

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**МАКОВЕЙЧУК ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 004.932 (043.3)

**МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ  
ПОБУДОВИ І ВИКОРИСТАННЯ ВІЗУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ  
СТРУКТУР ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ**

05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Рубан Ігор Вікторович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, перший проректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Жолткевич Григорій Миколайович**,  
Харківський національний університет імені  
В.Н.Каразіна, Міністерство освіти і науки України,  
декан факультету математики і інформатики;

доктор технічних наук, професор  
**Федорович Олег Євгенович**,  
Національний аерокосмічний університет імені  
М.Є.Жуковського "Харківський авіаційний  
інститут", Міністерство освіти і науки України,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук та  
інформаційних технологій;

доктор технічних наук, професор  
**Барабаш Олег Володимирович**,  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського",  
Міністерство освіти і науки України,  
професор кафедри автоматизації, проектування  
енергетичних процесів і систем.

Захист відбудеться "\_\_\_" грудня 2020 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий "\_\_\_" листопада 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І.П. Плісс

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На цей час інформаційні технології доповненої реальності використовуються у багатьох областях: медицина, освіта, військова сфера, виробництво і транспорт, кіно і телебачення, онлайн-трансляції, підготовка та навчання співробітників, маркетинг і реклама, роздріб/онлайн-комерція і торгівля нерухомістю, ігрова індустрія тощо. Згідно прогнозів банку Goldman Sachs та інших щодо розвитку ринку систем віртуальної та доповненої реальності до 2025 року, більшість систем доповненої реальності будуть використовуватися на мобільних платформах, що супроводжується:

- постійним збільшенням загального обсягу і доступності інформації з мобільних пристроїв;
- збільшенням інформації з високою розрізненістю;
- комплексного використання даних від різних джерел і пристроїв;
- збільшенням кількості суб'єктів у сфері отримання, розповсюдження, обробки та застосування інформації.

Сучасні системи обробки і передачі візуальної інформації, частинним випадком яких є маркерні системи доповненої реальності, базуються на візуальних інформаційних структурах (ВІС). Для маркерних систем доповненої реальності, у якості ВІС в даний час виступають лише візуальні маркери. У безмаркерних системах маркером є місцезнаходження камери, що визначається за допомогою системи глобального позиціонування (GPS – Global Positioning System).

Для отримання додаткової інформації про довільні об'єкти у переважній більшості випадків використовуються системи доповненої реальності на основі ВІС. Основні типи візуальних маркерів доповненої реальності (AR-маркерів, розглядаються як частинний випадок ВІС), які зараз використовуються:

- шаблонні маркери (template markers) – чорно-білі маркери, які мають просте зображення всередині чорної рамки;
- 2D штрих-кодові маркери (barcode markers) – маркери, що складаються з чорно-білих клітинок, які по-бітово кодують дані, найчастіше в якості штрих-кодових AR-маркерів використовують QR-коди;
- колові маркери (circular markers) – аналогічно до штрих-кодових маркерів, тільки біти кодуються не прямокутними клітинками, а чорно-білими круговими секторами;
- маркери-зображення (image markers) – в якості маркерів використовуються звичайні зображення, як кольорові, так і зображення в градаціях сірого. Вони можуть містити рамку або інші орієнтири для виявлення та знаходження положення. Такі маркери-зображення зазвичай ідентифікуються за допомогою пошуку по шаблону або по особливостях зображення.

Основні типи ВІС на прикладі візуальних маркерів мають такі особливості застосування у системах доповненої реальності:

- всі вони дозволяють визначати положення камери, але для цього використовуються різні методи: знаходження кутів зображення (шаблонні маркери); знаходження спеціальних областей прив'язки (штрих-кодові і колові маркери); знаходження особливих точок зображення і їх дескрипторів (маркери-зображення);

– частина з них (штрих-кодові і колові маркери) містить додаткову інформацію (повідомлення), наприклад, посилання на інформаційні ресурси, що є однозначною перевагою, оскільки дозволяє розширити область застосування.

