

Модель сигнала

Для описания поведения дискретно-квантованного сигнала на выходе АЦП представим сигнал на входе в виде суммы детерминированного сигнала, гауссовского белого шума и гауссовского белого собственного шума АЦП:

$$Y = a \cdot X + Z + Z_{adc}$$

a – амплитуда сигнала;

$X = (e^{-i\omega 0T_d}, e^{-i\omega 1T_d}, \dots, e^{-i\omega(L-1)T_d})$ – комплексный вектор детерминированного сигнала длиной L , где ω – частота сигнала, $T_d = \frac{2\pi}{\omega_d}$ – период дискретизации;

$Z = Z_{Re} + iZ_{Im}$ – комплексный вектор гауссовского белого шума с среднеквадратическим отклонением σ и распределением плотности вероятности компонент $p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}}$, ξ – случайная величина;

σ – среднеквадратичное отклонение комплексного шума;

$Z_{adc} = Z_{adc Re} + iZ_{adc Im}$ – комплексный вектор гауссовского белого собственного шума АЦП с среднеквадратическим отклонением σ_{adc} и распределением плотности вероятности компонент $p(\xi) = \frac{1}{\sigma_{adc}\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma_{adc}^2}}$, ξ – случайная величина;

σ_{adc} – среднеквадратичное отклонение комплексного шума.

Квантование сигнала

$$Y_m = \left(\left\lfloor \frac{Y_m^{\text{disc}}}{a_{\text{adc}}} \right\rfloor + 0,5 \right) \cdot a_{\text{adc}}, m = 0, 1 \dots L$$

Y_m – m -ый элемент вектора амплитуды дискретно-квантованного сигнала;

Y_m^{disc} – m -ый элемент вектора амплитуды дискретно-квантованного сигнала;

$a_{\text{adc}} = \frac{a_s}{2^{M-1}}$ – амплитуда младшего значащего разряда, где a_s – размах входного напряжения АЦП, M – разрядность преобразующего устройства;

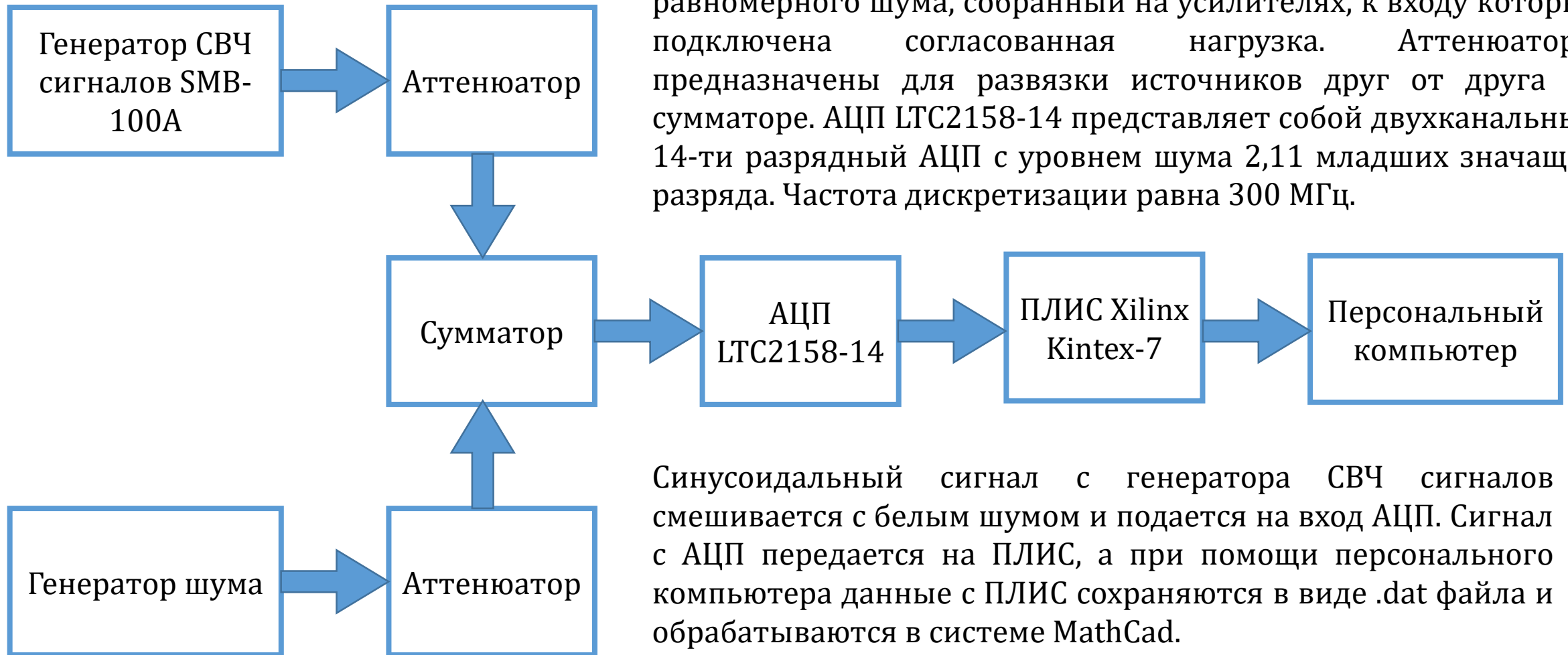
$\lfloor \rfloor$ – знак взятия целой части числа.

