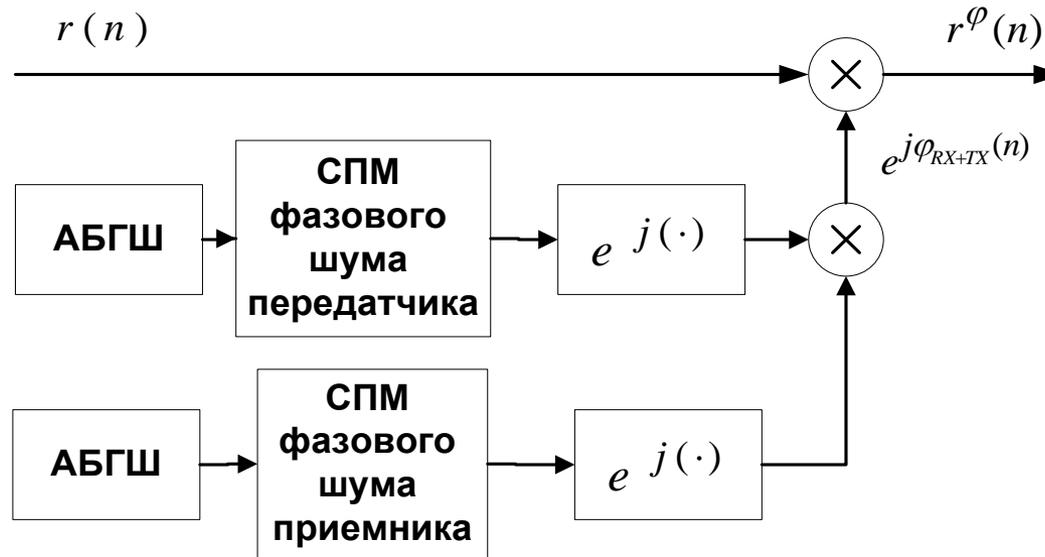
Математическое описание фазовых шумов генератора в частотной области

В частотной области, фазовый шум (7) может быть представлен через Лоренцеву спектральную плотность мощности (СПМ), которая имеет вид:

$$S_{\varphi_N}(f) = \frac{\pi\beta\varphi}{(\pi\beta\varphi)^2 + (\pi f)^2}, \quad (10)$$



