

Zurich Instruments

Как уменьшить уровень шума и улучшить отношение сигнал/шум (SNR) с помощью методов кросс-корреляции

19 мая 2020 года из блога [Jithesh Srinivas](#)

Сверхчувствительные измерения напряжения являются важнейшим требованием для таких приложений, как определение характеристик квантовых устройств [1]. Слабые сигналы легко затемняются тепловым шумом, особенно исходящим от измерительной аппаратуры; это увеличивает уровень шума [2] и приводит к более низкому отношению сигнал-шум (SNR).

Метод измерения перекрестной корреляции предлагает простой и эффективный способ улучшить SNR. Этот метод позволяет уменьшить нежелательные компоненты теплового шума в 10 и более раз [2]. Недавняя заметка о применении, выполненная в Университете Ланкастера [3], опиралась на два синхронизированных синхронных усилителя MFLI в качестве оцифровщиков (с опцией оцифровщика MF-DIG) для считывания сигналов и перекрестной корреляции с кодом Python.

Мы покажем, как реализовать метод кросс-корреляции с одним синхронным усилителем UHFLI с опцией оцифровщика UHF-DIG: установка использует преимущества двух полностью синхронизированных входных каналов в одном корпусе, а также возможность измерения до 600 МГц. Без необходимости синхронизации нескольких устройств (MDS), сокращается общее время измерения и упрощается код Python. Теперь вы можете попробовать это с вашим UHFLI, используя код.

Основной принцип

Метод кросс-корреляции основан на одновременном измерении двух сигналов $V_1(t)$ и $V_2(t)$, оба состоят из общей сигнальной составляющей $V_s(t)$. Оба измеренных сигнала содержат нежелательные шумовые компоненты $V_{n1}(t)$ и $V_{n2}(t)$, естественно, из-за отличительного теплового шума, присутствующего в их соответствующих сигнальных трактах. При применении перекрестной корреляции двух измеренных сигналов любые некоррелированные шумовые сигналы будут устранены; $V_{n1}(t)$ и $V_{n2}(t)$ исчезнут.

$$V_1(t) = V_s(t) + V_{n1}(t) \quad (1.1)$$

$$V_2(t) = V_s(t) + V_{n2}(t) \quad (1.2)$$

В перекрестной корреляции в частотной области выполните быстрое преобразование Фурье (FFT) обоих измеренных сигналов, чтобы получить $F[V_1(t)]$ и $F[V_2(t)]$. Возьмите комплексно сопряженное любого БПФ-сигнала, а затем умножьте два БПФ-сигнала, чтобы получить кросс-коррелированный спектр $S(f)$ (уравнение 2.1). Повторение измерений и усреднение кросс-коррелированного спектра дополнительно ослабляет некоррелированный источник шума, следовательно, уменьшает общий уровень напряжения шума.

$$S(f) = F[V_1(t)]^* \times F[V_2(t)] \quad (2.1)$$

$$S(f)_{\text{avg}} = \sum_n N S(f) N \quad (2.2)$$

Проверка перекрестной корреляции

Здесь мы демонстрируем одно измерение перекрестной корреляции, воспроизводя пример, показанный на рис. 1. UHFLI генерирует f (прямоугольный сигнал) и g (пилообразный сигнал) с помощью опции UHF-AWG, а также считывает эти сигналы. На рис. 2 показана схема подключения этой установки.

Cross-correlation

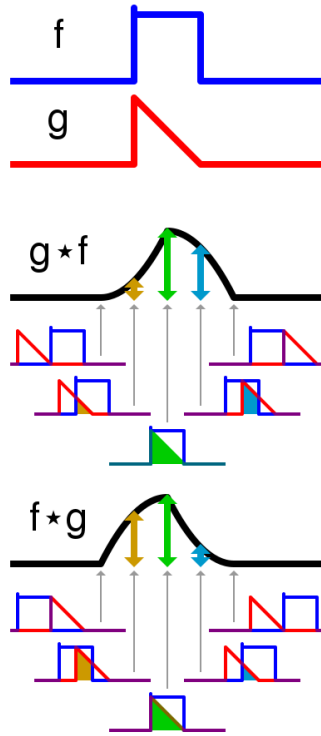


Рис. 1: перекрестная корреляция прямоугольного и пилообразного сигналов приводит к $f * g$ или $g * f$ (зависит от того, какой сигнал сопряжен) [4]