В сучасних умовах при використанні маркерних систем доповненої реальності до ВІС, взагалі, та до візуальних маркерів, зокрема, висуваються жорсткі вимоги по помітності (легке та швидке знаходження у відео-поточці), простоті (використання мінімальної кількості кольорів), інформативності (наявність додаткової інформації – повідомлення), орієнтованості (можливість визначення положення камери), робастності (збереження працездатності при втраті до 50% інформації), криптостійкості (повідомлення, що закодоване у ВІС, повинно бути стійким до криптоатак) і універсальності (використання технологіями обробки ВІС мінімуму апріорної інформації). Головною з цих вимог є вимога робастності – система повинна працювати при фізичній відсутності будь-якої частини ВІС чи закритті його завадою.

Обробка зображень, взагалі, та у системах доповненої реальності, зокрема, розглянута в роботах: У.Претта, Д.Канні, Р.Бейтса, Мак-Доннела, В.А.Сойфера, Р.Гонсалеса, Р.Вудса, Л.П.Ярославського, А.А.Потапова, Р.Хартлі, А.Цісермана, П.Мілгрема, А.Кушино, Р.Азуми, С.О.Субботіна, Ю.А.Скобцова, В.М.Курейчика, А.В.Пантелеєва, М.О.Попова, І.В.Рубана, В.П.Машталіра, В.О.Філатова, М.В.Ткачука, С.В.Машталіра, Є.П.Пуятіна, В.О.Гороховатського, С.І.Богучарського та інших.

Очевидно, що жоден стандартний тип AR-маркера не буде відповідати вказаним вимогам у повній мірі, тобто існуючим ВІС (AR-маркерам) притаманні функціональні обмеження щодо їх стійкого використання та наявності повідомлення. В свою чергу, вимозі інформативності задовольняє інший тип ВІС – матричні коди (прикладом яких є QR-коди). Таким чином, при розробці сучасних систем доповненої реальності загострилося протиріччя між зростаючими вимогами до візуальних інформаційних структур доповненої реальності і функціональними обмеженнями відомих типів візуальних маркерів доповненої реальності щодо їх стійкого використання та наявності повідомлення. Сформульоване протиріччя обумовлене відсутністю моделей та методів побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності.

Для розв'язання указанного протиріччя актуальним є вирішення наукової проблеми розробки теоретичних основ створення моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур в системах доповненої реальності для застосування в різних сферах обробки інформації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукової і науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетної НДР "Методи, системи і засоби криптографічного захисту інформації з гарантованим рівнем стійкості та підвищеною швидкодією" (№ ДР 0115U002431), господарсько-договірної НДР № 17-13 "Розробка моделей, механізмів, методів та засобів симетричного шифрування та гешування, методи оцінювання їх стійкості" шифр "Стійкість" (№ ДР 0118U003807), плану наукової і науково-технічної діяльності Харківського національного університету

Повітряних Сил імені Івана Кожедуба в рамках держбюджетної НДР "Створення програмного модуля обробки різномірних і різночасових даних, отриманих від оптико-електронних засобів безпілотних літальних апаратів та супутникових систем" шифр "Мозаїка-ПС" (№ ДР 0101U002020).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності шляхом розробки моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур. Для досягнення мети роботи необхідно вирішити такі завдання:

– провести критичний аналіз існуючих моделей, методів, та інформаційних технологій в системах доповненої реальності;

– розвинути теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності для забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності в умовах несприятливих зовнішніх впливів;

– створити системне уявлення візуальної інформаційної структури доповненої реальності та розробити її модель;

– розробити метод формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

– розробити модель та метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

– розробити метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації;

– розробити метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

– розробити метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності;

– розробити інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, яка дозволяє забезпечити вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності;

– провести порівняльну оцінку якості використання існуючих та мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності в умовах часткової втрати інформації;

– провести оцінку криптостійкості методу кодування інформації у мозаїчних стохастичних маркерах доповненої реальності.

*Об'єкт дослідження* – процес побудови і використання візуальних інформаційних структур у системах доповненої реальності.

*Предмет дослідження* – моделі, методи та інформаційна технологія побудови і використання візуальних інформаційних структур у системах доповненої реальності.

