АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ И ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ ДВИЖЕНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА ЭФФЕКТЕ ДОПЛЕРА

Литвинович А. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

В статье рассматриваются датчики движения, использующие эффект Доплера для обнаружения перемещения объектов. Анализируются физические основы работы микроволновых (СВЧ) и ультразвуковых датчиков, их конструктивные особенности, преимущества и недостатки; приводятся примеры применения в системах безопасности, автоматизации и робототехнике. Особое внимание уделено вопросам минимизации ложных срабатываний и повышения точности обнаружения.

Эффект Доплера, открытый в 1842 году Кристианом Доплером, нашел широкое применение в различных областях науки и техники, включая радиолокацию, акустику и системы обнаружения движения. Датчики, основанные на этом эффекте, позволяют бесконтактно регистрировать перемещение объектов за счет анализа изменения частоты отраженного сигнала. Эффект Доплера заключается в изменении частоты и длины волны сигнала, воспринимаемого приёмником, при относительном движении источника и приёмника. Схематическая иллюстрация данного эффекта приведена на рисунке 1.

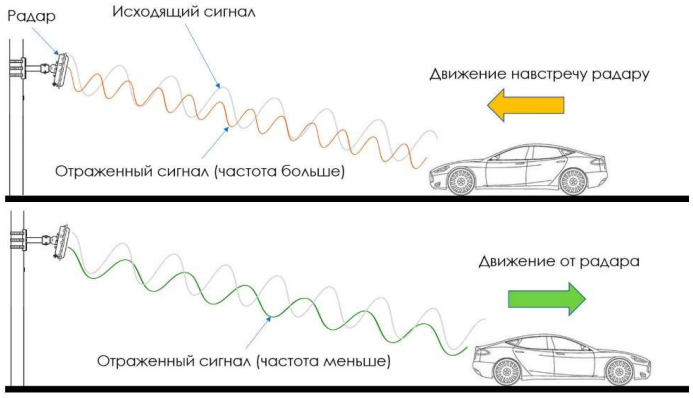

Рисунок 1 – Схема изменения длины (частоты) отражаемой волны в зависимости от направления движения объекта, показанная на примере автомобиля

Для того, чтобы применить эффект Доплера на практике, следует прибегнуть к следующим формулам: формула (1) используется при работе со звуковыми колебаниями, а формула (2) — при описании распространения электромагнитных волн (т. н. релятивистский эффект Доплера).

$$f_{\text{набл.}} = \frac{v \pm v_{\text{набл.}}}{v \pm v_{\text{ист.}}} f_{\text{ист.}} \ (1), \qquad \omega = \omega_0 \frac{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1-\frac{v}{c}cos\theta} \ (2),$$

где $(1): v = 335 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ (скорость звука); $f_{\text{набл.}}$ и $f_{\text{ист.}}$, $v_{\text{набл.}}$ и $v_{\text{ист.}}$ — частоты звуковых волн и скорости наблюдателя и источника соответственно; знак «+» ставится, если источник удаляется от наблюдателя; знак «-» ставится, если источник приближается к наблюдателя; (2): $c 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ (скорость света); v — скорость источника относительно приёмника (наблюдателя), θ — угол между направлениями на приёмник и вектором скорости в данной системе отсчёта [1].

С целью лучшего понимания эффекта Доплера, рассмотрим следующую задачу: «Поезд приближается к станции со скоростью 72 км/ч (20 м/с), издавая гудок частотой 500 Гц. Какую частоту услышит человек на платформе?» Учитывая, что человек неподвижен на платформе (т.е. скорость наблюдателя равна нулю) и скорость звука равна 335 метров в секунду, подставим значения в формулу (1): $f_{\text{набл.}} = \frac{335}{335-} \cdot 500 \approx 532(\text{Гц})$. Ответ: 532 Гц. Поскольку частота гудка на 32 Гц больше фактической, наблюдателю звук будет казаться «выше» по тональности, чем на самом деле. Данный пример подтверждает, что большинство людей регулярно сталкиваются с эффектом Доплера в быту.