Моделирование фазовых шумов генератора

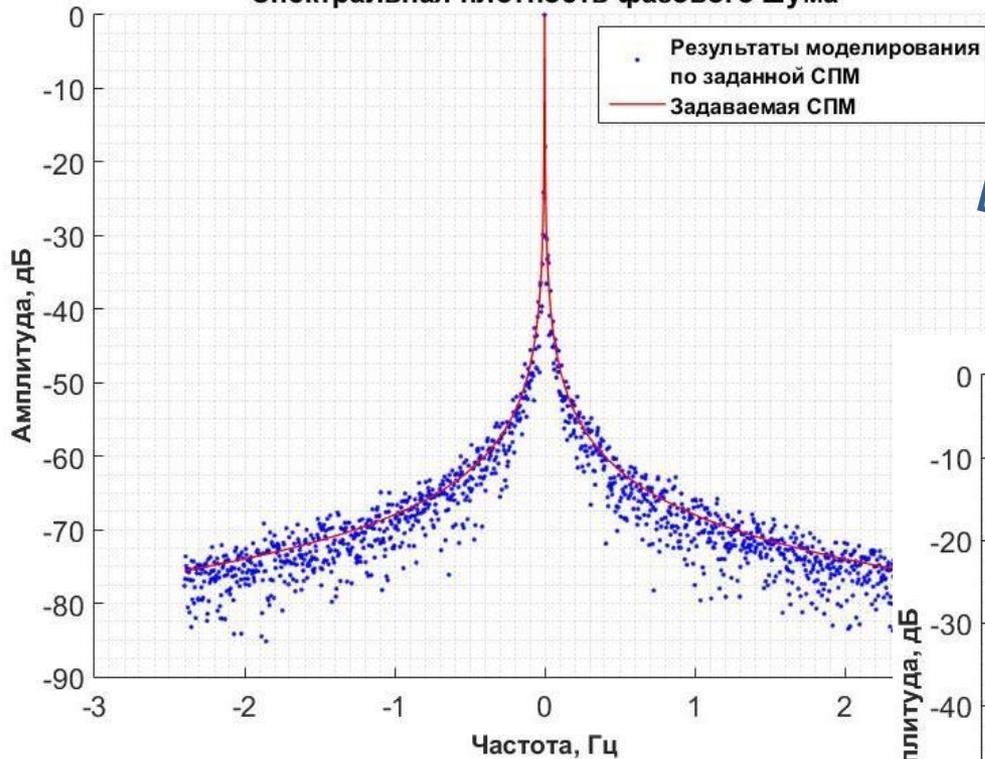


$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{jft} \sqrt{S_{\varphi_N}(f)} d\eta(f) \approx \sum_{k=-L}^L e^{if_k t} \sqrt{S_{\varphi_N}(f_k)} \eta_k, \quad (11)$$

где η_k - некоррелированные нормальные случайные величины с нулевым средним и дисперсиями равными значениям спектральной плотности на некоторой сетке частот f_k