**Методи дослідження.** Дослідження базується на критичному аналізі відомих методів, моделей та інформаційних технологій побудови і використання маркерів в системах доповненої реальності. При аналізі існуючих методів, моделей та інформаційних технологій в системах доповненої реальності використовувалися математичні методи порівняння зображень, методи цифрової обробки зображень, методи комп'ютерного зору. При розвитку теоретичних основ побудови і

використання ВІС доповненої реальності для забезпечення стійкого функціонування системи в умовах несприятливих зовнішніх впливів використовувалися методи теорії категорій, цифрової обробки зображень, комп'ютерного зору. При розробці моделі ВІС, методу формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, моделі та методу виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності використовувалися методи теорії ймовірності, методи комбінаторики, методи математичного моделювання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій, методи теорії оптимізації. При розробці методу визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації, методу декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, методу проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, розробці інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності використовувалися методи теорії матриць, методи аналітичної геометрії, методи математичного моделювання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій, методи теорії оптимізації. Для оцінки якості методів використання існуючих та мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, оцінки криптостійкості методу кодування інформації у мозаїчних стохастичних маркерах доповненої реальності використовувалися методи теорії ймовірності, методи теорії груп, методи математичної статистики, методи кластеризації даних, математичний апарат теорії матриць, методи математичного моделювання, методи цифрової обробки зображень, методи математичної логіки, методи створення інформаційних технологій.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше розроблено модель стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності та метод їх формування, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення методом найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою, що дозволяє забезпечити стійку передачу даних та коректне відображення візуальних об'єктів доповненої реальності.

2. Вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення.

3. Вперше розроблено метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апріорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера.

4. Вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію пермутованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації.

5. Отримали подальший розвиток теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності, які, на відміну від відомих, базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного формування, перетворення та декодування візуальної інформації, що забезпечує в умовах несприятливих зовнішніх впливів стійке функціонування систем доповненої реальності.

6. Удосконалено модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості, проведення стохастичного перевпорядкування та контейнеризації даних, що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних.

7. Отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потоків в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення.

8. Удосконалено інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє задовільнити зростаючі вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичне значення отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи полягає у розробці інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності, автоматизації процесу побудови візуальних об'єктів в існуючих та перспективних інформаційних системах доповненої реальності. Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані: у військовій частині А2667, м. Київ (акт від 28.02.2020); в приватному акціонерному товаристві "Авікос", м. Львів (акт від 28.05.2020); в Державному підприємстві "Центр державного земельного кадастру" Державного агентства земельних ресурсів України, м. Київ (акт від 29.05.2020); в Національному центрі управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, м. Київ (акт від 26.05.2020); в освітньому процесі Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків (акт від 05.05.2020). Отримані в дисертаційній роботі наукові результати можуть бути використані: в організаціях,

що є замовниками науково-технічної продукції та в науково-дослідних організаціях при обґрунтуванні технічних вимог до перспективних систем обробки зображень та комп'ютерного зору; в науково-виробничих організаціях промисловості при розробці нових систем і комплексів обробки зображень та комп'ютерного зору; у вищих навчальних закладах, що займаються підготовкою фахівців з обробки зображень та комп'ютерного зору.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати дисертаційної роботи сформульовані і отримані автором особисто. Наукові праці [1]–[6] опубліковані без співавторів. Окремі етапи дослідження були виконані у співпраці. У роботах, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в такому: [7] – розроблено модель формування зображення і метод декодування даних при визначенні джерел лісових пожеж за супутниковими знімками; [8] – проведена оцінка імовірностей помилки і пропуску даних на зображеннях при впливі протяжних маскуючих перешкод; [9] – розроблено метод використання псевдоінверсії Мура-Пенроуза для відтворення зображень з градієнтів при виявленні динамічних часткових спотворень; [10] – визначені показники якості відновлення повідомлення, що закодовано у мозаїчному стохастичному маркері, в умовах розфокусування та змазування зображення-повідомлення; [11] – запропоновано використання генетичних алгоритмів в методі декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності для фільтрації пермутованого зображення; [12] – запропоновано в методі виявлення мозаїчного стохастичного маркера знаходити маски біт-контейнерів шляхом сегментування маскованої області зображення, проаналізовані відомі методи сегментування зображення; [13] – запропоновано в методі виявлення мозаїчного стохастичного маркера для сегментування маскованої області зображення використовувати метод Отсу; [14] – запропоновано в методі виявлення мозаїчного стохастичного маркера для сегментування маскованої області зображення використовувати еволюційні методи; [15] – запропоновано в методі виявлення мозаїчного стохастичного маркера для оцінки якості сегментування маскованої області використовувати відстань Кульбака-Лейблера; [16] – досліджено еволюційний метод сегментування зображення та якість його застосування для виявлення мозаїчного стохастичного маркера; [17] – запропоновано трансформація зображення для побудови матриці бітів маркера та подальшого декодування зображення мозаїчного стохастичного маркера; [18] – досліджено вплив шумів на точність декодування зображення мозаїчного стохастичного маркера; [19] – досліджено метод штучної бджолоїної колонії сегментування зображення та якість його застосування для виявлення мозаїчного стохастичного маркера; [20] – розроблений метод формування зображення маркера доповненої реальності, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення; [21] – запропоновано метод поканального відновлення зображення в умовах несприятливих зовнішніх впливів; [22] – запропоновано використання суми дисперсій у якості цільової функції, яка в подальшому використовується у методі визначення параметрів проективного перетворення мозаїчного стохастичного маркера; [23] – досліджено застосування перетворення Хафа при розробці метода визначення параметрів проективного перетворення мозаїчного стохастичного маркера; [24] – запропоновано в методі виявлення об'єктів в системах

