

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»
Факультет управления и прикладной математики
Кафедра математического моделирования и прикладной математики

**Методы определения положения макетов на
аэродинамическом столе**

Выпускная квалификационная работа
(магистерская диссертация)

Выполнил:
студент 272 группы
Сизов Д.Л.

Научный руководитель:
Ткачев С.С., к.ф.-м.н.

г. Москва
2017

Оглавление

Введение	4
Актуальность задачи	4
Обзор существующих методик решения задачи	6
Постановка задачи.....	10
Постановка задачи.....	10
Система координат и математическая модель.....	10
Методы определения положения по полученному массиву времен регистрации сигналов	13
Локальный метод определения координат объекта на стенде	13
Использование фильтра Калмана	14
Использование моментов прихода сигнала	15
в качестве модели измерений	15
Использование координат, найденных из минимизации функционала в качестве модели измерений	16
Моделирование эксперимента.....	17
Модель эксперимента.....	17
Исследование ошибки локального метода от числа источников и их положения.....	18
Исследование точности после использования фильтра Калмана ..	20
Подготовка и проведение эксперимента.....	23
Обработка сигналов.....	23
Анализ звука в лаборатории	24
Создание «внешней среды»	25
Выбор частот сигналов.....	25
Подбор оборудования для создания «внешней среды».....	25

Эксперименты с двумя динамиками	29
Определение амплитуды гармоники сигнала одной частоты при ДПФ сигнала динамика другой частоты	29
Эксперимент по определению координаты микрофона, расположенного между двумя динамиками.	31
Заключение	34
Список литературы	35

Введение

Актуальность задачи

В Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН в настоящее время разрабатывается стенд КОСМОС (КОмплекС для Моделирования движения Спутников), в состав которого входит аэродинамический стол, промышленный вентилятор с блоком управления и системой трубопроводов, а также макеты системы управления микроспутников. Аэродинамический стол представляет собой плоское металлическое основание с отверстиями, через которые поступает воздух, нагнетаемый промышленным вентилятором по системе воздухопроводов. Таким образом создается воздушная подушка между поверхностью стола и дискообразной платформой, на которую устанавливается макет системы управления. Общий вид стенда представлен на рис. 1.



Рисунок 1. Стенд КОСМОС в ИПМ им. М.В. Келдыша

Размер рабочей поверхности стола составляет 198x148 см. Для нагнетания воздуха используется промышленный вентилятор. Он установлен на специальном фундаменте через демпферы для снижения вибрации. Частота вращения вентилятора плавно регулируется с помощью блока управления в диапазоне от 20 до 50 Гц, что позволяет плавно изменять грузоподъемность воздушной подушки на поверхности стола.

Корпус макетов систем управления сделан в форме восьмиугольной призмы высотой 40 см (рис. 2)

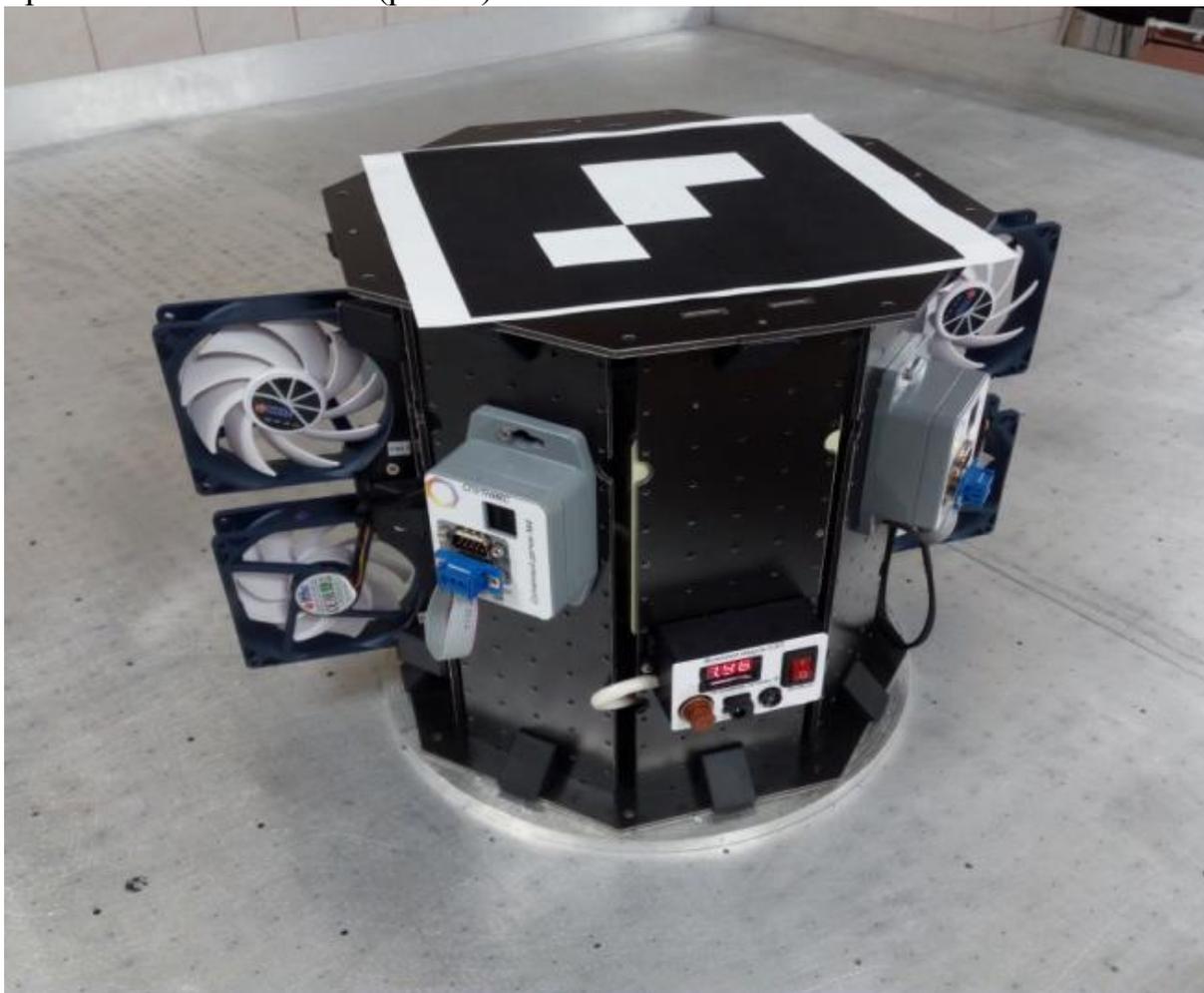


Рисунок 2. Внешний вид макета

Система управления макетами строится на элементной основе конструктора Орбикрафт, разработанной компанией Спутникс. Функциональный макет системы управления содержит:

- бортовой компьютер Raspberry PI B+;
- систему энергоснабжения, включающую в себя аккумулятор и блок управления питанием;
- систему передачи команд на управляющие элементы и сбора телеметрии с датчиков;
- датчики для определения движения: набор солнечных датчиков, магнитометр, датчик угловой скорости, акселерометр;
- управляющие актюаторы: одноосный двигатель-маховик, 4 вентилятора, имитирующих двигатели тяги;
- бортовую веб-камеру, которая может быть использована для определения относительного движения макетов;
- Wi-Fi-канал связи.

На верхней крышке каждого макета закреплена специальная контрастная метка в виде QR-кода. Над столом установлена веб-камера, по обработке снимков которой на стационарном компьютере определяется положение и

ориентация макетов на столе, а также их линейная и угловая скорость. Эти измерения отсылаются по Wi-Fi на бортовой компьютер макетов, и по ним рассчитываются управляющие команды на актюаторы. Эта система может быть использована также как система независимого определения движения макетов. Подробнее про стенд можно найти в [1]. Цель этой работы – предложить альтернативный способ найти координаты и скорость макета без использование внешней камеры, получая и обрабатывая данные о внешней среде непосредственно на борту макета.

Обзор существующих методик решения задачи

Существует несколько альтернативных способов решения этой задачи, реализованных, в том числе на аналогичных стендах в разных городах мира. Рассмотрим некоторые из них.

1) Звездный датчик

В Центре прикладных космических технологий и микрогравитации (ZARM) при Бременском университете (Германия) используется стенд LuVEX[2]. На нём используется звездный датчик (рис.3).

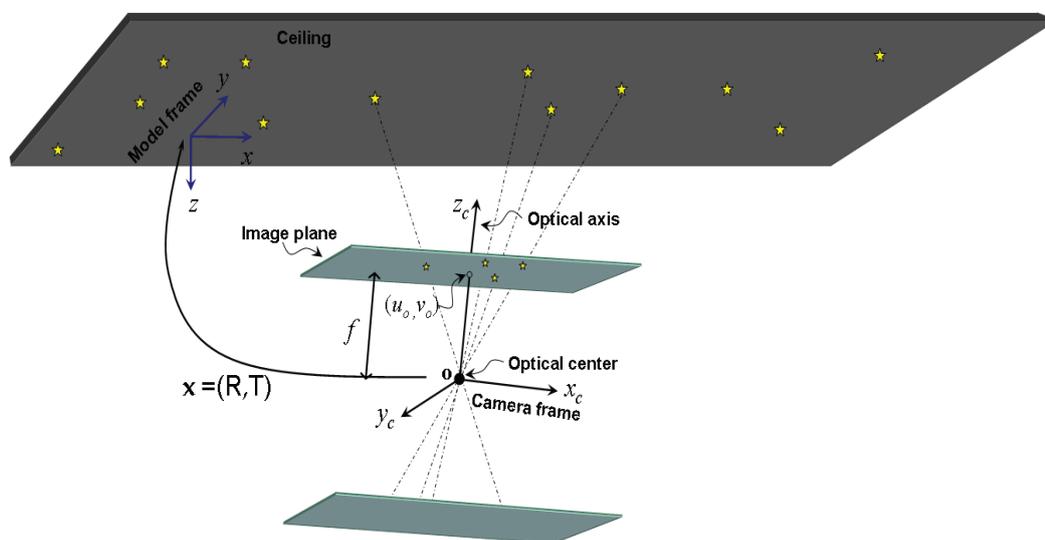


Рисунок 3. Геометрическая иллюстрация задачи звездного датчика.

Phillips VGA CCD сенсор установлен на макете и направлен вертикально вверх, где смонтировано “созвездие” из 140 звезд, координаты которых занесены в каталог (рис. 4).

