

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Савочкін Дмитро Олександрович

УДК 621.396.96

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ПРОСТОРОВОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ
НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ РАДІОЧАСТОТНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ**

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Севастопольському національному технічному університеті.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гімпілевич Юрій Борисович
Севастопольський національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки та телекомунікацій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Величко Анатолій Федорович
Інститут радіофізики і електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України,
завідувач відділу обробки радіосигналів

доктор технічних наук, професор
Лошаков Валерій Андрійович
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри телекомунікаційних систем

Захист відбудеться «6» жовтня 2015 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 66061, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 66061, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розіслано «__» _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В багатьох областях людської діяльності є потреба в системах безконтактної двовимірної локалізації об'єктів у закритих просторах. Такі системи знаходять використання при пошуку і відстеженні об'єктів усередині приміщень, наприклад, товарів на складах, книг у бібліотеках, працівників на підприємствах, пацієнтів у лікарнях та ін.

Перспективним напрямом просторової локалізації в закритих приміщеннях є застосування технології радіочастотної ідентифікації (radio frequency identification, RFID). При цьому на об'єктах локалізації встановлюють спеціальні пасивні RFID-мітки, місцеположення яких визначається шляхом аналізу вимірювальної інформації (VI), що одержується від міток за допомогою декількох антен RFID-системи. Отримання VI відбувається по радіоканалу, а у її ролі найчастіше виступають рівні потужності сигналів відповіді міток.

Для обробки VI застосовуються різні методи локалізації. Одним з методів, що забезпечують високу точність локалізації, є трилатераційний (далекомірний) метод. Однак цей метод вимагає наявності достатньо точної моделі залежності відстані від інформаційного параметру сигналу, причому параметри моделі визначаються на попередньому етапі. Актуальною задачею є вдосконалення трилатераційного методу для виключення необхідності в проведенні попереднього етапу, а також додаткового підвищення точності локалізації шляхом урахування можливої еліптичності ліній положення та обробки VI у вигляді фактів неотримання сигналів відповіді від міток.

Проведений аналіз літератури виявив ряд способів, що дозволяють з метою підвищення точності одночасно оброблювати VI декількох видів або об'єднувати декілька алгоритмів локалізації (синтезованих на базі різних методів). Однак у літературі не представлені способи одночасного об'єднання і видів VI, і алгоритмів локалізації. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки нового комбінованого методу локалізації, що дозволяє об'єднувати алгоритми різних типів, які обробляють VI різних видів, що одержується при випромінюванні запитальних сигналів з різними потужностями.

Розробка комбінованого методу призводить до постановці задачі пошуку оптимального розміщення антен RFID-системи. Така задача вирішувалася раніше для інших методів локалізації, проте отримані при цьому рішення не є найкращими для нового комбінованого методу. Тому актуальною задачею є розробка методики пошуку оптимального розміщення антен, що мінімізує середню помилку комбінованого методу, заснованого на алгоритмах трилатерації, відбитків та перетинів.

Для порівняння точності локалізації, яка забезпечується при реалізації різних методів, зазвичай проводять натурні експерименти, що може вимагати значних часових та матеріальних витрат. Скорочення трудовитрат при проведенні натурних досліджень можливе шляхом проведення попередніх модельних експериментів. У зв'язку з цим актуальною задачею є розробка методики імітаційного моделювання процесу отримання VI різних видів від пасивних RFID-міток.

Для отримання фазової VI від пасивних міток та її подальшої обробки з метою підвищення точності локалізації може застосовуватися блок квадратурного перетво-

рення, що є елементом рідера RFID-системи. Актуальною задачею є розробка методики верифікації такого блоку за допомогою спеціальних тестових сигналів, що подаються на його входи.

Таким чином, все вищесказане підтверджує актуальність теми дисертаційного дослідження, яке спрямоване на розвиток методів двовимірної просторової локалізації на базі RFID-технології з метою підвищення точності локалізації об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційного дослідження були використані при виконанні науково-дослідної роботи за договором про міжнародне співробітництво від 25 грудня 2012 р. між Севастопольським національним технічним університетом та компанією ERACTS Inc. (м. Торонто, Канада) на тему «Розробка методів і алгоритмів радіочастотної ідентифікації, що забезпечують локалізацію об'єктів у просторі» та держбюджетної науково-дослідної роботи «Дослідження амплітудно-фазових флуктуацій мікрохвильових електромагнітних полів у нижніх шарах атмосфери та методів дистанційного зондування» (шифр «Метеор», № державної реєстрації 0112U001247), які виконувалися на кафедрі радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету. Здобувач був виконавцем у цих роботах.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення точності двовимірної просторової локалізації об'єктів на базі технології радіочастотної ідентифікації.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- удосконалюється трилатераційний метод двовимірної просторової локалізації з урахуванням використання пасивних RFID-міток та антен з еліптичними зонами дії, а також обробки ВІ у вигляді фактів неотримання сигналів відповіді від міток за допомогою деяких антен;

- розробляється комбінований метод двовимірної просторової RFID-локалізації, який об'єднує алгоритми локалізації точкового і зонного типів, що обробляють ВІ різних видів, одержувану при випромінюванні запитальних сигналів на декількох рівнях потужності;

- розробляється методика пошуку оптимального розміщення антен RFID-системи двовимірної просторової локалізації, що мінімізує середню помилку комбінованого методу локалізації, та проводиться пошук оптимальних розміщень для деяких варіантів області локалізації;

- розробляється математична модель процесу отримання ВІ від пасивної RFID-мітки та методика імітаційного моделювання на основі цієї моделі;

- розробляється методика верифікації блоку квадратурного перетворення, виготовляється зразок блоку та експериментально перевіряється правильність методики;

- розробляється програмний комплекс для імітаційного моделювання ВІ, обчислення оцінок місцеположення RFID-міток та аналізу даних;

- проводяться модельні дослідження методів просторової локалізації та запропонованого критерію оптимальності розміщення антен з використанням розробленого програмного комплексу;

- проводяться експериментальні дослідження методів просторової локалізації на основі виготовленої RFID-системи з подальшим порівнянням отриманих результатів із модельними.

Об'єкт дослідження – процеси радіочастотної ідентифікації та локалізації об'єктів у просторі.

Предмет дослідження – методи двовимірної просторової локалізації об'єктів на базі технології радіочастотної ідентифікації, моделі процесів отримання й обробки вимірювальної інформації від пасивних RFID-міток.

Методи дослідження. У роботі використані наступні методи: теорія радіотехнічних систем – при вдосконаленні трилатераційного методу просторової локалізації та розробці математичної моделі процесу верифікації блоку квадратурного перетворення; методи теорії ймовірностей, математичної статистики і машинного навчання – при розробці комбінованого методу просторової локалізації; методи оптимізації – при розробці методики пошуку оптимального розміщення антен; методи математичного моделювання – при розробці математичної моделі процесу отримання вимірювальної інформації від RFID-міток і методики імітаційного моделювання; методи проведення експериментів і обробки результатів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– Удосконалено трилатераційний метод двовимірної просторової локалізації пасивних RFID-міток, який відрізняється тим, що він заснований на використанні прямої або зворотної нормованої пропорційної залежності відстані від інформаційного параметру, враховує еліптичність ліній положення та передбачає використання додаткової вимірювальної інформації у вигляді фактів неотримання сигналів відповіді від міток за допомогою деяких антен RFID-системи.

– Вперше розроблено комбінований метод двовимірної просторової RFID-локалізації, який, на відміну від існуючих, забезпечує підвищення точності локалізації за рахунок об'єднання алгоритмів локалізації точкового і зонного типів, що обробляють вимірювальну інформацію різних видів, одержувану при випромінюванні запитальних сигналів з різними потужностями.

– Вперше розроблено критерій оптимальності розміщення антен RFID-системи двовимірної просторової локалізації, який, на відміну від існуючих, передбачає мінімізацію середньої помилки комбінованого методу локалізації, заснованого на об'єднанні алгоритмів трилатерації, відбитків і перетинів.