екологічного моніторингу для сегментування маскованої області зображення використовувати ройові методи; [25] – запропоновано метод штучної бджолоїної колонії сегментування зображення для виявлення об'єктів; [26] – запропоновано метод формування зображення, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення у задане число разів; [27] – досліджено застосування метод Канні та перетворення Хафа при розробці метода визначення параметрів проективного перетворення зображення; [28] – запропоновано використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок; [29] – досліджено мурашиний метод сегментування зображення та якість його застосування для виявлення зображення маркера; [30] – досліджено сегментування кольорового зображення мурашиними алгоритмами; [31] – досліджена функція розмиття зображення-повідомлення при змазуванні та розфокусуванні.

**Апробація матеріалів дисертації.** Результати дисертаційної роботи апробовані на 29 наукових, науково-технічних, науково-практичних конференціях: 9-й, 11-й, 14-й та 15-й наукових конференціях "Новітні технології – для захисту повітряного простору" (м. Харків, 2013, 2015, 2018, 2019 рр.) [32]–[36]; 13-й Міжнародній науково-практичній конференції "Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)" (м. Львів, 2015 р.) [37]; IX науково-практичній конференції "Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО" (м. Київ, 2016 р.) [38], 17-й науково-технічній конференції "Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах" (м. Чернігів, 2017 р.) [39], 4-й всеукраїнській науково-практичній конференції "Спільні дії військових формувань та правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи" (м. Одеса, 2017 р.) [40], Міжнародній конференції "Ukraine – EU. Innovation in Education, Technology, Business and Law" (м. Чернігів, 2018 р.) [41], XXII всеукраїнській науково-практичній конференції "Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції" (м. Житомир, 2018 р.) [42], Міжнародних науково-технічних конференціях "Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ" (м. Львів, 2018, 2019 рр.) [43]–[44], 8-й, 9-й Міжнародних науково-технічних конференціях "Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління" (м. Полтава–Баку–Харків–Жиліна, 2018–2019 рр.) [45]–[46], 5-й та 6-й Міжнародних науково-практичних конференціях "Problems of info-communications science and technology (PICT S&T 2018, PICT S&T 2019)" (м. Харків, 2018 р., м. Київ, 2019 р.) [47]–[48]; I всеукраїнській науково-практичній конференції "Наукові проблеми створення, бойового застосування та підготовки фахівців безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів" (м. Житомир, 2018 р.) [49], науково-практичній конференції "Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності" (м. Львів, 2018, 2019 рр.) [50]–[51]; Міжнародній науково-практичній конференції "Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine" (м. Влоцлавек, 2018 р.) [52], Міжнародній науково-практичній конференції "Science, Research, Development # 14. Technics and Technology"

(м. Лондон, 2019 р.) [53], 3-й Міжнародній науково-технічній конференції "Комп'ютерні та інформаційні системи і технології" (м. Харків, 2019 р.) [54], 3-й Міжнародній науково-практичній конференції "Наукоємні технології в інфокомунікаціях" (м. Кам'янець-Подільський, 2019 р.) [55], VII Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки" (м. Київ, 2019 р.) [56], Міжнародній науково-практичній конференції "Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України" (м. Хмельницький, 2019 р.) [57], науково-технічній конференції ВІПІ (м. Київ, 2019 р.) [58], XXV Всеукраїнській науковій конференції "Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики АРАМCS-2019" (м. Львів, 2019 р.) [59], 15 Міжнародній конференції "Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Engineering (TCSET)" (м. Славське, 2020 р.) [60].

