

Измерение скорости звука в воздухе и исследование эффекта Доплера

Артамонов Сергей Максимович

8 класс, МАОУ Лицей № 36

Научный руководитель А.А. Ананичев,
старший лаборант-исследователь ИПФ РАН

В работе по задержке распространения между импульсами, прошедшими радиоканал и канал распространения звуковой волны, определена скорость звука в воздухе. По анализу фазы принятого звукового колебания от движущегося источника определены скорость и ускорение объекта. Проведен анализ и восстановление фазы принятого колебания при криволинейном движении источника гармонического звукового сигнала. Для проведения экспериментов на Android платформе разработан генератор гармонических колебаний звуковой частоты, на языке Matlab программно реализовано устройство выделения амплитуды и фазы из принятого колебания.

Нас окружают волны и колебания различной природы и с различными характеристиками. Звуковые волны имеют механическую природу, а частота звуковых колебаний лежит в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц [1]. Вопрос скорости распространения звуковых волн актуален и изучается по настоящее время [3]. А эффект Доплера, лег в основу принципа работы множества устройств. Цель данной работы – измерить скорость распространения звуковой волны в воздухе и исследовать восприятие приемником звука гармонического колебания, испускаемого движущимся источником при прямолинейном равномерном, прямолинейном ускоренном и криволинейном движении.

Для проведения опытов был разработан и реализован на Android платформе генератор гармонических колебаний звуковой частоты. Данный генератор запускается на смартфоне и формирует гармонические звуковые колебания в непрерывном или импульсном режиме.

Разработанное для проведения анализа принятых звуковых колебаний устройство выделения амплитуды $A(t)$ и фазы $\varphi(t)$ представлено на рис. 1. Данное устройство использует методы цифровой квадратурной обработки сигналов. Колебание удвоенной частоты,

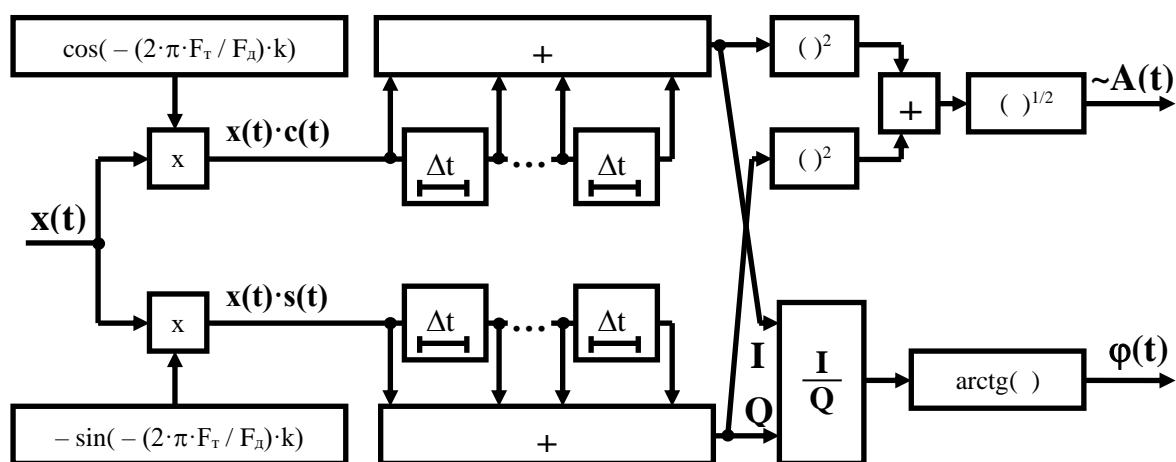


Рис. 1. Структурная схема устройства выделения амплитуды и фазы из принятого колебания

получаемое в результате преобразования частоты, в данном устройстве устраняется скользящим средним на интервале, кратном периоду удвоенной частоты. На рис. 1 F_T – частота генерируемого тона, F_d – частота дискретизации, Δt – интервал дискретизации, k – номер принятого отсчета сигнала, $t = k \cdot \Delta t$.

Схема проведения опыта по измерению скорости звука состояла из одного смартфона, излучающего звуковые импульсы, и другого, принимавшего их на микрофон. Между смартфонами расстояние 10 м. Рядом с излучающим смартфоном располагалась передающая радиостанция уоки-токи с нажатой тангентой, рядом с принимающим смартфоном принимающая радиостанция. На микрофоне принимающего смартфона демодулированный сигнал с приемной радиостанции и аудиосигнал от излучающего смартфона смешивались и записывались на программу-диктофон. Задержка между сигналом, принятым по радиоканалу и пришедшим по аудиоканалу, составила 28.2 мс. К ней следует добавить аппаратную задержку

радиостанций, измеренную ранее и составившую 1.3 мс. Скорость распространения звуковой волны составила $10 / 0.0295 = 339$ м/с. Отклонение от справочного значения (343 м/с при 20°C) составило 1.2 %.

