

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет
Кафедра общей физики
Василенко Моисей Александрович
КУРСОВАЯ РАБОТА

«Фильтрация сигналов с электретных микрофонов от шумов»

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18352

Научный руководитель:

Сеньков Дмитрий Валентинович
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума:

Костюрина Александра Георгиевна
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин Виталий Тимофеевич
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Аннотация

В данной курсовой работе исследуются частотные и шумовые характеристики электретных микрофонов, и способы цифровой корреляционной фильтрации с массива микрофонов. В современной технике широкое распространение получили электретные микрофоны со встроенным усилителем и дельта модулятором, позволяющим получить на выходе последовательный цифровой поток, который затем обрабатывается в цифровом виде. В работе использована матрица из пяти таких устройств, подключенных к ARM процессору. Оцифрованный сигнал обрабатывался с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье для получения частотной характеристики микрофона. Далее с помощью корреляционных методов анализа получена шумовая характеристика и проверены методы выделения направления полезного сигнала. Тестовый стенд состоит из материнской платы, связывающей электронные компоненты между собой, пяти ST цифровых микрофонов, которые позволяют принимать звуковые волны, преобразуя их в соответствующее электрическое напряжение, усилителей и дельта модуляторов, встроенных в микрофоны, преобразовывающих полученный с микрофонов электрический сигнал в последовательность нулей и единиц, процессора модели STM32F413ZHT6 (основанного на ARM архитектуре), обрабатывающего последовательность нулей и единиц с кольцевого буфера, которые записываются в него встроенным в процессор сигма демодулятором(СДМ), декодирующим цифровой поток от микрофонов, 1.5 Мбайт постоянной и 320 Кбайт оперативной памяти, TFT LCD дисплея разрешением 240x240 точек. При получении данных с микрофонов наша программа FFT высчитывает и выводит на дисплей микроконтроллера спектральную характеристику полученного сигнала. В ходе работы были освоены методы фильтрации сигнала с электретных микрофонов от шумов, а также методы написания кода на языках программирования C и C++ (в зависимости от требуемой задачи) на микроконтроллере серии STM32 в Интегрированной Среде Разработки(сокращённо IDE) <<System Workbench for STM32>> основанной на IDE Eclipse.

Оглавление

Введение.....	3
Теоретическое обоснование.....	5
1.1 Физика электростатического преобразователя.....	5
1.2 Физика Электрета.....	7
1.3 Микрофоны.....	8
1.3.1 Принцип действия электретного микрофона.....	8
1.4 Теория шумов.....	9
1.4.1 Тепловой шум.....	10
1.4.2 Дробовой шум.....	11
1.5 Математика.....	12
2 Экспериментальная часть.....	14
2.1 Описание установки.....	14
2.2 Методика.....	16
2.3 Результаты.....	18
2.4 Выводы.....	21
3. Литература.....	21

Введение

В данной курсовой работе исследуется фильтрация сигналов с электретных микрофонов, поэтому для начала введем понятия *сигнала и микрофона*, а также дадим неглубокое представление о *классе приборов, производящие перевод аналогового сигнала в цифровой и наоборот*:

Сигнал — физический процесс, несущий в себе информацию. Если мы получаем информацию с какого-то физического процесса, то он для нас становится *сигналом*. Сигналы как правило изображают в виде графика или поверхностей (так нагляднее). Примером сигнала может служить положения броуновской частицы в определённые моменты времени (рис.1а) или зависимость сопротивления медной проволоки от её длины (рис.1б), в данной работе сигнал представляет собой изменение электрического напряжения во времени.

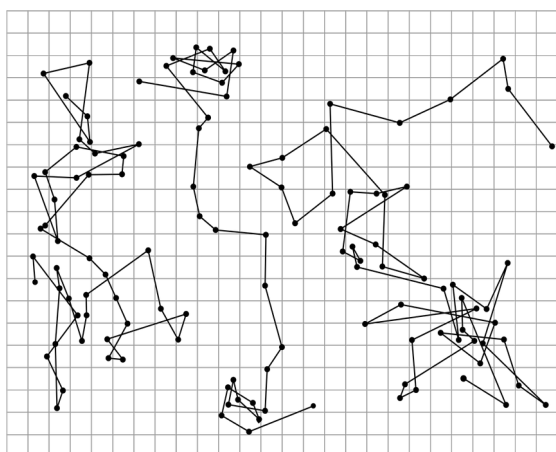


Рис.1(а)

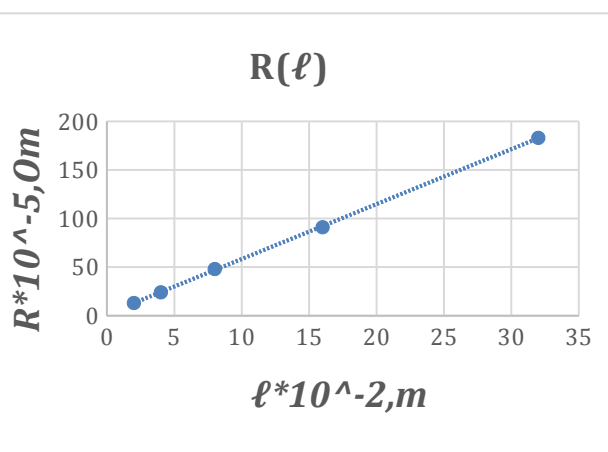


Рис.1(б)

Микрофон (от греч. μικρός - маленький, φωνή - голос) - электроакустический прибор, преобразующий акустические колебания в электрический сигнал. Различают разные типы микрофонов по принципу их действия: электростатические, динамические, угольные микрофоны и др. Мы же будем работать с электретным микрофоном (разновидность конденсаторного микрофона, который в свою очередь является одним из типов электростатического микрофона).

Существует класс устройств, преобразовывающие аналоговый сигнал в цифровой, проводя операции дискретизации и квантования — это АЦП (аналого-цифровой преобразователь). Их существует несколько видов (различают по способу применяемых алгоритмов): последовательные прямого преобразования, последовательного приближения, последовательные с сигма-дельта-модуляцией, параллельные одноступенчатые, параллельные двух- и более ступенчатые (конвейерные). Нас же будет интересовать Сигма-Дельта

Модулятор, потому что именно такой вид АЦП стоит в нашем микроконтроллере.