– Вперше розроблено математичну модель процесу отримання вимірювальної інформації видів proximity, received signal strength та identification rate від пасивної RFID-мітки, яка відрізняється тим, що вона базується на модифікованій основній формулі радіолокації і враховує кореляцію між вимірювальною інформацією видів received signal strength та identification rate.

– Вперше розроблено математичну модель процесу верифікації блоку квадратурного перетворення, що виділяє фазову вимірювальну інформацію з сигналів відповіді пасивних RFID-міток, яка відрізняється тим, що вона передбачає подачу тестових гармонічних сигналів на входи блоку.

Практичне значення отриманих результатів:

– Практична реалізація вдосконаленого трилатераційного методу двовимірної просторової локалізації пасивних RFID-міток дозволяє виключити трудомісткий етап попереднього збору ВІ, який має на меті уточнення залежності відстані від інформаційного параметру, та зменшити середню помилку локалізації.

– Практична реалізація розробленого комбінованого методу двовимірної просторової локалізації дозволяє зменшити середню помилку локалізації RFID-міток у порівнянні з одиночними точковими методами, на яких заснований комбінований метод. При об'єднанні трьох точкових і трьох зонних алгоритмів, що обробляють ВІ видів proximity, received signal strength та identification rate, отриману на кількох потужностях запитальних сигналів, зменшення середньої помилки може скласти більше 14%, що підтверджується експериментально.

– Розроблена методика пошуку оптимального розміщення антен RFID-системи може використовуватися при плануванні розташування основних блоків системи з метою мінімізації середньої помилки локалізації, що досягається при реалізації комбінованого методу локалізації.

– Методика імітаційного моделювання, що реалізована на основі розробленої математичної моделі процесу отримання ВІ від пасивної RFID-мітки, дозволяє порівнювати точність різних методів просторової локалізації для довільних областей локалізації на стадії проектування.

– Розроблений і виготовлений блок квадратурного перетворення може використовуватися як елемент рідера RFID-системи просторової локалізації або радара із ступінчастою частотною модуляцією. Створена на базі розробленої математичної моделі методика верифікації дозволяє перевіряти працездатність блоку.

– Результати дисертаційної роботи впроваджено в компанії LEADS Inc. (м. Торонто, Канада) і конструкторському бюро «Радіозв'язок» ТОВ «Телекарт-Прилад» (м. Севастополь, Україна). Також результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів та висновків обумовлені коректним використанням математичного апарату, проведенням імітаційного моделювання на базі розробленого програмного комплексу, проведенням експериментальних досліджень на базі виготовленої системи RFID-локалізації та відсутністю протиріччя між отриманими результатами.

Особистий внесок здобувача. Всі представлені в дисертації наукові та прикладні результати отримані автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний: [1] – проведено класифікацію та порівняльний аналіз методів просторової локалізації та видів ВІ; [3] – удосконалено трилатераційний метод просторової локалізації; [4, 27] – розроблено критерій оптимальності розміщення антен RFID-системи (в [4] також проведена адаптація евристичних алгоритмів до задачі оптимізації, що розглядається); [5] – розроблено методику верифікації блоку квадратурного перетворення; [6, 9, 14, 19] – розроблено комбінований метод просторової локалізації; [7, 15] – запропоновано використання ВІ у вигляді інтегрального identification rate; [8] – запропоновано модель прямокутної зони дії антен RFID-системи; [10] – розроблено блок квадратурного перетворення; [16] – виконано експериментальний аналіз чотирьох алгоритмів просторової локалізації; [18] – запропоновано підхід до об'єднання зонних алгоритмів просторової локалізації; [24] – розроблено алгоритми просторової локалізації та обробки ВІ; [25] – розроблено методику імітаційного моделювання процесу отримання ВІ від RFID-міток.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації представлені на 19 конференціях та форумах, що проводилися в Україні, Білорусі, Росії, Польщі та Фінляндії: 7-й, 9-й і 10-й Міжнародних молодіжних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» (Севастополь, 2011, 2013, 2014); Міжнародних науково-технічних конференціях «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (Київ, 2013, 2015); 17-му, 18-му і 19-му Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті» (Харків, 2013–2015); 23-й і 24-й Міжнародних кримських конференціях «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології «КриМіКо» (Севастополь, 2013–2014); 9-й Міжнародній конференції «Antenna theory and techniques» (Одеса, 2013); Міжнародній науковій конференції «Інформаційні технології і системи» (Мінськ, 2013); 20-й Міжнародній науково-технічній конференції студентів і аспірантів «Радіоелектроніка, електротехніка та енергетика» (Москва, 2014); Міжнародній науково-технічній конференції, приуроченої до 50-річчя МРТІ-БДУІР (Мінськ, 2014); Міжнародній науково-технічній конференції «Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science» (Львів-Славське, 2014); Всеросійській науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки» (Красноярськ, 2014); 20-й Міжнародній конференції «Microwaves, radar and wireless communications» (Гданськ, 2014); Міжнародній IEEE конференції «RFID technology and applications» (Тампере, 2014); 9-й Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (Київ, 2015).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 30 друкованих робіт: 3 статті в спеціалізованих фахових виданнях МОН України [1-3]; 1 стаття у фаховому виданні, яке включене до затвердженого переліку ВАК Білорусі [4]; 1 стаття в іноземному журналі англійською мовою, що індексується в наукометричній базі Scopus [5]; 1 патент України на винахід [6]; 3 патенти України на корисні моделі [7-9]; 21 стаття і тези доповідей у матеріалах міжнародних і національних конференцій [10-30]. Загальне число робіт, проіндексованих у наукометричній базі Scopus, – 7.

Структура дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 206 сторінок, у тому числі 40 рисунків, 13 таблиць, чотири додатка на 37 сторінках, список зі 128 використаних джерел на 15 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації – 147 сторінок. У додатки включено вивід виразу для розрахунку еліптичного коефіцієнту, фрагменти початкового коду розробленого програмного комплексу, методику розрахунку довірчого інтервалу для середнього значення релеєвського розподілу та акти впровадження результатів роботи.

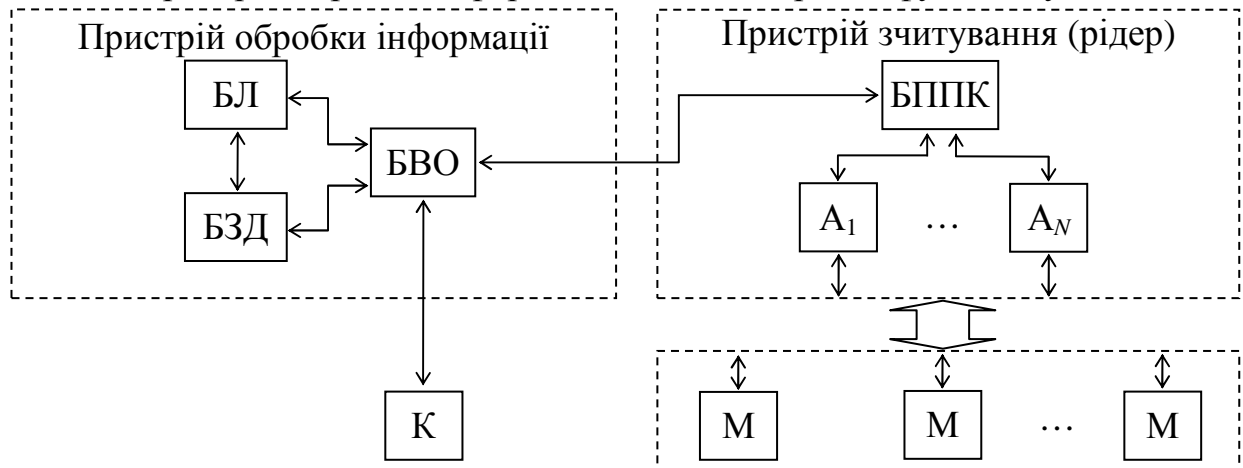
ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформовані мета і задачі дослідження. Охарактеризовано наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів. Зазначено дані про особистий внесок автора, апробацію результатів та публікації за темою дисертації. Наведено структуру дисертації та анотацію її розділів.