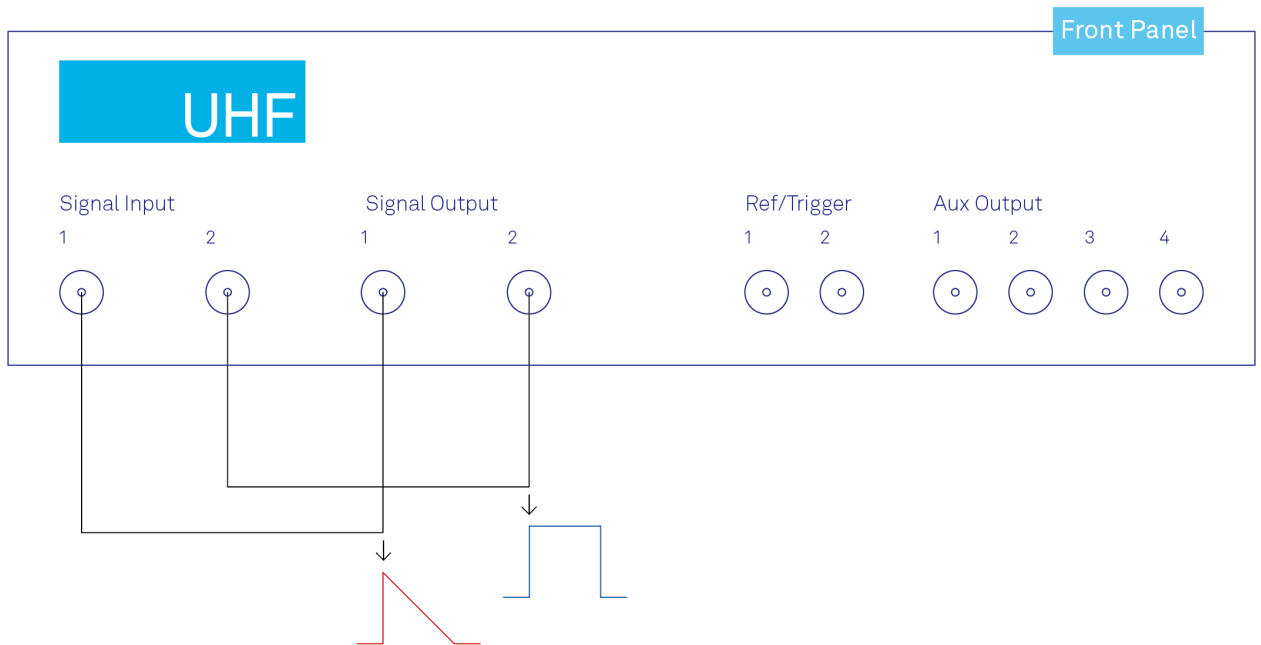


Рис. 2: Схема подключения для передачи двух генерируемых сигналов обратно на входы UHF1

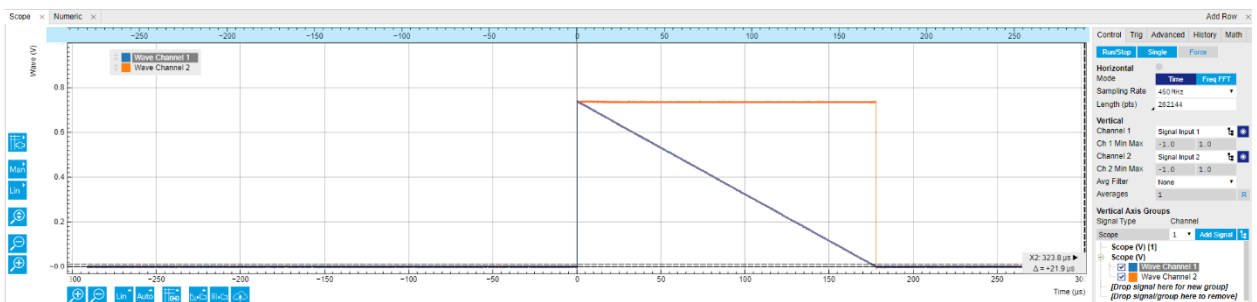
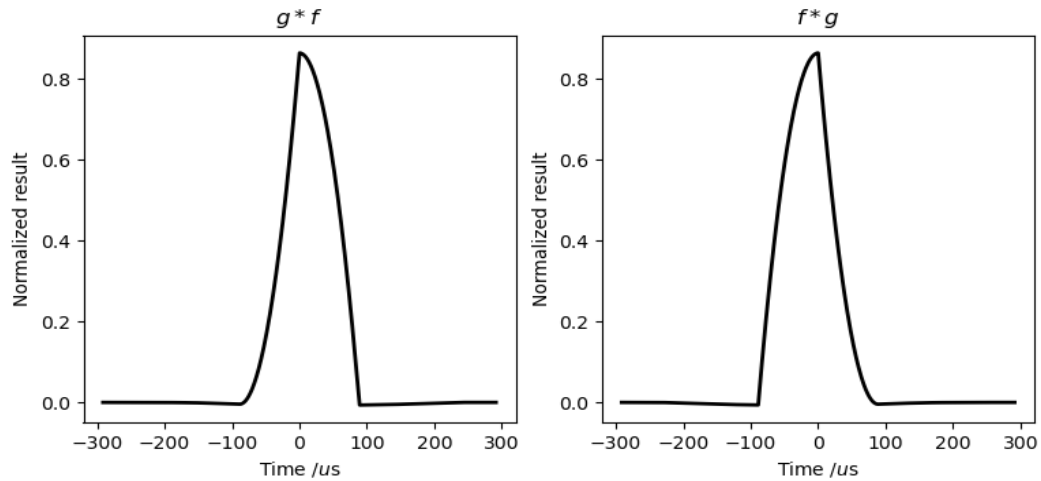