Отношение амплитуды сигнала к кванту амплитуды АЦП – $d = a/a_{\text{adc}}$;

Отношение сигнал шум – $q = a/\sigma$;

Отношение частоты сигнала к частоте дискретизации – $w = \omega/\omega_d$;

Модель эксперимента



Генератор шума представляет собой макет источника равномерного шума, собранный на усилителях, к входу которых подключена согласованная нагрузка. Аттенюаторы предназначены для развязки источников друг от друга на сумматоре. АЦП LTC2158-14 представляет собой двухканальный 14-ти разрядный АЦП с уровнем шума 2,11 младших значащих разряда. Частота дискретизации равна 300 МГц.

Синусоидальный сигнал с генератора СВЧ сигналов смешивается с белым шумом и подается на вход АЦП. Сигнал с АЦП передается на ПЛИС, а при помощи персонального компьютера данные с ПЛИС сохраняются в виде .dat файла и обрабатываются в системе MathCad.

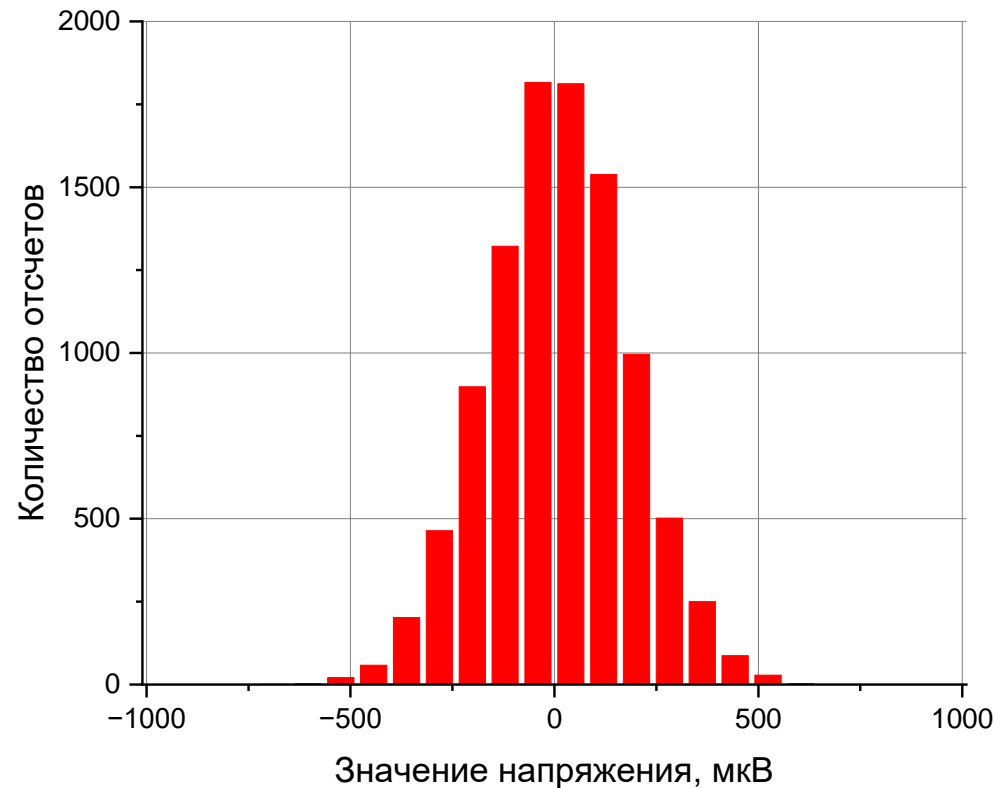
Первым шагом стало измерение собственного шума АЦП. Вместо сумматора к входу АЦП подключается согласованная нагрузка. На графике изображена гистограмма значений собственных шумов АЦП.

