

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Национальный исследовательский университет**

**Лупов С.Ю., Муякшин С.И.**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ  
ОТРАЖАЮЩЕГО ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ЕГО АКТИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета  
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки  
03.03.03 «Радиофизика», 02.03.02 «Фундаментальная информатика и  
информационные технологии» и специальности 10.05.02  
«Информационная безопасность телекоммуникационных систем»

Нижний Новгород  
2015

УДК 621.317  
ББК 3 842  
Л-82

Л-82 Лупов С.Ю., Муякшин С.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОТРАЖАЮЩЕГО ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЕГО АКТИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 21 с.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор О.А. Морозов

Практикум содержит методические указания, которые поясняют принципы активного зондирования движущихся объектов. Представлены описания лабораторной установки и программного обеспечения. Демонстрируются типичные этапы обработки сигнала: оцифровка, предварительная цифровая полосовая фильтрация, квадратурное преобразование и децимация. Приведены примеры оценки параметров движущегося объекта.

Практикум предназначен для студентов радиофизического факультета ННГУ при изучении дисциплины «Дистанционные методы зондирования объектов окружающей среды» по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика», дисциплины «Цифровая обработка сигналов» по направлению подготовки 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии» и по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

Ответственные за выпуск:  
председатель методической комиссии радиофизического факультета ННГУ,  
к.ф.-м.н., доцент **Н.Д. Миловский**,  
зам. председателя методической комиссии радиофизического факультета  
ННГУ, д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 621.317  
ББК 3 842

© Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского, 2015

## Введение

В настоящее время электромагнитные и акустические волны имеют широчайшее применение для передачи информации (радиосвязь в атмосфере и космическом пространстве, подводная связь и телеметрия); определения местоположения подвижных объектов (наземные навигационные системы, системы спутниковой навигации, системы позиционирования плавучих буровых установок и подводных аппаратов) и для дистанционного зондирования различных объектов искусственного и природного происхождения («классическая» активная радиолокация воздушных и космических объектов, метеорадиолокация, активная акустическая локация морского дна, исследование газодинамических процессов). Во всех системах такого типа амплитуда и фаза излученного сигнала при его распространении и взаимодействии с объектами претерпевают изменения. Например, в системах связи и навигации движение передатчика и/или приемника приводят к смещению несущей частоты из-за эффекта Доплера [1], а отражения сигнала от местных предметов к флуктуациям амплитуды. Эти эффекты могут искажать передаваемую информацию, т.е. играть негативную роль. Наоборот, в системах дистанционного зондирования [1-4] они используются для получения информации о движении объекта и его отражательных характеристиках. В любом случае, при анализе работы таких систем и выборе методов обработки принятых сигналов нужно хорошо представлять себе описанные процессы.

Данный практикум на простом физическом примере знакомит с интерференционными эффектами, которые возникают при попадании в приемник прямого сигнала и сигнала, отраженного от неподвижного или движущегося (колеблющегося) объекта. В нем также демонстрируются типичные этапы обработки сигнала: оцифровка, предварительная цифровая полосовая фильтрация, квадратурное преобразование и децимация [5, 6]. Используются элементы графического языка программирования LabVIEW [7].

Практикум содержит методические указания к лабораторной работе и предназначен для студентов радиофизического факультета при изучении дисциплин «Дистанционные методы зондирования объектов окружающей среды» по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика», «Цифровая обработка сигналов» по направлению подготовки 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии» и по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

## 1. Активное акустическое зондирование

По отношению к исследуемым объектам дистанционные методы зондирования подразделяются на пассивные, т.е. осуществляющие только приём электромагнитного или акустического поля, и на активные, осуществляющие как излучение электромагнитного или акустического поля с заданными характеристиками (формой, амплитудой и фазой, так и приём отражённого от исследуемого объекта сигнала с характеристиками, в которых заложена физическая информация об объекте. В первом случае физическая информация об исследуемом объекте заключена в интенсивности принимаемого сигнала и в его спектральных характеристиках. Во втором она заложена как в амплитуде и форме отражённого сигнала, так и в его фазовых искажениях.

Рассмотрим процесс дистанционного измерения скорости объекта с помощью активного акустического зондирования на примерах. Исследуемый объект будем непрерывно зондировать звуковой волной, а отраженный сигнал будем регистрировать с помощью микрофона, как схематично представлено на рис. 1.

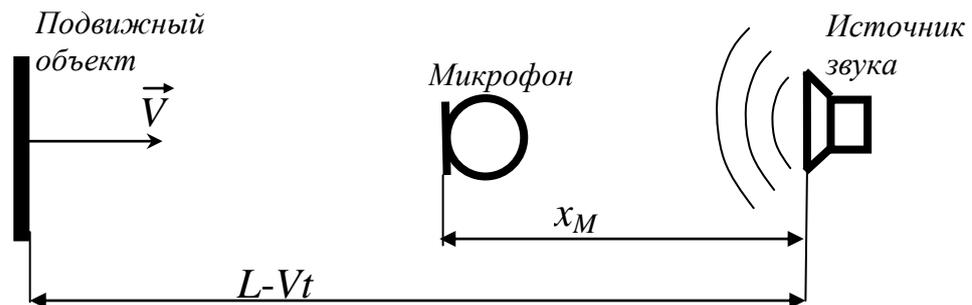


Рис. 1. Схематическое изображение процесса активного акустического зондирования

### Пример 1. Объект неподвижен

Рассмотрим сначала пример, когда объект, отражающий звуковые волны неподвижен ( $V=0$ ) и располагается на расстоянии  $L$  от источника звука (рис. 1). В этом случае микрофон, расположенный между источником звука и неподвижным объектом на расстоянии  $x_M$  от источника звука, будет регистрировать сумму двух звуковых волн с одинаковыми частотами: одна излучается источником звука, другая отражается от неподвижного тела:

$$s(t) = A_{ИСТ} \cdot \cos(2\pi f_0 t - kx_M + \varphi_0) + A_{ОТР} \cdot \cos(2\pi f_0 t - k(2L - x_M) + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $f_0$  – частота гармонического сигнала, излучаемого источником звука,  $\varphi_0 = \text{const}$  – начальная фаза сигнала,  $A_{ИСТ}$  – постоянный коэффициент, зависящий от многих факторов, таких как интенсивность звуковых колебаний и расстояние от микрофона до источника звука,  $A_{ОТР}$  – коэффициент, зависящий не только от интенсивности звуковых колебаний, но и расстояния от микрофона до предмета  $x_M$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число.

Выражение (1) легко преобразовать к виду:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_0 t + \psi),$$

где

$$A = \sqrt{A_{ИСТ}^2 + A_{ОТР}^2 + 2A_{ИСТ}A_{ОТР} \cos(2k(L - x_M))} = const,$$

$$\psi = \varphi_0 - kx_M - \text{Arctg} \frac{A_{ИСТ} + A_{ОТР} \cos(2k(L - x_M))}{A_{ОТР} \sin(2k(L - x_M))} = const.$$

Это означает, что микрофон регистрирует гармонический сигнал с частотой, равной частоте звуковой волны, излучаемой источником звука, но смещенной по фазе. Сигнал, приведенный на осциллограмме, содержит только одну синусоиду (рис. 2).