Рис. 3: два сигнала, захваченные при срабатывании с помощью модуля LabOne Scope

Мы применяем БПФ и кросс-коррелируем два захваченных сигнала (рис. 3) в Python, чтобы получить новый спектр. Чтобы наблюдать наш результат кросс-корреляции в виде сигнала, мы применяем обратное БПФ и строим график во временной области (рис. 4). Теперь мы можем видеть, что результат соответствует ожидаемому выходу примера (рис. 1); это подтверждает достоверность используемого нами кода перекрестной корреляции.

Еще более важно понимание того, почему результат (рис. 4), являющийся треугольным сигналом, объясняет как перекрестная корреляция действует в качестве фильтра. Спектр пилообразных волн состоит как из нечетных, так и из четных гармоник [5], а спектр прямоугольных волн, напротив, имеет только нечетные гармоники [6]. Амплитуды гармоник обоих спектров равны $1/n$, где n - это n -я гармоника. При перекрестной корреляции скалярное произведение обоих спектров (уравнение 2.1) отбрасывает четные гармоники, но оставляет нечетные гармоники теперь с амплитудами $1/n^2$. Исходя из базовых знаний по обработке сигналов, спектр, состоящий только из нечетных гармоник с амплитудой $1/n^2$, является треугольной волной [7], поэтому наш результат является



треугольным (с модифицированными коэффициентами Фурье).

Рис. 4: Результат кросс-корреляции сигнала для обоих случаев, когда комплексно сопряженным является либо f , либо g

Шумоподавление и SNR

Теперь мы хотим проверить, насколько может быть уменьшен уровень шума UHF и, следовательно, на сколько увеличивается SNR. Шум входного напряжения одного канала в UHF составляет $4 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$ [8]; от внутренних источников, таких компонентов, как АЦП, входной усилитель, фильтр. Давайте посмотрим, насколько сильно этот шум от двух отдельных каналов может быть перекрестно коррелирован и уменьшен.

Сначала мы генерируем синусоидальный сигнал на частоте 133,97 МГц в двух отдельных экспериментах при 1 мВ_{пп} и 10 мВ_{пп}, который подвергается затуханию на 60 дБ, а затем разделяется на два входных канала. На рис. 5 показана схема подключения