Цель работы: отфильтровать сигнал с электретных микрофонов от шумов.

Задачи:

1. С помощью электретных микрофонов и Сигма-Дельта Модулятора получить звуковой сигнал, преобразованный в электрическое напряжение.
2. Написать программу, с помощью которой можно будет получить спектр звуковой волны, соотношение сигнал-шум, максимальное значение частоты в спектре и выводить всё это на экран.
3. Написать программу, которая будет рассчитывать свёртку сигналов с двух микрофонов и с её помощью определять на какой из микрофонов пришёл сигнал раньше.

Теоретическое обоснование

1.1 Физика электростатического преобразователя

Чтобы понять принцип действия электретного микрофона, рассмотрим сначала принцип действия электростатического преобразователя, а затем рассмотрим, что из себя представляет электрет.

Действие электростатического преобразователя основано на появлении сил электростатического притяжения между заряженными обкладками конденсатора и на изменении напряжения на заряженном конденсаторе при изменении его емкости (сближении или удалении друг от друга его обкладок).

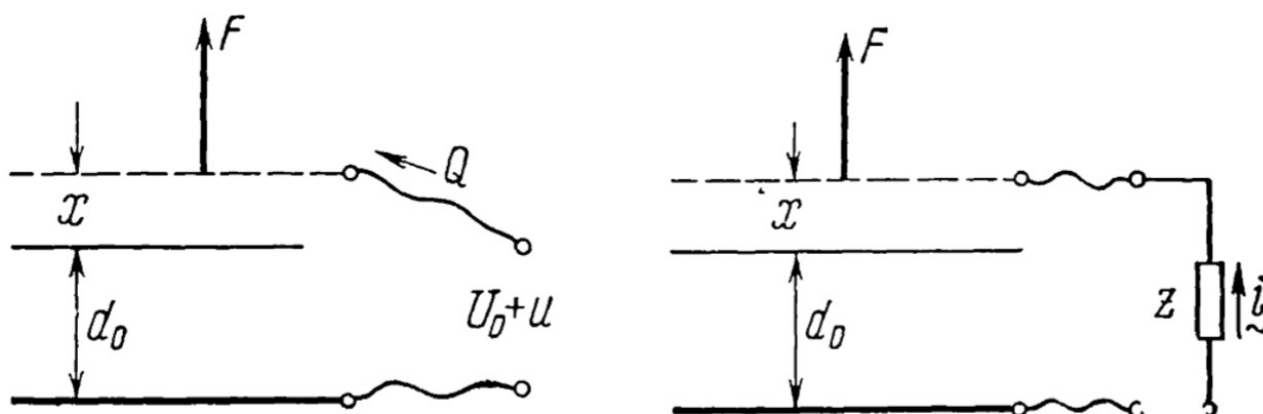


Рис.1. К выводу уравнений для электростатического преобразователя

Рассмотрим плоский конденсатор (рис.1), где одна из обкладок имеет возможность приближаться и отдаляться от другой, колеблясь вдоль силовых линий электрического поля в конденсаторе. Если конденсатор не заряжен, то на эту обкладку (при движении) действуют следующие силы: механическая сила реакции $F_{\text{реак}}$, состоящая из сил реакции обкладки и упругости подвеса обкладки $\xi \dot{x} F_{\text{реак}} / \vartheta$, где ξ – собственное механическое сопротивление обкладки (преобразователя).

Если конденсатор зарядить, то возникнет сила взаимного притяжения пластин $F_3 = Q^2 / (2Cd)$, где C – емкость конденсатора; d – расстояние между пластинами, Q – заряд.

Из этого следует, что F_3 изменяется не линейно относительно Q , а пропорционально ее квадрату, что означает, что такой подвижный конденсатор будет искаженно преобразовывать механические колебания в электрические. Поэтому, чтобы была линейная зависимость, конденсатор предварительно заряжают до некоторого постоянного напряжения U_0 , то есть ему сообщают заряд $Q_0 = U_0 C$. В режиме работы напряжение на преобразователе очень слабо меняется около постоянного значения U_0 : $U = U_0 + U$, и соответственно заряд на нем также колеблется около постоянного значения: $Q = Q_0 + q$. Отсюда вытекает следующее:

$$F_3 = \frac{(Q_0 + q)^2}{2Cd} \approx F_{30} + \frac{U_0}{d_0} q, \text{ где } F_{30} = Q_0^2 / (2Cd)$$

Если q – переменный заряд, меняющийся по синусоидальному закону, то удобно выразить его через силу тока, тогда переменная составляющая силы F_3 имеет следующий вид:

$$F_3 = \frac{U_0}{d_0} q = \frac{U_0}{j\omega d_0} i.$$

Здесь учтено, что $Cd = C_0 d_0 = \frac{S}{4\pi}$ для плоского конденсатора с площадью обкладок S , а также, что $q \ll Q_0$. Так можно сделать, потому что преобразователь может работать без искажений формы колебаний только, если отклонения пластины от среднего положения малы. Силу постоянного притяжения F_{30} можно уравновесить, если подвижную обкладку укрепить на упругом подвесе, позволяющем ей колебаться около положения равновесия. Поэтому далее будем интересоваться переменными силами. Составим для них уравнение, учитывая внешнюю силу F :

$$F = F_{\text{реак}} + F_3 \text{ или } F = \xi \dot{\vartheta} + \frac{U_0}{j\omega d_0} i.$$

Рассмотрим теперь электрическую сторону устройства. Пусть конденсатор имеет заряд Q и одна из его обкладок, колеблясь, отклоняется от среднего положения на величину x . В положении устойчивого равновесия ($x=0$) напряжение на конденсаторе $U = \frac{Q}{C_0}$. Если расстояние между обкладками изменится с d_0 на $d_0 + x$, то напряжение возрастет пропорционально отношению расстояний: $U = \frac{Q(d_0 + x)}{C_0 d_0}$.