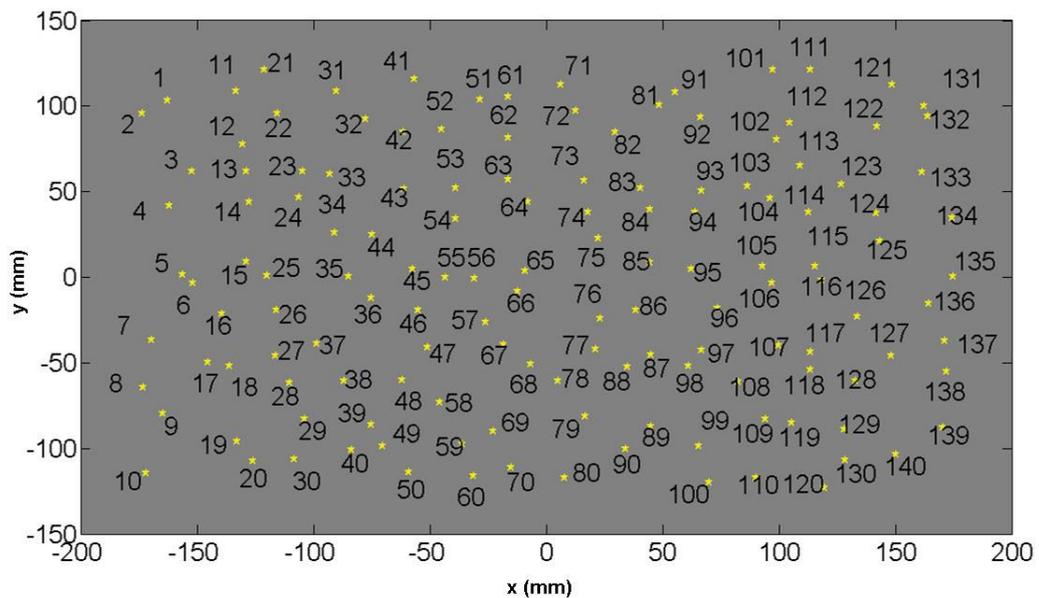


Рисунок 4. Позиции и номера звезд в каталоге

Работа системы состоит из пяти шагов:

1. Калибровка камеры.
2. Получение изображения.
3. Сегментация изображения: картинка преобразуется в двоичный формат, фильтруется, чтобы оставить только яркие точки, после чего вычисляется центроид каждой звезды (рис. 5).
4. Распознавание: берутся три звезды, строится треугольник, и высчитываются углы в нем, которые потом используются в поиске по таблице поиска.
5. Оценка позиции звездного датчика на основе собранной информации.



*Рисунок 5. Сегментирование изображения.
Оригинальное, отфильтрованное, с центроидами*

2) Фотограмметрический метод

Описание метода взято из [3]. Основная идея метода в следующем: по анализу снимка какого-либо центрального тела с известными параметрами, то есть по размерам его освещенной части, вычисляется расстояние до этого тела и угол между направлением на тело и направлением на источник света. (рис. 6)

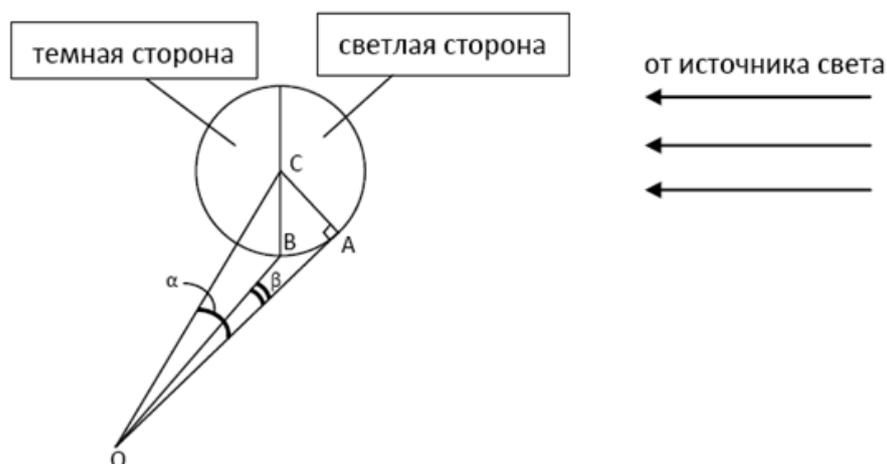
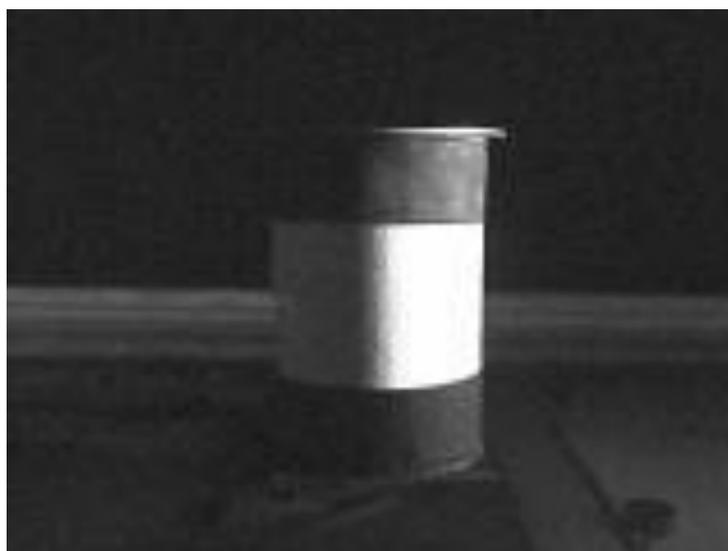


Рисунок 6. Вид сверху на макет и центральное тело

В целях упрощения расчётов и увеличения точности в качестве центрального тела берется цилиндр. (рис.7).



*Рисунок 7. Неподвижное
центральное тело*

По мере движения макета, производимые с периодичностью $t \approx 2$ сек снимки обрабатывались в среде MATLAB. Далее полученные в результате обработки данные о положении и ориентации макета передавались по беспроводному Wi-Fi соединению на бортовой компьютер. На их основе работал алгоритм поддержания заданного типа движения.

4) Триангуляционная система определения координат источника звука

В статье [4] описывается метод определения координат источника звука с помощью микрофонов, закрепленных в точках в известных координатах. Микрофоны регистрируют время прихода звукового импульса от источника и затем с помощью методов оптимизации вычисляются координаты источника. Этот метод послужил основой метода, предложенного в настоящей работе.

Так же достойны упоминания различные методы, основанные на применении лазерных и инфракрасных дальномеров, псевдо-GPS и инерционных датчиков. Их достоинства и недостатки описаны в [1].

Постановка задачи

Цель работы – построение и обоснование способа определения координат геометрического центра макета спутника на столе с использованием внешней среды, а именно – источников звука.

Способ основан на измерении моментов прихода звуковых сигналов от источников, расположенных около стола на микрофон на макете. По разности времен фиксации звука от разных источников определяется положение макета (или макетов) на столе. Дополнительно необходимо учесть возможность потери сигнала или экранирование прямого хода сигнала от одного из источников, приводящее к его получению отраженным от стены.

Постановка задачи

Макет движется по прямоугольному столу с размерами 2×1.5 метра. Максимальная скорость равна 1 м/с . Полагается, что микрофон расположен в геометрическом центре макета. Около стола в точках с известными координатами расположены M источников звука, которые создают «внешнюю среду» для макета. Источники синхронно испускают звуковые импульсы каждый на своей частоте. Эти импульсы улавливаются микрофоном и обрабатываются.

Система координат и математическая модель

В работе используется двухмерная прямоугольная декартова система координат с началом в одном из углов стола и осями, направленными по сторонам стола (рис.8).

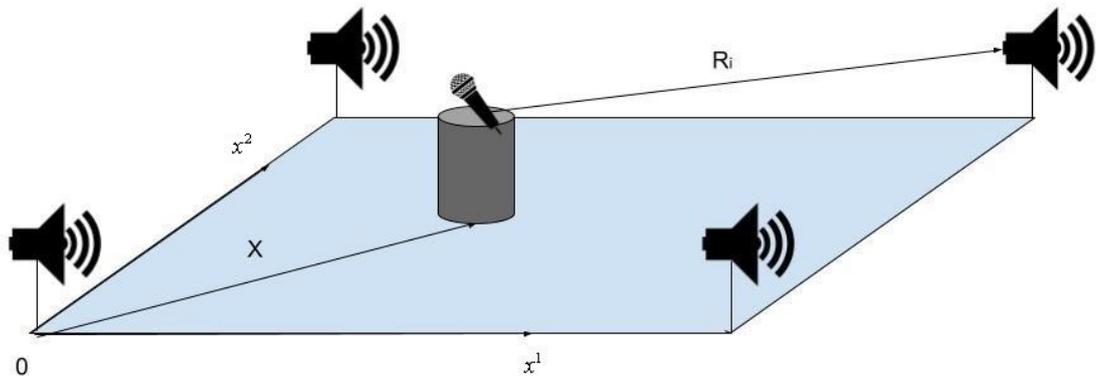


Рисунок 8. Упрощенная схема стэнда

В данной работе рассматривается движение центра масс макета

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{V}, \\ \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{U} + \mathbf{F}_{\text{вн}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{X} – координаты, \mathbf{V} – скорость макета, \mathbf{U} – управляющая сила, $\mathbf{F}_{\text{вн}}$ – внешние силы, действующие на макет.

Обозначим x_i^1, x_i^2 – координаты i -го источника звука. Расстояние между i -м источником звука и микрофоном

$$R_i = \sqrt{(X^1 - x_i^1)^2 + (X^2 - x_i^2)^2} \quad (2)$$

Тогда интервал времени между началом испускания импульса источником звука и приходом его на микрофон $t_i = R_i / c$, где c – скорость звука, за которую в работе принята скорость звука в воздухе при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении в 1 атм равная 343 м/с. А разность этих интервалов для разных источников:

$$t_{ij} = t_i - t_j = \frac{R_i - R_j}{c} \quad (3)$$

Для различения сигналов от разных источников используются разные частоты испускаемых сигналов. Частоту i -го источника обозначим

ν_i . Чтобы различать эти частоты, к оцифрованному сигналу с микрофона применяется дискретное преобразование Фурье(ДПФ)[5]. Обозначим частоту дискретизации микрофона как $\nu_{мик}$. Для ДПФ необходимо несколько измерений, объединенных в «сэмпл», обозначим количество измерений в сэмпле за N . Тогда на получение этого сэмпла необходимо время $T_\delta = N / \nu_{мик}$. За это время звук проходит расстояние $L_\delta = T_\delta \cdot c = \frac{N \cdot c}{\nu_{мик}}$,

что ограничивает снизу точность измерения расстояний до источников.