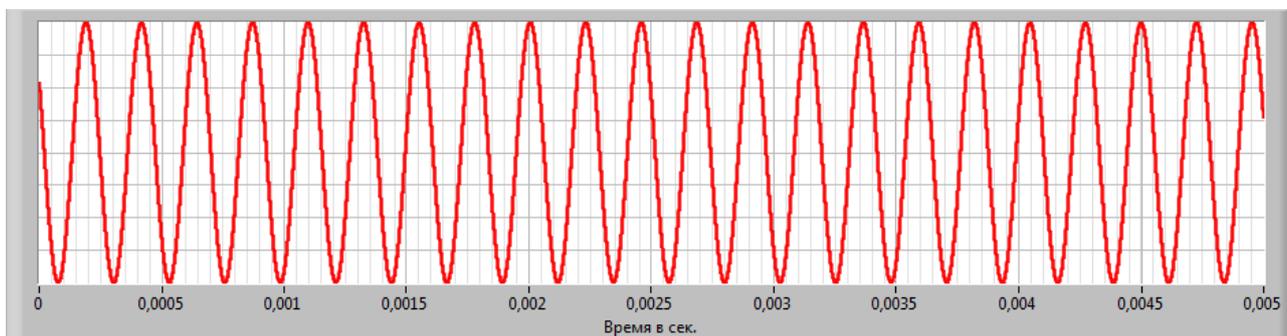


Рис. 2. Осциллограмма, соответствующая сигналу, полученному при регистрации звуковых волн (объект неподвижен)

### Пример 2. Объект движется с постоянной скоростью

Рассмотрим пример, когда объект, отражающий звуковую волну, движется с постоянной скоростью ( $V=const$ ) в сторону микрофона и источника звука (рис. 1). В этом случае микрофон, расположенный между источником звука и движущимся объектом на расстоянии  $x_M$  от источника звука, будет регистрировать сумму двух звуковых волн с разными частотами: одна излучается источником звука, другая отражается от подвижного объекта:

$$s(t) = A_{ИСТ} \cdot \cos(2\pi f_0 t - kx_M + \varphi_0) + A_{ОТР} \cdot \cos(2\pi f_0 t - k(2 \cdot (L - Vt) - x_M) + \varphi_0), \quad (2)$$

где параметры  $f_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $A_{ИСТ}$ ,  $A_{ОТР}$  и  $k$  имеют те же значения, как и в выражении (1).

Выражение (2) можно представить в виде двух гармонических компонент:

$$s(t) = A_{ИСТ} \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta_1) + A_{ОТР} \cdot \cos(2\pi(f_0 + f_D) \cdot t + \theta_2),$$

где  $f_D = \frac{2}{\lambda} V$  называется доплеровским смещением частоты,  $\theta_1 = \varphi_0 - kx_M = const$ ,

$\theta_2 = \varphi_0 + kx_M - 2kL = const$  или в виде одной компоненты с переменными амплитудой и фазой:

$$s(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \psi(t)),$$

где

$$A(t) = \sqrt{A_{ИСТ}^2 + A_{ОТР}^2 + 2A_{ИСТ}A_{ОТР} \cos(2\pi f_D t + \theta_2 - \theta_1)},$$

$$\psi(t) = \theta_1 - \operatorname{Arctg} \frac{A_{\text{ИСТ}} + A_{\text{ОТР}} \cos(2\pi f_D t + \theta_2 - \theta_1)}{A_{\text{ОТР}} \sin(2\pi f_D t + \theta_2 - \theta_1)}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(2\pi f_0 t + \psi(t))}{dt} = f_0 + f_D \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{\text{ОТР}}^2 - A_{\text{ИСТ}}^2}{A_{\text{ИСТ}}^2 + A_{\text{ОТР}}^2 + 2A_{\text{ИСТ}}A_{\text{ОТР}} \cos(2\pi f_D t + \theta_2 - \theta_1)} \right)$$

Зависимость  $f(t)$  характеризует закон изменения частоты сигнала  $s(t)$  и называется мгновенной частотой.

Рассмотрим три частных случая:

1. Если  $A_{\text{ОТР}} = A_{\text{ИСТ}}$ , то  $\omega(t) = 2\pi(f_0 + f_D/2) = \text{const}$ ;
2. Если  $A_{\text{ОТР}} = 0$ , то  $\omega(t) = 2\pi f_0 = \text{const}$ ;
3. Если  $A_{\text{ИСТ}} = 0$ , то  $\omega(t) = 2\pi(f_0 + f_D) = \text{const}$ ;

Во всех остальных случаях мгновенная частота не постоянна, но если учесть, что  $f_D \ll f_0$ , то изменениями мгновенной частоты можно пренебречь.

Изменения  $A(t)$  проявляются на осциллограмме в виде биений, частота которых равна частоте Доплера  $f_D$ , а амплитуда зависит от параметров  $A_{\text{ИСТ}}$  и  $A_{\text{ОТР}}$ .

На рис. 3 представлена осциллограмма, соответствующая сигналу, полученному при регистрации двух звуковых волн: одна пришла от источника звука напрямую, другая – отразившись от движущегося с постоянной скоростью объекта.

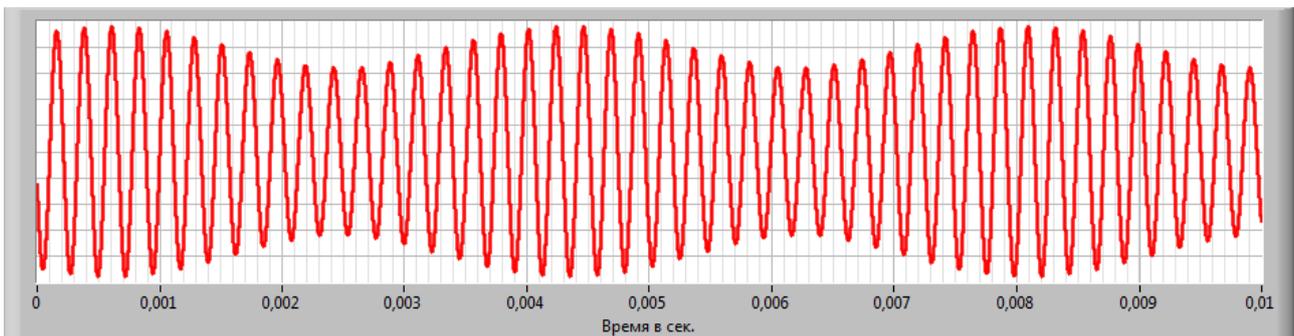


Рис. 3. Осциллограмма, соответствующая сигналу, полученному при регистрации звуковых волн (объект движется с постоянной скоростью)

На осциллограмме хорошо видны биения, частота которых совпадает с частотой Доплера.

