

УДК 681.586:629.7.058.54

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ДВИЖЕНИИ В СИСТЕМАХ НА БАЗЕ МИКРОВОЛНОВЫХ ДАТЧИКОВ RCWL-0516 И ОБЫЧНЫХ PIR-СЕНСОРОВ

А.О. ПУРУС, А.А. ГОЛУБЕВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: sasapurus@gmail.com, koniara602@gmail.com.

Аннотация. Проведён сравнительный анализ радиотехнической системы извлечения информации о движении на основе микроволнового датчика RCWL-0516 (эффект Доплера, 3,18 ГГц) и пассивной инфракрасной (PIR) системы. Разработана экспериментальная установка, включающая оба датчика и микроконтроллерную платформу с регистрацией откликов. Показано, что микроволновая система обеспечивает обнаружение через диэлектрические преграды (гипсокартон, стекло) с вероятностью правильного обнаружения 0,98 при ложной тревоге 0,02, в то время как PIR-сенсор не способен регистрировать движение за препятствиями и чувствителен к тепловым помехам. Результаты могут быть использованы при проектировании охраняемых и «умных» систем с повышенной скрытностью.

Abstract. A comparative analysis of a radio-technical motion information extraction system based on a microwave Doppler sensor RCWL-0516 (3.18 GHz) and a passive infrared (PIR) system is carried out. An experimental setup including both sensors and a microcontroller platform with response registration is developed. It is shown that the microwave system provides detection through dielectric barriers (drywall, glass) with a probability of correct detection of 0.98 and a false alarm rate of 0.02, while the PIR sensor cannot detect motion behind obstacles and is sensitive to thermal interference. The results can be used in the design of security and smart systems with increased stealth.

Введение

Задачи извлечения информации о наличии и параметрах движения объектов в контролируемом пространстве относятся к числу ключевых в радиотехнических системах охранной сигнализации, «умного дома», мониторинга помещений и робототехники [1]. Наиболее распространёнными массовыми решениями являются пассивные инфракрасные (PIR) датчики, реагирующие на изменение теплового поля. Однако они обладают принципиальными недостатками: не работают через преграды, чувствительны к тепловым засветкам и потоком воздуха [2].

Альтернативой выступают микроволновые (радиоволновые) доплеровские датчики, например RCWL-0516, работающие на частоте 3,18 ГГц. Такие системы реализуют радиотехнический метод извлечения информации об объекте на основе анализа частотного сдвига отражённого сигнала (эффект Доплера). Однако сравнительных количественных оценок их точности в одинаковых условиях по отношению к PIR-сенсорам в доступной литературе недостаточно.

Цель работы — экспериментальное сравнение вероятностных характеристик обнаружения движения двух типов систем: пассивной инфракрасной (HC-SR501) и микроволновой радиотехнической (RCWL-0516).

Методика эксперимента

Для проведения сравнительного анализа была собрана установка, включающая: контроллер Arduino Nano (опрашивает датчики по дискретным выходам с частотой 10 Гц), микроволновый модуль RCWL-0516 (автодинный тип, непрерывное излучение, полоса доплеровских частот 10–150 Гц) и PIR-датчик HC-SR501. Оба датчика размещались в одной точке наблюдения.

Эксперимент проводился в помещении 6×4 м. Использовались два режима:

1. **Прямая видимость** — человек движется в зоне чувствительности (2–5 м от датчиков).
2. **Работа через преграду** — между датчиками и объектом устанавливался лист гипсокартона (12,5 мм) или оконное стекло (4 мм).

Фиксировались: факт срабатывания (логическая «1» на выходе), задержка между моментом начала движения и срабатыванием, а также ложные срабатывания при отсутствии движения. Для каждого режима проведено по 100 тестов. В качестве показателя точности использовалась вероятность правильного обнаружения P_d при заданной вероятности ложной тревоги P_{fa} .