Формула ДПФ

$$Y_k = \sum_n^{N-1} y_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, k = 0, \dots, N-1,$$

где Y_k – комплексные амплитуды гармоник, присутствующих в полученном сигнале, y_n – измерения микрофона как Из теоремы Котельникова следует, что $\nu_{мик}$ должна быть больше, чем удвоенная максимальная из частот источников. Так же дискретизация частоты гармоники равна $\nu_\delta = 1/T_\delta = \nu_{мик} / N$, что накладывает ограничение на выбор частот динамиков. В работе «мусорными» для сигнала с какой-то частотой гармониками называются побочные гармоники, которые появляются после ДПФ этого сигнала из-за несовершенства аппаратуры или конечности сэмпла.

Методы определения положения по полученному массиву времен регистрации сигналов

В этой главе считается, что массив времён регистрации сигналов получен. В локальном методе используется только одно полученное измерение времен регистрации сигналов, предыдущее положение используется только как стартовая точка для минимизации функционала.

Локальный метод определения координат объекта на стенде

Из (3) следует, что для каждой пары источников должно выполняться равенство

$$R_i - R_j - c \cdot t_{ij} = 0, i = 1, \dots, M - 1, j = i, \dots, M .$$

При $M = 3$ при известных положениях динамиков и t_{ij} положение объектов из системы равенств определяется однозначно, но нет возможности избавиться от сигнала, который очевидно зарегистрирован с ошибкой.

При $M > 3$ координаты микрофона можно искать с помощью оптимизационные методы. Если написать функционал, равный нулю при отсутствии погрешностей и положительный в общем случае, то, решив задачу его минимизации, можно определить координаты макета \mathbf{X} . В качестве такого функционала предлагается взять

$$\Phi = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M (R_i - R_j - c \cdot t_{ij})^2 \quad (4)$$

Необходимо учесть вариант, что сигнал, не сумев дойти до приемника по прямой, в первый раз может дойти, отразившись от стены. Это случиться, например, из-за второго объекта на пути сигнала. Если минимум функционала больше определенного значения, используется следующий алгоритм:

- из вычислений исключается поочередно каждый из источников, путем убирания соответствующих компонент из массива времен прихода сигналов и матрицы положений источника;
- вычисляются М значений функционала (4), используя координаты макета предыдущего шага;
- вычисляются новые координаты, без использования данных от источника, без которого функционал (4) на предыдущих шагах был минимален.

Для минимизации используется функция `fminsearch` из OptimizationToolboxMATLAB, которая основана на методе Нелдера – Мида.

Использование фильтра Калмана

Точность локального метода будет не высока из-за дискретности измерений. Для улучшения точности используется расширенный фильтр Калмана(ФК) [5].

Этап прогноза (интегрирование)

1. Прогноз вектора состояния

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) dt,$$

2. Прогноз матрицы ошибок

$$\mathbf{P}_k^- = \Phi_k \mathbf{P}_{k-1}^+ \Phi_k^T + \mathbf{Q}_k,$$

Этап коррекции (обработка измерения)

1. Вычисление весовой матрицы

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1},$$

2. Коррекция $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ с использованием \mathbf{z}_k

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k [\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-, t)],$$

3. Усечение матрицы ошибок

$$\mathbf{P}_k^+ = [\mathbf{E} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_k^-.$$

Модель движения выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{V}, \\ \mathbf{V} &= \mathbf{U} + \mathbf{w}_k, \end{aligned}$$

где на каждом шаге фильтра $\mathbf{w}_k \in N\left(0, \begin{pmatrix} \sigma_f^2 & 0 \\ 0 & \sigma_f^2 \end{pmatrix}\right)$.

Модель измерений можно задать двумя способами: можно в качестве измерений использовать непосредственно измерения времени прихода сигнала, а найденные, через локальный метод координаты.

*Использование моментов прихода сигнала
в качестве модели измерений*

Вектор измерений возьмем в виде разницы времен прихода сигнала от источника с номером $i = 2, \dots, M$ по сравнению с первым. Размерность этого вектора будет $M - 1$. Модель измерений запишется в виде:

$$z_i = \frac{\sqrt{(X^1 - x_{i+1}^1)^2 + (X^2 - x_{i+1}^2)^2} - \sqrt{(X^1 - x_1^1)^2 + (X^2 - x_1^2)^2}}{c} + w_m^i$$

где на каждом шаге фильтра $w_m \in N\left(0, \begin{pmatrix} \sigma_m^2 & 0 \\ 0 & \sigma_m^2 \end{pmatrix}\right)$

Линеаризация приводит к матрице H

$$H_{i,j} = \frac{(X^j - x_i^j)}{c\sqrt{(X^1 - x_{i+1}^1)^2 + (X^2 - x_{i+1}^2)^2}} - \frac{(X^j - x_1^j)}{c\sqrt{(X^1 - x_1^1)^2 + (X^2 - x_1^2)^2}},$$

где значение матрицы H вычисляется по вектору состояния после этапа прогноза.

$$Q = \begin{pmatrix} \sigma_f^2 & 0 \\ 0 & \sigma_f^2 \end{pmatrix}; R = \begin{pmatrix} (\sigma_m c)^2 & 0 \\ 0 & (\sigma_m c)^2 \end{pmatrix},$$

где σ_f – СКО(среднеквадратичное отклонение) шума движения, σ_m – СКО шума измерений. Начальные условия: $\mathbf{X}(0)$ определяем локальным методом, $\mathbf{V}(0)$ определяется по измерениям координат на первых пяти шагах. ФК запускается с шестого шага. Матрица ошибок $P(0) = I_{4 \times 4}$.

Для валидации измерений считается минимизируется функционал (4) и в случае превышения порогового значения используется алгоритм исключения ошибочного измерения из локального метода.

Использование координат, найденных из минимизации функционала в качестве модели измерений

В таком случае модели измерений выглядит просто:

$$\mathbf{X}_{\text{изм}} = \mathbf{X}_{\text{лок}} + \mathbf{w}_m$$

Но в таком случае тяжело говорить о нормальной распределенной ошибке в модели измерений, нормально распределены только ошибки в измерениях времени прихода сигнала. Но зато можно отсеивать сразу через локальный метод измерения, которые приходят явно с большой ошибкой или не приходят вовсе.

В качестве ковариационных матриц для ФК используются диагональные матрицы с дисперсиями ошибок на диагонали:

$$Q = \begin{pmatrix} \sigma_f^2 & 0 \\ 0 & \sigma_f^2 \end{pmatrix}; R = \begin{pmatrix} \sigma_m^2 & 0 \\ 0 & \sigma_m^2 \end{pmatrix},$$

где σ_f – СКО шума движения, σ_m – СКО.

Начальные условия: $\mathbf{X}(0)$ определяется локальным методом, $\mathbf{V}(0)$ определяется по измерениям координат на первых пяти шагах. ФК запускается с шестого шага. Матрица ошибок $P(0) = I_{4 \times 4}$.

Моделирование эксперимента

Для первичной проверки метода, подбора коэффициентов и оценки ошибок моделируется эксперимент.

Модель эксперимента

В качестве модели эксперимента используется движение одного макета с установленным в геометрическом центре микрофоном. Макет движется под действием управляющей силы и шума, который для каждого шага по времени описывается нормально распределенным случайным вектором и с диагональной ковариационной матрицей.

$$\ddot{\mathbf{X}}_k = \mathbf{F}_k^{\text{упр}} + \mathbf{w}_k, \text{ где } \mathbf{w}_{f \text{ mod}} \in N\left(0, \begin{pmatrix} \sigma_{f \text{ mod}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{f \text{ mod}}^2 \end{pmatrix}\right)$$

На каждом шаге по времени интегрируется вектор $(\mathbf{X}; \mathbf{V})$ методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

В качестве функции управления в работе взята сила притяжения к центру стола, линейная по расстоянию до центра:

$$\mathbf{F} = -k(\mathbf{r} - \mathbf{r}_c)$$

Коэффициент k и начальные условия подбираются так, чтобы движение использовало почти весь стол. В случае касания боковой стенки стола макетом происходит упругое отражение. Для моделирования ошибок определения времени прихода сигнала от каждого из источников использовано наложение шума, который в на каждом шаге интегрирования нормально распределен:

$$t_k^i = R_k^i / c + w_{km \text{ mod}}^i, \text{ где } w_{km \text{ mod}}^i \in N\left(0, (\sigma_{m \text{ mod}} c)^2\right)$$

Для моделирования потери сигнала от какого-либо источника или прихода его отраженным от стенки используется добавление ко времени хода сигнала величины, сравнимой с временем хода сигнала напрямую.

Исследование ошибки локального метода от числа источников и их положения.

В этом разделе построенная выше модель эксперимента используется, чтобы оценить необходимое количество динамиков и предложить их расположение около стенда. Для этого при различных количествах и расположении динамиков к данным из модели эксперимента применяется локальный метод. На дальнейших графиках $\sigma = \sigma_{m\text{mod}}$, PosDev – СКО результата за 3000 шагов. По осям отложено время и ошибка по соответствующей оси. Результаты моделирования эксперимента с четырьмя динамиками, расположенными по углам стола, при двух разных $\sigma_{m\text{mod}}$ приведены на рис. 9

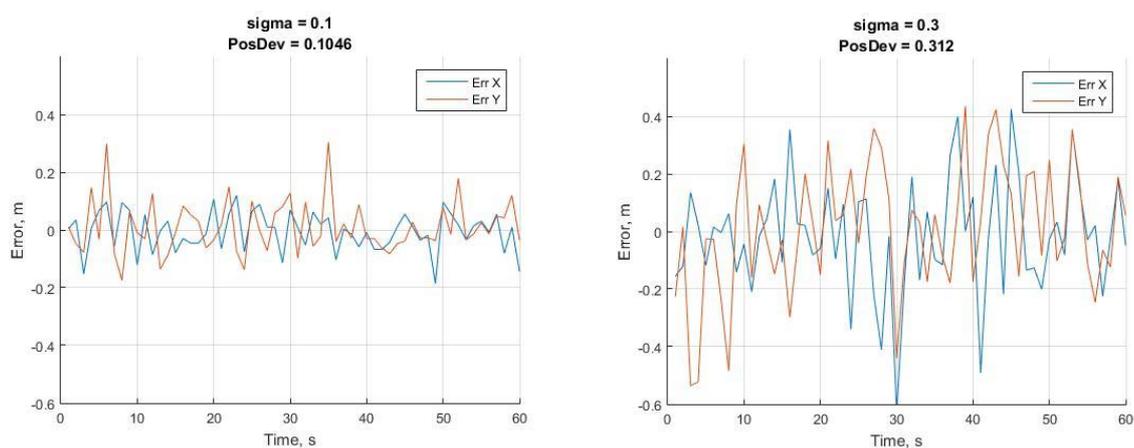


Рисунок 9. Ошибки определения положения при четырех источниках, расположенных по углам стола при $\sigma_{m\text{mod}} = 0.1$ (слева) и $\sigma_{m\text{mod}} = 0.3$ (справа)

Если теперь поставить те же 4 динамика по серединам сторон стола, то ошибка несколько вырастет (рис. 10). Если добавить два динамика и расположить их по углам и серединам длинных сторон, то точность немного улучшится (рис. 11). В случае восьми источников точность будет еще больше (рис 12).