Учитывая постоянный заряд Q_0 , можем написать

$$U = U_0 + u \approx \frac{(Q_0 + q)(d_0 + x)}{C_0 d_0}$$

Или

$$U_0 + u \approx i \frac{1}{j\omega C_0} + \frac{U_0 \vartheta}{j\omega d_0} + U_0,$$

Здесь мы пренебрегли величинами второго порядка малости по сравнению с $\frac{q}{Q_0} u \frac{x}{d_0}$, а переменные величины выражены через скорость ϑ и ток i вместо x и q соответственно. Так для переменного напряжения получим:

$$u = i \frac{1}{j\omega C_0} + \frac{U_0 \vartheta}{j\omega d_0}.$$

Если переменное напряжение u подается к конденсатору через внешнее сопротивление z_n , то в правой части следует учесть падение напряжения на нем iz_n . Обозначив $\frac{1}{j\omega C_0} = z_0$, получим:

$$u = i(z_0 + z_n) + \frac{U_0 \vartheta}{j\omega d_0}.$$

В итоге, заменяя $\frac{U_0}{j\omega d_0}$ на M_1 и $z_0 + z_n$ на z_2 , для электростатического преобразователя мы получили следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} F = \xi \vartheta + M_1 i \\ u = M_1 \vartheta + i z_2 \end{cases}.$$

Эти небольшие выкладки нужны были для того, чтобы показать, что сила, действующая на обкладку и напряжение конденсатора линейно зависят от скорости колебания обкладки и заряда конденсатора, то есть, что электростатический преобразователь без искажений преобразует форму сигнала, а также то, что одна пластина не упадет на другую за счёт кулоновского взаимодействия.

1.2 Физика Электрета

Электретом называется диэлектрик, который способен в течение долгого времени сохранять поляризованное состояние, в которое он переходит под воздействием сильного электрического либо магнитного поля, коронного разряда, гамма-излучения и/или других энергетических факторов. Суть в том, что под этим воздействием образуется система, состоящая из анизотропно расположенных ион-молекулярных комплексов. Эти комплексы, поглощая энергию из внешней среды, распадаются на молекулы и электрозаряженные

анизотропно расположенные частицы: анионы, катионы и их пары (квазидиполи). При суперпозиции полей этих частиц создаётся сильное длительно действующее электрическое поле системы.

Сами электреты делят на два типа: гетеро и гомоэлектреты, принципиальное различие которых заключается в том, что гетероэлектрет выдаёт поле противоположное полю поляризации, а гомоэлектрет имеет поле, сонаправленное полю поляризации.

1.3 Микрофоны

Ещё раз вспомним определение **микрофона** – это электроакустический прибор, преобразующий акустические колебания в электрический сигнал. Микрофоны различают по принципу преобразования механической волны в электрический сигнал: Электростатические, динамические (катушечного или ленточного типа), пьезоэлектрические, оптоакустические и угольные. Среди электростатических или ещё конденсаторных микрофонов выделяют т.н. электретные микрофоны, единственная разность которых заключается в том, что на конденсаторном микрофоне разность потенциалов поддерживается за счёт постоянного поляризующего напряжения, а в электретном микрофоне за счёт гомоэлектрета, нанесённого тонким слоем на одну из обкладок.

1.3.1 Принцип действия электретного микрофона

Действие электретного микрофона основано на принципе электростатического преобразователя. Схематическая конструкция такого микрофона приведена ниже.

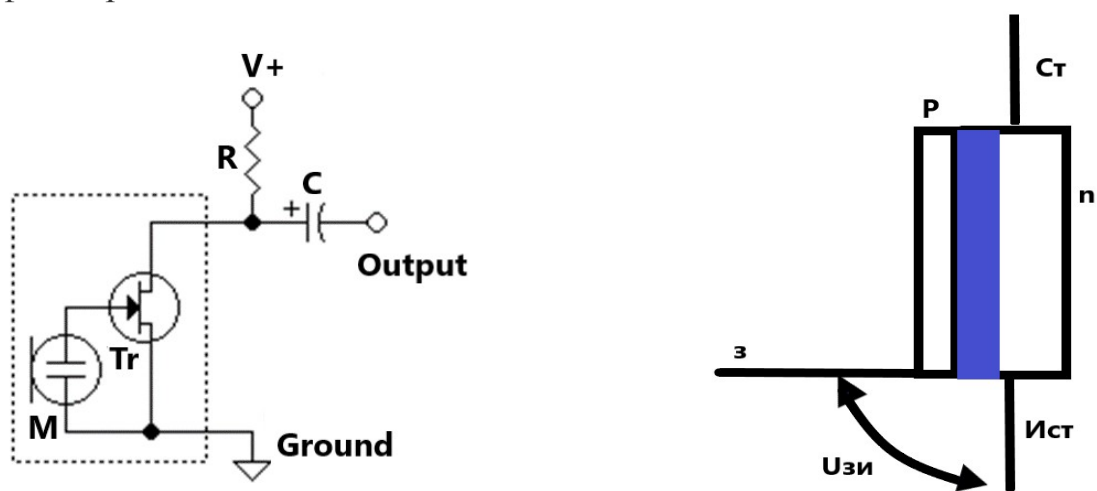


Рис 2.1. Схема электретного микрофона; Рис 2.2 Схема полевого n-канального транзистора с управляющим p-n переходом (синяя область – область p-n перехода)

Тонкая диафрагма, на которую нанесён тонкий слой гомоэлектрета, помещена над неподвижным плоским электродом, так что зазор между ними очень мал. Диафрагма очень сильно натянута и электрически подключена к корпусу микрофона