Для определения скорости движения источника звуковых волн, излучающий звуковые колебания смартфон помещался на полотно беговой дорожки, а записывающий звук смартфон размещался неподвижно. Анализ показал, что фаза принятого колебания содержит линейно изменяющиеся участки, при сближении источника и приемника с положительным наклоном и при удалении – с отрицательным. По тангенсу угла наклона этих участков получена оценка доплеровского смещения частоты и, соответственно, скорость движения источника звука. При установленной скорости 1 м/с, измеренная скорость составила 0.989 м/с при сближении источника и приемника, 0.998 м/с при удалении источника от приемника (отклонение не превысило 1.1 %). Скорость беговой дорожки измерялась независимым методом и устанавливалась с учетом отклонений от показаний табло.

Ускорение свободно падающего источника звука измерялось также через анализ фазы принятого колебания. Частота принимаемого сигнала $\omega_{\text{прм}} = \frac{\omega_{\text{прд}}}{1 - \frac{V_{\text{прд}}}{v_{\text{зв}}}}$ [2]. Где $\omega_{\text{прд}}$ – угловая

частота передатчика, $V_{\text{прд}}$ – скорость передатчика, $v_{\text{зв}}$ – скорость звука. Подставив скорость, выраженную через ускорение, получим $\omega_{\text{прм}} = \frac{\omega_{\text{прд}}}{1 - g \cdot \frac{t}{v_{\text{зв}}}}$. Где g ускорение свободного падения,

$t = k \cdot \Delta t$ – дискретное время. Далее символьно в Матлабе можно взять интеграл и добавить к нему линейный набег фазы $\omega_{\text{прд}} \cdot t$ из-за перемножения на опорные колебания с частотой тона в устройстве обработки (рис. 1) и добавить начальную неопределенную фазу φ_0 . Тогда зависимость фазы принятого колебания от времени описывается формулой (1).

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega_{\text{прд}} \cdot t + \left(\omega_{\text{прд}} \cdot \frac{v_{\text{зв}}}{g} \right) \cdot \ln(v_{\text{зв}} - g \cdot t) \quad (1)$$

Максимально правдоподобными началом падения и ускорением свободного падения считались, величины, обеспечивающие минимум среднего квадрата ошибки между практической кривой и кривой расчетной. Оценка значения ускорения свободного падения составила 9.9 м/с², что отличается от справочного значения в 9.81 м/с² на 0.9 %.

В последнем эксперименте источник звука раскручивался на вращающемся стенде и

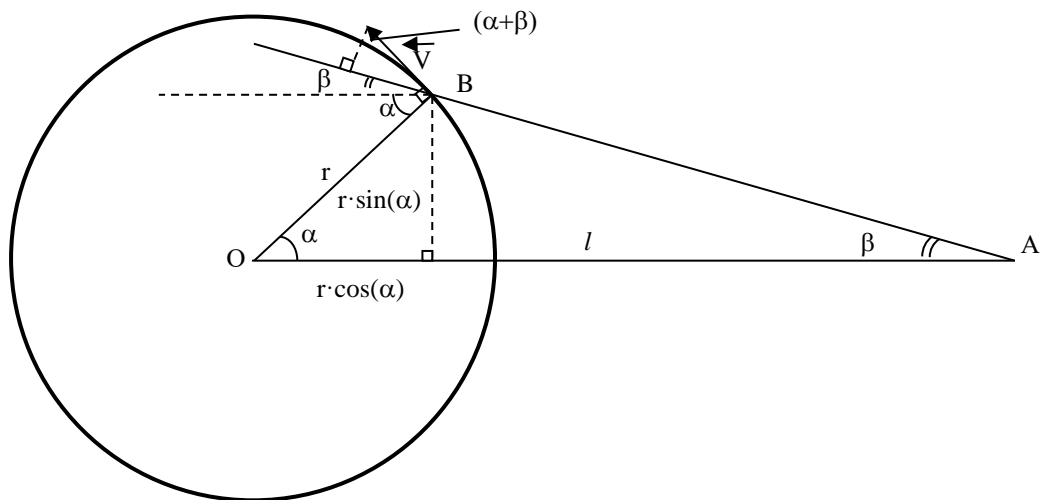


Рис. 2. Схема опыта по анализу и восстановлению фазы принимаемого гармонического колебания от криволинейно движущегося источника.

совершал несколько свободных оборотов, а приемник располагался неподвижно, вблизи от траектории вращающегося источника (рис. 2).