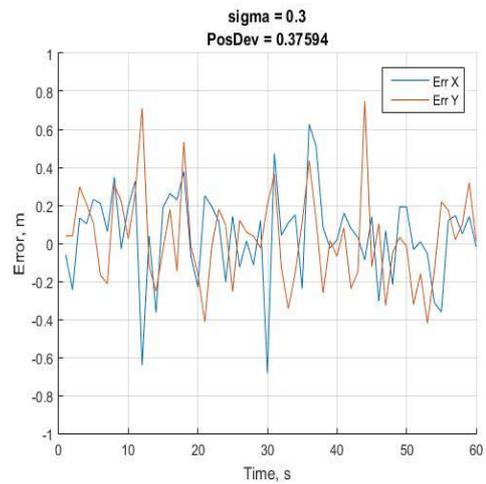
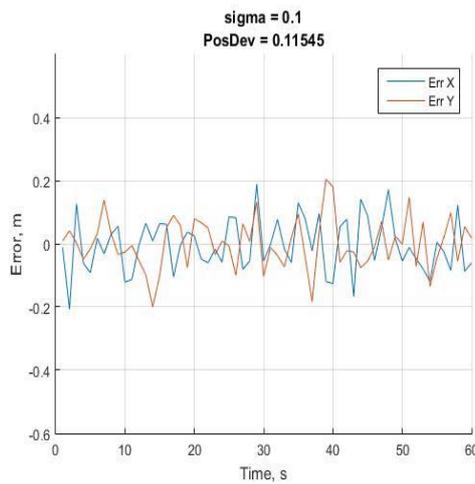


Рисунок 10. Ошибки определения положения при четырех источниках, расположенных серединам сторон при $\sigma_{m\text{mod}} = 0.1$ (слева) и $\sigma_{m\text{mod}} = 0.3$ (справа)

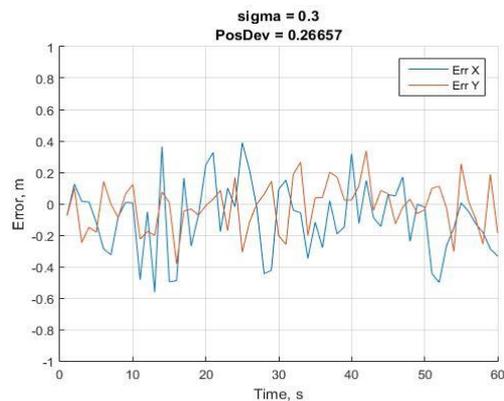
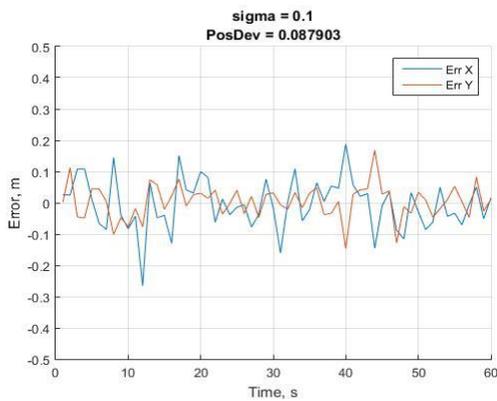


Рисунок 11. Ошибки определения положения при шести источниках, расположенных в углах и на серединах двух длинных сторон при $\sigma_{m\text{mod}} = 0.1$ (слева) и $\sigma_{m\text{mod}} = 0.3$ (справа)

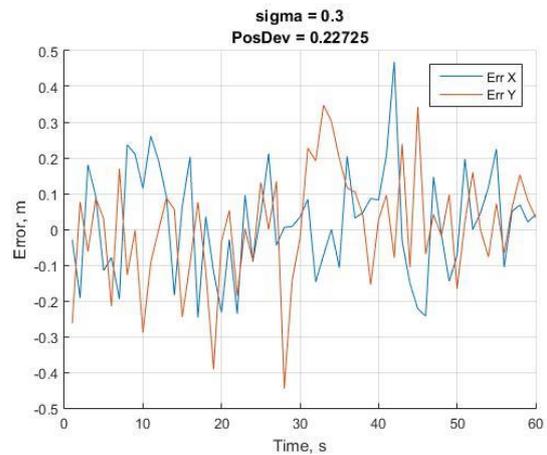
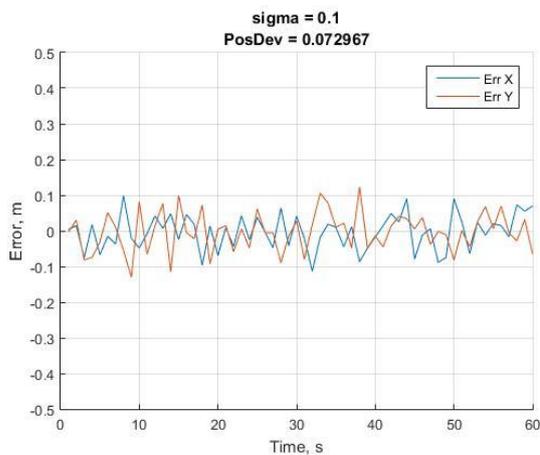


Рисунок 12. Ошибки определения положения при восьми источниках, расположенных по углам и серединам сторон при $\sigma_{m\text{mod}} = 0.1$ (слева) и $\sigma_{m\text{mod}} = 0.3$ (справа)

Как и ожидалось, с увеличением количества источников точность возрастает, но не настолько, чтобы оправдать сильно возрастающую сложность регистрации моментов прихода сигналов на микрофон. Использование четырех динамиков, расположенных недалеко от углов стола выглядит наилучшим вариантом.

Исследование точности после использования фильтра Калмана

В этом разделе подбираются параметры для ФК и оценивается рациональность его использования. Данные с модели эксперимента поступают в зависимости от выбранной модели измерений: или сначала на локальный метод, а потом в ФК (рис. 13), или сразу в ФК (рис. 14). Используемые обозначения: $\text{sigmadel} = \sigma_{m\text{mod}}$, $\text{sigmaF} = \sigma_{f\text{mod}}$.

Как видно из графиков обе модели измерений дают примерно одинаковый результат и в два раза лучше, чем локальный метод без фильтрации. Это же подтверждается моделирование на более продолжительном отрезке времени. По итогам выборки из 100 000 шагов результат для ФК с моделью измерений по времени прихода среднеквадратичное отклонение оценки от координаты оказалось 0,1 для $\sigma_{m\text{mod}} = 0,2$ и 0,17 для $\sigma_{m\text{mod}} = 0,4$. Для ФК с моделью измерений по координатам, полученным минимизацией функционала 0,09 и 0,17 соответственно. Видно, что результаты примерно в 2 раза лучше, чем без фильтрации и почти одинаковы для обоих фильтров. Выбор конкретной модели измерений — дело вкуса исполнителя, стоит заметить, однако, что в случае использования непосредственно массива времен приходов сигналов всё равно стоит отсеивать отраженные сигналы по алгоритму из локального метода.

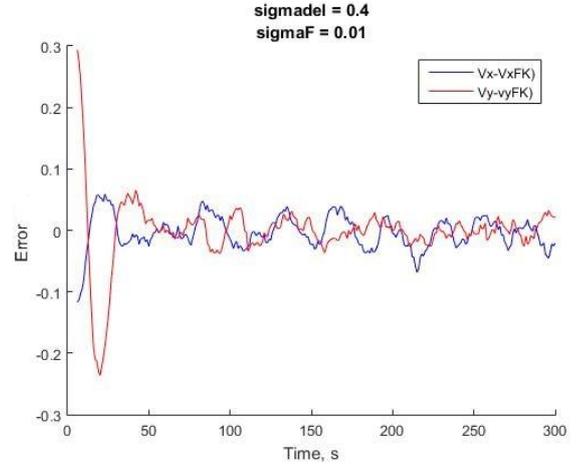
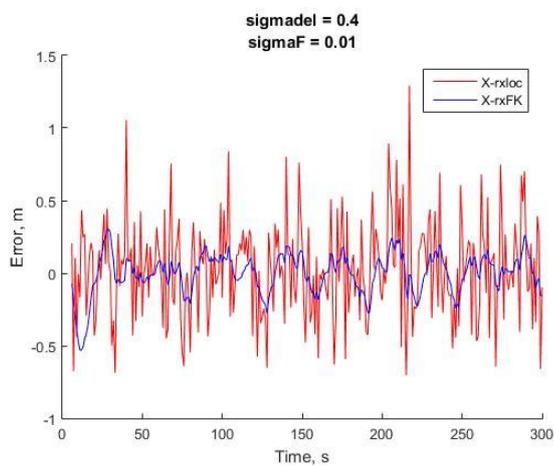
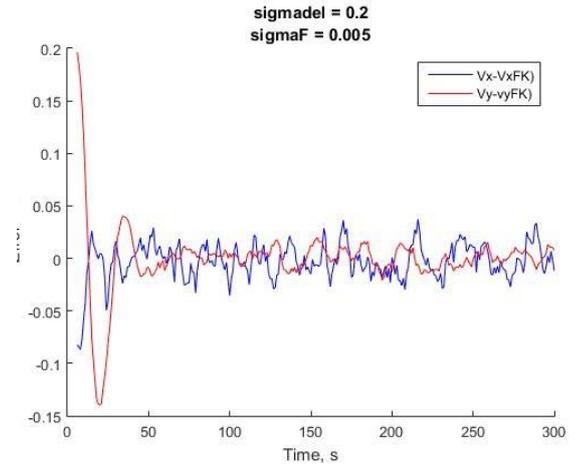
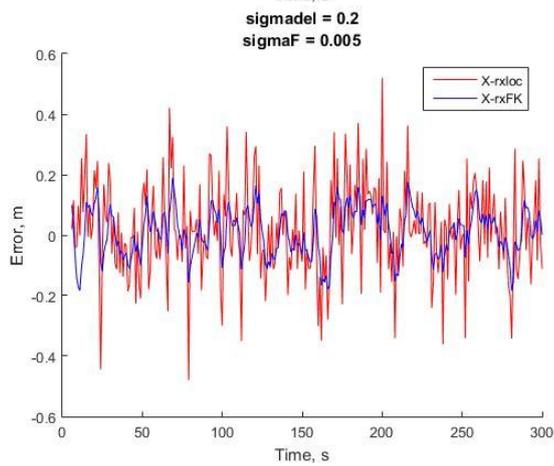
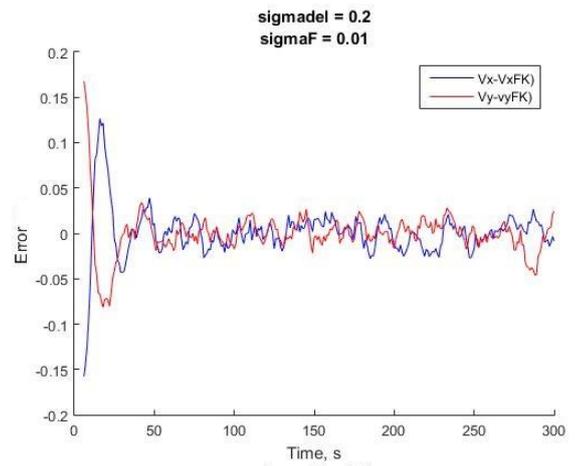
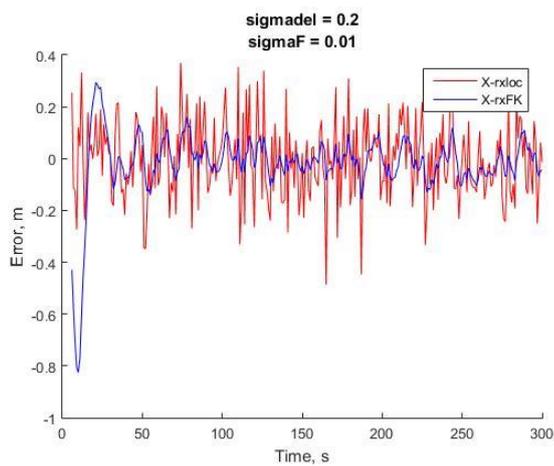