У **першому розділі** проведено огляд технологій, що можуть використовуватися для синтезу систем просторової локалізації об'єктів. Встановлено, що RFID-технологія з використанням пасивних міток, функціонуючих у стандартизованому

частотному діапазоні 860...960 МГц, є найкращою з точки зору мінімізації вартості впровадження при вирішенні задачі двовимірної просторової локалізації великої кількості об'єктів усередині закритих приміщень.

Наведено структуру типової RFID-системи локалізації (рис. 1) і показано, що її основними елементами є пристрій зчитування (рідер), до складу якого входять кілька антен, та пристрій обробки інформації. Описано процес функціонування системи.



К – користувач; БЛ – блок локалізації; БЗД – блок збереження даних;
 БВО – блок взаємодії та обробки; БППК – блок передачі, прийому і комутації;
 $A_1...A_N$ – антени; М – RFID-мітки

Рис. 1. Структура типової RFID-системи для просторової локалізації

Проведено аналіз видів вимірювальної інформації, що одержується від RFID-міток за допомогою кількох антен. Визначено, що ВІ у вигляді факту відповіді мітки (proximity), рівня потужності сигналу відповіді (received signal strength, RSS) та співвідношення числа отриманих відповідей до числа посланих запитів (identification rate, IR) доступна практично у всіх реалізаціях RFID-рідерів.

Наведено поняття зони дії деякої антени RFID-системи як такої області простору, що при розміщенні в ній RFID-міток, їхні сигнали відповіді приймаються за допомогою антени, а при розміщенні поза цією зоною – не приймаються.

Виконано порівняльний аналіз методів просторової локалізації та визначено методи, що забезпечують найбільшу точність локалізації. Запропоновано класифікувати методи локалізації по типу оцінок місцеположення, що формуються, на точкові та зонні. Результатом роботи точкових методів є оцінка координат місцеположення RFID-мітки, а результатом роботи зонних – вектор ймовірностей знаходження мітки в кожній із зон, на які попередньо розбито область локалізації.

Встановлено, що точність локалізації істотним чином залежить від розміщення антен рідера RFID-системи. Розглянуто ряд підходів до рішення задачі оптимального розміщення антен та визначено їх основні недоліки.

Другий розділ присвячено вдосконаленню трилатераційного та розробці комбінованого методів двовимірної просторової локалізації. Для трилатераційного методу локалізації запропоновано задати функцію відстані від інформаційного параметра сигналу у вигляді прямої або зворотної (залежно від виду ВІ) нормованої пропорційної залежності для виключення попереднього етапу збору ВІ. Передбачається, що при локалізації пасивних RFID-міток, призначених для роботи на малих відста-

нях, таке спрощення не призведе до суттєвого погіршення в точності локалізації (дане припущення підтверджується експериментально). З іншого боку для збільшення точності запропоновано враховувати можливу еліптичність ліній положення і використовувати ВІ у вигляді фактів неотримання відповідей від міток шляхом введення спеціальних коефіцієнтів у вирази для розрахунку оцінок місцеположення міток. При цьому оцінки \hat{l}_{RSS} та \hat{l}_{IR} місцеположення деякої RFID-мітки для ВІ видів RSS та IR записуються наступним чином:

$$\hat{l}_{RSS} = \arg \min_l \left\{ \sum_{n \in q} \left[d_n - d_0 \frac{\omega_{RSS,n} - \omega_{RSS,max}}{\omega_{RSS,0} - \omega_{RSS,max}} \frac{k(\varphi_n)}{k(\varphi_0)} \right]^2 + \sum_{n' \in q_a \setminus q} f_p(d_{n'}) \right\}; \quad (1)$$

$$\hat{l}_{IR} = \arg \min_l \left\{ \sum_{n \in q} \left[d_n - d_0 \frac{\omega_{IR,0}}{\omega_{IR,n}} \frac{k(\varphi_n)}{k(\varphi_0)} \right]^2 + \sum_{n' \in q_a \setminus q} f_p(d_{n'}) \right\}, \quad (2)$$

де l – точка поточної ітерації циклу обчислення оцінки; q – множина номерів антен RFID-системи, за допомогою яких прийняті сигнали від мітки; d_n – відстань між n -ю антеною та точкою l (у двовимірній площині локалізації); d_0 – відстань між опорною антеною і точкою l (під опорною антеною розуміється та антена, за допомогою якої від мітки отримано найбільше значення інформаційного параметра); $\omega_{RSS,n}$, $\omega_{IR,n}$ – значення RSS та IR, отримані від мітки за допомогою n -ї антени, відповідно; $\omega_{RSS,0}$, $\omega_{IR,0}$ – значення RSS та IR, отримані від мітки за допомогою опорної антени, відповідно; $\omega_{RSS,max}$ – максимально можливе значення RSS; $k(\varphi_n)$, $k(\varphi_0)$ – еліптичні коефіцієнти для азимутів φ_n і φ_0 на точку l відносно точок a_n і a_0 розміщення n -ї та опорної антен, відповідно; $q_a = \{1, \dots, N\}$ – множина номерів усіх антен системи; N – загальне число антен; $f_p(d_{n'})$ – штрафна функція.

Еліптичний коефіцієнт $k(\varphi)$ для деякого азимута φ враховує можливу еліптичність зон дії антен, що призводить до викривлення ліній положення до еліптичної форми:

$$k(\varphi) = \frac{f_e}{\sqrt{f_e^2 + \cos(\varphi - \psi)^2 (1 - f_e^2)}}, \quad (3)$$

де f_e – відношення довжин великої та малої півосей еліпсів зон дії антен; ψ – кут повороту еліпсів зон дії відносно деякого початкового напрямку.

Штрафна функція $f_p(d_{n'})$ для відстані $d_{n'}$ між n' -ю антеною та точкою l вводить для врахування ВІ у вигляді фактів неотримання відповідей від міток. Використання штрафної функції призводить до збільшення значення виразів, що мінімізуються в (1) і (2), для тих точок l , які знаходяться поряд із точками розміщення антен, за допомогою яких не прийняті сигнали від мітки. Така функція задається як

$$f_p(d_{n'}) = \begin{cases} [a_e k(\varphi_{n'}) - d_{n'}]^2 & \text{якщо } d_{n'} < a_e k(\varphi_{n'}); \\ 0 & \text{якщо } d_{n'} \geq a_e k(\varphi_{n'}), \end{cases} \quad (4)$$

де a_e – довжина малої півосі еліптичної зони дії n' -ї антени.

Розроблено трилатераційні евристичні процедури для оцінювання місцеположення тих міток, відповіді яких отримані тільки за допомогою однієї або двох антен.

На наступному етапі дослідження розроблено комбінований метод двовимірної просторової локалізації RFID-міток, який дозволяє об'єднувати точкові та зонні алгоритми локалізації, що обробляють ВІ різних видів, одержувану при випромінюванні запитальних сигналів на різних потужностях. Результуюча оцінка \hat{l} місцеположення мітки при використанні такого методу записується наступним чином:

$$\hat{l} = \frac{1}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M w(\hat{l}_{i,j,m}) \hat{p}(\hat{l}_{i,j,m})} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M w(\hat{l}_{i,j,m}) \hat{p}(\hat{l}_{i,j,m}) \hat{l}_{i,j,m}, \quad (5)$$

де I – число використовуваних видів ВІ; J – число використовуваних рівнів потужності; M – число використовуваних точкових алгоритмів; $w(\hat{l}_{i,j,m})$ – ваговий коефіцієнт; $\hat{p}(\hat{l}_{i,j,m})$ – ймовірність знаходження мітки в точці $\hat{l}_{i,j,m}$; $\hat{l}_{i,j,m}$ – оцінка місцеположення мітки, сформована m -м точковим алгоритмом шляхом обробки ВІ i -го виду, отриманої при випромінюванні запитальних сигналів з j -ю потужністю.