### Пример 3. Объект совершает произвольные движения

Рассмотрим пример, когда скорость объекта, отражающего звуковые волны не постоянна  $V(t)$ :

$$x(t) = L - \int_0^t V(t) dt,$$

В этом случае микрофон, расположенный между источником звука и объектом на расстоянии  $x_M$  от источника звука (рис. 1), будет регистрировать сумму двух звуковых волн с разными частотами: одна излучается источником звука, другая отражается от подвижного объекта:

$$s(t) = A_{ИСТ} \cdot \cos(2\pi f_0 t - kx_M + \varphi_0) + A_{ОТР} \cdot \cos\left(2\pi f_0 t - k\left(2 \cdot (L - \int_0^t V(t) dt - x_M)\right) + \varphi_0\right), \quad (3)$$

где параметры  $f_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $A_{ИСТ}$ ,  $A_{ОТР}$  и  $k$  имеют те же значения, как в выражении (1).

Выражение (3) можно представить в виде двух частотных компонент, одна из которых имеет постоянную частоту  $f_0$ , а мгновенная частота другой изменяется пропорционально скорости объекта:

$$s(t) = A_{ИСТ} \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta_1) + A_{ОТР} \cdot \cos\left(2\pi \left(f_0 t + \frac{2}{\lambda} \int_0^t f_D(t) dt\right) + \theta_2\right),$$

где  $\theta_1 = \varphi_0 - kx_M = const$ ,  $\theta_2 = \varphi_0 + kx_M - 2kL = const$ ,  $f_D(t) = \frac{2}{\lambda} V(t)$  – мгновенное значение частоты Доплера

Мгновенное значение частоты второй частотной компоненты сигнала  $s(t)$  можно представить выражением:

$$f_2(t) = f_0 + \frac{2}{\lambda} V(t) = f_0 + f_D(t).$$

Представим (3) в виде одной компоненты с переменными амплитудой и фазой:

$$s(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \psi(t)),$$

где

$$A(t) = \sqrt{A_{ИСТ}^2 + A_{ОТР}^2 + 2A_{ИСТ}A_{ОТР} \cos\left(2\pi \int_0^t f_D(t) dt + \theta_2 - \theta_1\right)},$$

$$\psi(t) = \theta_1 - \text{Arctg} \frac{A_{ИСТ} + A_{ОТР} \cos\left(2\pi \int_0^t f_D(t) dt + \theta_2 - \theta_1\right)}{A_{ОТР} \sin\left(2\pi \int_0^t f_D(t) dt + \theta_2 - \theta_1\right)}.$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(2\pi f_0 t + \psi(t))}{dt} = f_0 + f_D \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{0.5 \cdot (A_{ОТР}^2 - A_{ИСТ}^2)}{A_{ИСТ}^2 + A_{ОТР}^2 + 2A_{ИСТ}A_{ОТР} \cos\left(2\pi \int_0^t f_D(t) dt + \theta_2 - \theta_1\right)} \right].$$

Функция  $f(t)$  – мгновенная частота сигнала  $s(t)$ . Если  $f_D(t) \ll f_0$ , то изменениями мгновенной частоты можно пренебречь.

Функция  $A(t)$  влияет на частоту и амплитуду биений. Зависимость частоты биений совпадает с мгновенными значениями частоты Доплера  $f_D(t)$ , а амплитуда биений зависит от параметров  $A_{ИСТ}$  и  $A_{ОТР}$ .

На рис. 4 и 5 представлена осциллограмма, соответствующая сигналу, полученному при регистрации двух звуковых волн: одна пришла от источника звука напрямую, другая – отразившись от маятника.

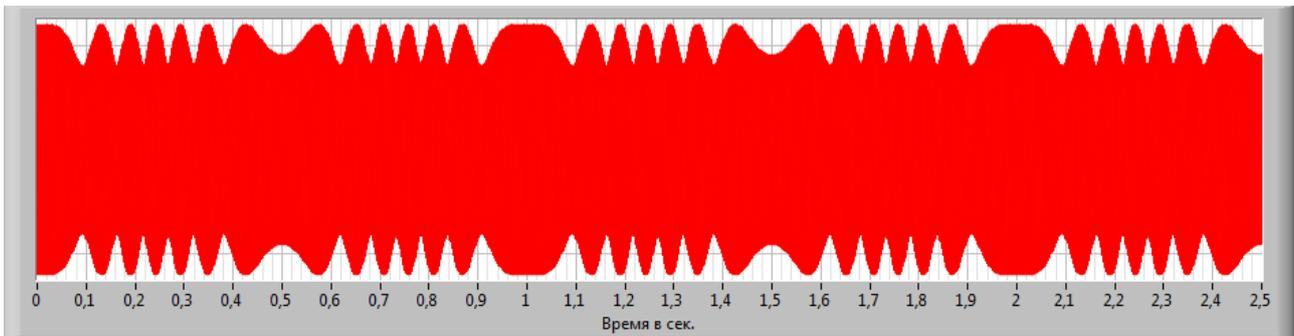


Рис. 4. Осциллограмма, соответствующая сигналу, полученному при регистрации звуковых волн (объект совершает колебательные движения)

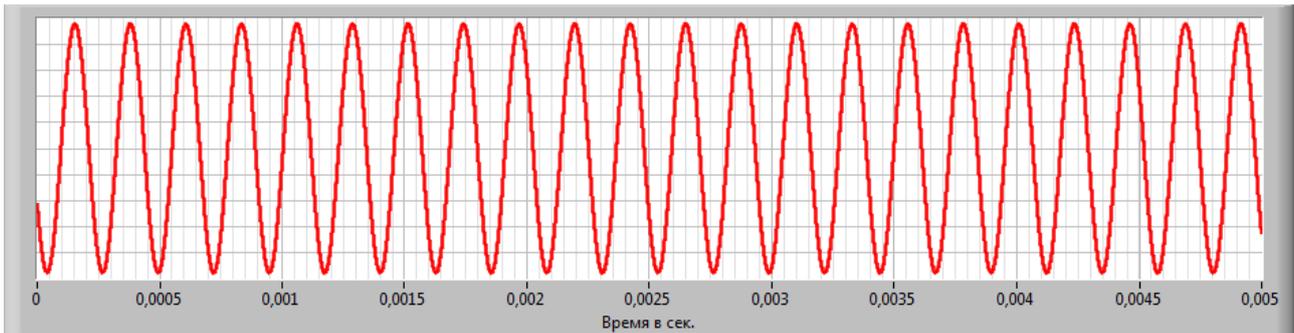


Рис. 5. Увеличенная часть осциллограммы, представленной на рис. 4

На рис. 4 хорошо видны биения, частота которых периодически меняется. По биениям можно оценить период колебаний маятника и мгновенные значения модуля скорости.