Рисунок 13. Результаты моделирования эксперимента с координатами, полученными локальным методом в качестве модели измерений. Ошибки относительно модельных положения(слева) и скорости макета(справа).

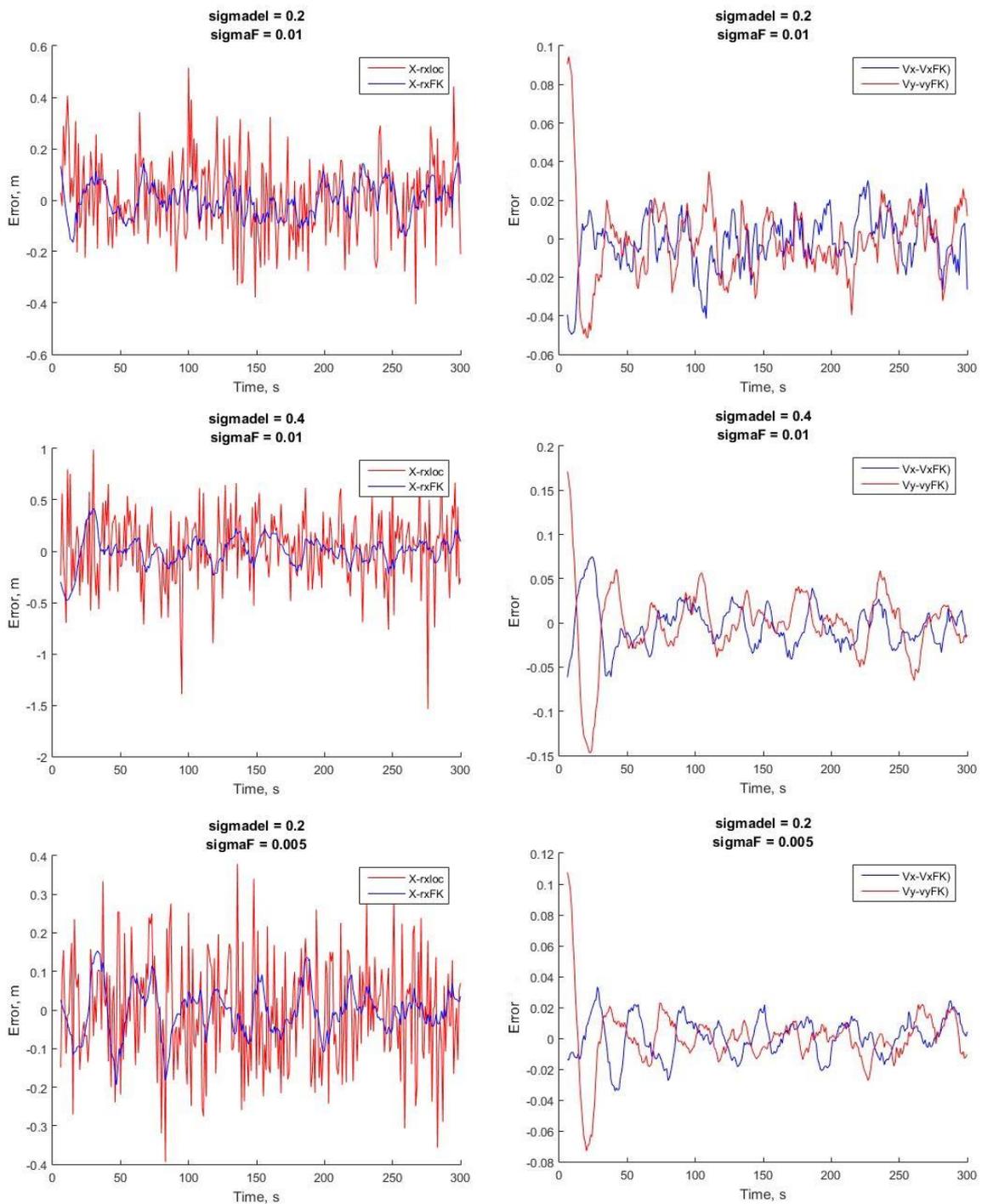


Рисунок 14. Результаты моделирования эксперимента с массивом времен регистрации сигналов в качестве модели измерений. Ошибки относительно модельных положения(слева) и скорости макета(справа)

Подготовка и проведение эксперимента

В предыдущих главах массив времён регистрации сигналов считался известным. В этой главе изучается процесс получения этого массива на практике, подбирается оборудование создающее внешнюю среду и параметры алгоритмов, используемых при получении этого массива.

Обработка сигналов

Для того, чтобы получить массив времён регистрации сигналов от разных источников используется следующая последовательность действий:

- 1) Колебания воздушной среды улавливаются микрофоном, оцифровываются с частотой дискретизации 44.1 кГц и поступают на вход программы-обработчика.
- 2) Обработчик разбивает сигнал на сэмплы (небольшие оцифрованные звуковые фрагменты), количество точек в которых подбирается отдельно.
- 3) Каждый сэмпл подается на вход дискретного преобразования Фурье(ДПФ), на выходе которого получается амплитуда сигналов разных гармоник в этом сэмпле и передается алгоритму обнаружения прихода сигнала интересующих нас частот.
- 4) После того, как время прихода сигналов со всех динамиков зафиксировано или с момента прихода сигнала первой частоты прошло времени больше, чем необходимо для получения сигнала напрямую из дальней точки стола, массив передается на алгоритм определения положения макета на столе.

Выбор размера сэмпла производится исходя из следующих соображений:

При частоте дискретизации 44.1 кГц (стандартная частота для простого микрофона) длина каждого измерения составляет

$$t_{\delta} = 1/44100 \approx 2,27 \cdot 10^{-5} \text{ с}$$

А расстояние, которое за это время проходит звук:

$$l_{\delta} = t_{\delta} \cdot c = 2,27 \cdot 10^{-5} \cdot 343 \approx 0,78 \text{ см}$$

Т.е. при длине сэмпла в N погрешность измерений расстояния будет порядка

$$L_{\delta} = 0,78 \cdot N \text{ см.}$$

С другой стороны, количество гармоник на выходе ДПФ равно N , что при нашей частоте дискретизации соответствует разнице между соседними гармониками

$$\nu_{\delta} = 44,1 / N \text{ кГц.}$$

При этом чем меньше N тем больше влияние «мусорных» гармоник из-за конечности интервала времени на входе ДПФ.

В результате пробных экспериментов для текущего оборудования принято решение взять $N = 30$. Тогда $L_{\delta} \approx 23,3$ см, $\nu_{\delta} = 1,47$ кГц.

Анализ звука в лаборатории

На стенде КОСМОС используется промышленный вентилятор, который создает много шума в звуковом диапазоне. Цель этого раздела — изучить этот шум с целью не выбирать частоты динамиков, которые будут им глушиться. При вентиляторе, работающем на разных частотах, в разных над столом был записан звук. Этот звук потом был разложен с помощью ДПФ на гармоники и получилась следующая картина (рис.15). Из неё следует, что основной шум локализован в области до 2 кГц. Таким образом выбрав частоты динамика так, чтобы минимальная частота не попадала в одну точку спектра с частотами до 2кГц можно попробовать избежать проблем с шумом оборудования стэнда.