Запропоновано два варіанти формування вагових коефіцієнтів $w(\hat{l}_{i,j,m})$ залежно від можливості проведення додаткового попереднього калібрувального етапу (з використанням спеціальних калібрувальних RFID-міток, що розміщуються на відомих позиціях). При реалізації першого варіанту процедури локалізації (без калібрувального етапу) коефіцієнт $w(\hat{l}_{i,j,m})$ задається як

$$w(\hat{l}_{i,j,m}) = w_1(\hat{l}_{i,j,m}) w_2(m, N_j), \quad (6)$$

де $w_1(\hat{l}_{i,j,m})$ – ваговий коефіцієнт близькості оцінки $\hat{l}_{i,j,m}$ до середнього всіх сформованих точкових оцінок; $w_2(m, N_j)$ – ваговий коефіцієнт апріорної точності m -го точкового алгоритму локалізації, що забезпечується при локалізації міток, сигнали від яких прийняті за допомогою N_j антен; N_j – кількість антен, за допомогою яких отримані відповіді від мітки, що локалізується, при використанні j -ї потужності.

Ваговий коефіцієнт $w_1(\hat{l}_{i,j,m})$ дозволяє зменшити вплив аномальних оцінок при усередненні та задається у вигляді кусочно-лінійної функції:

$$w_1(\hat{l}_{i,j,m}) = \begin{cases} 1 \text{ якщо } d_c(\hat{l}_{i,j,m}) \leq d_{\min}; \\ 1 - \frac{d_c(\hat{l}_{i,j,m}) - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \text{ якщо } d_{\min} < d_c(\hat{l}_{i,j,m}) < d_{\max}; \\ 0 \text{ якщо } d_c(\hat{l}_{i,j,m}) \geq d_{\max}, \end{cases} \quad (7)$$

де $d_c(\hat{l}_{i,j,m})$ – відстань від точки $\hat{l}_{i,j,m}$ до середнього всіх сформованих точкових оцінок; d_{\min} – радіус такого кола з центром у точці середнього всіх точкових оцінок, що оцінки, які лежать всередині нього, враховуються при усередненні повністю; d_{\max} – радіус такого кола з центром у точці середнього всіх точкових оцінок, що оцінки, які лежать поза ним, не враховуються при усередненні.

Ваговий коефіцієнт $w_2(m, N_j)$ враховує відомі апріорно дані про алгоритми. Цей коефіцієнт вибирається зі сформованої попередньо таблиці точності алгоритмів.

При реалізації другого варіанту процедури локалізації (з калібрувальним етапом) коефіцієнт $w_2(m, N_j)$ замінюється коефіцієнтом $w_2(i, j, m, N_j)$ апостеріорної точності. Такий коефіцієнт враховує точність, що забезпечується при використанні m -го точкового алгоритму, i -го виду ВІ та j -ї потужності запитальних сигналів при локалізації міток, відповіді яких прийняті за допомогою N_j антен:

$$w_2(i, j, m, N_j) = 1 / \sigma_{i,j,m,N_j}^2, \quad (8)$$

де σ_{i,j,m,N_j}^2 – вибіркова дисперсія помилки оцінювання місцеположення RFID-міток, яка обчислюється з використанням m -го точкового алгоритму, i -го виду ВІ та j -ї потужності запитальних сигналів. При обчисленні аналізується ВІ тільки тих калібрувальних міток, відповіді від яких отримані за допомогою N_j антен.

Ймовірність $\hat{p}(\hat{l}_{i,j,m})$ розраховується шляхом інтерполяції значень вектора \hat{p} , що формується в ході об'єднання зонних алгоритмів локалізації. Для першого варіанту процедури локалізації (без калібрувального етапу) вектор \hat{p} формується з використанням функції сумування ймовірностей, а для другого варіанту (з калібрувальним етапом) застосовується алгоритм K зважених найближчих сусідів.

В якості об'єднаних точкових алгоритмів обрані алгоритми, синтезовані на базі методу перетинів, трилатераційного методу та методу K зважених найближчих сусідів, а в якості зонних алгоритмів – алгоритми на базі машини опорних векторів, штучної нейронної мережі та наївного байєсівського класифікатора. При використанні методу перетинів обробляється ВІ виду proximity, а при використанні інших методів – ВІ видів RSS та IR.

Третій розділ присвячено оптимізації розміщення антен RFID-системи. Початковими даними для задачі оптимізації є розмір області локалізації, число антен та форма і розмір їхніх зон дії. В результаті оптимізації потрібно визначити такі координати антен та азимутальні кути їх повороту, при яких середня помилка комбінованого методу локалізації мінімальна. Передбачається, що антени розміщуються на стелі приміщення над областю локалізації, а комбінований метод об'єднує три базових алгоритми: трилатераційний алгоритм, алгоритм відбитків і алгоритм перетинів.

Розроблено критерій оптимальності розміщення антен, що передбачає максимізацію наступної цільової функції:

$$S(a) = c_1'(a)^2 c_1(a)^3 [w_{\text{трил}}(a) \overline{H(a)} + w_{\text{відб}}(a) \overline{C(a)} + w_{\text{пер}}(a) \overline{E(a)}], \quad (9)$$

де $a = \{a_1, \dots, a_N\}$ – вектор розміщення антен (кожен елемент вектора містить координати центру антени і кут її повороту); $c_1'(a)$ – відношення площі тієї ділянки центральної частини області локалізації, що покрита зонами дії хоча б однієї антени, до загальної площі центральної частини області локалізації; $c_1(a)$ – відношення площі тієї частини області локалізації, що покрита зонами дії хоча б однієї антени, до загальної площі області локалізації; $w_{\text{трил}}(a)$, $w_{\text{відб}}(a)$, $w_{\text{пер}}(a)$ – вагові коефіцієнти базових алгоритмів; $\overline{H(a)}$ – нормована усереднена величина горизонтального зниження точності (horizontal dilution of precision, HDOP); $\overline{C(a)}$ – нормований коефіцієнт покриття області локалізації зонами дії антен; $\overline{E(a)}$ – нормована середня помилка локалізації, що забезпечується при реалізації алгоритму перетинів.

Множники $c'_1(a)$ і $c_1(a)$ підносяться до степеня, оскільки вважається, що необхідно мати якомога більш повне покриття всієї області локалізації (та особливо її центральної частини) зонами дії хоча б однієї з антен. Вагові коефіцієнти $w_{\text{трил}}(a)$, $w_{\text{відб}}(a)$ і $w_{\text{пер}}(a)$ дозволяють врахувати ступінь точності базових алгоритмів. Величини $\overline{H}(a)$, $\overline{C}(a)$ і $\overline{E}(a)$ визначаються шляхом усереднення відповідних значень по всій області локалізації та подальшого нормування. При цьому значення HDOP для деякої точки l визначається згідно з відомою процедурою, яка використовується в теорії систем супутникової навігації. Значення коефіцієнта покриття для деякої точки l визначається як число зон дії антен, всередині яких знаходиться точка l . Значення помилки локалізації алгоритму перетинів, що забезпечується в точці l , визначається як середнє зважене відстаней між точкою l і всіма можливими оцінками місцеположення мітки при її розташуванні в точці l . Ваговими коефіцієнтами усереднення при цьому служать ймовірності формування конкретних оцінок.

Проведено аналіз деяких простих схем розміщення антен. Проаналізовано схеми у вигляді квадратної сітки, трикутників, квадрата, квадрата з антеною в центрі, кола та кола з антеною в центрі. Визначено, що згідно з розробленим критерієм найкраще розміщення 16 антен з еліптичними зонами дії для квадратної області локалізації розміром 5 м × 5 м забезпечується при використанні схеми квадратної сітки.