Каждый столбик соответствует одному младшему значащему разряду.

Значение измеренных шумов АЦП по гистограмме $\sigma_{\text{изм.ш.АЦП}}^{\text{гист.}} = 201,4$ мкВ.

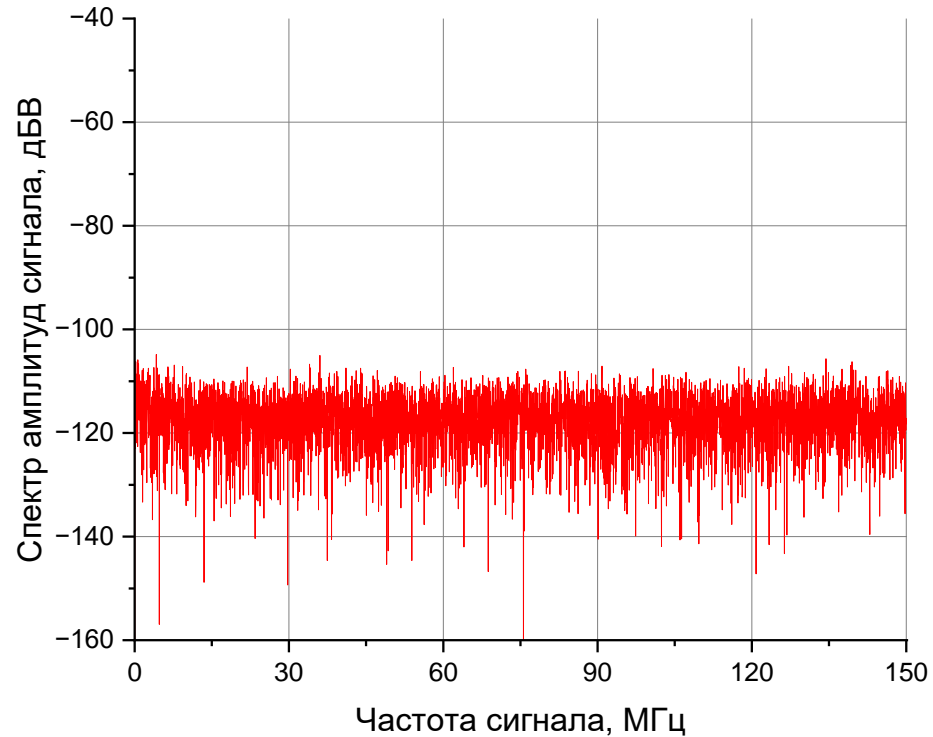
Уровень шумов, оценка которого произведена по среднеквадратичному значению всей выборки: $\sigma_{\text{изм.ш.АЦП}}^{\text{выб.}} = 174,5$ мкВ.

Уровень шумов, оценка которого произведена по мощности выборки $P_{\text{ш.АЦП}} = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} |Y_m|^2 = (\sigma_{\text{изм.ш.АЦП}}^{\text{мощн.}})^2$, $\sigma_{\text{изм.ш.АЦП}}^{\text{мощн.}} = 174,5$ мкВ ($P_{\text{ш.АЦП}} = -62,2$ дБм) (значение совпало с $\sigma_{\text{изм.ш.АЦП}}^{\text{выб.}}$).



На левом графике изображен спектр шумов АЦП. Из графика видно, что шумы распределены равномерно в области частот до половины частоты дискретизации.

На правом графике изображено распределение значений собственных чисел для длины выборки корреляционной матрицы $N=10$. Распределение представлено в дБ: $\lambda[\text{дБ}] = 10\log_{10}(\lambda[\text{абс.зн.}])$. Красной линией показан результат эксперимента, синей линией изображен результат, полученный численным моделированием.