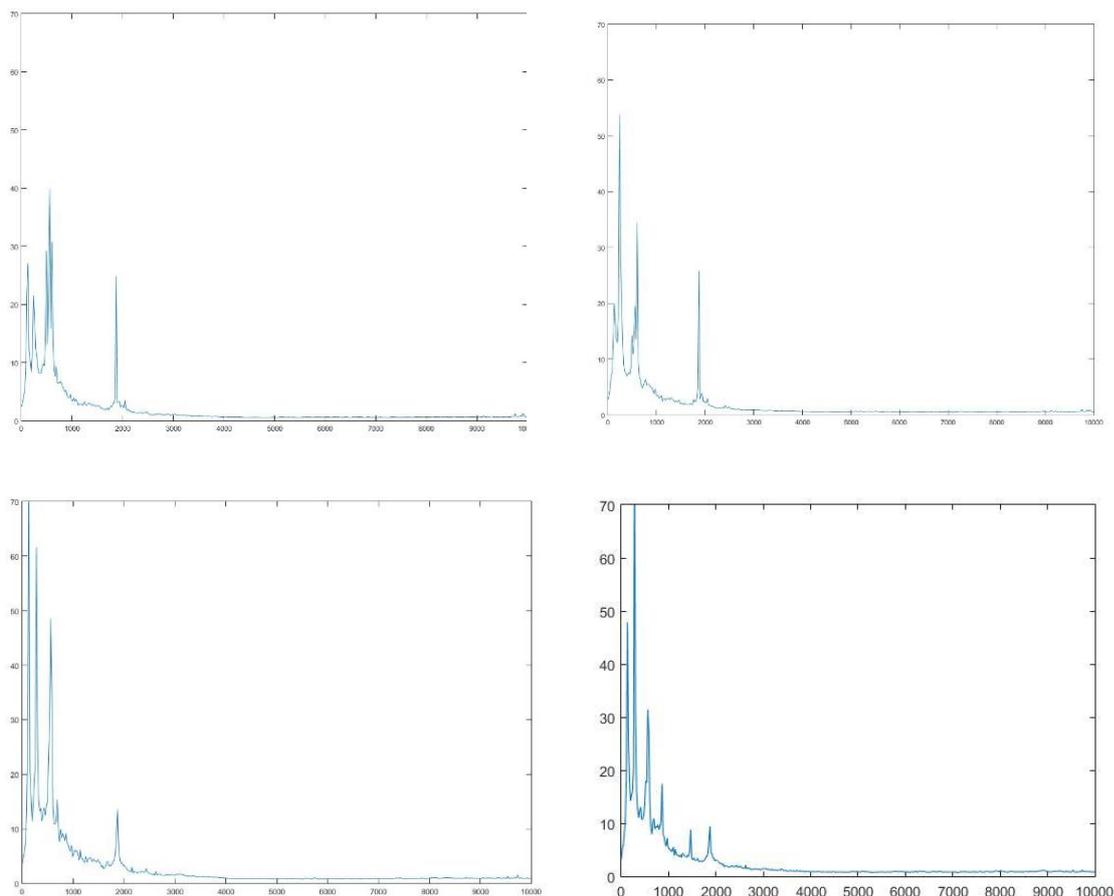


Рисунок 15. Результаты ДПФ для звука, записанного в лаборатории при работающем на разных частотах вентиляторе. По осям отложены частоты и амплитуды гармоник

Р

Создание «внешней среды»

Выбор частот сигналов

Для эксперимента с двумя источниками используются синусоидальные сигналы с частотами $\nu_{low} = 4.41$ кГц и $\nu_{high} = 10.288$ кГц. Они достаточно далеко друг от друга, чтобы «мусорные» гармоники не сильно влияли, и совпадают с точками на выходе ДПФ для длины сэмпла 30.

Подбор оборудования для создания «внешней среды»

Для начала эксперимент был проведен с помощью аудио карты компьютера и компьютерных колонок (рис. 16). Результаты показали, что

не получается добиться достаточного уровня синхронности начала генерации сигнала.

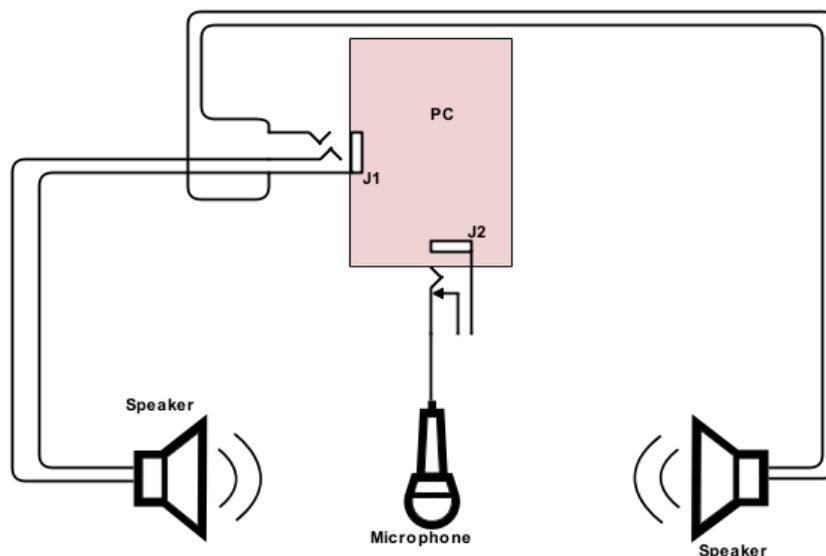


Рисунок 16. Упрощенная схема эксперимента с персональным компьютером в качестве генератора сигнала.

В качестве альтернативы выбрана плата STM32F4-Discovery [9]. Благодаря низкому уровню программирования на плате, можно ожидать, что синхронность будет лучше. С помощью этой платы сигнал можно генерировать как минимум тремя способами:

С помощью встроенного аудио-ЦАП CS43L22 можно сгенерировать две частоты

С помощью ШИМ с дальнейшей подачей сигнала на внешний усилитель

С помощью ЦАП с дальнейшей подачей сигнала на внешний усилитель

После проведения тестовых экспериментов предпочтение было отдано ЦАП. Полученный с его помощью синусоидальный сигнал гораздо ближе к теоретической синусоиде, чем сигнал от ШИМ.

Источники звука и усилители выбирались исходя из того, что они должны хорошо воспроизводить звук в рассматриваемом диапазоне частот (от 2 до 20 кГц), при этом подходить по напряжению и сопротивлению под

параметры платы и друг друга. В результате эксперименты проводились с динамиками 28KC08-1 и с двумя наименованиями усилителей: SAS0048 и SAS0022 (рис 17).

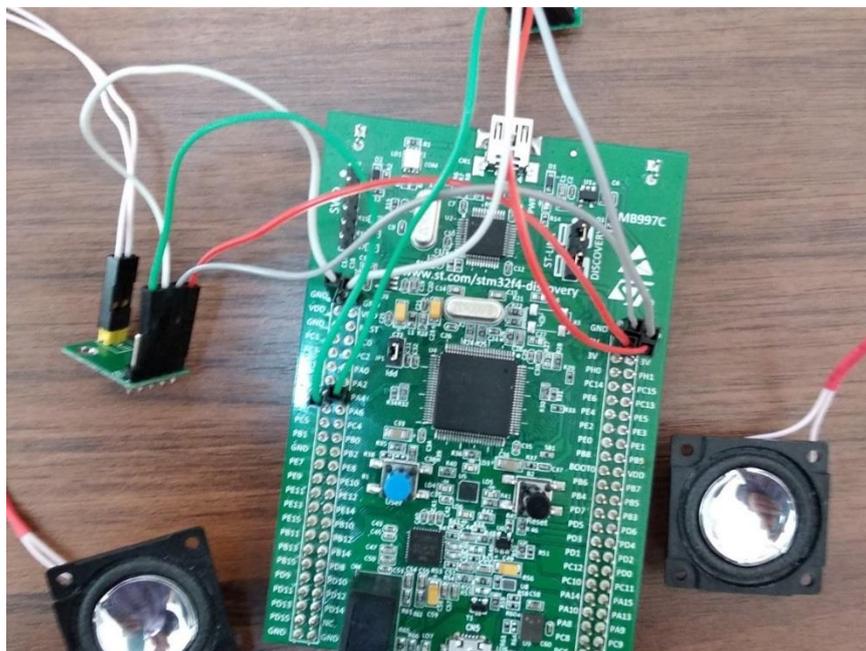


Рисунок 17. Плата, усилитель SAS0048 и динамики

На выходе усилителей SAS0048, не удалось получить синусоидальный сигнал. Возможно сказывались микроскопические колебания с частотой обновления ЦАП в 1 МГц. В результате амплитуда «мусорных» гармоник ДПФ одной из частот была слишком большой и часто перекрывала амплитуду основной гармоники второй частоты. С помощью усилителей SAS0022 и внешнего источника питания (рис.18) удалось получить почти идеальный синусоидальный сигнал, подаваемый на динамики (рис19). Амплитуда в 6 вольт позволяет отчетливо слышать писк динамиков.

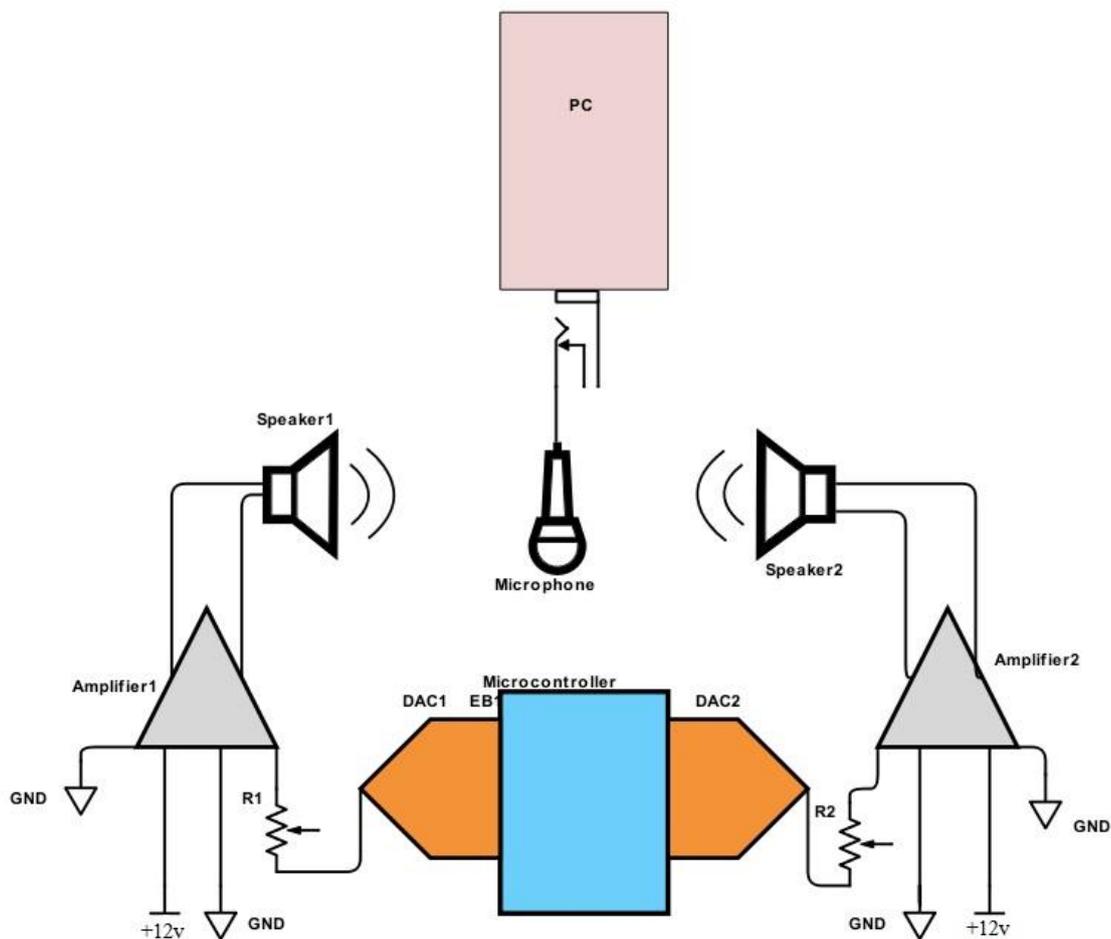


Рисунок 18. Упрощенная схема эксперимента при использовании платы STM32F4-Discovery