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 60 наукових роботах, серед яких 31 наукова стаття, з них 6 наукових статей написані без співавторів (30 наукових статей у фахових наукових періодичних виданнях з технічних наук, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних: Scopus, Cross Ref, EBSCO, Index Copernicus та іншими, 1 стаття у зарубіжному науковому періодичному виданні), 29 тез доповідей у матеріалах наукових конференцій, в тому числі 4 з яких індексуються міжнародними наукометричними базами IEEE Xplore, Scopus та Web of Science.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг дисертації складає 394 сторінки, у тому числі 276 сторінок основного тексту, 11 сторінок займають титульний аркуш, зміст, перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів, 2 анотації на 34 сторінках, 129 рисунків та 16 таблиць, з них 16 рисунків та 5 таблиць повністю займають площу на 18 сторінках, список використаних джерел з 247 найменувань на 31 сторінці, 2 додатки на 24 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подається загальна характеристика дисертації. Обґрунтовується актуальність роботи, шляхом критичного аналізу висвітлюється зв'язок теми дисертації із сучасними дослідженнями по розробці методів та інформаційних технологій обробки зображень в системах доповненої реальності, визначається сутність наукової проблеми. Наведено зв'язок роботи з НДР, планами, сформульовано мету і завдання дослідження, окреслені об'єкт, предмет дослідження, перераховуються використані наукові методи дослідження та змістовно відзначається, що саме досліджувалося кожним методом; обґрунтовується вибір методів, що забезпечують достовірність отриманих результатів та висновків. Представлені основні наукові результати, які виносяться на захист, із зазначенням відмінності отриманих результатів від відомих раніше, відмічається практичне значення отриманих наукових результатів. Зазначається конкретний особистий внесок здобувача в роботах, що виконані у співавторстві,

відомості щодо апробації, публікації матеріалів дисертації, впровадження результатів дисертації, анонсується структура та загальний обсяг роботи.

**У першому розділі** дисертації визначені основні проблеми існуючих систем і технологій доповненої реальності, які пов'язані з недосконалістю існуючих методів обробки, проаналізовані відомі моделі, методи та інформаційні технології в системах доповненої реальності, проаналізовані типи існуючих маркерів доповненої реальності та типові методики роботи з ними. Стисло, критично висвітлені відомі результати щодо розробки моделей, методів та інформаційних технологій обробки зображень в системах доповненої реальності, окреслені основні етапи застосування візуальних інформаційних структур в системах доповненої реальності та вирішені питання, що залишилися невирішеними, обґрунтовується вибір напряму дослідження. Сформульовано наукову проблему, мету та завдання дослідження.

**У другому розділі** дисертації наведено результати подальшого розвитку теоретичних основ побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності, які базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного формування, перетворення та декодування візуальної інформації. Узагальнена схема системи доповненої реальності, що базується на ВІС, представлена на рис. 1.