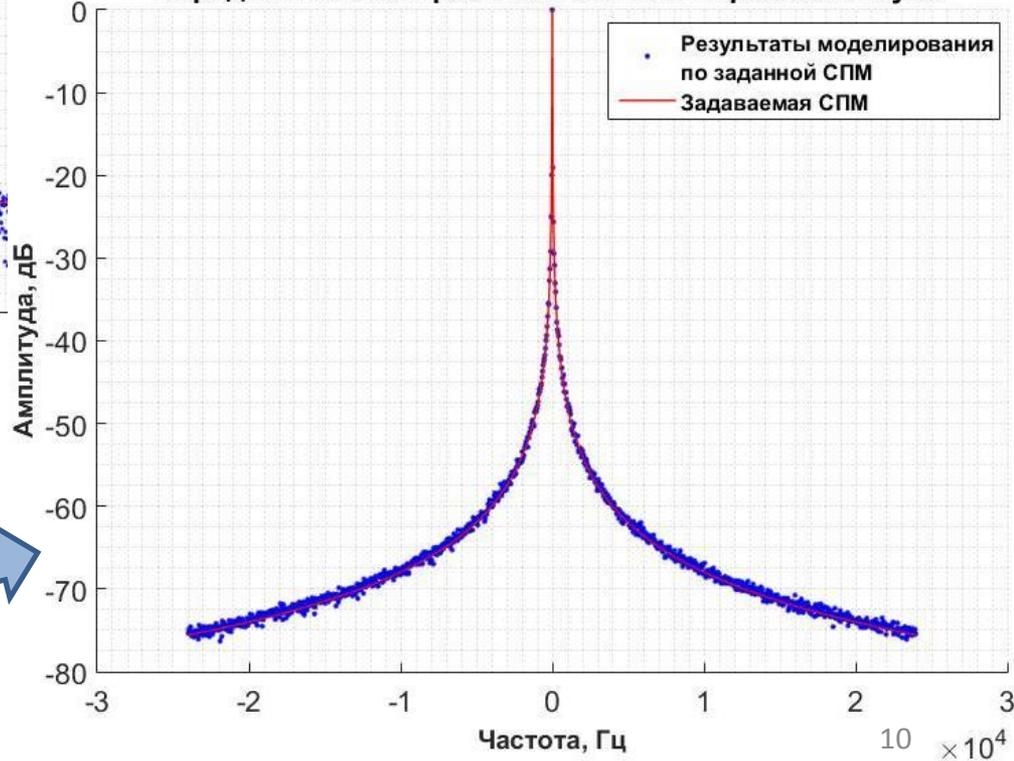
Результат моделирования СПМ

Спектральная плотность фазового шума



Результаты моделирования СПМ

Усредненная спектральная плотность фазового шума

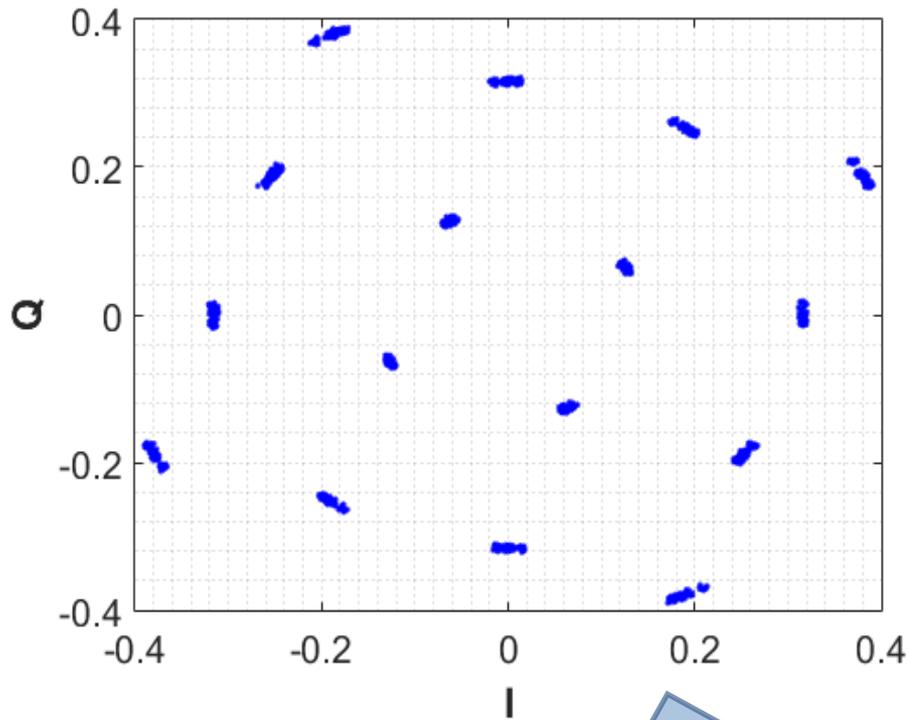


Усредненные результаты моделирования СПМ

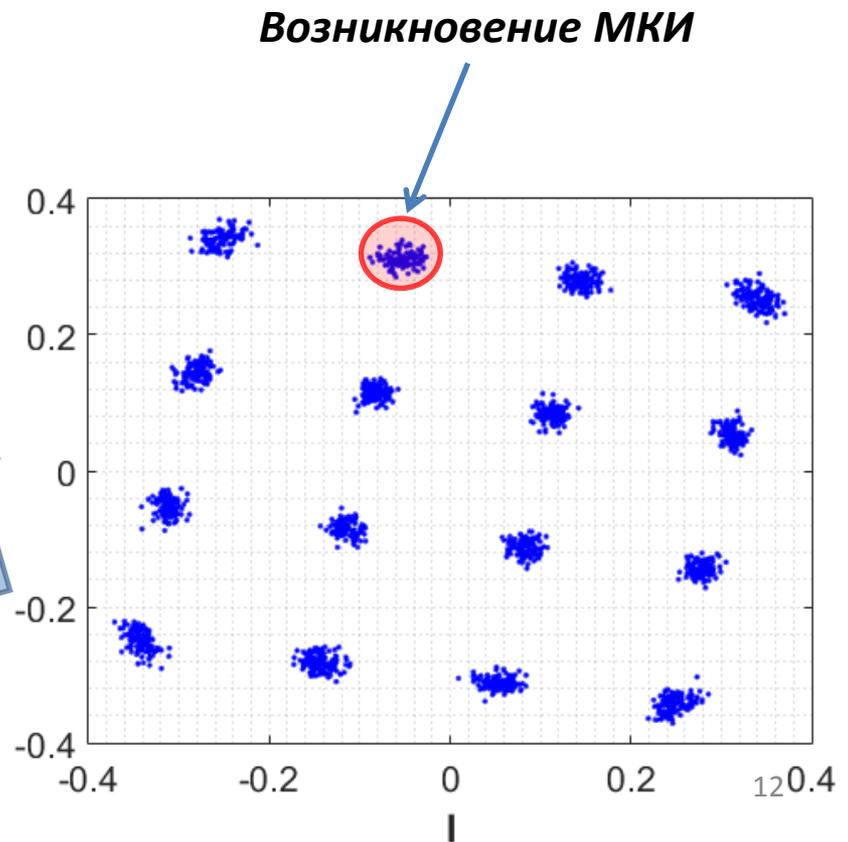
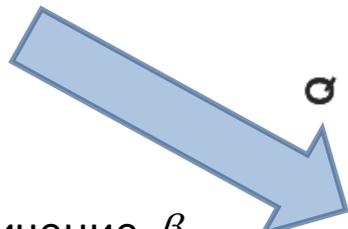
Модель анализа фазовых шумов генератора для OFDM сигнала