Под действием звуковой волны электретная мембрана микрофона (**M**) приходит в движение, изменяется ёмкость конденсатора, соответственно и напряжение, которое подаётся на вход предусилителя (**Tr**), так как отклонения напряжения от постоянного, как говорилось ранее очень малы, а так как такой конденсатор имеет высокое выходное сопротивление, то и подключаемый к нему предусилитель должен иметь высокое входное сопротивление, поэтому в качестве предусилителя берётся полевой n-канальный транзистор с управляющим p-n переходом, который работает следующим образом. Вообще полевой n-канальный транзистор с управляющим p-n переходом состоит из истока(**Ист**), стока(**Ст**), затвора(**з**) и канала(**н**), где исток и сток являются контактами, причём исток является источником основных носителей заряда, в данном случае это электроны, затвор представляет из себя полупроводник p-типа, а канал – полупроводник n-типа. Зная, из чего состоит полевой транзистор, разберём его принцип действия. Во-первых, так как канал n-типа, то к истоку нужно подключить отрицательный вывод источника питания, во-вторых, нужно подавать отрицательное напряжение на затвор относительно истока. Таким образом, увеличивая напряжение по модулю между затвором и истоком, область p-n перехода расширяется в сторону канала, тем самым уменьшая область проводимости. То есть управляя напряжением затвор-исток, можно менять ток, протекаемый через канал. Собственно, когда за счёт звуковых волн напряжение на конденсаторе меняется, то меняется и напряжение затвор-исток (причём таким же образом), и это переменное напряжение пропускает конденсатор, не позволяя пройти постоянной составляющей, которая идёт от источника постоянного напряжения, питая полевой транзистор. Стоит добавить, что высокое входное сопротивление полевого транзистора получается за счёт того, что затвор управляется напряжением, и ток через затвор практически не течёт (только ток утечки).

1.4 Теория шумов

Разобравшись, что из себя представляет электретный микрофон, и на чём основан его принцип действия, перейдем к помехам, которые возникают при преобразовании сигнала микрофоном.

Скажем вначале то, что в общем случае **шум** – это беспорядочные колебания различной физической природы, в частности и

случайные электрические флуктуации - хаотические изменения потенциалов и токов в электрических цепях.

Существуют разные, сложившиеся исторически, методы классификации шумов:

- естественные и технические;
- аддитивные и мультипликативные.

Естественными называют шумы, вызванные фундаментальными физическими причинами, например,

- диссипацией энергии,
- дискретностью заряда электрона, $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

К **техническим** относят шумы, вызванные несовершенством технологии изготовления прибора.

Аддитивным называют шум, обычно в токе, либо напряжении, статистические характеристики которого не зависят от напряжения, приложенного к прибору, либо протекающего через прибор тока.

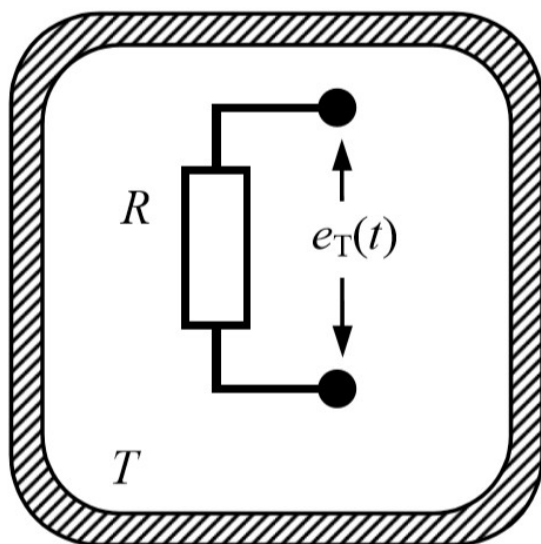
Под **мультипликативным** понимается шум, вызванный флуктуациями параметров элемента и проявляющийся при приложении напряжения к этому элементу, либо пропускании через него электрического тока.

Рассмотрим те виды шумов, которые в основном влияют на точность преобразования сигнала.

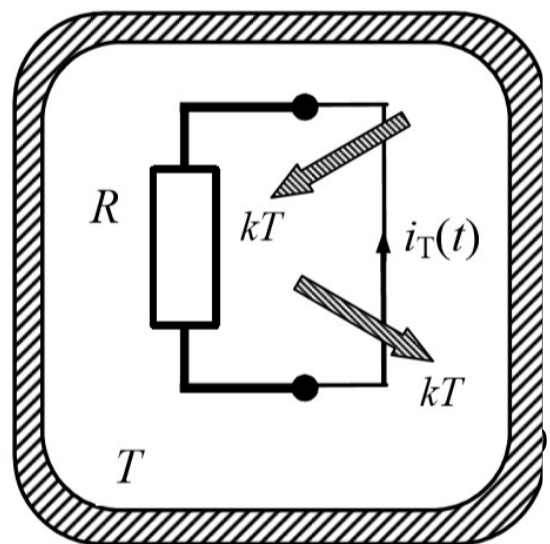
1.4.1 Тепловой шум

Условие существования теплового шума – наличие диссипации энергии.

Рассмотрим идеальный резистор (Рис. 3), имеющий сопротивление R и находящийся в термостате при абсолютной температуре T .



а)



б)

Рис.3. Идеальный резистор в термостате: (а) разомкнутые выводы; (б) короткозамкнутые выводы

На выводах разомкнутого резистора (Рис. 3-а) проявляется эдс теплового шума $e_T(t)$, возникающая из-за хаотического (теплового) движения носителей тока внутри его. При замыкании выводов резистора (Рис. 3-б) через переключку потечёт шумовой ток $i_T(t)$. Хотя этот ток обусловлен тепловым движением носителей в резисторе, можно также считать, что он обусловлен обменом квантами энергии между короткозамкнутым резистором и термостатом. В нашей установке присутствует СДМ, который содержит в себе интегратор, то есть интегрирующую RC-цепочку, которая из всех составляющих установки вносит больший вклад в тепловой шум.

1.4.2 Дробовой шум

Условия существования дробового шума:

- 1) дискретность заряда электрона, $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$;
- 2) наличие выделенного направления движения электронов, то есть скорость $\vec{v}$ имеет среднее значение, отличное от нуля, $\langle \vec{v} \rangle \neq 0$;
- 3) стохастичность инжекции в выделенном направлении.

Первое условие представляется достаточно очевидным.

По поводу второго условия заметим, что при отсутствии выделенного направления движения генерируется тепловой шум. Среднее значение тепловой компоненты $\vec{v}_T$ скорости электрона всегда равно нулю, $\langle \vec{v}_T \rangle = 0$.

Третье условие, на первый взгляд, не столь очевидно. Однако, в качестве предельного случая, рассмотрим строго периодическую инжекцию электронов с периодом τ_1 . В этом случае ток через прибор имеет линейчатый (дискретный) спектр с набором гармоник на частотах, кратных $\frac{1}{\tau_1}$. Для того чтобы ток имел случайный характер, необходима стохастичность инжекции носителей.