Створено методику пошуку оптимального розміщення антен на базі процедури евристичної оптимізації. До задачі оптимізації, що розглядається, адаптовані чотири евристичних алгоритми (генетичний алгоритм, алгоритм росту рослин, алгоритм імітації відпалу, алгоритм рою частинок).

Проведено обчислювальний експеримент, що мав на меті пошук оптимального розміщення 16 антен для трьох наступних варіантів квадратної області локалізації розміром 5 м × 5 м: 1) без перешкод; 2) з ідеально екрануючою перегородкою розміром 0,3 м × 4 м у центрі (моделює ситуацію деякої стіни в приміщенні); 3) з проходом розміром 0,8 м × 5 м у центрі (моделює ситуацію зони вільної від RFID-міток). Встановлено, що існують різні оптимальні розміщення, які в кількісному сенсі значно перевершують зручний конструктивно варіант розміщення у вигляді квадратної сітки. Отримані найкращі варіанти розміщення представлені на рис. 2.

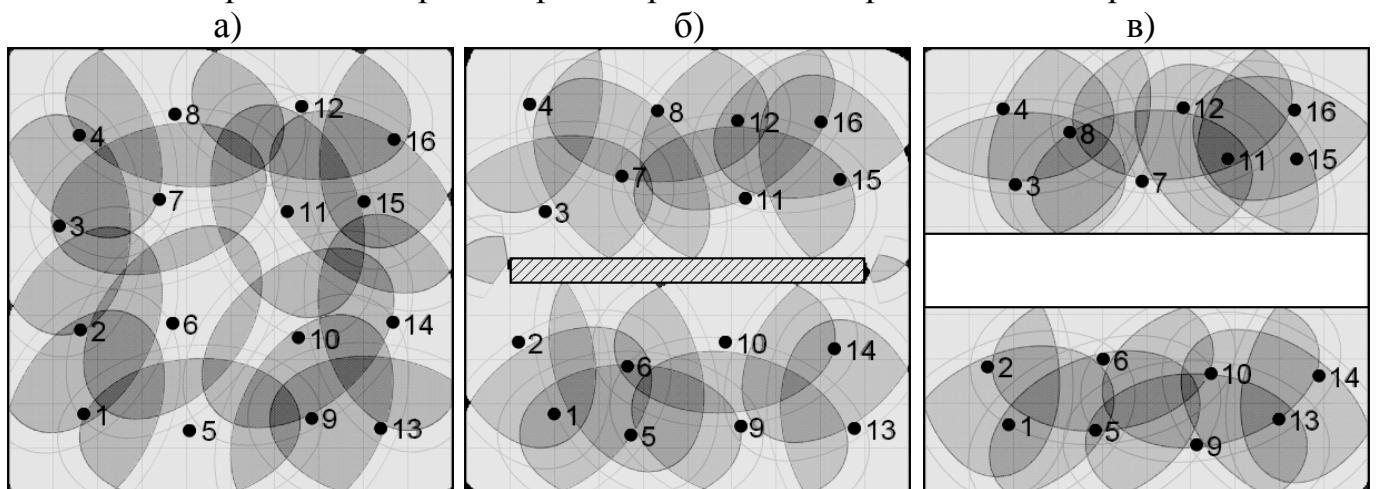


Рис. 2. Найкращі варіанти розміщення 16 антен (чорні круги), отримані для областей локалізації без перегородки і проходу (а), з перегородкою (б), з проходом (в)

Четвертий розділ присвячено розробці методик моделювання та верифікації. Розроблено методику імітаційного моделювання процесу отримання ВІ видів proximity, RSS та IR від пасивних RFID-міток. Початковими даними імітаційного моделювання є координати точок місцеположення заданого числа віртуальних міток, координати точок місцеположення антен RFID-системи та параметри міток і антен. Результатом моделювання є ВІ, що отримується від кожної віртуальної мітки за допомогою кожної з антен системи. Формування ВІ відбувається на базі розробленої математичної моделі процесу отримання ВІ. Відповідно до цієї моделі значення RSS $P_{\text{пр}}$ отримане за допомогою деякої антени, що розташована в точці $v = (v_x, v_y, v_z)$, від RFID-мітки, що розташована в точці $t = (t_x, t_y, t_z)$, формується як

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{зап}} G^2 F_v^2(\theta_v, \varphi_v) F_t^2(\theta_t, \varphi_t) \mu^4 \lambda^2 \xi}{(4\pi)^3 \left[(v_z - t_z)^2 + (v_x - t_x)^2 + (v_y - t_y)^2 \right]^2}, \quad (10)$$

де $P_{\text{зап}}$ – потужність запитального сигналу; G – коефіцієнт підсилення антени рідера RFID-системи; $F_v(\theta_v, \varphi_v)$, $F_t(\theta_t, \varphi_t)$ – нормовані діаграми спрямованості антен рідера та мітки, відповідно; μ – коефіцієнт неузгодженості по поляризації; λ – довжина хвилі; ξ – ефективна площа розсіювання RFID-мітки.

В сформоване за допомогою (10) значення RSS додатково вноситься випадкова шумова складова, яка визначається у вигляді суми трьох компонент: 1) загальної для всіх потужностей запитальних сигналів; 2) характерної для конкретної потужності запитальних сигналів; 3) випадкової (флуктуаційної).

У разі якщо згенероване після внесення шумової складової значення RSS виявляється нижче встановленого порогу чутливості, вважається, що відповідь мітки не була прийнята і відповідне значення proximity встановлюється нульовим. В іншому разі вважається, що була отримана відповідь мітки (значення proximity встановлюється рівним одиниці).

Значення IR $R_{\text{пр}}$, що отримане за допомогою деякої антени від RFID-мітки, визначається по сформованому значенню RSS $P_{\text{пр}}$:

$$R_{\text{пр}} = \kappa \overline{P_{\text{пр}}} + \sqrt{1 - \kappa^2} U(0,1), \quad (11)$$

де κ – коефіцієнт кореляції між RSS та IR значеннями; $\overline{P_{\text{пр}}}$ – нормоване до діапазону $[0; 1]$ значення RSS мітки; $U(0,1)$ – випадкова величина розподілена рівномірно в діапазоні від 0 до 1.

На наступному етапі дослідження розроблено математичну модель процесу верифікації блоку квадратурного перетворення, який шляхом квадратурної обробки виділяє фазову ВІ з сигналів відповіді пасивних RFID-міток при ступінчастій зміні частоти. Модель передбачає ситуацію взаємодії RFID-системи за допомогою однієї з її антен з одиночною міткою, що розташована на відстані d від антени. Створена на базі моделі методика верифікації дозволяє перевіряти працездатність блоку шляхом подачі на його входи двох тестових гармонічних квадратурних коливань з частотою

$$f_I = f_Q = \frac{d}{RT}, \quad (12)$$

де R – дальність дії RFID-системи при використанні конкретної антени рідера; T – період слідування радіоімпульсів запитального сигналу.

Згідно з методикою верифікації після подачі коливань (12) на входи блоку необхідно переконатися, що їм будуть сформовані послідовності відліків, які слідують з частотою дискретизації $f_D = 1/T$ і обвідні яких змінюються по гармонійним законам

$$\begin{cases} X_{I,b} = D_b \cos\left(2\pi \frac{d}{RT} t_b + \frac{4\pi d}{c} f_0\right); \\ X_{Q,b} = -D_b \sin\left(2\pi \frac{d}{RT} t_b + \frac{4\pi d}{c} f_0\right), \end{cases} \quad (13)$$

де D_b – модуль b -го комплексного відліку сигналу відповіді мітки; t_b – момент часу початку випромінювання b -го запитального радіоімпульсу; c – швидкість світла; f_0 – початкова частота запитального сигналу.

На базі мови програмування Ruby створено програмний комплекс, який дозволяє виконувати імітаційне моделювання процесу отримання ВІ згідно з розробленою методикою, обчислювати оцінки місцеположення RFID-міток за допомогою різних алгоритмів та проводити аналіз даних.

