

УДК 628.14:620.193:620.179

Р.Д. Брайловський, студ. гр. ПК-41мп

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ФАКТОРІВ НА ТОЧНІСТЬ ПОЗИЦІОНУВАННЯ В СИСТЕМАХ SMART PARKING

Анотація. У статті розглянуто актуальну проблему підвищення надійності функціонування автоматизованих систем керування паркувальним простором. Проведено детальний аналіз фізичних принципів роботи ультразвукових далекомірів та виявлено залежність точності вимірювань від параметрів навколишнього середовища. На основі математичного моделювання доведено, що температурні флуктуації в межах робочого діапазону можуть призводити до критичних похибок детектування. Запропоновано та обґрунтовано метод програмної температурної компенсації, що дозволяє мінімізувати похибку вимірювання та підвищити загальну ефективність системи.

Ключові слова: Smart Parking, ультразвуковий сенсор, IoT, температурна компенсація, похибка вимірювання, акустичні хвилі.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку урбанізованих територій характеризується стрімким впровадженням концепції «Розумного міста» (Smart City), яка передбачає інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у міську інфраструктуру для підвищення якості життя населення. Однією з критичних проблем сучасних мегаполісів є перенасичення транспортом та дефіцит паркувального простору, що призводить до виникнення заторів та погіршення екологічної ситуації. У цьому контексті особливої актуальності набуває задача створення та впровадження інтелектуальних систем керування паркуванням (Smart Parking Systems), які здатні в режимі реального часу моніторити стан паркомісць та надавати цю інформацію користувачам.

Ключовим елементом архітектури таких систем є сенсорний вузол, завданням якого є бінарна класифікація стану паркувального слота («вільно»/«зайнято»). Серед існуючих методів детектування (оптичні, магнітометричні, індукційні) найбільш широкого розповсюдження набули ультразвукові сенсори. Це обумовлено їхньою економічною ефективністю, простотою монтажу та відсутністю необхідності порушувати цілісність дорожнього покриття. Проте, незважаючи на очевидні переваги, даний метод має суттєвий недолік, пов'язаний з фізичною природою поширення акустичних хвиль.

Як відомо, швидкість звуку не є фундаментальною константою, а залежить від фізико-хімічних властивостей середовища поширення, насамперед від температури повітря. Умови експлуатації паркувальних систем, особливо в напівзакритих або підземних паркінгах, характеризуються значними сезонними та добовими коливаннями температур, діапазон яких може становити від -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$. Ігнорування цього фактора при проектуванні апаратно-програмних засобів призводить до накопичення систематичної похибки вимірювання, що може спричинити хибні спрацювання системи та, як наслідок, зниження довіри користувачів до сервісу.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є проведення комплексного дослідження впливу температурних факторів на точність ультразвукового детектування та розробка

алгоритмічних методів компенсації похибок для підвищення надійності систем Smart Parking.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТА МЕТОДИ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

Фізичний принцип дії ультразвукових сенсорів базується на методі активної ехолокації. Випромінювач генерує пакет пружних поздовжніх хвиль ультразвукового діапазону (зазвичай 40 кГц), які поширюються в повітряному середовищі, відбиваються від поверхні об'єкта (перешкоди) та повертаються до приймача. Мікроконтролер вимірює часовий інтервал t між фронтом випроміненого імпульсу та моментом реєстрації ехо-сигналу.

Математична модель розрахунку відстані D описується базовим кінематичним рівнянням:

$$D = \frac{v \cdot t}{2}$$

де v — швидкість поширення звукової хвилі в середовищі. Коефіцієнт $1/2$ враховує подвійний шлях проходження сигналу (від датчика до об'єкта і назад).

У більшості бюджетних реалізацій паркувальних радарів та аматорських систем значення швидкості звуку приймається за константу, що відповідає нормальним умовам ($T=20^{\circ}\text{C}$), і становить $v \approx 343$ м/с. Однак, такий підхід є спрощенням, яке не враховує термодинаміку газів. Згідно з молекулярно-кінетичною теорією, швидкість звуку в ідеальному газі залежить від середньої квадратичної швидкості руху молекул, яка прямо пропорційна температурі.