Дробовой шум проявляется, когда скорость дрейфа сравнима со среднеквадратической тепловой скоростью, $v_d \sim v_T$. При комнатной температуре имеем $v_T \sim 70 \text{ км/с}$.

В металлических проводниках дробовой шум не виден, так как в них дрейфовая скорость относительно мала, $v_d \ll v_T$. Говоря конкретнее, отметим, что при $v_d \sim 1 \text{ см/с}$ любой металлический проводник расплавится.

В полупроводниках дробовой шум может быть виден, так как в них величина v_d принимает существенно бóльшие значения из-за того, что соударения носителей с решеткой относительно редки.

В инжекционных приборах (электровакуумных лампах, полупроводниковых диодах и биполярных транзисторах) дробовой шум есть всегда.

В нашей установке присутствует полевой n-канальный транзистор с управляющим p-n переходом, а значит дробовой шум в нём присутствует.

Скажем ещё о наводках на микрофон от разных электрических устройств, в лаборатории, где проводился эксперимент находилось не малое количество таких устройств как: осциллографы, генераторы низких частот, компьютеры, разные микроконтроллеры, рабочие во время эксперимента.

1.5 Математика

В данном разделе мы скажем несколько слов о математике, которую мы использовали в нашем эксперименте.

Любой сигнал для дальнейшей обработки дискретизируется и квантуется АЦП, в нашем случае это делает СДМ. Это связано с тем, что процессор работает хоть на и высокой, но на ограниченной частоте.

В нашей работе использовалось **Быстрое Преобразование Фурье**, которое является алгоритмом ускоренного дискретного преобразования Фурье, позволяющий получить результат за время, меньшее $O(N^2)$ (требуемого для прямого, по формульного вычисления), которое работает с последовательностью значений сигнала, выбранных с определённым интервалом времени, называемым периодом дискретизации, который, согласно теореме Котельникова, должен быть в два раза меньше, чтобы можно было без искажений восстановить исходный сигнал. Ниже буду приведены формулы Дискретного Преобразования Фурье без пояснения алгоритма БПФ, чтобы не загромождать всё одной математикой.

Прямое преобразование:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{\frac{-2\pi i}{N} kn},$$

где N - количество значений сигнала, измеренных за период, а также количество компонент разложения;

$x_n, n=0, \dots, N-1$, измеренные значения сигнала (в дискретных временных точках с номерами $n=0, \dots, N-1$), которые являются входными данными;

$X_k, k=0, \dots, N-1$, – N комплексных амплитуд синусоидальных сигналов, слагающих исходный сигнал.

Также упомянем **свёртку функций** – операцию в функциональном анализе, которая к двум функциям(сигналам) $f(t)ug(-t)$. Операция свёртки можно интерпретировать как «схожесть» одной функции (сигнала) с отражённой и сдвинутой во времени другой функцией (сигналом). Например, в радиосвязи свёртка помогает определить наличие того или иного куска сигнала в эфире. А ещё, подбирая разные функции g , можно свёртку использовать, как фильтр сигнала, кстати БПФ тоже можно отнести к фильтрам, так как мы берём сигнал зависящий от времени, применяем к нему оператор и на выходе получаем его спектр (мощность от частоты).

Саму свёртку можно вычислить через формулу связи свёртки и Преобразования Фурье, выглядит она так:

$\widehat{(f*g)} = \sqrt{2\pi} \hat{f} \hat{g}$, где $(f*g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(s-t)dt$ и есть свёртка двух функций (сигналов)(соответственно для дискретной свёртки интеграл превращается в сумм), а крышечки – это Прямое Преобразование Фурье.

Если к данной формуле применить обратное Преобразование Фурье, то получится искомая свёртка.