## 2. Описание лабораторной установки

Установка (рис. 6) состоит из маятника, в качестве груза которого используется металлическая пластина, хорошо отражающая звук, микрофона, звуковых колонок и персонального компьютера.



Рис. 6 Внешний вид лабораторной установки

Микрофон и колонки соединены с соответствующими входами звукового адаптера на корпусе компьютера. Микрофон располагается между звуковой колонкой, излучающей синусоидальный сигнал, и маятником, так, чтобы звук, отражаясь от качающейся пластины, попадал в него. Сигнал, считанный с микрофона (с частотой дискретизации 44100 Гц), записывается на диск компьютера в виде текстового файла.

Полученный на такой установке сигнал интересен тем, что кроме компоненты на основной частоте, излучаемой колонками, в нем присутствует более слабая частотная компонента отраженного от качающейся пластины звукового сигнала с доплеровским сдвигом частоты:

$$f_D = \frac{2}{\lambda} V, \quad (4)$$

где  $\lambda = c/f_0$  – длина звуковой волны,  $c \approx 331$  м/с – скорость звука,  $f$  – частота звукового сигнала, излучаемого колонками ( $\lambda \approx 75$  мм для  $f_0 = 4410$  Гц).

Для генерации звукового сигнала и оцифровки данных, полученных с микрофона, используется стандартная звуковая плата компьютера. Она управляется программой Sounding.vi, написанной на графическом языке программирования LabVIEW. Блок-диаграмма и передняя панель<sup>1</sup> этой программы приведены на рис. 7, 8.

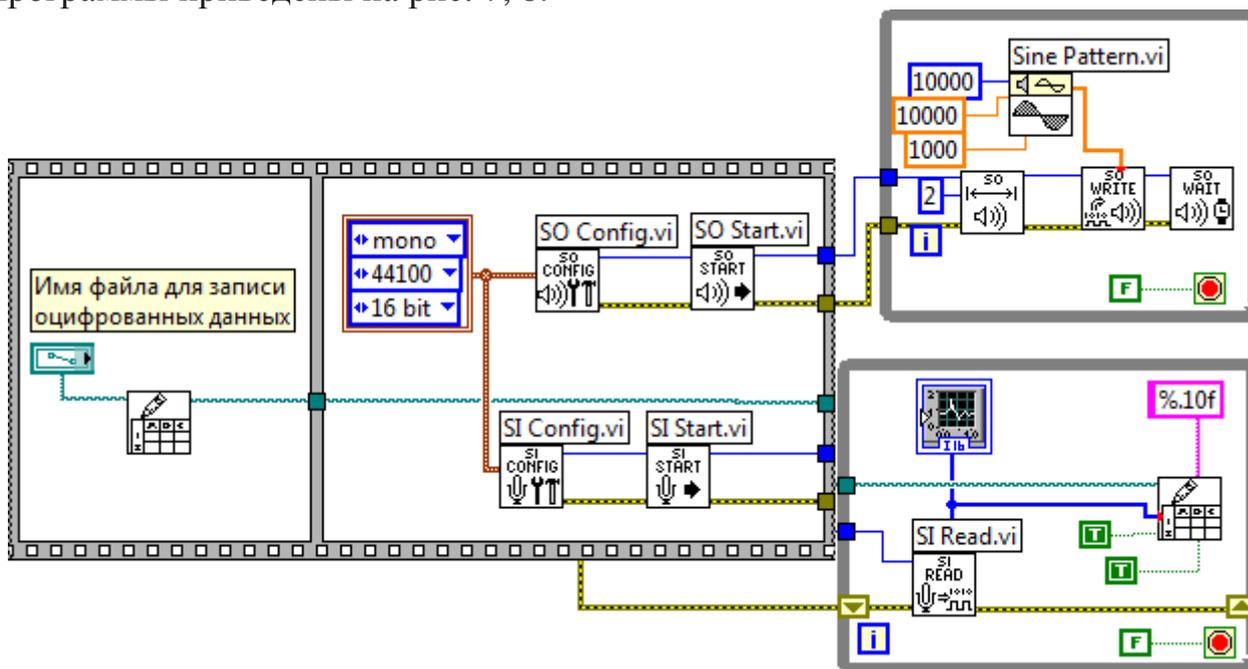


Рис. 7. Блок-диаграмма виртуального прибора Sounding.vi

<sup>1</sup> Для программ, написанных на языке программирования LabVIEW, исходный текст принято называть блоком диаграмм, внешний вид – передней панелью, а саму программу – виртуальным прибором

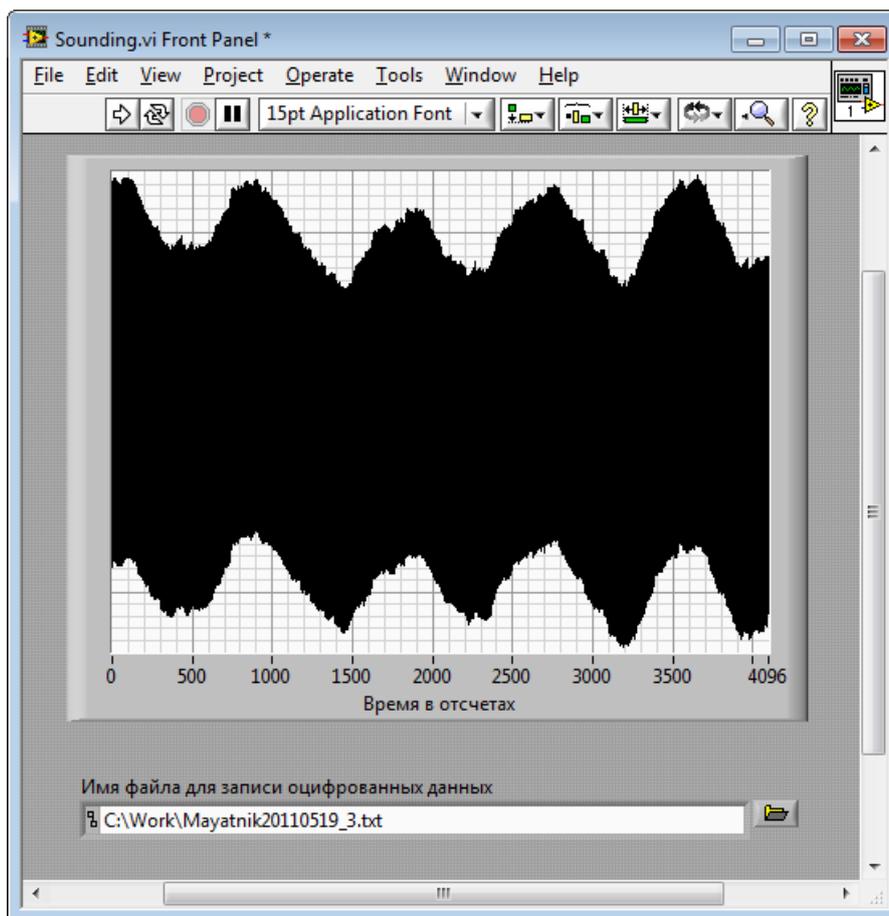


Рис. 8 Передняя панель виртуального прибора Sounding.vi

На переднюю панель выведены:

- графический индикатор для контроля полученного с микрофона сигнала;
- элемент управления для задания имени выходного файла, в который записываются отсчеты сигнала, считанные с микрофона, с частотой дискретизации 44100 Гц (полученные данные записываются в файл в текстовом формате в одну колонку).