Энтропия сигнала $N=2,29$

Энтропия шумов ($N=10$) $N=2,3$

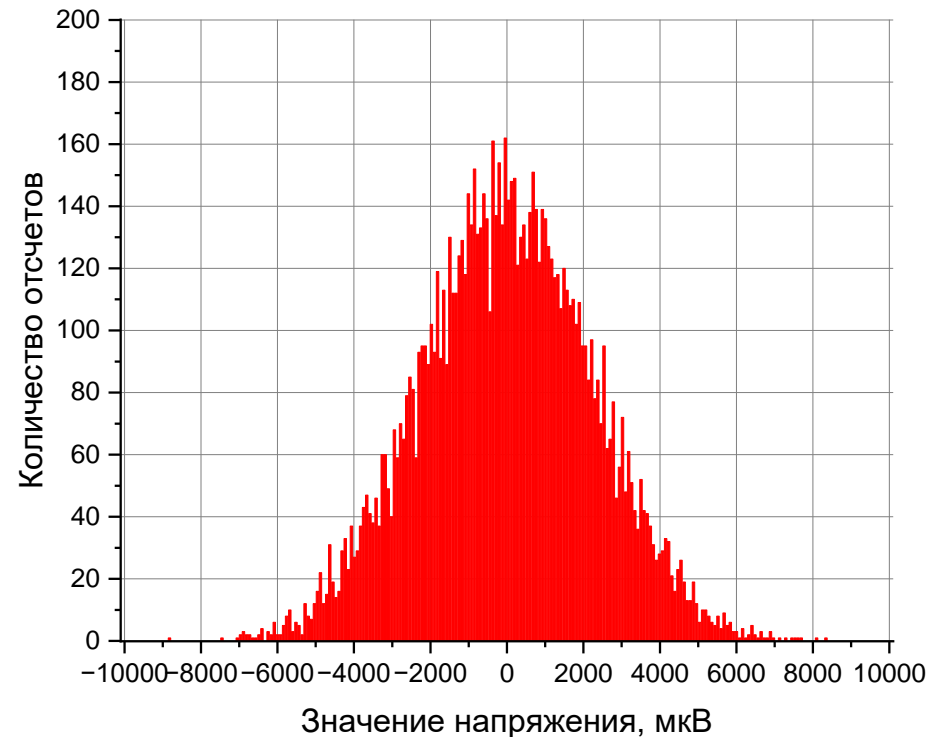
Следующим шагом стало измерение собственного шума АЦП. Вместо сумматора к входу АЦП подключается генератор шума. На графике изображена гистограмма значений сигнала генератора шума.

Каждый столбик соответствует одному младшему значащему разряду.

Значение измеренных шумов АЦП по гистограмме $\sigma_{\text{изм.ш.}}^{\text{гист.}} = 2819,9 \text{ мкВ}$.