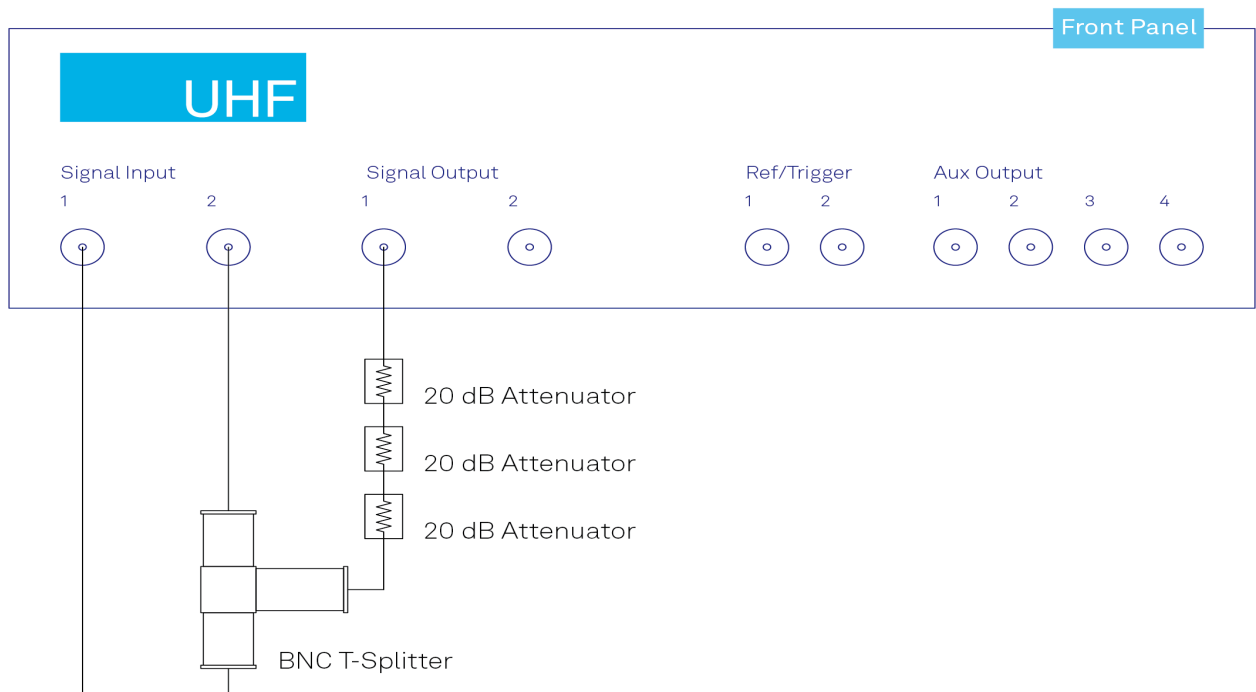


Рис. 5: Установка для передачи сигнала от UHFLI, ослабления его и разделения обратно на два входа

Мы устанавливаем модуль scope для выборки двух сигналов со скоростью 1,8 ГВиб/с и получаем 262144 временных отсчетов в каждом канале с помощью дигитайзера для потоковой передачи на ПК (используя Python API). Код Python выполняет перекрестную корреляцию полученных выборок и получает их спектральную плотность напряжения. Затем этот процесс повторяется и усредняет кросс-коррелированный спектр до 10^3 раз для обеих выходных амплитуд (1 мВ_{пп} и 10 мВ_{пп}). На рисунке 6 ниже показан контраст между усредненными кросс-коррелированными и одноканальными спектрами, в то время как масштабирование осуществляется на частоте пика, который мы хотим измерить.

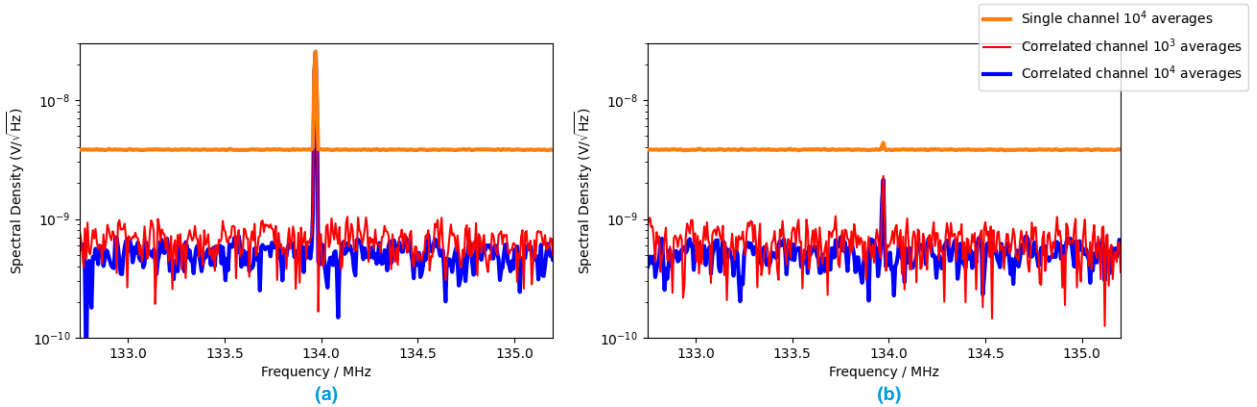


Рис. 6: а) большой выходной сигнал 10 мВ_{пп} приводит к более заметному пику над уровнем шума как в одноканальном сигнале, так и в кросс-коррелированном сигнале. б) Что касается меньшего выходного сигнала 1 мВ_{пп}, то пик теперь загрязнен шумами и менее заметен, однако перекрестная корреляция раскрывает сигнал.