### 3. Дополнительная обработка сигнала, полученного на установке

Оценить параметры движения маятника на лабораторной установке, описанной в разделе 3, по биениям в зарегистрированном сигнале не всегда возможно. Это связано с тем, что интенсивность отраженной волны во много раз меньше интенсивности зондирующей, также в зарегистрированном сигнале присутствуют дополнительные помехи, амплитуда которых может значительно превышать амплитуду биений. Кроме того, по биениям нельзя оценить направление скорости.

Перед оценкой параметров движения маятника, необходимо выполнить предварительную обработку полученного сигнала. Для этого используется программа "I-Q demodulator" написанная на графическом языке

программирования LabVIEW, передняя панель и блок-диаграмма этой программы приведены на рис. на рис. 9, 10.

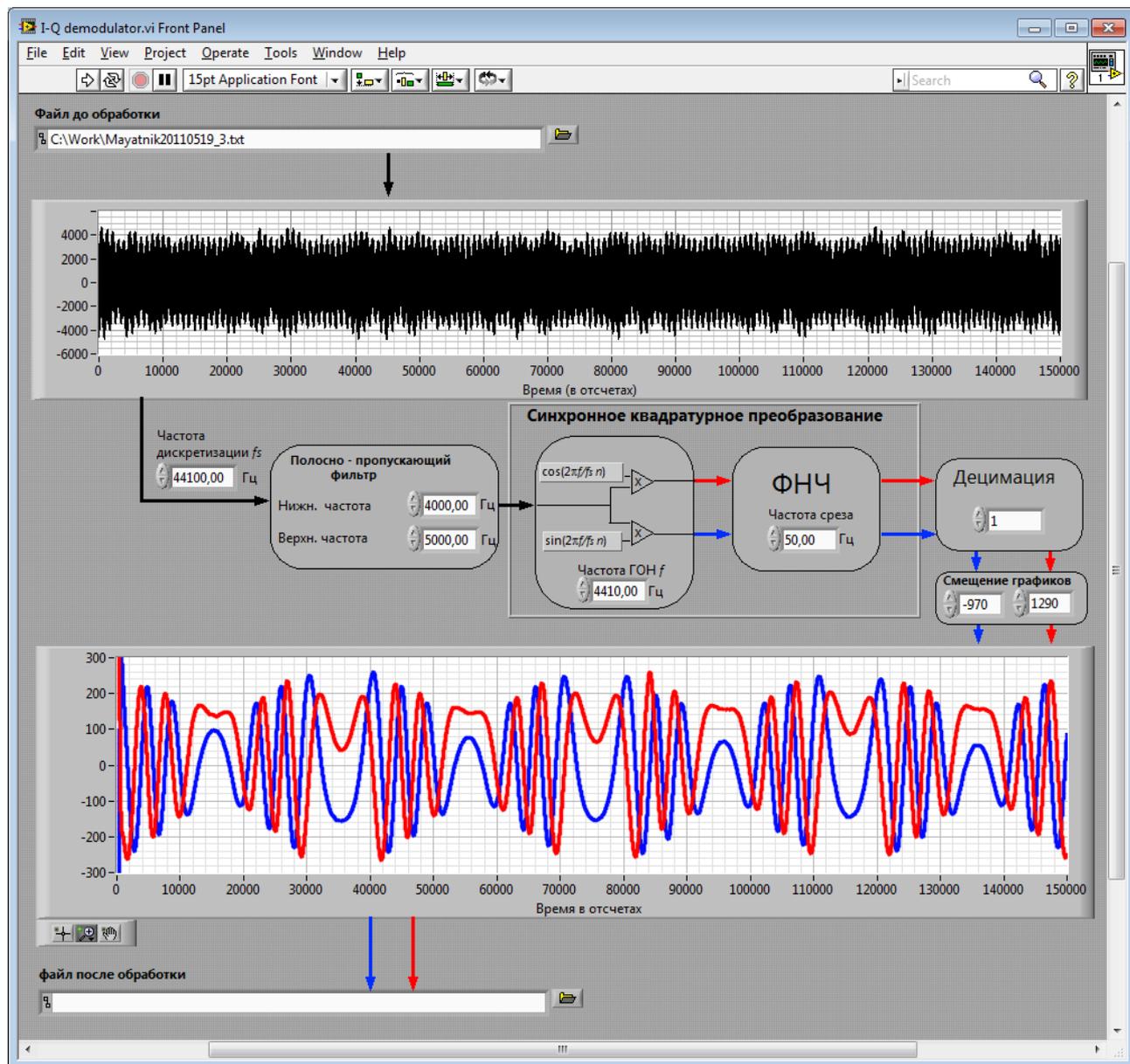


Рис. 9. Передняя панель виртуального прибора “I-Q demodulator.vi”

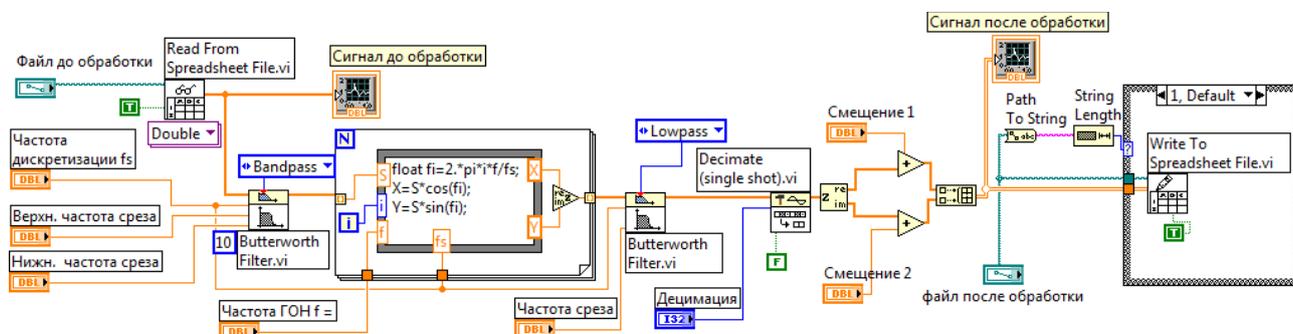


Рис. 10. Блок-диаграмма виртуального прибора “I-Q demodulator.vi”

Алгоритм обработки схематично представлен на передней панели программы (рис. 9) и включает следующие действия:

- фильтрация полосно-пропускающим фильтром (с частотами среза 4 кГц и 5 кГц), чтобы ослабить интенсивность помех (шум вентилятора и другие посторонние источники звука);
- квадратурное синхронное преобразование для смещения анализируемой части спектра в область нулевых частот (для последующей децимации) и создания двух квадратурных каналов для повышения точности спектрально-временного анализа;
- при необходимости можно выполнить децимацию, для сокращения времени спектрально-временного анализа дополнительным программным обеспечением.