Влияние фазовых шумов на OFDM сигнал с модуляцией поднесущих QAM-16



Увеличение β_φ

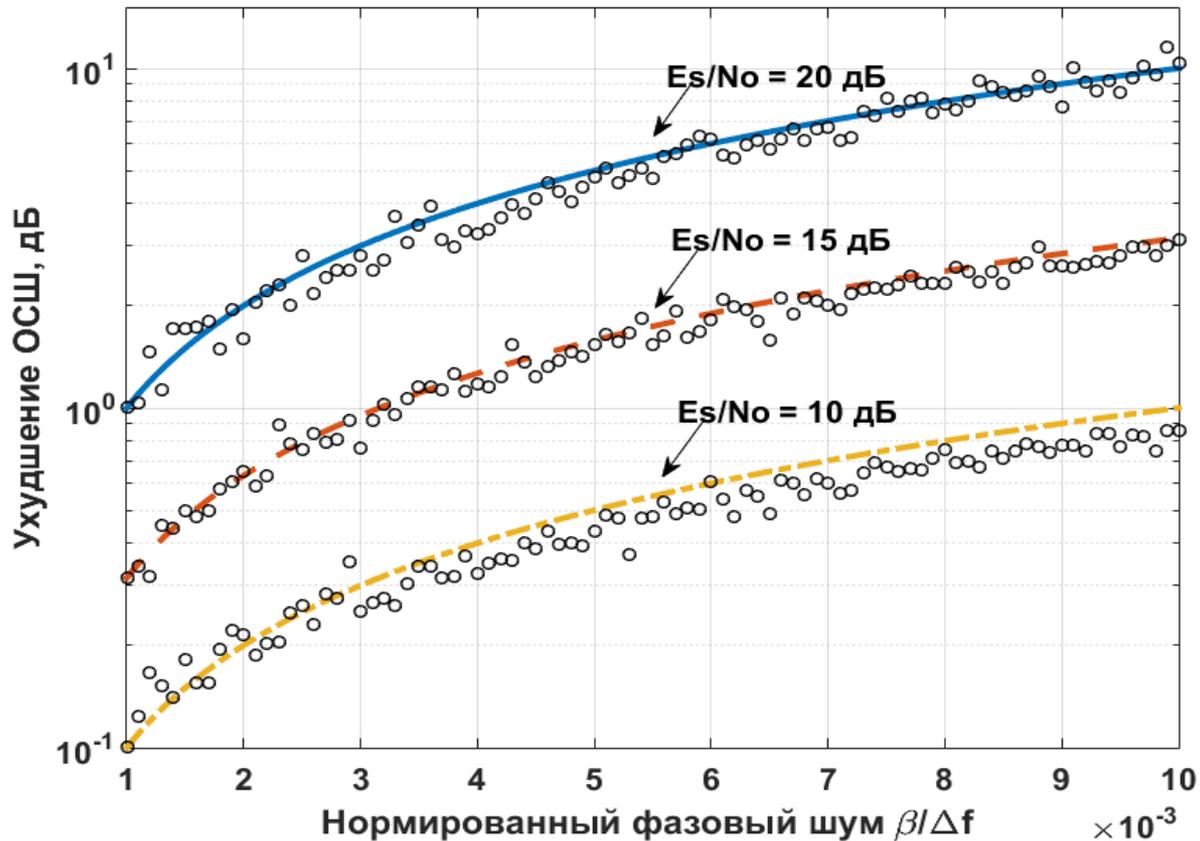


Возникновение МКИ

Результаты измерений ухудшения ОСШ сигнала OFDM

Аналитическая формула расчета ухудшения ОСШ:

$$D_{\text{дБ}} \cong \frac{11}{6 \cdot \ln(10)} \left(4\pi \frac{\beta_{\varphi}}{\Delta f} \right) \frac{E_s}{N_0} \quad (12)$$



Заключение

Одним из недостатков OFDM является чувствительность к фазовым шумам генератора. Связано это с тем, что фазовый шум вносит общую фазовую ошибку, а также приводит к возникновению МКИ, что ухудшает помехоустойчивость и накладывает определенные требования к синхронизации и аппаратной реализации приемных трактов.

Влияние общей фазовой ошибки с определенной точностью может быть компенсировано системой синхронизации. Более серьезным является влияние МКИ, которая ухудшает ОСШ сигнала из-за нарушения ортогональности. Ее влияние напрямую зависит от параметров используемого генератора, таких как добротность и резонансная частота. Использование высокостабильных генераторов с низким уровнем фазовых шумов значительно повышает стоимость конечного продукта, что является не всегда оправданным.

Решением проблемы возникновения МКИ, является увеличение разноса между поднесущими OFDM сигнала.

Разработанная модель фазовых шумов генератора может быть использована для:

1. Расчета бюджета канала связи;
2. Анализа помехоустойчивости разрабатываемой системы;
3. Тестирования методов синхронизации OFDM сигналов;
4. Формирования требований к параметрам OFDM сигнала (например расстояние между поднесущими).

Литература

1. Батырев И.А. Оценка влияния сдвига несущей частоты на качество принимаемого OFDM сигнала // Омский научный вестник. – 2015. №3(123). – С. 259 – 262;
2. D. B. Leeson. A simple model of feedback oscillator noise spectrum. Proc. of the IEEE. pp. 329-330, Feb 1966;
3. A. G. Armada, "Phase Noise and Sub-Carrier Spacing Effects on the Performance of an OFDM Communication System," IEEE Commun. Lett., vol. 2, no. 1, pp. 1113, Jan. 1998;
4. P. Robertson and S. Kaiser, "Analysis of the Effects of Phase-Noise in Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) Systems", Proceedings of the IEEE ICC'95, pp. 1652 – 1657, June 1995;
5. Pollet, T., van Bladel, M., and Moeneclaey, M. (1995) BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and wiener phase noise. IEEE Trans. on Commun., 43(2/3/4), 191–193;
6. Pramod Jacob Mathecken Performance Analysis of OFDM With Wiener Phase Noise and Frequency Selective Fading Channel;
7. M. Hosseinpour and M. Waezi Mitigating Phase Noise Effect in OFDM System Using Partial IFFT/FFT and Adaptive Filtering;
8. Prabakaran. M, Sivabalan. A. Compensation of Phase Noise Effect and Performance of Channel Equalizer in OFDM Systems over Fading Channels;
9. Белов А.А., Степанов А.В. Кварцевые резонаторы;
10. Крюков Я.В., Рогожников Е.В., Покаместов Д.А. Модель фазового шума с учетом спектральной маски синтезаторов частоты и генераторов сигнала;
11. Стругов Ю.Ф., Семенов А.М., Добровольский С.М., Батырев И.А. Стохастическое моделирование каналов с аддитивными и мультипликативными помехами. Схема реализации. // Математические структуры и моделирование. – 2015. - №2(34). – С. 48-63.
12. Digital Radio Mondiale (DRM) System Specification. ETSI ES 201 980 V2.2.1.