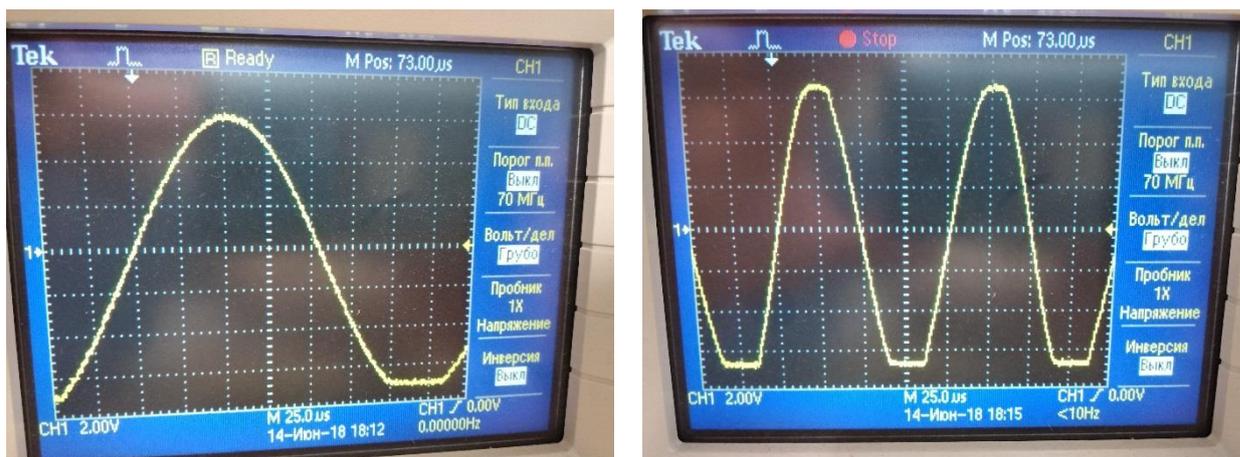


Рисунок 19. Сигнал на выходе усилителей SAS0022 частотами 4,41 кГц(слева) и 10.228 кГц(справа).

Эксперименты с двумя динамиками

Из-за конечности семпла на входе ДПФ а так же неидеальности динамиков спектр звука любого из динамиков будет иметь «мусорные» гармоники. Чтобы подобрать пороговые значения регистрации сигналов различных частот нужно сначала оценить эти гармоники по отдельности, а потом провести эксперимент с двумя динамиками, работающими одновременно.

Определение амплитуды гармоники сигнала одной частоты при ДПФ сигнала динамика другой частоты

Для того, чтобы настроить алгоритмы определения времени регистрации сигнала одной частоты, нужно знать какой вклад в эту гармонику будет давать сигнал другой частоты. Для этого включив только один динамик измеряются амплитуды обеих гармоник ДПФ при положении микрофона на различных расстояниях от динамика. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты ДПФ в зависимости от частоты сигнала и дистанции от динамика до микрофона

Дистанция, см	Динамик ν_{low}		Динамик ν_{high}	
	A_{low}	A_{high}	A_{low}	A_{high}
30	19	0.7	2	2
60	18	0.5	1.2	2
90	15	0.3	0.7	4
120	13	0.35	0.6	2.5
150	16	0.45	0.4	2.5
180	15	0.15	0.4	1.2

Результаты с одной стороны обнадеживающие, с другой видно, что амплитуды зависят от расстояния не монотонно, возможно, что влияет то, что микрофон не точечный и то, что сигнал может отразиться от плоскости стола, на котором проводился эксперимент. Это может привести к проблемам при подборке значений для регистрации сигнала. Так же можно отметить, что амплитуда «мусорной» гармоника часто значимая только на первом сэмпле(рис.20), это может быть следствием того, что сигнал приходит где-то в середине сэмпла. По результатам эксперимента выбраны пороговые значения регистрации сигнала в $Threshold_{low} = 3, Threshold_{high} = 1$. В дальнейшем, однако, их придется скорректировать

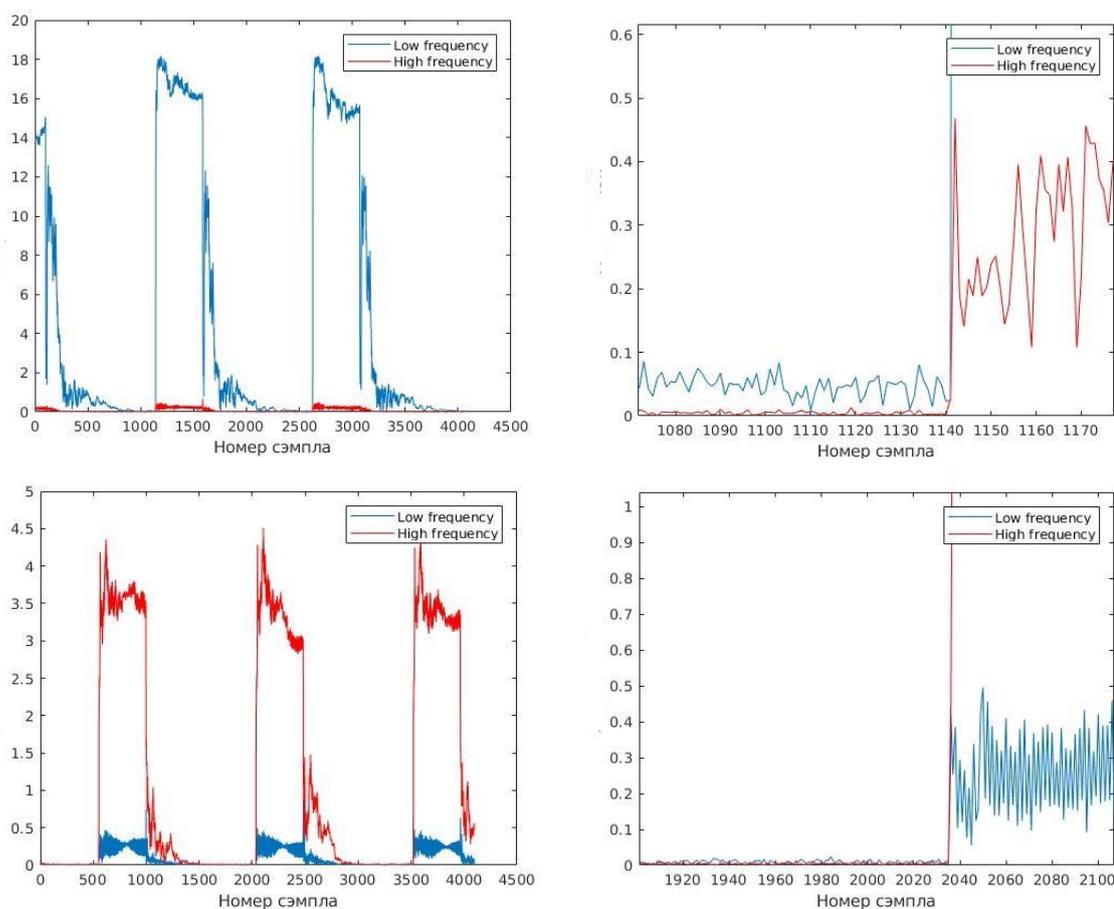


Рисунок 20. Амплитуды гармоник ДПФ при использовании динамика низкой частоты (сверху) и высокой частоты(снизу) на расстоянии 150 см от микрофона

Эксперимент по определению координаты микрофона, расположенного между двумя динамиками.

Для проверки пороговых значений, найденных в предыдущем пункте в частности и метода в целом проводится эксперимент, в котором определяется положение микрофона, расположенного между двумя динамиками на прямой. Для измерения истинного положения микрофона относительно динамиков используется измерительная линейка. Для удобства микрофон закреплен на макете(рис.21).

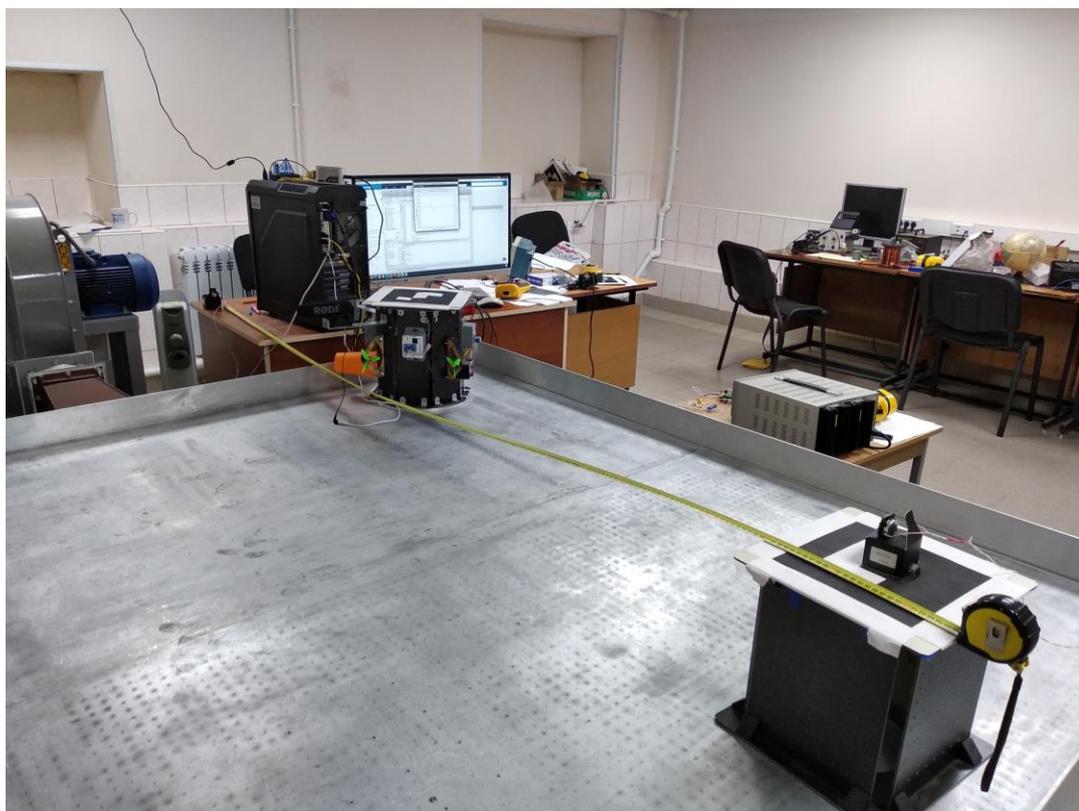


Рисунок 21. Расположение динамиков и макета с микрофоном

Макет движется вдоль линейки и в эксперименте определяется его единственная координата без фильтрации. При использовании уровней регистрации сигнала из предыдущего пункта результаты получились хуже, чем ожидалось. Анализ результатов ДПФ показал, что при включении обоих динамиков одновременно картина на выходе ДПФ другая, нежели в предыдущем параграфе. Что конкретно является причиной, на данный момент не установлено, скорее всего микрофон подстраивается под

уровень шума и уменьшает громкость. После первых корректировок пороговых значений получился следующий результат (рис 22), который выдается в виде разницы расстояний от микрофона до динамиков: Dhigh – расстояние до динамика высокой частоты, Dlow – низкой.