Рассмотрим подробнее процесс обработки. Для этого проведем моделирование сигнала, полученного на установке. Представим его в виде трех частотных компонент:

- компонента с частотой источника звука  $f_0$ ;
- компонента с частотой звуковой волны, отраженной от движущегося объекта ( $f_0 + f_D(t)$ ), мгновенные значения частоты меняются по синусоидальному закону от  $-f_{Dmax}$  до  $+f_{Dmax}$  с периодом равным  $1/f_1$ ;
- помеха  $N(t)$  (используется белый гауссов шум с дисперсией равной 1, пропущенный через фильтр нижних частот с частотой среза  $f_{Nmax}$ ).

Зададим дополнительные условия:  $f_0 \gg f_{Dmax}$  и  $f_0$  в несколько раз больше  $f_{Nmax}$ .

После оцифровки на аналого-цифровом преобразователе с частотой дискретизации  $f_s$  получим последовательность отсчетов:

$$s(n) = A_{ИСТ} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \theta_1\right) + A_{ОТР} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \frac{f_{Dmax}}{f_1} \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \theta_2\right) + \theta_3\right) + N(t), \quad (5)$$

где  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и  $\theta_3$  – начальные фазы.

На рис. 11 представлена осциллограмма, вычисленная по формуле (5) со следующими параметрами:  $A_{ИСТ}=1$ ,  $A_{ОТР}=0.02$ ,  $A_{П}=0.2$ ,  $f_s=44100$  Гц,  $f_0=4410$  Гц,  $f_1=0.2$  Гц,  $f_{Dmax}=20$  Гц,  $f_{Nmax}=500$  Гц,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и  $\theta_3$  равны нулю.

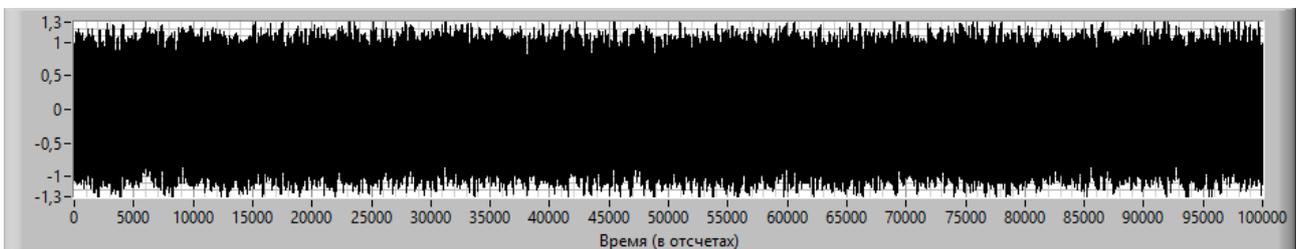


Рис. 11. Осциллограмма, построенная по формуле (5)

По осциллограмме трудно оценить параметры маятника из-за сильной помехи. Учитывая, что энергия помехи сосредоточена в области частот, верхняя граница которых в несколько раз меньше частот двух первых компонент, нетрудно подобрать параметры цифрового полосно-пропускающего

фильтра такие, чтобы ослабить помеху более чем на 20 дБ. Это действие уменьшит влияние помехи на оценку параметров.

В выражении (5) после цифровой фильтрации можно оставить только две компоненты (будем считать, что амплитудно-частотная характеристика фильтра в полосе пропускания равна 1, а фазово-частотная характеристика линейна, это повлияет на значения начальных фаз):

$$s_1(n) = A_{ИСТ} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \tilde{\theta}_1\right) + A_{ОТП} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \frac{f_{D\max}}{f_1} \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \theta_2\right) + \tilde{\theta}_3\right). \quad (6)$$

На рис. 12 представлена осциллограмма последовательности, полученная после цифровой фильтрации с полосой пропускания от 4000 до 5000 Гц, что приблизительно соответствует цифровым частотам 0.09 и 0.11 (цифровая частота безразмерна и вычисляется как отношение реальной частоты к частоте дискретизации).

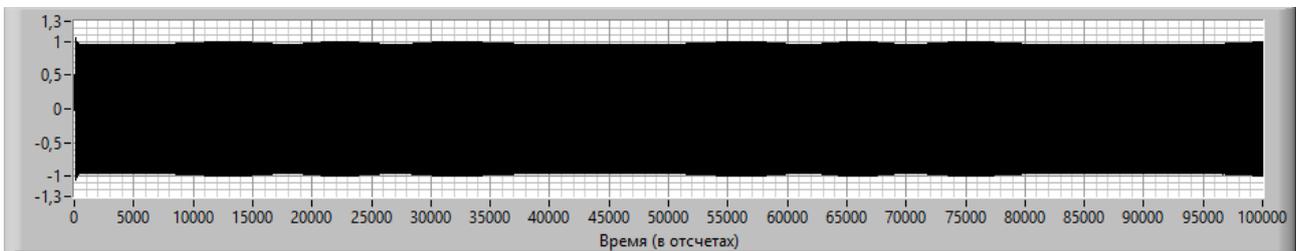


Рис. 12. Осциллограмма сигнала после фильтрации

Далее полученная последовательность поступает на синхронный квадратурный преобразователь, принцип действия которого состоит в следующем:

1. Создадим две новых последовательности:

$$x(n) = s_1(n) \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} n\right),$$

$$y(n) = s_1(n) \cdot \sin\left(2\pi \frac{f_0}{f_s} n\right),$$

которые после перемножения и выполнения тригонометрических преобразований можно представить в виде двух высокочастотных и двух низкочастотных компонент:

$$x(n) = \frac{A_{ИСТ}}{2} \cdot \cos\left(2\pi \left(\frac{2f_0}{f_s}\right) n + \tilde{\theta}_1\right) + \frac{A_{ИСТ}}{2} \cos \tilde{\theta}_1 + \frac{A_{ОТП}}{2} \cdot \cos\left(2\pi \left(\frac{2f_0}{f_s}\right) n + \frac{f_{D\max}}{f_1} \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \theta_2\right) + \tilde{\theta}_3\right) +$$

$$+ \frac{A_{ОТП}}{2} \cdot \cos\left(\frac{f_{D\max}}{f_1} \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \theta_2\right) + \tilde{\theta}_3\right),$$

$$y(n) = \frac{A_{ИСТ}}{2} \cdot \sin\left(2\pi \left(\frac{2f_0}{f_s}\right) n + \tilde{\theta}_1\right) + \frac{A_{ИСТ}}{2} \sin \tilde{\theta}_1 + \frac{A_{ОТП}}{2} \cdot \sin\left(2\pi \left(\frac{2f_0}{f_s}\right) n + \frac{f_{D\max}}{f_1} \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \theta_2\right) + \tilde{\theta}_3\right) +$$

$$+ \frac{A_{ОТП}}{2} \cdot \sin\left(\frac{f_{D\max}}{f_1} \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \theta_2\right) + \tilde{\theta}_3\right).$$