В случае датчиков движения, передатчик излучает сигнал (СВЧ или ультразвук) в направлении зоны контроля. Если в этой зоне появляется движущийся объект, частота отражённого сигнала

изменяется. Приёмник фиксирует это изменение и преобразует его в электрический сигнал, активируя систему.

Доплеровские датчики движения применяются в следующих сферах:

1. Охранные системы: обнаружение вторжения на территорию, интеграция с камерами видеонаблюдения.
2. Умный дом и автоматизация: автоматическое включение света, управление климатическими системами [2].
3. Робототехника: навигация беспилотных устройств.
4. Транспортные системы: контроль скорости автомобилей (радары), датчики парковки.

В таблице 1 приведены типы доплеровских датчиков движения, их преимущества и недостатки.

Таблица 1 – Датчики движения, основанные на эффекте Доплера.

Тип	Принцип действия	Преимущества	Недостатки
Микроволновые (СВЧ) датчики	Используют излучение в диапазоне 1–60 ГГц (чаще всего 5,8 ГГц или 10 ГГц).	Высокая чувствительность к движению, работа сквозь неметаллические препятствия, устойчивость к температурным перепадам, использование уникальных частот, применение у животных, двойной сдвиг при отражении, зависимость от угла движения	Возможность ложных срабатываний, более высокая стоимость по сравнению с ИК-датчиками [3].
Ультразвуковые датчики	Работают на частотах 20–60 кГц, излучая и принимая отражённые звуковые волны.	Высокая эффективность в условиях запыленности и задымленности, менее подвержены влиянию тепловых помех	Ограниченная дальность действия, возможные воздействия на фауну (напр. летучие мыши).

Датчики движения, основанные на эффекте Доплера, демонстрируют высокие результаты в задачах бесконтактного обнаружения перемещений объектов различной природы. Эффективность обусловлена их уникальной способностью анализировать частотно-временные и фазовые характеристики отражённых сигналов с высокой степенью точности. Однако существующие технологические ограничения, такие как вероятность ложных срабатываний у СВЧ-датчиков при наличии электромагнитных наводок и относительно ограниченная дальность действия ультразвуковых аналогов (обычно не превышающая 10-15 метров), требуют комплексной оптимизации алгоритмов цифровой обработки сигналов и разработки гибридных решений, сочетающих доплеровскую технологию с другими методами детектирования (ИК-сенсорами, видеокамерами, т. н. «лидарами»).

Перспективные направления развития технологии связаны с глубокой интеграцией доплеровских датчиков в архитектуру интеллектуальных систем управления нового поколения, где они выступают в качестве критически важных элементов обратной связи для адаптивного регулирования параметров окружающей среды в реальном времени. Особый интерес представляет внедрение передовых методов машинного обучения и алгоритмов нейросетей для точной классификации типов движения (различение человека, животного, механизма) и эффективной минимизации шумовых составляющих сигнала. Параллельно с этим, освоение новых частотных диапазонов (в частности, т. н. «терагерцового» с длиной волны 0.1-1 мм) открывает принципиально новые возможности для применения в специализированных областях: медицинской диагностике (контроль микроциркуляции крови), прецизионных измерительных системах (с точностью до микрометров), а также в системах промышленной робототехники и автономного транспорта. Таким образом, стратегически важные направления дальнейших научно-исследовательских работ должны быть сфокусированы не только на устранении существующих технических ограничений, но и на кардинальном повышении информативности обнаруживаемых сигналов за счёт внедрения передовых методов обработки и многоспектрального анализа, что в полной мере позволит реализовать уникальный потенциал доплеровской технологии в условиях экспоненциально растущих требований к точности, надёжности и интеллектуальности современных автоматизированных систем различного назначения.

Список использованных источников:

1. Эффект Доплера – [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Доплера (Дата обращения: 02.04.2025)

2. Применение микроволновых датчиков движения в системах "умного дома" – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.elektro-expo.ru/ru/articles/24077/ (Дата обращения: 02.04.2025).

3. Микроволновый датчик движения: принцип работы – [Электронный ресурс]. – URL: https://samara-ohrana.ru/wiki/lichnaya-bezopasnost/mikrovolnovyy-datchik-dvizheniya-printsip-raboty/ (Дата обращения: 02.04.2025).