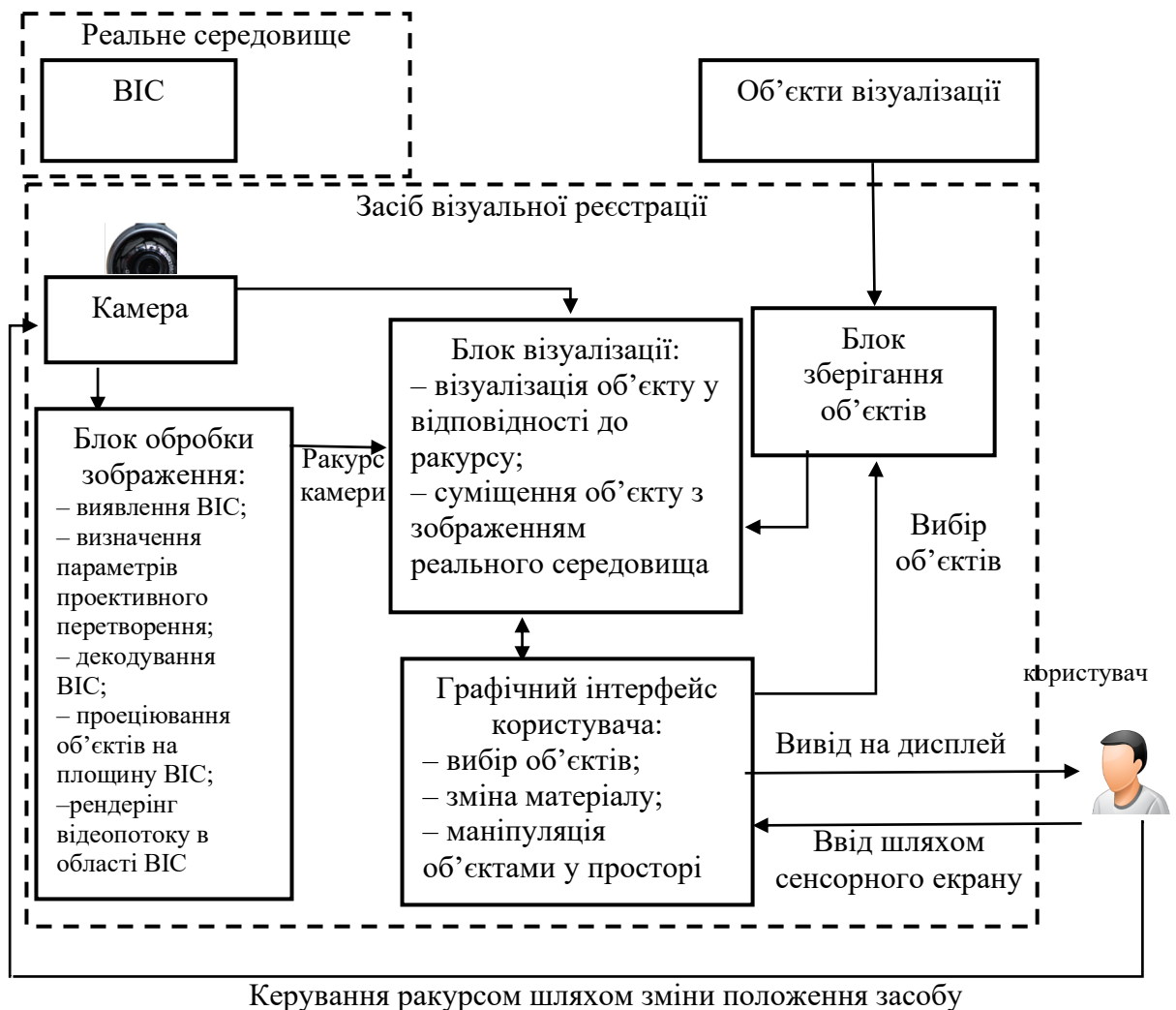


Рисунок 1 – Узагальнена схема системи доповненої реальності, що базується на візуальних інформаційних структурах

Формалізація операцій, що проводяться над ВІС, представлена у формалізмі теоретико-категорного підходу, в рамках якого сформульовано ряд визначень і теорем. Будемо говорити, що задана система ВІС, якщо визначено, які множини можуть виступати в якості множини методів і множини імплементацій, і які відображення допускаються в якості ВІС. Будемо вимагати, щоб клас всіх таких відображень був би замкнутий щодо композиції та включав в себе тотожні відображення. Це, в свою чергу, означає, що задати систему ВІС – означає задати конкретну категорію  $\mathcal{C}$ , наприклад, підкатегорію категорії множин і відображень. При цьому в якості ВІС можна вважати будь-який морфізм  $\varphi \in \mathcal{C}(X, Y)$  цієї категорії.