После обработки фильтром нижних частот в последовательностях останутся только две компоненты: мгновенная частота одной совпадает с частотой Доплера, а вторая является постоянной составляющей, которая просто смещает график по оси ординат:

$$x(n) = \frac{A_{OTP}}{2} \cdot \cos\left(\frac{f_{Dmax}}{f_1} \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \theta_2\right) + \tilde{\theta}_3\right) + \frac{A_{ИСТ}}{2} \cos \tilde{\theta}_1,$$

$$y(n) = \frac{A_{OTP}}{2} \cdot \sin\left(\frac{f_{Dmax}}{f_1} \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \theta_2\right) + \tilde{\theta}_3\right) + \frac{A_{ИСТ}}{2} \sin \tilde{\theta}_1.$$

На рис. 13 красным цветом изображена последовательность  $x(n)$ , синим –  $y(n)$ .

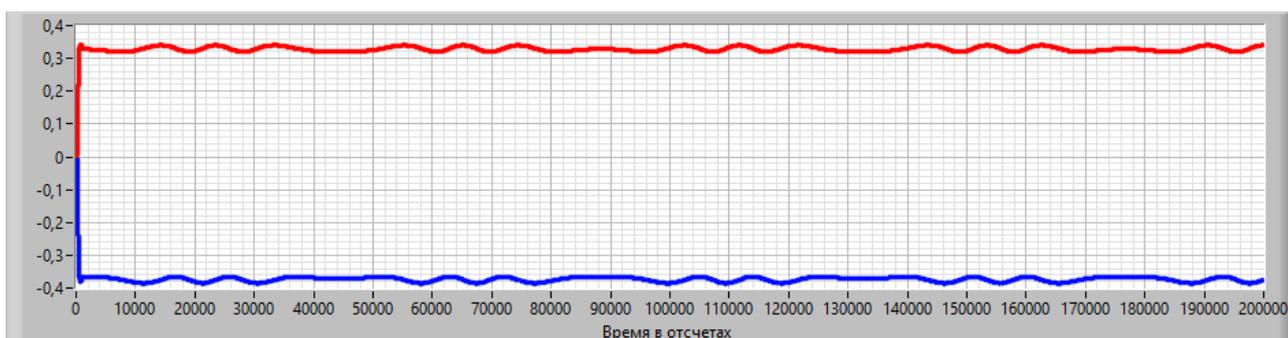


Рис. 13. Осциллограмма сигнала после квадратурного преобразования

Начальный участок графика из анализа следует исключить, т.к. из-за переходных процессов в начальный момент времени фильтры вносят значительные искажения.

На рис. 14 представлены те же графики после удаления постоянной составляющей.

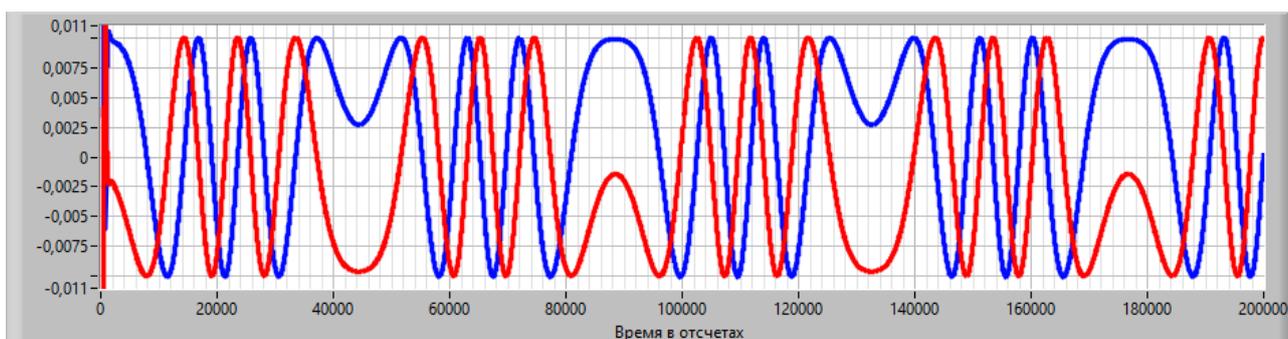


Рис. 14. Осциллограмма сигнала после квадратурного преобразования и удаления постоянной составляющей

#### 4. Оценка параметров маятника

На рис. 14 хорошо различимы две частотные компоненты, мгновенная частота которых циклически меняется от 0 до максимального значения и обратно. Обратим внимание, на одних участках синий график опережает

красный, на других отстает от красного. Это связано с направлением движения объекта.

По рис. 14 можно оценить следующие параметры:

1. Период колебаний маятника;
2. Направление движения объекта и его скорость в каждый момент времени;
3. Относительное перемещение объекта.

Относительное перемещение объекта и скорость можно оценить по экстремумам графика. Расстояние между верхними или нижними экстремумами на графике одного цвета соответствует перемещению объекта на расстояние равное половине длины звуковой волны ( $\lambda/2$ ). Если это перемещение разделить на длительность, то получим среднюю скорость на этом участке. Если экстремумы красного и синего графиков совпадают по времени, то скорость объекта в этот момент времени равна нулю.

Более точно перемещение и среднюю скорость можно оценить по соседним экстремумам красного и синего графиков, которые соответствуют перемещению объекта на расстояние равное  $\lambda/8$  (рис. 15).

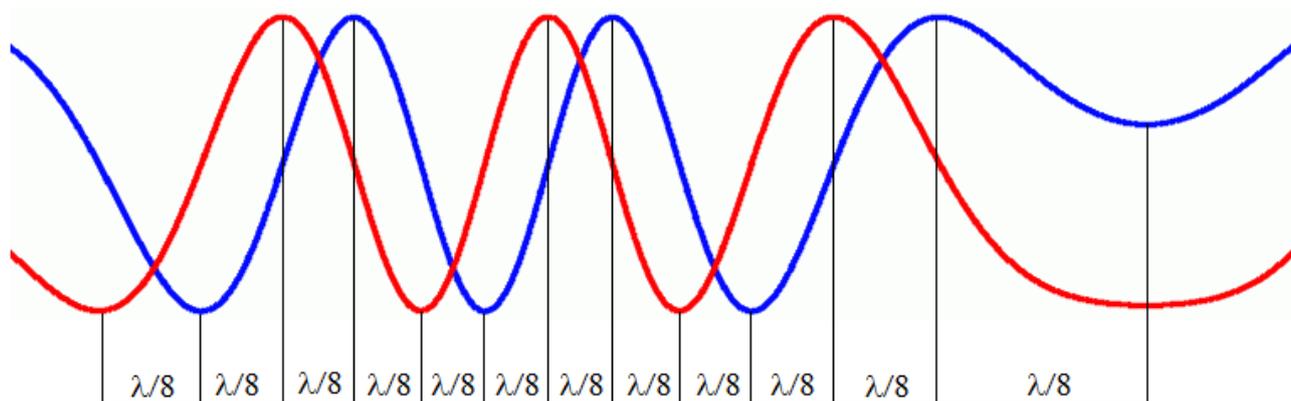


Рис. 15. Соседние экстремумы красного и синего графиков соответствуют перемещению объекта на расстояние равное  $\lambda/8$