Мы видим снижение уровня шума с коэффициентом ~ 8 (Рис. 6) между кросс-коррелированными и одноканальными спектрами при усреднении 10^4 , и рисунок 7 характеризует, как увеличение числа усреднений влияет на уровень шума в обоих случаях.

Пик для выходного сигнала 10 мВ_{пп} на рис. 6а легко различим как в одиночном, так и в кросс-коррелированном спектре. Таким образом, значения отношения сигнал/шум значительно выше, чем 1 на рис. 8а и продолжает улучшаться с увеличением кросс-корреляционного усреднения. Однако, для выхода сигнала 1 мВ_{пп} (рис. 6б), шум одноканального измерения загрязняет пик, что приводит к SNR ~ 1 . Но снижение уровня шума методом кросс-корреляции раскрывает эту вершину, приводя к улучшению отношения сигнал/шум с коэффициентом 4 при усреднении 10^4 (Рис. 8б). Кроме того, теперь мы можем измерить реальную пиковую амплитуду, так как нежелательный шум канала также уменьшается на частоте пика.

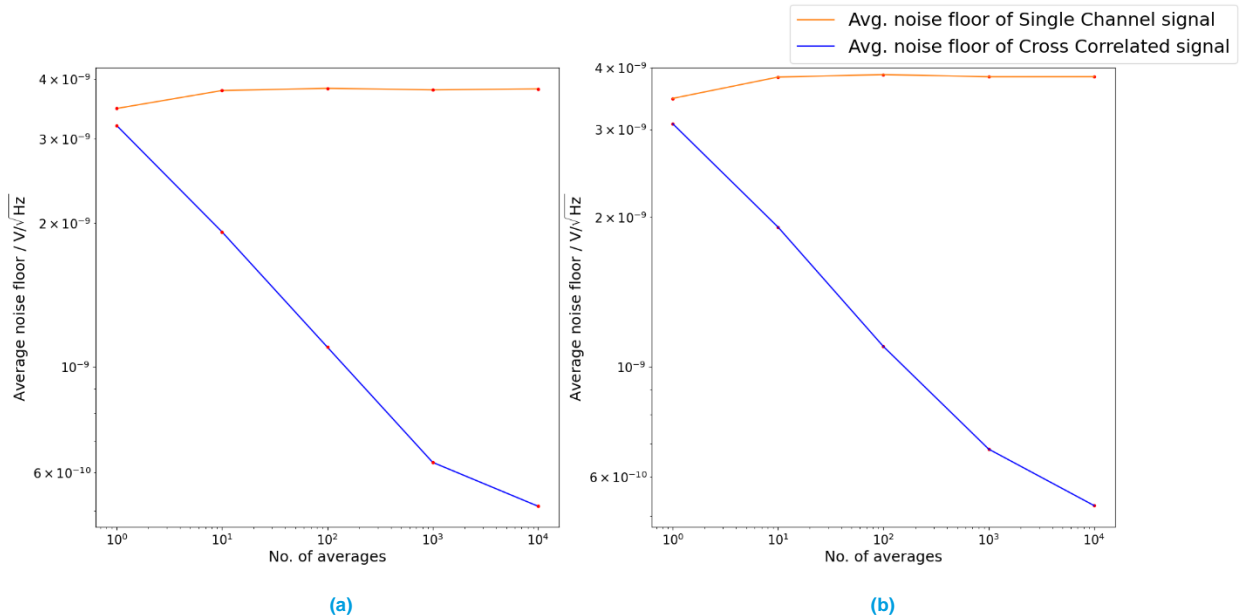


Рис. 7: (а) уменьшение уровня шума с усреднением как для одноканального, так и для кросс-корреляционного сигнала 10 мВ_{пп}, не скрытого уровнем шума (б) Уменьшение уровня шума для меньшего выходного сигнала 1 мВ_{пп} показывает то же поведение, что и в (а)