У загальному випадку можна відмовитися від вимоги, щоб категорія  $\mathcal{C}$  обов'язково була б підкатегорією категорії множин, для отримання нетривіальних результатів достатньо, щоб вона належала до декартово замкнутих категорій – типу категорій, у яких кожен морфізм, що задано на добутку двох об'єктів, можна природно ідентифікувати із морфізмом на одному із множників. З точки зору програмування декартово замкнуті категорії реалізують інкапсуляції аргументів функцій, тобто кожен аргумент представляється об'єктом категорії (у програмуванні об'єкти – це типи даних) і використовується як окрема сутність. При цьому виразності декартово замкнутих категорій цілком достатньо, щоб оперувати з функціями способом, прийнятим в  $\lambda$ -численні, що робить їх природними категорними моделями типізованого  $\lambda$ -числення, прикладами яких є:

- категорія множин **Set** природним чином є декартово замкнутою категорією, оскільки функції з однієї множини в іншу утворюють множину і, отже, є об'єктом. Також в ній існують декартові добутки і термінальний об'єкт – синглетон;

- якщо  $G$  є групою, то категорія всіх  $G$ -множин є декартово замкнутою;

- категорія всіх скінченних  $G$ -множин також є декартово замкнутою;

- категорія **Cat** всіх малих категорій (і функторів, як морфізмів) є декартово замкнутою;

- елементарний топос є декартово замкнутою категорією за означенням.

Системою формальних ВІС називається категорія  $\mathcal{C}$ , в якій для кожної пари об'єктів  $X$  і  $Y$  визначена деяка множина  $\mathcal{C}_s(X, Y) \subset \mathcal{C}(X, Y)$  морфізмів, причому виконується така умова технологічної замкнутості: якщо задані морфізми  $\varphi: X \rightarrow S$ ,  $\psi: Y \rightarrow S$  і  $\sigma: X \rightarrow Y$  такі, що  $\varphi = \psi \circ \sigma$ , то  $\varphi \in \mathcal{C}_s(X, S)$  тоді і тільки тоді, коли  $\psi \in \mathcal{C}_s(Y, S)$ .  $S$ -структурою будемо називати морфізми  $\varphi: X \rightarrow S$ , де  $X$  – довільний об'єкт категорії,  $S$ -методом – морфізм  $\alpha: X \rightarrow S$ ,  $\alpha \in \mathcal{C}_s(X, S)$ . Об'єкт  $X$  будемо називати областю імплементацій  $S$ -структури  $\varphi$ . Метод  $\alpha: A \rightarrow S$  вважається сумісним по інтерфейсу з ВІС  $\varphi: X \rightarrow S$ , якщо для деякого морфізму  $\beta: A \rightarrow X$  маємо, що  $\alpha = \varphi \circ \beta$ .

Формальною технологією з  $S$  в  $T$  називається пара ВІС –  $S$ -структура і  $T$ -структура – із загальною областю імплементацій, тобто пара морфізмів  $\varphi: X \rightarrow S$  і  $\psi: X \rightarrow T$ . Така технологія діє на  $S$ -методи, перетворюючи їх у  $T$ -методи. Технологія  $(\varphi, \psi)$  вважається прийнятною для метода  $\alpha: A \rightarrow S$ , якщо

цей метод сумісний по інтерфейсу зі структурою  $\varphi$ , тобто  $\alpha = \varphi \circ \beta$  для деякого  $\beta: A \rightarrow X$ . Результатом застосування технології до метода  $\alpha$  в цьому випадку вважається метод  $\psi \circ \beta: A \rightarrow T$  (цей морфізм є методом в силу умови технологічної замкнутості).

Властивості як ВІС, так і технологій, можуть бути розділені на дві групи. До першої групи віднесемо властивості, засновані на тому, як влаштовані ці структури і технології. До другої – властивості, що описують, якими методами ці ВІС можна обробляти, і як ці технології діють на методи. Властивості першого виду будемо називати інтенціональними, властивості другого виду – екстенціональними.

Нехай  $\varphi: X \rightarrow S$  – деяка ВІС. Позначимо символом  $S\varphi$  множину  $S$ -методів, сумісних із структурою  $\varphi$ .

**Визначення.** ВІС  $\varphi$  є окремим випадком структури  $\psi$ , якщо  $S\varphi \subset S\psi$ .

Це визначення є екстенціональним, дамо тепер його інтенціональний аналог.

**Визначення.** Нехай  $\varphi: X \rightarrow S$  і  $\psi: Y \rightarrow S$  – дві ВІС. Будемо говорити, що першу з них можна порівняти з другою, якщо існує морфізм  $\chi: X \rightarrow Y$  такий, що  $\varphi = \psi \circ \chi$ . У цьому випадку будемо також називати структуру  $\varphi$  підструктурою ВІС  $\psi$ .