2 Экспериментальная часть

2.1 Описание установки

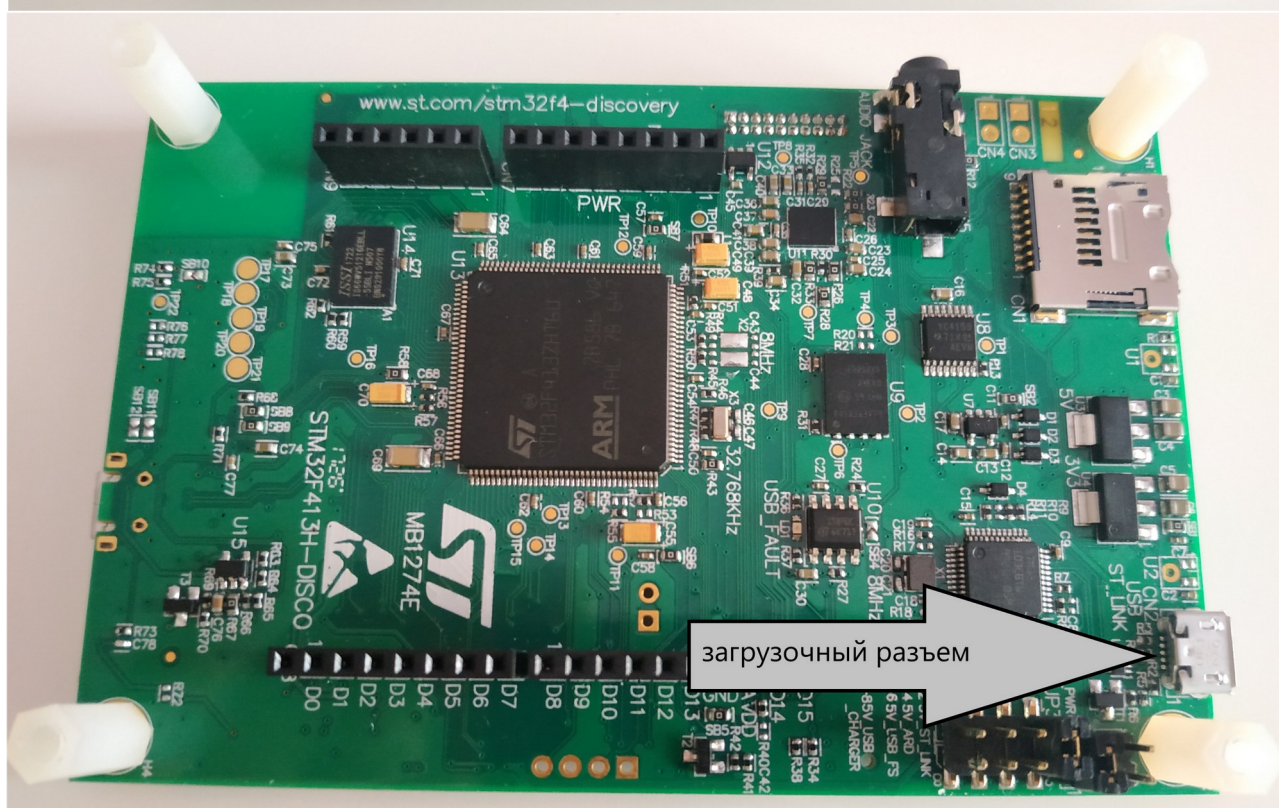
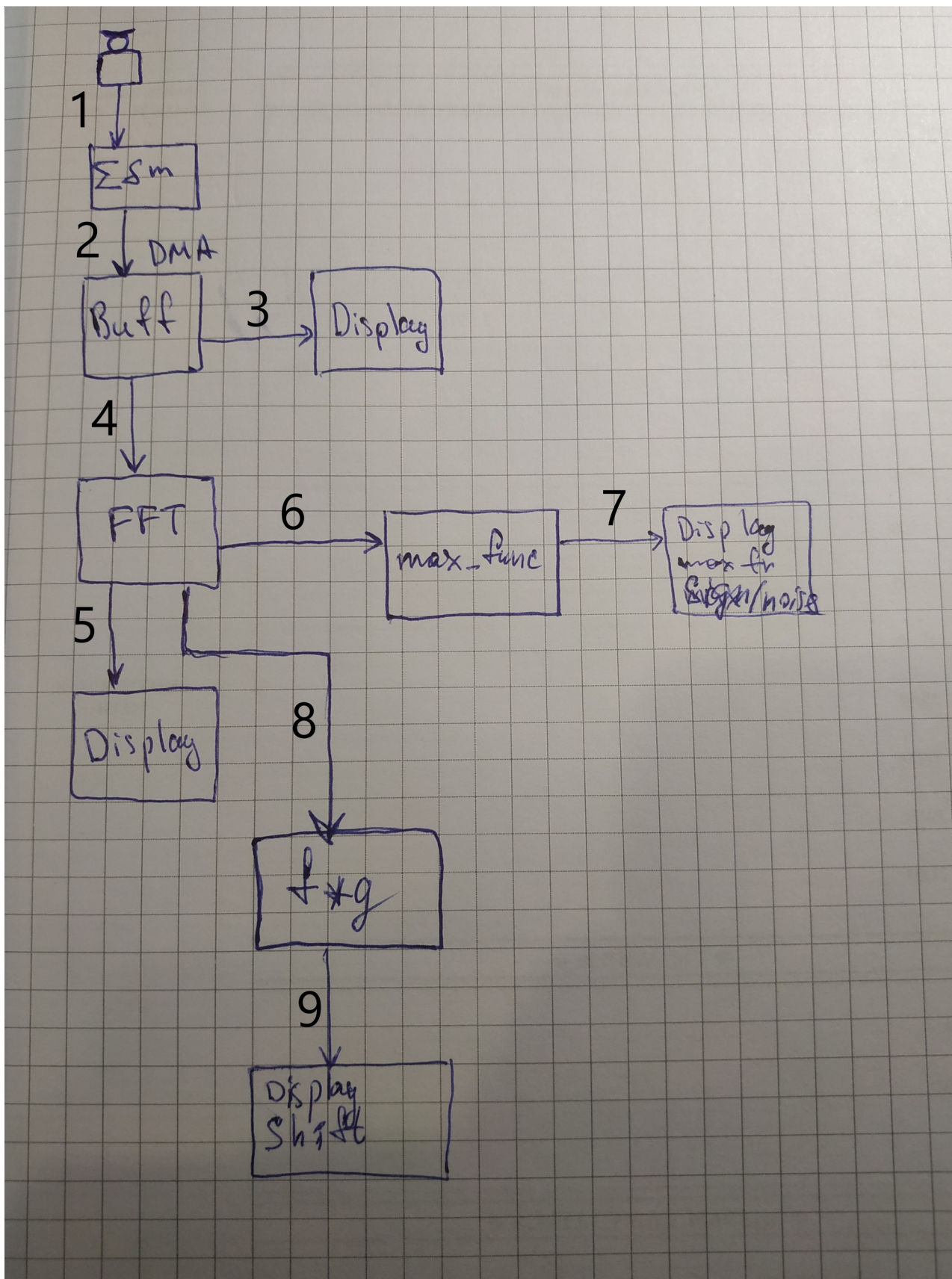


Рис.4. Фотография установки фильтрации сигнала с электретных микрофонов от шумов (многофункциональный микроконтроллер STM32F413).

Установка представляет из себя многофункциональный микроконтроллер STM32F413, которая по мимо явно указанных деталей таких как LCD экрана разрешением 240х240, 5-ти MEMS микрофонов и загрузочного разъёма, содержит ещё кнопку перезагрузки (чёрного цвета) и программируемую для пользовательских задач кнопку (голубого цвета), а также два ещё один USB разъём.