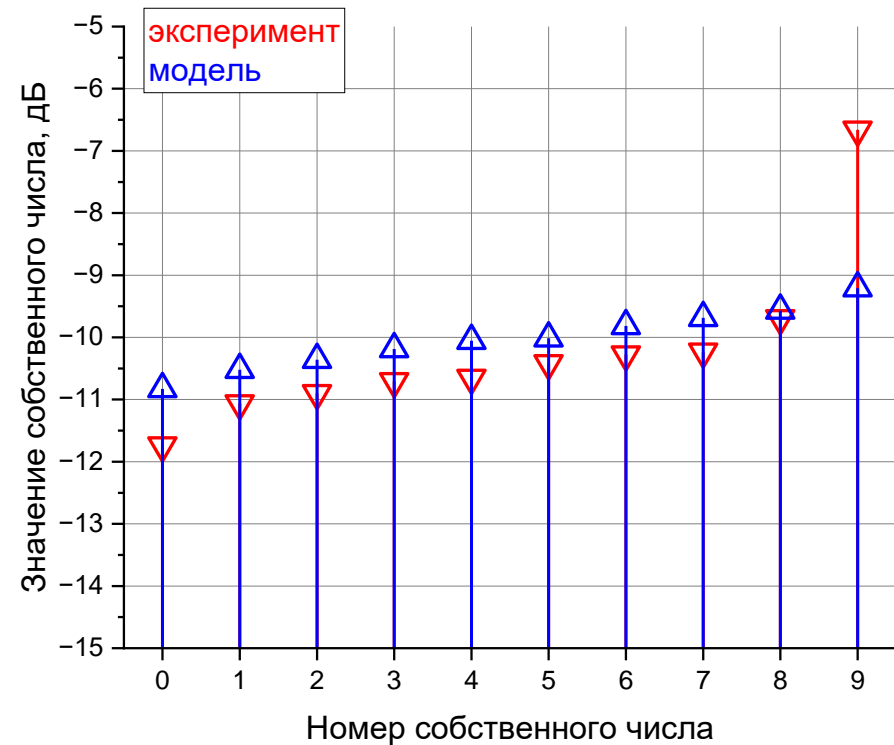
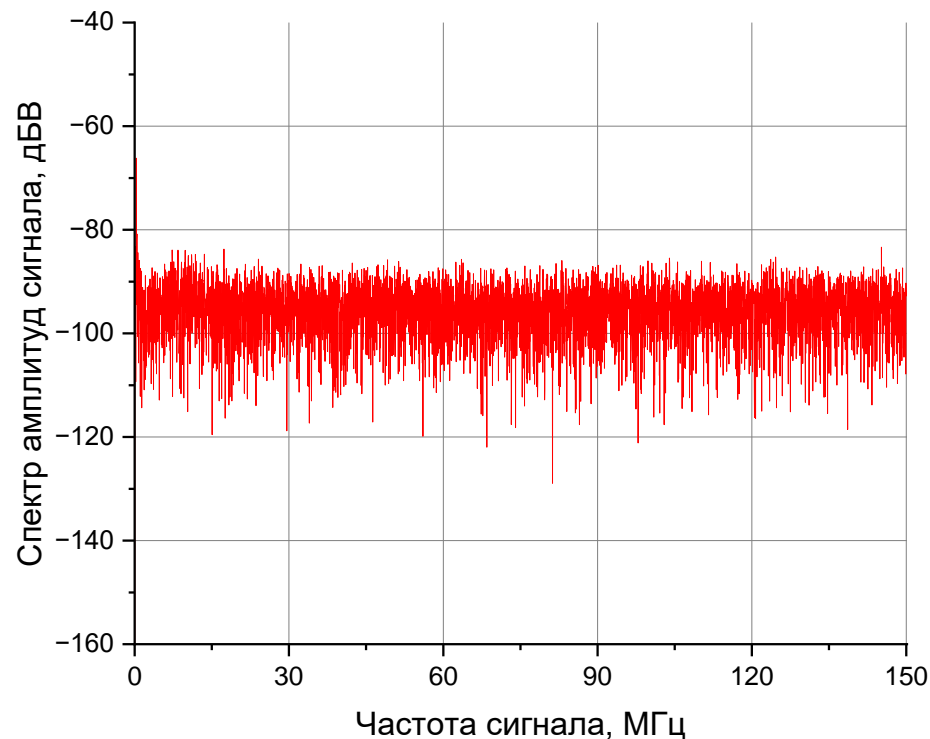
Уровень шумов, оценка которого произведена по среднеквадратичному значению всей выборки: $\sigma_{\text{изм.ш.}}^{\text{выб.}} = 2246,3 \text{ мкВ}$.

Уровень шумов, оценка которого произведена по мощности выборки $P_{\text{ш}} = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} |Y_m|^2 = (\sigma_{\text{изм.ш.}}^{\text{мощн.}})^2$, $\sigma_{\text{изм.ш.}}^{\text{мощн.}} = 2246,5 \text{ мкВ}$ ($P_{\text{ш}} = -40 \text{ дБм}$).



На левом графике изображен спектр шумов АЦП. Из графика видно, что шумы распределены равномерно в области частот до половины частоты дискретизации кроме области около 300 кГц, где наблюдается помеха.

На правом графике изображено распределение значений собственных чисел для длины выборки корреляционной матрицы $N=10$. Распределение представлено в дБ: $\lambda[\text{дБ}] = 10\log_{10}(\lambda[\text{абс.зн.]})$. Красной линией показан результат эксперимента, синей линией изображен результат, полученный численным моделированием.