На основі методики імітаційного моделювання та з використанням програмного комплексу проведена верифікація розробленого критерію оптимальності розміщення антен RFID-системи. Встановлено, що є істотний (коефіцієнт кореляції близько $-0,9$) статистичний зв'язок між значеннями цільової функції і значеннями середньої помилки локалізації, що підтверджує адекватність розробленого критерію. Також проведена модельна верифікація комбінованого методу просторової локалізації. Встановлено, що застосування комбінованого методу дозволяє зменшити середню помилку локалізації до 28,6% порівняно з найкращим варіантом одиночного точкового алгоритму локалізації, що обробляє ВІ тільки одного виду.

П'ятий розділ присвячено практичним результатам та експериментальним дослідженням. Описано структуру розробленої та виготовленої системи двовимірної просторової RFID-локалізації, що використовувалася для експерименту. Система включала в себе 16 антен, розміщених на стелі закритого приміщення. Проведено збір ВІ від 144 пасивних RFID-міток, функціонуючих у частотному діапазоні 902...928 МГц. Мітки розміщувалися на пінопластових підставках на підлозі приміщення. Схема розміщення антен системи і міток представлена на рис. 3. На рис. 4 представлена фотографія експериментальної установки.

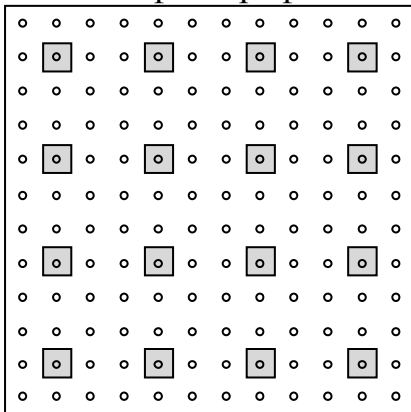


Рис. 3. Схема розміщення RFID-міток (кола) та антен (квадрати) в області локалізації



Рис. 4. Фотографія експериментальної установки для просторової RFID-локалізації

Виготовлено зразок блоку квадратурного перетворення (рис. 5) та проведено його дослідження з використанням розробленої методики верифікації. Отримані результати підтвердили працездатність зразка й адекватність математичної моделі процесу верифікації.

З використанням виготовленої RFID-системи виконана експериментальна оцінка швидкодії алгоритмів просторової локалізації та встановлено, що найменший середній час обчислення оцінки місцеположення RFID-мітки досягається при використанні алгоритмів перетинів, машини опорних векторів і штучної нейронної мережі.

Проведено експериментальне порівняння класичного та вдосконаленого трилатераційних методів просторової локалізації. При реалізації алгоритму, синтезованого на базі вдосконаленого методу, відзначено зменшення середньої помилки з 58,6 см до 53,2 см (виграш 9,2%) та з 58,3 см до 54,4 см (виграш 6,7%) для ВІ видів RSS та IR, відповідно. Достовірність результату підтверджена тим, що зменшення середньої помилки зареєстровано для кожного з 40 проаналізованих варіантів комбінації висоти розміщення міток, виду ВІ та потужності запитальних сигналів.

Виконано експериментальне дослідження комбінованого методу просторової локалізації. Реалізація алгоритму, синтезованого на його основі, дозволила зменшити середню помилку локалізації з 39,4 см до 33,6 см (виграш 14,7%) у порівнянні з найкращим варіантом одиночного точкового алгоритму, що обробляє ВІ одного виду. На рис. 6 представлено схему відповідності реальних місцеположень RFID-міток та результуючих оцінок, обчислених за допомогою алгоритму на базі комбінованого методу. Достовірність отриманих результатів підтверджена тим, що зменшення середньої помилки зареєстровано для кожного з 24 варіантів побудови вибірок ВІ. Відзначено достатньо добре якісне узгодження результатів модельного та натурного експериментів.

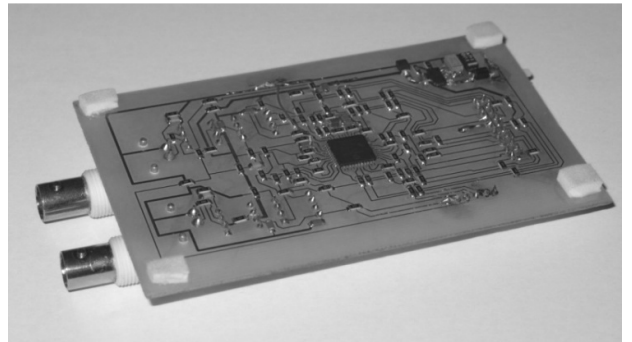


Рис. 5. Фотографія зразка блоку квадратурного перетворення

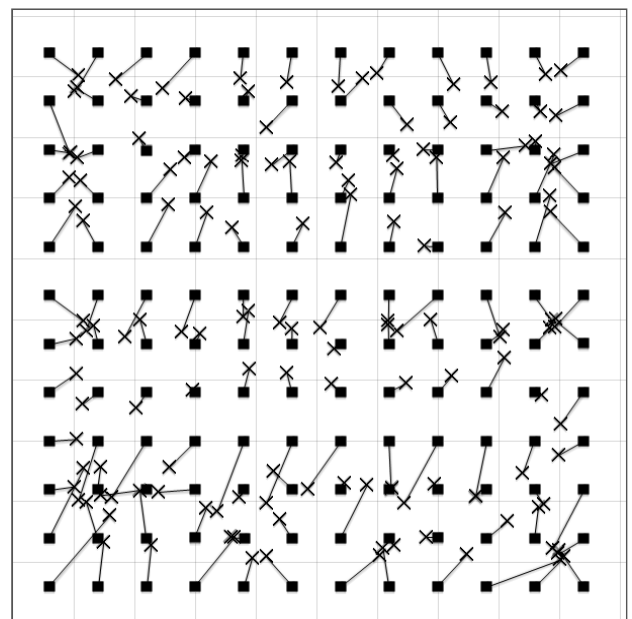


Рис. 6. Схема відповідності реальних місцеположень RFID-міток (квадрати) та обчислених оцінок (хрести)

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача розвитку методів двовимірної просторової локалізації об'єктів на базі RFID-технології. Представлені результати свідчать про те, що досягнута мета дослідження, яка полягала у підвищенні точності двовимірної просторової RFID-локалізації.

У роботі отримані наступні наукові та практичні результати:

1) Удосконалено трилатераційний метод двовимірної просторової локалізації пасивних RFID-міток шляхом спрощення залежності відстані від інформаційного параметру, врахування еліптичності ліній положення і використання вимірювальної інформації у вигляді фактів неотримання відповідей від міток, що в сукупності забезпечує виключення попереднього етапу збору вимірювальної інформації та зменшення середньої помилки локалізації.

2) Розроблено комбінований метод двовимірної просторової локалізації, який дозволяє підвищити точність визначення місцеположення RFID-міток шляхом усереднення оцінок, що формуються точковими та зонними алгоритмами локалізації, які обробляють вимірювальну інформацію різних видів, одержувану при випромінюванні запитальних сигналів на декількох потужностях. Новизна розробленого методу та систем просторової локалізації на його основі підтверджується двома патентами України.

3) Розроблено критерій оптимальності розміщення антен RFID-системи двовимірної просторової локалізації, який мінімізує середню помилку комбінованого методу локалізації на базі алгоритмів трилатерації, відбитків і перетинів. Створено методику пошуку оптимального розміщення антен для довільної області локалізації, яка заснована на використанні розробленого критерію та процедури евристичної оптимізації. У ході обчислювального експерименту знайдено ряд оптимальних варіантів розміщення 16 антен для квадратної області локалізації, близьких за своєю структурою до схеми квадратної сітки.

4) Розроблено математичну модель процесу отримання вимірювальної інформації видів proximity, received signal strength та identification rate від пасивних RFID-міток. На базі цієї моделі створена методика імітаційного моделювання вимірювальної інформації, яка дозволяє оцінювати точність методів просторової локалізації на стадії проектування.