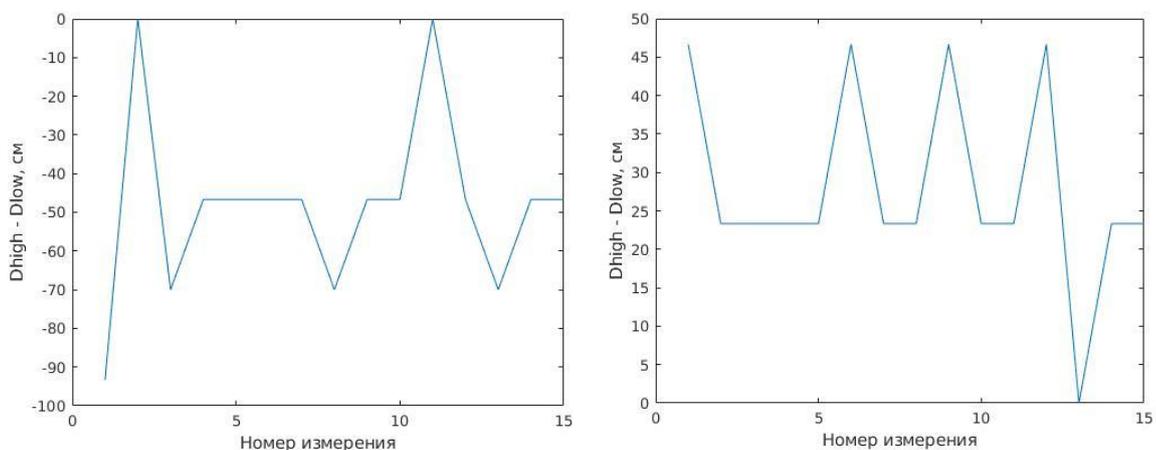


Рисунок 22. Определенные алгоритмом координаты. Точный результат -48 слева и 28 справа

Видно, что проскакивают нулевые координаты, которые получаются в результате того, что оба пороговых значения превышены по приходу первого сигнала. После дальнейшей корректировки картина стала заметно лучше (рис 21)

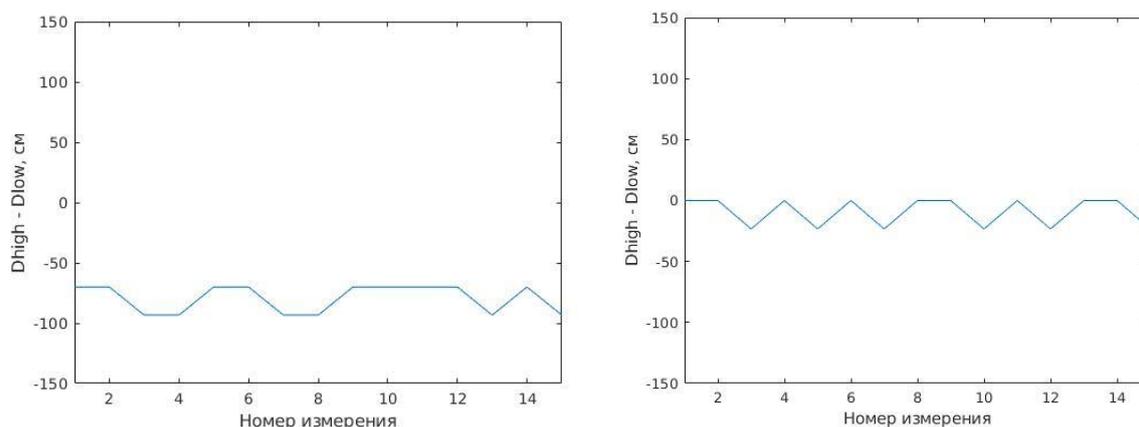


Рисунок 23. Определенные алгоритмом координаты. Точный результат: -65 слева и -5 справа

В случае движения макета между динамиками результаты получаются с ошибкой не больше L_0 , за исключением случаев, когда макет находится слишком близко к одному из динамиков (рис 24).

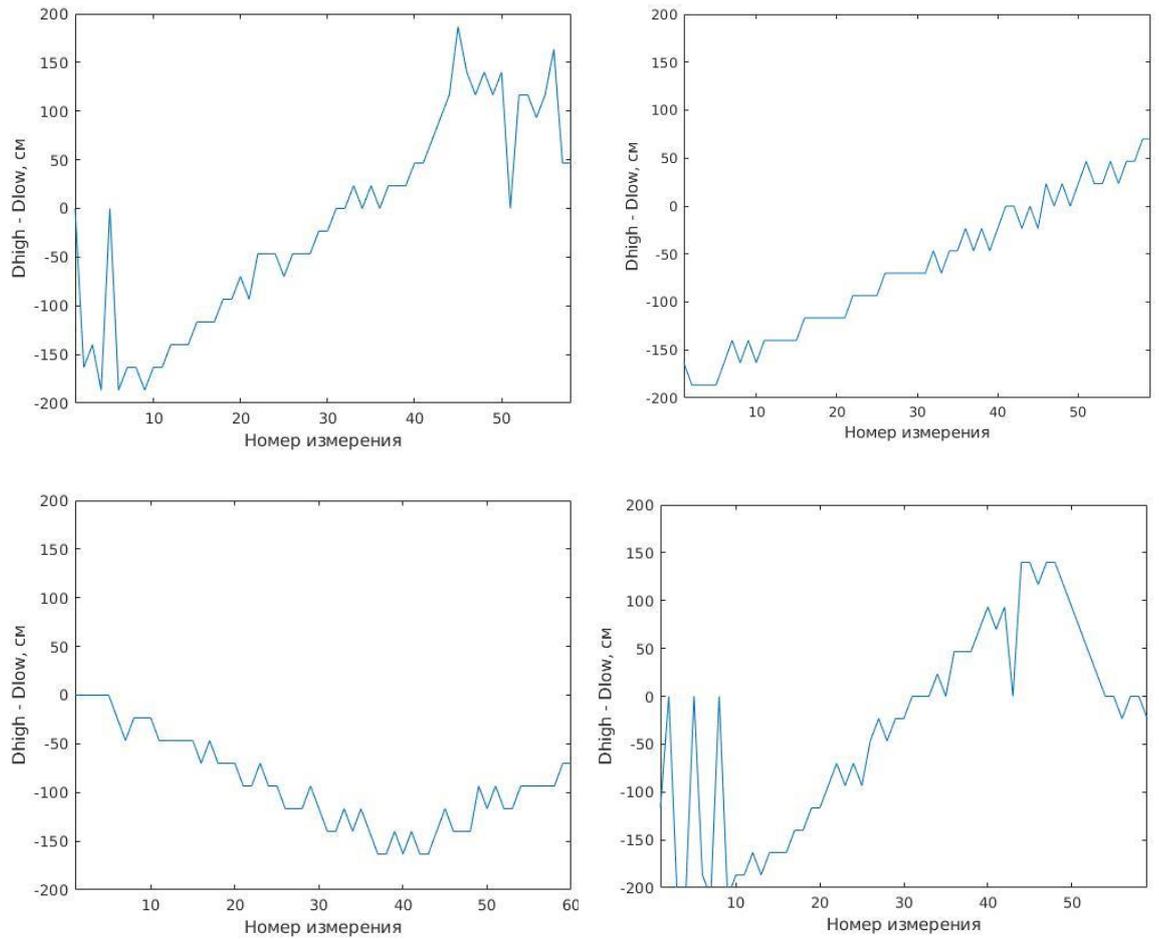


Рисунок 24. Определенные алгоритмом координаты при движении макета между динамиками. Видны ошибочные нулевые измерения при приближении к динамикам.

К сожалению, при таком размере сэмпла шум от вентиляторов после ДПФ дает слишком большие амплитуды фиксируемых гармоник, решением может стать переход на ультразвук, и/или микрофон с большей частотой дискретизации.

Заключение

В данной работе представлен алгоритм определения положения макета на плоскости стола с помощью звуковых импульсов, испускаемых динамиками, расположенными в известных координатах, и улавливаемых микрофоном, расположенным на макете. В теории всё выглядит довольно просто: звуковые импульсы одновременно излучаются динамиками, улавливаются микрофоном и, базирясь на времени прихода на микрофон и координатах динамиков, минимизируется функционал ошибки. При реализации, однако, выявилось много проблем, некоторые из которых тяжело было предсказать до начала работы. Но тем не менее эксперимент, пусть и всего с двумя динамиками, показал, что координаты таким способом можно определять с точностью, которая ограничена временем сбора данных на микрофоне для формирования сэмпла на вход дискретному преобразованию Фурье. При переходе в ультразвуковой диапазон и при использовании микрофона с большей частотой дискретизации точность можно будет улучшить, сократив это время.

Список литературы

- 1) Иванов Д. С., Овчинников М.Ю., Ткачев С.С. Стенд КОСМОС для моделирования движения макетов системы управления микроспутников и обзор мировых аналогов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 138. 32 с.
- 2) Gilberto Arantes Junior “Rendezvous with a non-cooperating target”. Университет Бремена, 2011.
- 3) Иванов Д.С., Овчинников М.Ю., Трофимов С.П. Применение фотограмметрического метода в задаче автономного определения относительного движения группы макетов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 5»
- 4) А.В. Львов, М.Н. Агапов, А.И.Тищенко. Триангуляционная система определения координат источником звука. Ползуновский вестник №2 2010 – с.159
- 5) Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — 2-е. — СПб: Питер, 2006
- 6) Иванов Д.С., Трофимов С.П., Ширококов М.Г. Учебное пособие «Численные методы в механике космического полета. Численное моделирование орбитального и углового движения космических аппаратов»
- 7) А.К.Платонов, Д.С.Иванов. Методы обработки измерений: учеб. пособие — М.: МФТИ. 2013.
- 8) А.А. Дегтярев, Ш. Тайль «Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана» Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша. 2003
- 9) STM32F407 Reference manual, www.st.com