Энтропия сигнала $N=2,23$

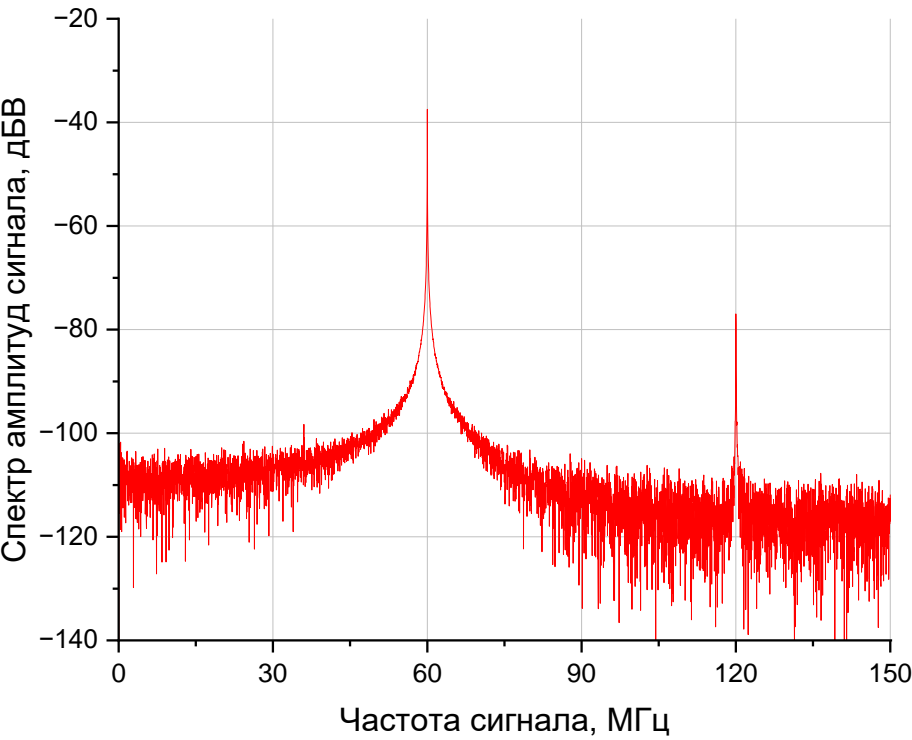
Энтропия шумов ($N=10$) $N=2,3$

Следующим шагом стало измерение сигнала с СВЧ генератора без шума, уровень сигнала на входе АЦП -20 дБм, частота сигнала 60 МГц. Отношение амплитуды к кванту амплитуды АЦП равно 366.

На графике слева изображен спектр сигнала с генератора, помимо основной частоты 60 МГц наблюдается частота 2 гармоники 120 МГц.

Уровень сигнала, оценка которого произведена по мощности выборки $P_c = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} |Y_m|^2$, $P_c = -20,7$ дБм.

На правом графике изображено распределение значений собственных чисел для длины выборки корреляционной матрицы N=10. Распределение представлено в дБ: $\lambda[\text{дБ}] = 10\log_{10}(\lambda[\text{абс.зн.}])$. Красной линией показан результат эксперимента, синей линией изображен результат, полученный численным моделированием.