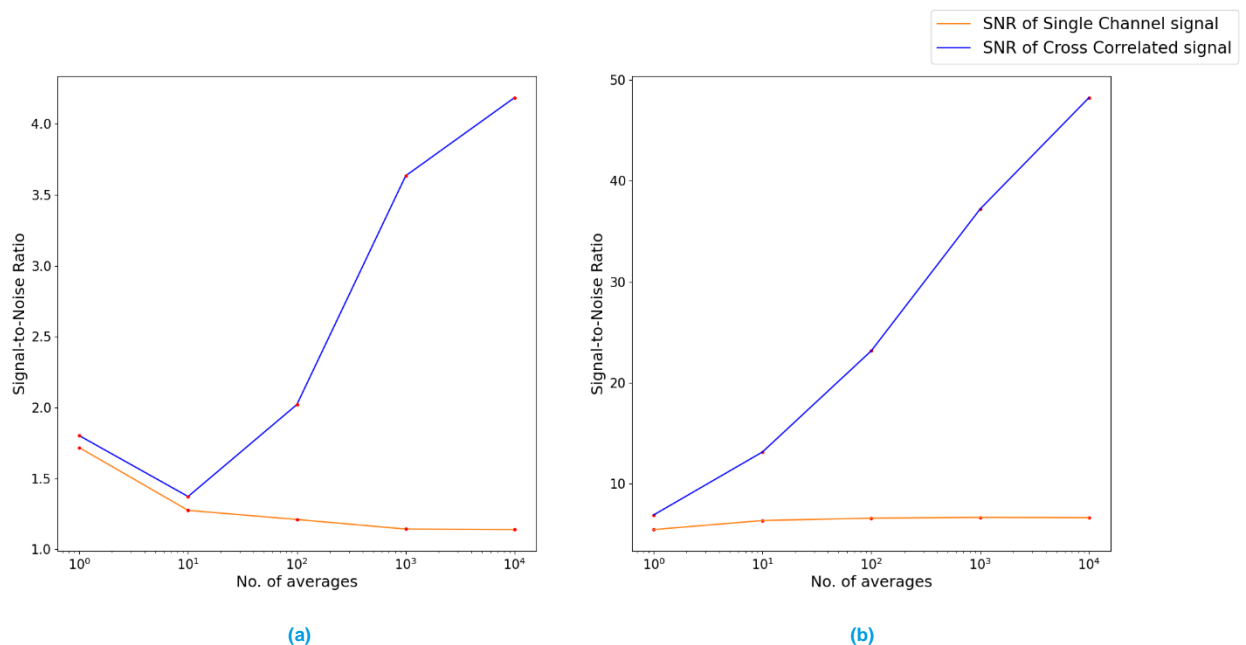


Рис. 8: (а) эффект усреднения в SNR для выходного сигнала 10 МВпп как в одноканальном, так и в кросс-корреляционном усреднении (б) поведение SNR для выходного сигнала 1 МВпп: мы видим, что SNR начинает улучшаться после 10 усреднений

Мы видим значительные улучшения в SNR в обоих рассмотренных случаях, когда сигнал находится около или ниже уровня шума. На рис. 8 (а) показано, что SNR достигает 50 для сигнала 10 МВпп, что является улучшением в ~ 10 раз.

Заключение

В заключение следует отметить, что перекрестная корреляция может быть реализована как решение для устранения специфических источников шума путем распараллеливания измерений. Однако, в реальных приложениях время измерения может быть критическим требованием, и эта операция может быть трудоемкой: в среднем 10^4 измерений занимают почти 30 минут. Но результаты на рисунках 6 и 7 показывают, что даже 10^3 усреднений достаточно для значительного улучшения SNR, занимающего всего ~ 2 минуты для выполнения с текущим кодом.

Мы показали одно применение в этом блоге, когда шум источника канала влияет на силу измеряемого сигнала. В результате, с помощью UHFLI была достигнута чувствительность шумового порога $\sim 0,5$ нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ (рис. 7). В предыдущей работе уровень шума MFLI также был снижен с 2,5 до $\sim 0,5$ нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ с помощью двух MFLI [3]. Эта работа д-ра Jonathan Prance и д-ра Michael Thompson послужила главным источником вдохновения для этого блога.

Jithesh-аспирант Лондонского Университетского колледжа в группе квантовых устройств Mark Buitelaar. Его аспирантура частично поддерживается Zurich instruments через программу EPSRC CASE. В настоящее время он работает в Zurich instruments вместе с Jelena Trbovic и Niels Haandbaek над несколькими проектами, связанными с контролем и измерениями квантового состояния. Его образование связано с компьютерной инженерией с акцентом на ПЛИС, вычислительную архитектуру и цифровую обработку сигналов. Недавно присоединился к миру физики квантовых вычислений и специально работает со спин-кубитами, используя квантовые точки, углеродные нанотрубки, методы коррекции ошибок и считывания данных.