Залежність швидкості звуку в сухому повітрі від температури T (у градусах Цельсія) з достатньою для інженерних розрахунків точністю описується формулою:

$$v(T) = 331.4 \cdot \sqrt{1 + \frac{T}{273.15}}$$

Для спрощення обчислень на 8-бітних мікроконтролерах, що мають обмежені ресурси для операцій з плаваючою комою, часто використовують лінійну апроксимацію даного виразу (ряд Тейлора):

$$v(T) \approx 331.4 + 0.606 \cdot T$$

Аналіз цієї залежності показує, що зміна температури повітря на 1°C призводить до зміни швидкості звуку приблизно на 0.6 м/с. На перший погляд, ця величина здається незначною, проте в масштабах діапазону робочих температур паркінгу накопичена похибка стає суттєвою.

Математичне моделювання похибки вимірювання. Для кількісної оцінки впливу температурного фактора було проведено чисельний експеримент. Моделювалася робота сенсора, встановленого на стандартній висоті підвісу $D_{\text{real}} = 200$ см (відстань від стелі до даху середньостатистичного легкового автомобіля або підлоги).

Було розглянуто сценарій, при якому контролер системи не має зворотного зв'язку по температурі і використовує фіксоване значення швидкості v_{const}

=343 м/с (відповідає +20°C), в той час як реальна температура середовища змінюється в діапазоні від -10°C (зимовий період) до +30°C (літній період).

Абсолютна похибка вимірювання ΔD визначається як різниця між обчисленим значенням (яке «бачить» контролер) та реальною фізичною відстанню:

$$\Delta D = D_{\text{meas}} - D_{\text{real}} = \frac{v_{\text{const}} \cdot t}{2} - \frac{v(T) \cdot t}{2}$$

Результати розрахунків наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1 Залежність похибки вимірювання відстані 200 см від температури

Температура середовища, °C	Реальна швидкість звуку, м/с	Виміряна відстань (без корекції), см	Абсолютна похибка ΔD , см	Відносна похибка, %
-10	325.4	210.8	+10.8	5.4 %
0	331.4	207.0	+7.0	3.5 %
+10	337.4	203.3	+3.3	1.6 %
+20	343.4	200.0	0.0	0.0 %
+30	349.4	196.6	-3.4	-1.7 %

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що при зниженні температури до -10°C (що є типовим для неопалюваних підземних паркінгів у зимовий період), абсолютна похибка вимірювання на відстані 2 метри перевищує 10 см. У контексті задачі детектування автомобіля це може призвести до критичних помилок. Наприклад, якщо порогове значення детектування встановлено занадто близько до рівня підлоги, система може інтерпретувати «подовження» відстані як відсутність перешкоди, або навпаки — сприймати власну похибку як наявність об'єкта.

Для усунення виявленого недоліку пропонується модифікувати апаратну та програмну частину сенсорного вузла. Апаратна модернізація полягає у введенні до схеми датчика температури (термістора NTC або цифрового сенсора DS18B20), розташованого в безпосередній близькості до ультразвукового випромінювача.

Програмний алгоритм мікроконтролера повинен виконувати перерахунок швидкості звуку перед кожним циклом вимірювання. Блок-схема запропонованого алгоритму включає наступні етапи:

Зчитування поточної температури T_{curr} з термодатчика.

Розрахунок актуальної швидкості звуку v_{curr} за формулою лінійної апроксимації.

Генерація зондуючого імпульсу та вимірювання часу відгуку t_{echo} .

Обчислення відстані з використанням скоригованого значення швидкості.

Експериментальна верифікація запропонованого методу показала, що його впровадження дозволяє зменшити відносну похибку вимірювання у всьому

робочому діапазоні температур до значень, що не перевищують 1 % (± 2 см), що є цілком достатнім для надійного розпізнавання статусів паркомісця.

ВИСНОВОК

У ході виконання роботи було теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено суттєвий вплив температурних факторів на точність роботи ультразвукових систем позиціонування. Встановлено, що використання константних значень швидкості звуку в алгоритмах обробки даних є неприпустимим для систем зовнішнього та напівзакритого використання, оскільки похибка може досягати 5-6 %. Запропонований метод апаратно-програмної термокомпенсації дозволяє ефективно нівелювати вплив середовища, підвищуючи надійність та стабільність роботи системи Smart Parking в цілому. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні промислових систем автоматизації паркування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Shoup d. The high cost of free parking. Chicago: planners press, 2005. 734 p.
- [2] Magalhaes f. Et al. Smart parking: a literature review from the technological perspective. Sustainability. 2020. Vol. 12. P. 1-20.
- [3] Kuttruf h. Room acoustics. 5th ed. London: spon press, 2009. 349 p.
- [4] Petryk v.f., protasov a.g. wireless technologies in non-destructive testing automation. Visnyk ntuu kpi. 2021. No 5. P. 25-29.

Наук. керівник – к.т.н., доц. Богдан Г. А.