2.2 Методика

Для всех пунктов методики нарисую блок-схему программы, разбив её над подпрограммы:

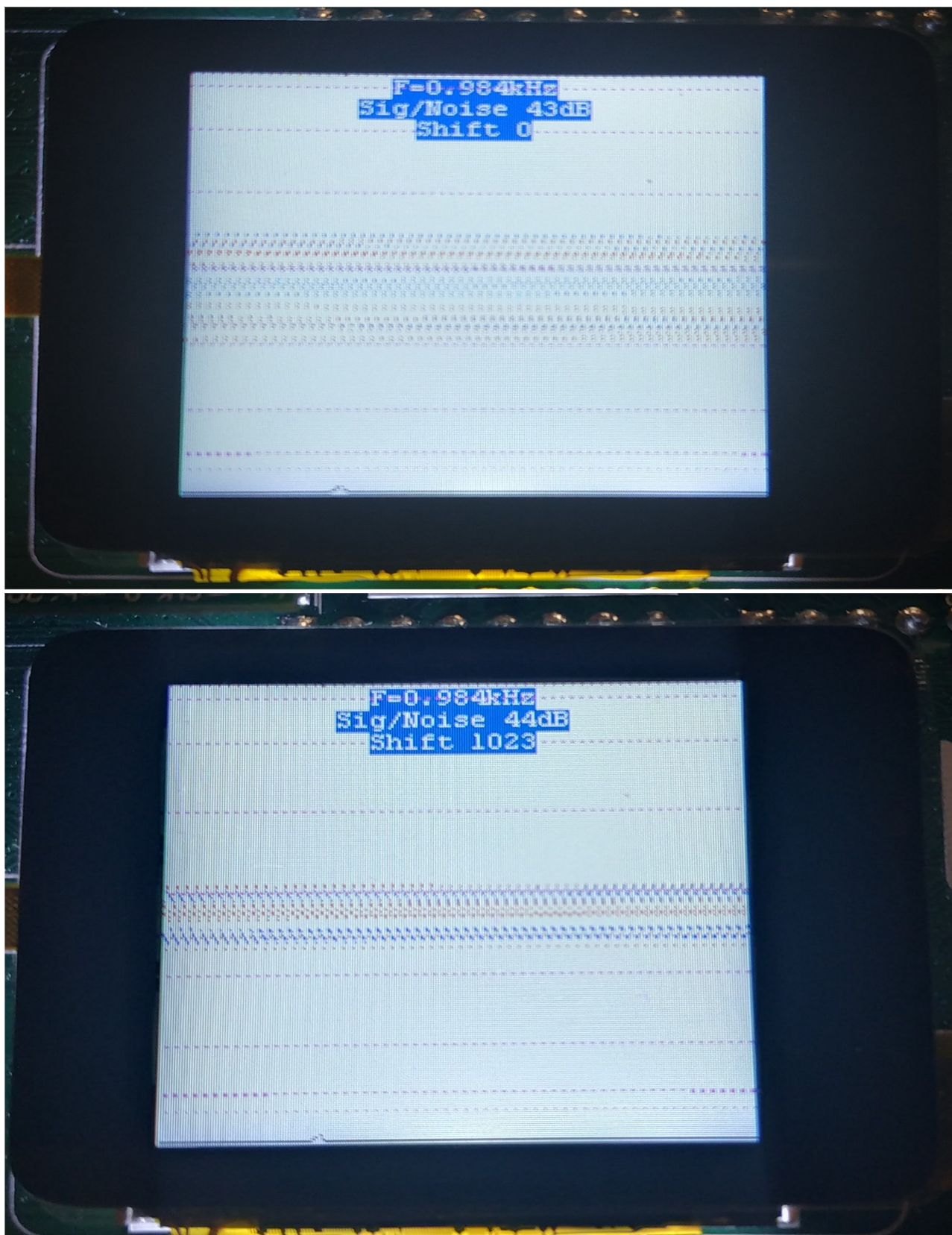


1. Аналоговый сигнал с микрофона приходит на Сигма-Дельта Модулятор ($\sum \delta m$);
2. Далее, через DMA, данные, минуя процессор, поступают в буфер (Buff);
3. Затем одна программа выводит сигнал без фильтрации на экран (Display);
4. Далее ещё одна программа делает Быстрое Прямое Преобразование Фурье (FFT);
5. Другая программа, используя подсчитанное преобразование фурье на предыдущем шаге, выводит на экран Амплитудно-Частотную Характеристику (Display);
6. На этом шаге ещё одна программа берёт уже подсчитанное преобразование фурье для нашего сигнала и высчитывает максимальную частоту и соотношение сигнал-шум;
7. Затем следующая программа выводит на экран данные, полученные на предыдущем шаге (Display, max fr, sign/noise);
8. Далее, другая программа, пользуясь подсчитанными данными с преобразования фурье, с помощью формулы связи свёртки с преобразованием фурье, рассчитывает с какого микрофона раньше пришёл сигнал;
9. Далее последняя программа выводит временную задержку на экран (Display, Shift).