В формулу для определения принимаемой частоты входит проекция скорости на направление, связывающее источник звука и приемник [2]. Эту проекцию удобно выразить как функцию угла поворота стенда α (рис. 2). На рис. 2: O – центр вращения стенда, A – приемник звука, B – источник звуковых колебаний.

Можно получить формулу для определения частотного сдвига принимаемого колебания:

$$\omega_{\text{вых}} = \frac{\omega_{\text{прд}} \cdot V_{\text{прд}} \cdot \sin \left(\alpha + \text{artg} \left(\frac{r \cdot \sin \alpha}{l - r \cdot \cos \alpha} \right) \right)}{V_{\text{зв}} - V_{\text{прд}} \cdot \sin \left(\alpha + \text{artg} \left(\frac{r \cdot \sin \alpha}{l - r \cdot \cos \alpha} \right) \right)} \quad (2)$$

где $V_{\text{прд}}$ – скорость источника, α – угол поворота стенда, l – расстояние от центра вращения источника до приемника (0.35 м), r – радиус вращения источника (0.3 м). Период вращения был оценен по среднему интервалу между минимумами на экспериментальной зависимости фазы от времени (рис. 3). Исходя из радиуса, можно рассчитать длину окружности и оценить значение модуля скорости излучателя. Формула (2) символьному интегрированию не поддается, т.е. зависимость фазы от времени в явном виде не выводится. Интегрирование было проведено численно в системе Matlab. Результат представлен на рис. 3.

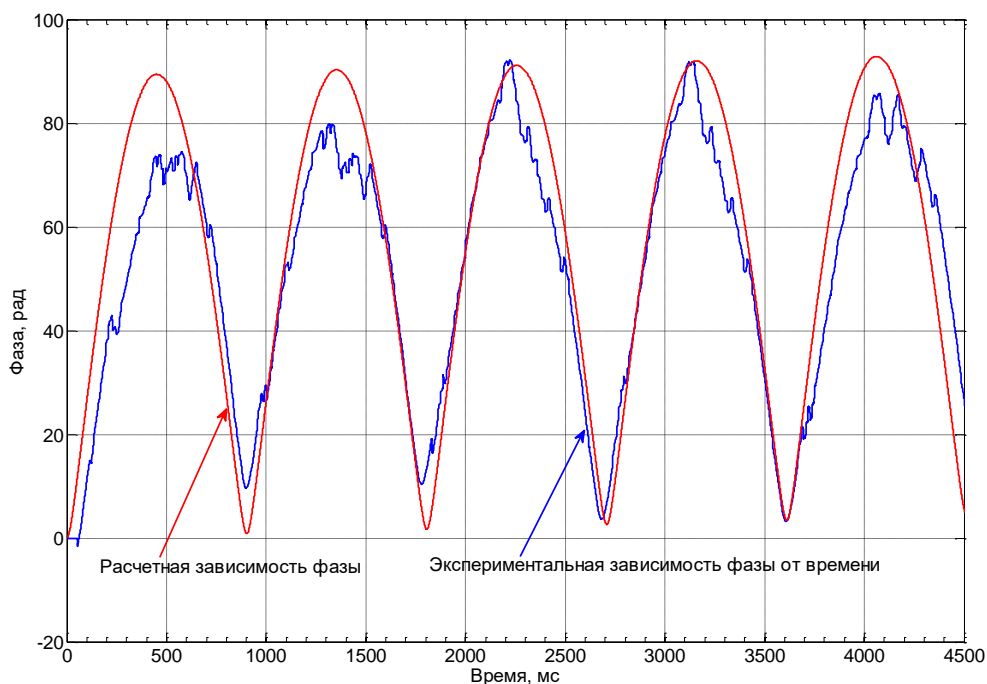


Рис. 3. Рассчитанная и полученная экспериментально зависимости фазы принятого колебания при криволинейном движении источника звука

Значительные шумы на экспериментальной кривой обусловлены неравномерностью вращения стенда и совершением им при вращении колебательных движений относительно точки крепления в горизонтальной и в вертикальной плоскостях.

Измеренные в ходе опытов физические величины хорошо согласуются со справочными данными или задаваемыми в ходе эксперимента параметрами, что говорит о правильности разработанных способов проведения экспериментов и методов их анализа.

Список литературы:

- 1 Радзишевский А.Ю. Основы аналогового и цифрового звука. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006.
- 2 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика: Учеб. пособие. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1985.
- 3 Trachenko K., Monserrat B., Pickard C. J., Brazhkin V. V. Speed of sound from fundamental physical constants // *Science Advances*. – 2020, 09 Oct. – Vol. 6, no. 41, eabc8662.