## 5. Контрольные вопросы

1. Зачем выполнять предварительную обработку сигнала?
2. По рис. 2 оцените частоту звуковой волны излучаемой источником звука.
3. По рис. 3 оцените скорость движущегося объекта.
4. Как оценить максимальную скорость маятника по осциллограммам?
5. Как оценить период колебаний маятника по осциллограммам?
6. Как оценить коэффициент затухания маятника по осциллограммам?
7. Как изменятся осциллограммы в программе I-Q demodulator, если частоту зондирующего сигнала уменьшить в 2 раза?
8. Как изменятся осциллограммы в программе I-Q demodulator, если увеличить первоначальное отклонение маятника?
9. Какие изменения в оценке параметров произойдут, если источник звука поднять на 10 см относительно микрофона и маятника?
10. Зачем нужен полосно-пропускающий фильтр в программе I-Q demodulator?
11. Как изменятся осциллограммы в программе I-Q demodulator, если в ней задать частоту генератора опорного напряжения, отличающуюся от частоты зондирующего сигнала?
12. Зачем нужны два квадратурных канала?
13. Какие настройки необходимо сделать в программе I-Q demodulator, чтобы определить направления движения маятника по одному квадратурному каналу?
14. По рис. 14 определите на каких участках объект движется в сторону микрофона, а на каких в обратную.

## 6. Задания

1. Соберите установку, как показано на рис. 6.

2. Сбор данных.

2.1. Запустите программу Sounding.vi. Укажите в ней имя и расположение файла, в который будут записываться данные с микрофона.

2.2. Проверьте работу программы, нажав мышкой кнопку «Run» . На графическом индикаторе должна появиться осциллограмма, примерно как на рис. 8. Отрегулируйте громкость, так чтобы звук не сильно раздражал, и амплитуда сигнала превосходила амплитуду помехи (частота помехи в несколько раз меньше частоты основного сигнала, на осциллограмме она проявляется в виде низкочастотной синусоиды). Можно при этом качнуть маятник. После отладки нажмите кнопку «Stop» .

2.3. Отклоните маятник от положения равновесия примерно на 10 см и отпустите. Сразу после этого нажмите в программе кнопку «Run». Дождитесь, когда маятник совершит 10 периодов, после чего нажмите кнопку «Stop».

2.4. Закройте программу Sounding.exe

3. Предварительная обработка данных.

3.1. Запустите программу I-Q Demodulator.vi.

3.2. Для выполнения работы с данной программой задайте следующие параметры:

– полное название файла, содержащего данные, полученные с помощью программы Sounding.exe;

– частоту дискретизации, с которой входной сигнал был оцифрован (44100 Гц);

– частоты среза полосно – пропускающего фильтра (4000 и 5000 Гц);

– частоту генератора опорного напряжения (ГОН) в синхронном квадратурном преобразователе (4410 Гц);

– частоту среза фильтра нижних частот (50 Гц);

– коэффициент децимации оставьте равным 1;

3.3. Нажмите в программе кнопку «Run» и дождитесь остановки программы (кнопка «Run» снова станет активной).

4. Оценка параметров маятника

4.1. Запустите программу I-Q demodulator.vi.

4.2. Задайте в программе следующие параметры:

– полное название файла, содержащего данные, полученные с помощью предыдущей программы;

– частоту дискретизации, с которой входной сигнал был оцифрован (44100 Гц);

– частоты среза полосно – пропускающего фильтра (4000 и 5000 Гц);

– частоту генератора опорного напряжения в синхронном квадратурном преобразователе (4410 Гц);

– частоту среза фильтра нижних частот (50 Гц);

При необходимости (если планируется провести анализ дополнительным программным обеспечением) можно указать имя выходного файла, в который запишется результат после предварительной обработки в текстовом формате в две колонки.

4.3. Оцените период колебаний маятника.

4.4. Оцените максимальную скорость маятника на каждом периоде (методика оценки скорости описана в разделе 4).

Для более точной оценки можно воспользоваться палитрой элементов управления графиком, с помощью которой можно выбрать способ выделения участка графика (рис. 16).

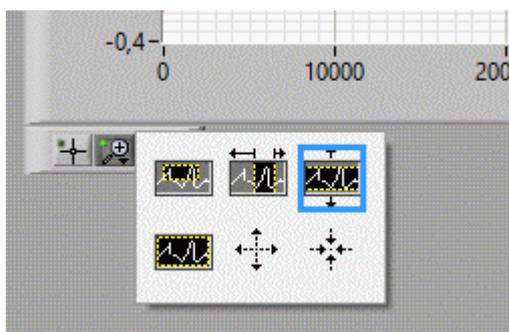


Рис. 16. Палитра элементов управления графиком

4.5. Оцените коэффициент затухания маятника по формуле:

$$\alpha = \frac{\ln V_K - \ln V_H}{t_K - t_H},$$

где  $V_K$  и  $V_H$  – максимальные скорости за период колебания маятника в двух точках  $t_H$ ,  $t_K$  (в начале и в конце регистрации данных).

## Список литературы

1. Горелик Г.С. Колебания и волны. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1950. – 572 с.
2. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование земли: в 2 т. Т.1: Физические основы – М.: ИКИ РАН, 2014. – 552 с.
3. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии. Под ред. Крэнкелла. – М.: Мир, 1984. – 535 с.
4. Канаков В.А., Лупов С.Ю., Орехов Ю.И., Родионов А.В. Методы извлечения информации о перемещении границ раздела в газодинамических экспериментах с использованием радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2008. – Т. LI. № 3. – С. 234-246.
5. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Техносфера, 2009. – 856 с.
6. Кривошеев В.И. Цифровая обработка сигналов. Учебное пособие. – Н.Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2006. – 207 с.
7. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. – М: ДМК Пресс, 2008. – 880 с.

## Содержание

Введение	3
1. Активное акустическое зондирование	4
2. Описание лабораторной установки	8
3. Дополнительная обработка сигнала, полученного на установке	10
4. Оценка параметров маятника	14
5. Контрольные вопросы	16
6. Задания	17
Список литературы	19

Сергей Юрьевич Лупов  
Сергей Иванович Муякшин

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ  
ОТРАЖАЮЩЕГО ОБЪЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ЕГО АКТИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского».  
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.