5) Розроблено математичну модель процесу верифікації блоку квадратурного перетворення і методику верифікації на базі цієї моделі. Виготовлено зразок блоку квадратурного перетворення та проведено експеримент, який підтвердив правильність роботи виготовленого зразка й адекватність математичної моделі процесу верифікації.

6) Розроблено програмний комплекс, що дозволяє виконувати імітаційне моделювання процесу отримання вимірювальної інформації, обчислювати оцінки місцеположення RFID-міток та проводити аналіз даних.

7) За допомогою програмного комплексу проведено модельний експеримент, який підтвердив адекватність запропонованого критерію оптимальності розміщення антен та показав, що зменшення середньої помилки комбінованого методу локалізації може досягати 28,6% у порівнянні з найкращим варіантом одиночного точкового методу.

8) На базі виготовленої RFID-системи проведено натурний експеримент, який показав, що вдосконалений трилатераційний метод локалізації забезпечує зменшення середньої помилки на 6,7...9,2% у порівнянні з класичним трилатераційним методом, а комбінований метод – на 14,7% у порівнянні з найкращим варіантом одиночного

ного точкового методу. У ході порівняння результатів модельного і натурального експериментів відзначено достатньо добре якісне узгодження.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в компанії LEADS Inc. (м. Торонто, Канада) і конструкторському бюро «Радіозв'язок» ТОВ «Телекарт-Прилад» (м. Севастополь, Україна), а також в науково-дослідних роботах і навчальному процесі кафедри радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету.

Результати роботи рекомендуються для впровадження в науково-дослідних та промислових організаціях, що здійснюють розробку і дослідження систем та методів просторової локалізації об'єктів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гимпилевич Ю.Б. Современное состояние и перспективы развития методов пространственной локализации объектов на основе технологий радиочастотной идентификации / Ю.Б. Гимпилевич, Э.А. Левин, Д.А. Савочкин // Радиотехника. – 2013. – Вып. 173. – С. 69–80.

2. Савочкин Д.А. Метод пространственной локализации объектов на основе процедуры классификации для использования в RFID-системах / Д.А. Савочкин // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 4 (63). – С. 89–97.

3. Гимпилевич Ю.Б. Эллиптическая модификация трилатерационного метода пространственной локализации RFID-меток на основе линейной модели зависимости расстояние-мощность / Ю.Б. Гимпилевич, Д.А. Савочкин // Вісник Нац. техн. ун-ту України «КПІ». Серія – Радиотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – Вип. 55. – С. 80–88.

4. Гимпилевич Ю.Б. Эвристическая оптимизация размещения антенн RFID-системы при реализации комбинированного метода пространственной двумерной локализации / Ю.Б. Гимпилевич, Д.А. Савочкин // Доклады БГУИР. – 2015. – № 4 (90). – С. 61–67.

5. Gimpilevich Yu.B. Verification procedure for radar quadrature processing unit with stepwise frequency modulation of the probing signal / Yu.B. Gimpilevich, D.A. Savochkin // Radioelectronics and communications systems. – 2013. – Vol. 56, No 6. – P. 290–295.

6. Пат. 107886 Україна, МПК G01S 13/75, G01S 5/04. Спосіб визначення місцеположення об'єктів у двовимірному просторі / Ю.Б. Гімплевич, Д.О. Савочкін (Україна). – № a201312060 ; заявл. 14.10.2013 ; опубл. 25.02.2015, Бюл. № 4. – 12 с.

7. Пат. 87459 Україна, МПК G01S 5/04. Спосіб визначення місцеположення об'єктів / Ю.Б. Гімплевич, Д.О. Савочкін (Україна). – № u201309681 ; заявл. 05.08.2013 ; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. – 3 с.

8. Пат. 87461 Україна, МПК G01S 13/75. Спосіб визначення місцеположення об'єктів у двовимірному просторі / Ю.Б. Гімплевич, Д.О. Савочкін (Україна). № u201309691 ; заявл. – 05.08.2013 ; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. – 3 с.

9. Пат. 98316 Україна, МПК G01S 13/75. Спосіб визначення місцеположення об'єктів у двовимірному просторі / Ю.Б. Гімплевич, Д.О. Савочкін (Україна). № u201411869 ; заявл. 03.11.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. – 4 с.

10. Савочкин Д.А. Блок квадратурной обработки сигналов радара со ступенчатой частотной модуляцией / Д.А. Савочкин, Ю.Я. Смаилов // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2011» : 7-а Міжнар. молодіж. наук.-техн. конф., 11–15 квіт. 2011 р. : матеріали конф. – Севастополь, 2011. – С. 78.

11. Савочкин Д.А. Классификация методов локализации объектов в двумерном пространстве внутри помещений с помощью RFID-систем / Д.А. Савочкин // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи : Міжнар. наук.-техн. конф., 11–15 берез. 2013 р. : матеріали конф. – Київ, 2013. – С. 152–153.

12. Савочкин Д.А. Анализ технологий и систем пространственной локализации объектов внутри помещений / Д.А. Савочкин // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті : 17-й Міжнар. молодіж. форум, 22–24 квіт. 2013 р. : матеріали форуму. – Харків, 2013. – Т. 3. – С. 146–147.

13. Савочкин Д.А. Анализ вероятностных методов пространственной локализации объектов с помощью систем радиочастотной идентификации / Д.А. Савочкин // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2013» : 9-а Міжнар. молодіж. наук.-техн. конф., 22–26 квіт. 2013 р. : матеріали конф. – Севастополь, 2013. – С. 78.

14. Гимпилевич Ю.Б. Комбинированный метод пространственной локализации объектов с помощью RFID-систем / Ю.Б. Гимпилевич, Д.А. Савочкин // НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології «КриМіКо-2013» : 23-а Міжнар. кримська конф., 8–13 верес. 2013 р. : матеріали конф. – Севастополь, 2013. – Т. 1. – С. 300–301.

15. Gimpilevich Yu.B. RFID indoor positioning system based on read rate measurement information / Yu.B. Gimpilevich, D.A. Savochkin // Antenna theory and techniques : IX int. conf., Sept. 16–20, 2013 : proc. of conf. – Odessa, 2013. – P. 546–548.

16. Гимпилевич Ю.Б. Экспериментальный анализ алгоритмов пространственной локализации RFID-меток / Ю.Б. Гимпилевич, Д.А. Савочкин // Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013): Междунар. науч. конф., 23 окт. 2013 г. : материалы конф. – Минск, 2013. – С. 260–261.

17. Савочкин Д.А. Модифицированный трилатерационный метод пространственной локализации объектов для использования в RFID-системах / Д.А. Савочкин // Радиоелектроника, электротехника и энергетика : 20-я Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 27–28 февр. 2014 г. : тез. докл. – Москва, 2014. – Т. 1. – С. 126.

18. Gimpilevich Yu.B. Combinational zone-based localization algorithm for RFID systems / Yu.B. Gimpilevich, D.A. Savochkin // Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science (TCSET) : Int. conf., Feb. 25–March 1, 2014 : proc. of conf. – Lviv-Slavske, 2014. – P. 775.

19. Савочкин Д.А. Пространственная RFID-локализация на базе комбинации точечных и зонных алгоритмов / Д.А. Савочкин, Ю.Б. Гимпилевич // Междунар. науч.-техн. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР, 18–19 марта 2014 г. : материалы конф. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 68–69.

20. Савочкин Д.А. Обобщение трилатерационного метода пространственной локализации RFID-меток / Д.А. Савочкин // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті : 18-й Міжнар. молодіж. форум, 14–16 квіт. 2014 р. : матеріали форуму. – Харків, 2014. – Т. 3. – С. 161–162.

21. Савочкин Д.А. Экспериментальное сравнение комбинированных зонных алгоритмов пространственной локализации для использования в системах радиочастотной идентификации / Д.А. Савочкин // Современные проблемы радиоэлектроники : Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, 6–8 мая 2014 г. : сб. науч. тр. – Красноярск, 2014. – С. 218–223.