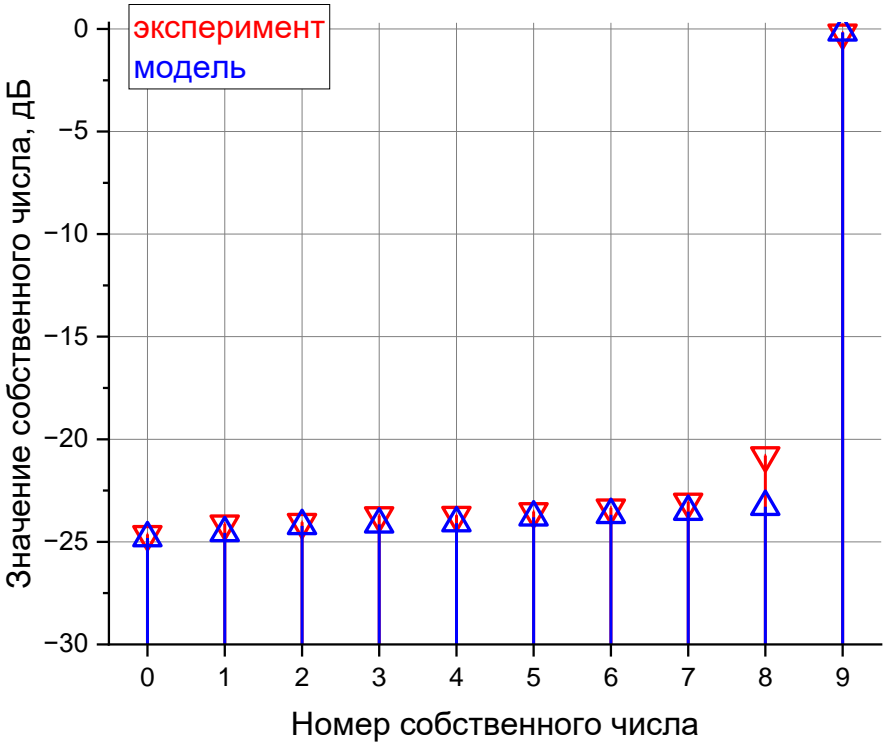
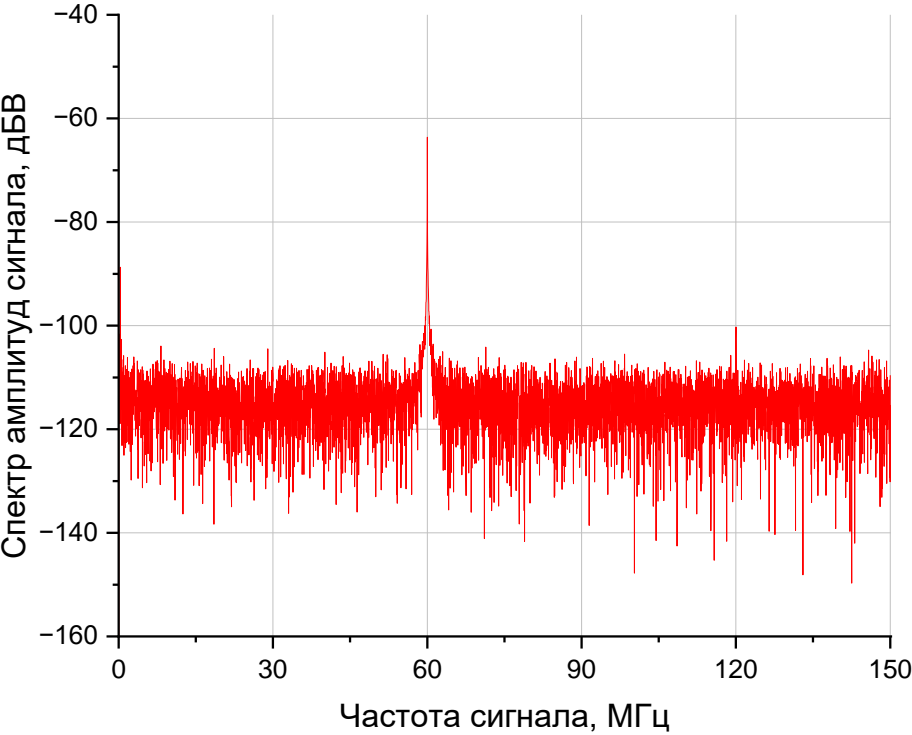
Энтропия сигнала N=0.27
Энтропия модели N=0.22

Следующим шагом стало измерение сигнала с СВЧ генератора, смешанного с шумом, уровень сигнала на входе АЦП -46 дБм, частота сигнала 60 МГц, уровень шума на входе АЦП -64 дБм. Отношение сигнал шум равно 8. Отношение амплитуды к кванту амплитуды АЦП равно 20.

На графике слева изображен спектр сигнала с генератора, помимо основной частоты 60 МГц наблюдается частота 2 гармоники 120 МГц. Наблюдается помеховый сигнал на частоте 300 кГц от генератора шума.

Уровень шумов, оценка которого произведена по мощности сигнала $P_{ш} = \frac{1}{L} \sum_{m=0}^{L-1} |Y_m|^2$, $P_{ш} = -46,7$ дБм.

На правом графике изображено распределение значений собственных чисел для длины выборки корреляционной матрицы N=10. Распределение представлено в дБ: $\lambda[\text{дБ}] = 10\log_{10}(\lambda[\text{абс.зн.}])$. Красной линией показан результат эксперимента, синей линией изображен результат, полученный численным моделированием.



Энтропия сигнала N=0.016
Энтропия модели N=0.001