Доплеровский сдвиг частоты для движущегося объекта рассчитывался по формуле:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta,$$

где v — скорость объекта, λ — длина волны (для 3,18 ГГц $\lambda \approx 0,094$ м), θ — угол между направлением движения и радиолучом.

Результаты и их анализ

В табл. 1 представлены полученные экспериментальные данные.

Таблица 1. Результаты сравнительного тестирования PIR и микроволновой систем

Условия эксперимента	PIR (HC-SR501)	Микроволновый радар (RCWL-0516)
Прямая видимость, P_d	0,95	0,98
Прямая видимость, P_{fa}	0,04	0,02
Задержка срабатывания, мс (прямая видимость)	320 ± 50	40 ± 10
Сквозь гипсокартон, P_d	0,00 (не обнаруживает)	0,96
Сквозь стекло, P_d	0,00 (не обнаруживает)	0,94
Ложные срабатывания от потока воздуха (вентилятор)	0,42	0,01

Как видно из табл. 1, в условиях прямой видимости обе системы демонстрируют высокую вероятность обнаружения, однако микроволновая система превосходит PIR по скорости реакции (40 мс против 320 мс) и имеет вдвое меньший уровень ложных тревог.

При наличии диэлектрической преграды PIR-сенсор полностью теряет работоспособность, поскольку инфракрасное излучение не проникает через непрозрачные материалы. Микроволновая система сохраняет возможность извлечения информации о движении: радиоволна частотой 3,18 ГГц свободно проходит через гипсокартон и стекло, отражаясь от человека. Вероятность правильного обнаружения снижается незначительно — до 0,94–0,96.

Ключевое различие также проявилось при воздействии тепловых и воздушных помех (вентилятор, кондиционер). PIR-система давала ложные тревоги в 42% случаев, тогда как микроволновый датчик практически не реагирует на изменение температуры и потока воздуха.

Характер сигнала радиолокационной системы содержит доплеровскую составляющую, что позволяет дополнительно извлекать информацию о скорости объекта. Например, при движении человека со скоростью 1 м/с под углом $\theta = 0$ доплеровский сдвиг составляет:

$$f_d = \frac{2 \cdot 1}{0,094} \approx 21,3 \text{ Гц.}$$

Эта частота легко выделяется с помощью простого аналогового фильтра или БПФ на микроконтроллере.

Заключение

В результате сравнительного анализа установлено, что радиотехническая система извлечения информации о движении на микроволновом датчике RCWL-0516:

1. Обеспечивает обнаружение движения сквозь диэлектрические преграды (гипсокартон, стекло), где PIR-система неработоспособна.
2. Показывает в 8 раз меньшую задержку срабатывания и вдвое меньший уровень ложных тревог в условиях прямой видимости.
3. Практически не подвержена ложным срабатываниям от тепловых и воздушных помех.
4. Позволяет извлекать дополнительную информацию о скорости объекта по частоте Доплера.

Таким образом, для задач, требующих скрытности, работы за преградами и высокой помехоустойчивости, микроволновая радиотехническая система является предпочтительной. PIR-датчики могут быть рекомендованы только для простых условий прямой видимости с минимальными требованиями к задержке.

Список использованных источников

1. Горбатов, К. Решение «Альфа-прибор» для измерения скорости железнодорожных составов / К. Горбатов, В. Логинов, Ю. Котенев // СВЧ-электроника. — 2020. — №3. — С. 10-16.
2. Прудников, А.Д. Микроволновые доплеровские датчики движения: принципы работы и применение / А.Д. Прудников // Датчики и системы. — 2018. — №5. — С. 22–27.
3. Bistromatics. RCWL-0516 Microwave Radar Motion Sensor Datasheet. – 2017. – 9 p.
4. HC-SR501 PIR Motion Sensor Datasheet. – 2015. – 7 p.
5. Бородин, В.Г. Радиотехнические системы извлечения информации: учеб. пособие / В.Г. Бородин. – М.: Радиотехника, 2019. – 240 с.