22. Savochkin D.A. Antenna deployment for intersectional RFID localization / D.A. Savochkin // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2014» : 10-а Міжнар. молодіж. наук.-техн. конф., 12–17 трав. 2014 р. : матеріали конф. – Севастополь, 2014. – С. 70.

23. Savochkin D.A. Combinational RFID-based localization using different algorithms and measurements / D.A. Savochkin // Microwaves, radar and wireless communications : 20-th Int. conf., June 16–18, 2014 : proc. of conf. – Gdansk, 2014. – Vol. 2. – P. 563–566.

24. Passive RFID system for 2D indoor positioning / A.A. Savochkin, Y.P. Mikhayluck, V.M. Iskiv [et al.] // Microwaves, radar and wireless communications : 20-th Int. conf., June 16–18, 2014 : proc. of conf. – Gdansk, 2014. – Vol. 2. – P. 771–773.

25. Гимпилевич Ю.Б. Методика имитационного моделирования измерительной информации RFID-меток / Ю.Б. Гимпилевич, Д.А. Савочкин // НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології «КриМіКо-2014» : 24-а Міжнар. кримська конф., 7–13 верес. 2014 р. : матеріали конф. – Севастополь, 2014. – Т. 1. – С. 263–264.

26. Savochkin D.A. Simple approach for passive RFID-based trilateration without offline training stage / D.A. Savochkin // 2014 IEEE RFID technology and applications (RFID-TA) : Int. conf., Sept. 8–9, 2014 : proc. of conf. – Tampere, 2014. – P. 159–164.

27. Гімпілевич Ю.Б. Розробка критерію оптимальності розміщення антен при реалізації комбінованого методу просторової двовимірної RFID-локалізації / Ю.Б. Гімпілевич, Д.О. Савочкін // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи : Міжнар. наук.-техн. конф., 16–22 берез. 2015 р. : матеріали конф. – Київ, 2015. – С. 169–171.

28. Савочкін Д.О. Метод просторової RFID-локалізації на основі комбінування алгоритмів та видів вимірювальної інформації / Д.О. Савочкін // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті : 19-й Міжнар. молодіж. форум, 20–22 квіт. 2015 р. : матеріали форуму. – Харків, 2015. – Т. 3. – С. 98–99.

29. Савочкін Д.О. Моделювання вимірювальної інформації виду received signal strength пасивних RFID-міток / Д.О. Савочкін // Проблеми телекомунікацій : 9-а Міжнар. наук.-техн. конф., 21–24 квіт. 2015 р. : збірник матеріалів конф. – Київ, 2015. – С. 214–216.

30. Савочкін Д.О. Евристична оптимізація розміщення антен у системі двовимірної просторової локалізації / Д.О. Савочкін // Проблеми телекомунікацій : 9-а Міжнар. наук.-техн. конф., 21–24 квіт. 2015 р. : збірник матеріалів конф. – Київ, 2015. – С. 211–213.

АНОТАЦІЯ

Савочкін Д.О. Розвиток методів просторової локалізації об'єктів на базі технології радіочастотної ідентифікації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2015.

Удосконалено трилатераційний метод двовимірної просторової локалізації при використанні пасивних RFID-міток. Розроблено комбінований метод локалізації, що підвищує точність за рахунок об'єднання різних алгоритмів локалізації та видів вимірювальної інформації. Розроблено методику пошуку оптимального розміщення антен RFID-системи просторової локалізації, яка мінімізує середню помилку локалізації при використанні комбінованого методу локалізації на базі алгоритмів трилатерації, відбитків і перетинів. Розроблено методику імітаційного моделювання процесу отримання вимірювальної інформації від пасивних RFID-міток. Розроблено методику верифікації блоку квадратурного перетворення, що виділяє фазову вимірювальну інформацію з сигналів відповіді пасивних RFID-міток.

Ключові слова: просторова локалізація, радіочастотна ідентифікація, трилатерація, комбінування, вимірювальна інформація, оптимізація розміщення антен, імітаційне моделювання, квадратурне перетворення.

АННОТАЦИЯ

Савочкин Д.А. Развитие методов пространственной локализации объектов на базе технологии радиочастотной идентификации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2015.

В диссертации решена актуальная научно-прикладная задача развития методов двумерной пространственной локализации на базе технологии радиочастотной идентификации с целью повышения точности локализации объектов.

Усовершенствован трилатерационный метод двумерной пространственной локализации пассивных RFID-меток путем упрощения зависимости расстояния от информационного параметра, учета эллиптичности линий положения и использования измерительной информации в виде фактов неполучения ответов от меток. Практическая реализация метода обеспечила исключение предварительного этапа сбора измерительной информации и уменьшение средней ошибки локализации на 6,7...9,2%.

Разработан комбинированный метод двумерной пространственной локализации, позволяющий объединять несколько алгоритмов локализации точечного и зонного типов, обрабатывающих измерительную информацию различных видов, получаемую при излучении запросных сигналов на нескольких мощностях. Проведенный эксперимент показал, что возможно уменьшение средней ошибки локализации до 14,7% по сравнению с наилучшим вариантом одиночного точечного метода.

Разработан критерий оптимальности размещения антенн RFID-системы двумерной пространственной локализации, минимизирующий среднюю ошибку комбинированного метода локализации на базе алгоритмов трилатерации, отпечатков и пересечений. Создана методика поиска оптимального размещения антенн для произвольной области локализации, основанная на использовании разработанного критерия и процедуры эвристической оптимизации. В ходе вычислительного эксперимента найден ряд оптимальных размещений 16 антенн для квадратной области локализации.

Разработана математическая модель процесса получения измерительной информации видов proximity, received signal strength и identification rate от пассивных RFID-меток. На базе этой модели создана методика имитационного моделирования, позволяющая оценивать точность методов пространственной локализации на стадии проектирования. Разработан программный комплекс, позволяющий выполнять имитационное моделирование, вычислять оценки местоположения RFID-меток и проводить анализ данных.

Разработана методика верификации блока квадратурного преобразования, выделяющего фазовую измерительную информацию из ответных сигналов пассивных RFID-меток. Изготовлен образец блока квадратурного преобразования и проведен эксперимент, подтвердивший правильность работы изготовленного образца и адекватность методики верификации.

С помощью разработанного программного комплекса проведен модельный эксперимент, подтвердивший адекватность предложенного критерия оптимальности размещения антенн и факт повышения точности локализации при реализации комбинированного метода. На базе изготовленной системы двумерной пространственной RFID-локализации проведен натурный эксперимент. В ходе сравнения результатов модельного и натурального экспериментов установлено, что имеется достаточно хорошее качественное согласие.

Достоверность представленных в диссертации результатов обусловлена корректным использованием математического аппарата, проведением имитационного моделирования, проведением экспериментальных исследований и отсутствием противоречия между полученными результатами.

Ключевые слова: пространственная локализация, радиочастотная идентификация, трилатерация, комбинирование, измерительная информация, оптимизация размещения антенн, имитационное моделирование, квадратурное преобразование.

ABSTRACT

Savochkin D.O. Development of methods of spatial object localization based on radio frequency identification technology. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, specialty 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2015.

The two-dimensional spatial trilateration localization method is improved for use with passive RFID tags. The combinational localization method that increases accuracy by

jointly using several localization algorithms and measurement data of different types is developed. The procedure of search for the optimal placement of RFID localization system antennas, which minimizes the average localization error for the case of using the combinational method based on the algorithms of trilateration, fingerprinting and intersections, is developed. The procedure for simulation of the process of obtaining measurement data from passive RFID tags is created. The procedure for verification of a quadrature transformation unit, which extracts phase measurement data from response signals of passive RFID tags, is developed.

Keywords: spatial localization, radio frequency identification, trilateration, combinational method, measurement information, antenna placement optimization, simulation, quadrature transformation.