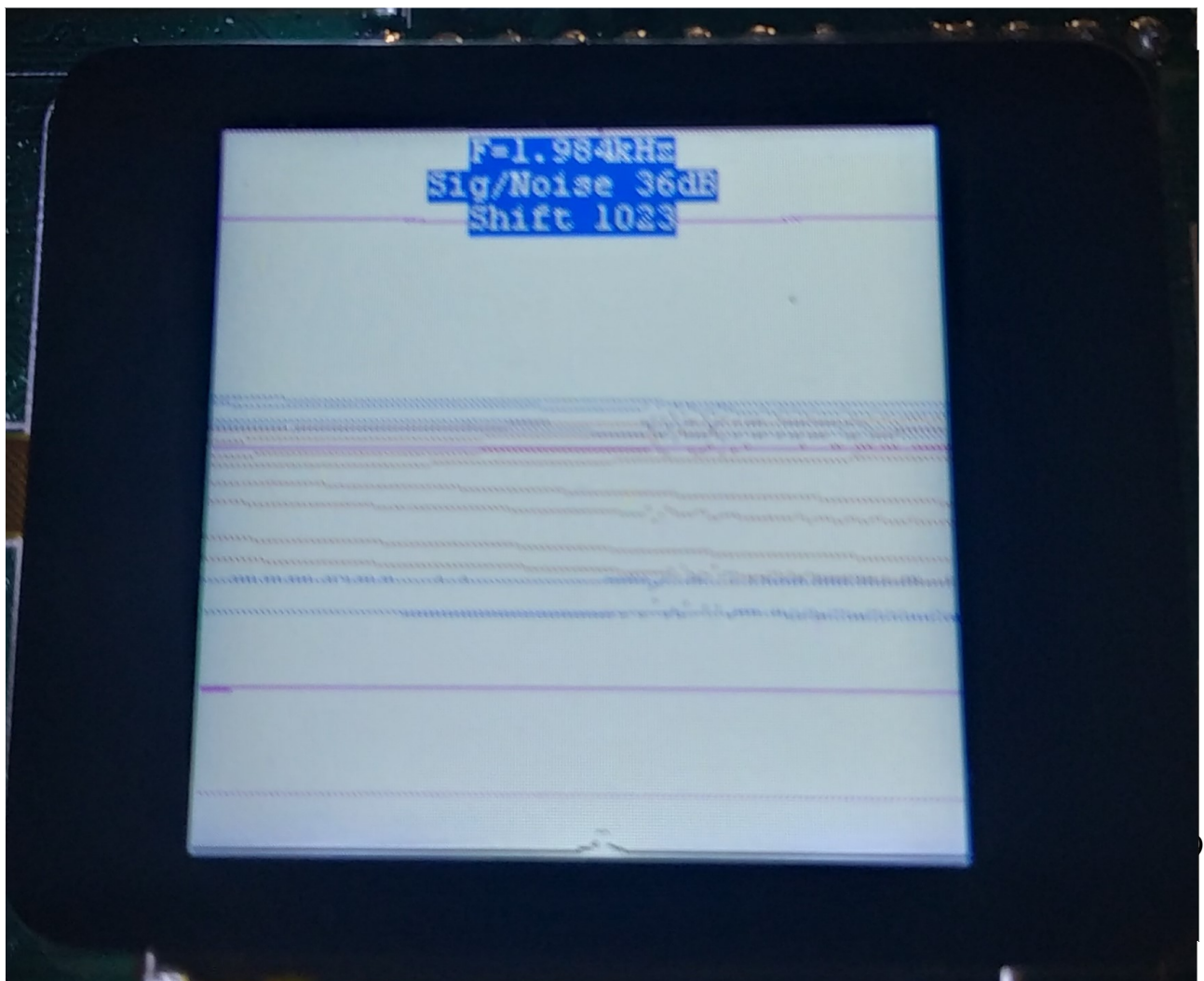
Сам эксперимент проводился следующим образом: с помощью приложения генератора частот на смартфоне, мы делали выборку некоторых частот: 2кГц, 4кГц, 6кГц и 7.5кГц, и подносили к микрофонам микроконтроллера, затем удерживали синюю кнопку, которая была запрограммирована на то, чтобы останавливать всё, в итоге оставался как бы снимок последнего вычисления программы, затем фотографировали показания на смартфон. Для того, чтобы определить до какого микрофона раньше дошла звуковая волна, точнее с каких двух микрофонов берутся сигналы (система микроконтроллера при каждом новом запуске программы (для этого нужно выключить и включить STM32) самопроизвольно выбирает два из пяти микрофонов), мы подносили с разных сторон смартфон и смотрели какой номер максимального элемента массива выведет нам микроконтроллер (массив имеет длину в 1024 элемента). Как мы по номеру определим сдвинут сигнал или нет? Дело в том, что если мы применим свёртку к самому сигналу и к отражённому и сдвинутому во времени этому же сигналу, то максимум этой свёртки придётся на совпадение этих сигналов, то есть на время задержки

разности прихода сигнала на один и другой микрофон, а учитывая, что расстояние между некоторыми микрофонами в какой-то мере существенное, то нам остаётся лишь для свёртки сделать сигнал обратным. Стоит сказать, что так как для этого нам понадобилось увеличить частоту дискретизации, то максимальные значения амплитуд уменьшились вдвое.

2.3 Результаты



Я привел две фотографии, так как программа для Shift высчитывает номер элемента, то результаты на противоположных сторонах оказываются одинаковыми. К сожалению, фотографировал и генерировал сигнал с одного телефона, поэтому на фото даже не в увеличенном виде нельзя увидеть с каких именно микрофонов брался сигнал для обработки, но я и мой научный руководитель подтверждаем справедливость наших утверждений. Для этих измерений мы использовали частоту в 2кГц, и как видно на экране с небольшой погрешностью мы получили максимальную частоту в 2 раза меньше (во всех наших экспериментах выбирался звук только одной частоты, а следовательно максимальная частота и просто частота совпадали), также мы видим соотношение сигнал-шум и в самом низу экрана чёрным цветом представлена Амплитудно-Частотная Характеристика сигнала, а именно график «шапочка», с максимумом в частоте в 2 кГц (для программы в 1 кГц, так как в два раза меньше). Дальше я приведу ещё две фотографии для частоты в 4кГц и, как мы увидим, для неё всё вычисляется верно.



2.4 Выводы

С помощью электретных микрофонов и Сигма-Дельта Модулятора мы получили звуковой сигнал, преобразованный в электрическое напряжение. Написали программу, с помощью которой получили спектр звуковой волны и вывели его на экран в виде амплитудо-частотной характеристики, а также программу, которая рассчитывает соотношение сигнал-шум, максимальное значение в спектре сигнала и с помощью свёртки сигнала с двух микрофонов, определяет временной сдвиг, и выводит всё это на экран.

3. Литература

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%83%D0%BC> – Шум.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%BE%D0%BD> – Электретный микрофон.
3. <https://www.youtube.com/watch?v=PKmK0nLsYLo&t=210s> – полевой транзистор (электротехника и электроника для программистов).
4. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%8B%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A4%D1%83%D1%80%D1%8C%D0%B5 – Быстрое Преобразование Фурье.
5. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A4%D1%83%D1%80%D1%8C%D0%B5 – Дискретное Преобразование Фурье.
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D1%91%D1%80%D1%82%D0%BA%D0%B0_\(%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D1%91%D1%80%D1%82%D0%BA%D0%B0_(%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA)

[%D0%B8%D0%B9 %D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7\)#%D0%A1%D0%B2%D1%91%D1%80%D1%82%D0%BA%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%80](#) – Свёртка функций.

7. http://www.lib.unn.ru/students/src/Yakimov_Noise.pdf - Физика Шумов и Флуктуаций параметров (А.В. Якимов).
8. <https://kurskelectronic.ru/library/elektroakustika-rimskij-korsakov-a-v-1973/> - Электроакустика (Римский-Корсаков)