**Теорема.** Якщо ВІС  $\varphi: X \rightarrow S$  можна порівняти зі структурою  $\psi: Y \rightarrow S$ , то будь-який метод, що сумісний по інтерфейсу зі структурою  $\varphi: X \rightarrow S$ , є сумісним і з ВІС  $\psi: Y \rightarrow S$ , тобто якщо одна ВІС є підструктурою іншої, то вона є також її окремим випадком.

**Доведення.** Нехай структури  $\varphi: X \rightarrow S$ ,  $\psi: Y \rightarrow S$  і морфізм  $\chi: X \rightarrow Y$  задовольняють умовам визначення. Якщо метод  $\alpha: A \rightarrow S$  такий, що  $\alpha \in S\varphi$ , тобто для деякого морфізма  $\beta: A \rightarrow X$  маємо  $\alpha = \varphi \circ \beta$ , то морфізм  $\chi \circ \beta: A \rightarrow Y$  задовольняє рівності  $\alpha = \psi \circ \chi \circ \beta$ , звідки  $\alpha \in S\psi$ .

Перейдемо тепер до технологій. Як приклад того, як екстенціональні операції, визначені на технологіях, зводяться до інтенціональних, розглянемо операцію композиції технологій.

**Визначення.** Композиція двох технологій – це така технологія, яка перетворює метод  $\alpha$  у метод  $\beta$  в тому і тільки в тому випадку, коли існує такий метод  $\gamma$ , що перша технологія перетворює  $\alpha$  в  $\gamma$ , а друга –  $\gamma$  в  $\beta$ .

Це визначення, очевидно, є екстенціональним. Дамо його інтенціональний аналог. Для того, щоб це було можливо, будемо вважати, що в заданій категорії існують декартові квадрати.

**Теорема.** Нехай  $S \xleftarrow{\varphi} X \xrightarrow{\sigma} S$  та  $S \xleftarrow{\varphi} Y \xrightarrow{\tau} S$  – технології, а вираз (1):

$$\begin{array}{ccc} Z & \xrightarrow{\mu} & Y \\ \downarrow_{\lambda} & & \downarrow_{\varphi} \\ X & \xrightarrow{\sigma} & S \end{array} \quad (1)$$

– декартовий квадрат. Тоді технологія  $S \xleftarrow{\varphi \circ \lambda} Z \xrightarrow{\sigma \circ \mu} S$  є композицією технологій  $S \xleftarrow{\varphi} X \xrightarrow{\sigma} S$  та  $S \xleftarrow{\varphi} Y \xrightarrow{\tau} S$ .

Побудова декартова квадрата – це класична операція теорії категорій. Якщо

доведено, що в категорії, яка описує деяку структуру знань, існують декартові квадрати, і є метод для їх побудови, то є можливість для побудови композиції.

Теоретико-категорійною мовою можуть бути описані не тільки алгоритми отримання результатів на основі знань, але й алгоритми автоматичного формування нових знань. Основним інструментом для такого формування є операція узагальнення. Узагальнення технологій – завдання досить складне, і далеко ще не вирішене. Більш просте завдання – завдання узагальнення ВІС – полягає в тому, щоб по парі ВІС побудувати таку третю ВІС, щоб, кожна з двох вихідних була би її частинним випадком. Сформулюємо все це більш строго.

**Визначення.** Нехай задана мала категорія  $C$ , і нехай  $S$  – об'єкт цієї категорії. Позначимо символом  $C/S$  множину морфізмів виду  $X \rightarrow S$ , де  $X$  – довільний об'єкт категорії  $C$ . Якщо  $\varphi: X \rightarrow S$  і  $\psi: Y \rightarrow S$  – дві ВІС, тобто  $\varphi, \psi \in C/S$ , то покладемо  $\varphi \leq \psi$ , якщо існує морфізм  $\chi: X \rightarrow Y$  такий, що  $\varphi = \psi \circ \chi$ .

**Теорема.** Відношення  $\leq$  є відношенням передпорядку на множині  $C/S$ .

**Доведення.** Нагадаємо, що відношення передпорядку – це бінарне відношення в теорії порядку, що є рефлексивним та транзитивним. Рефлексивність випливає з того, що для одиничного морфізма  $\text{id}_X: X \rightarrow X$  маємо  $\varphi = \text{id}_X \circ \varphi$ . Нехай тепер для трьох ВІС  $\varphi: X \rightarrow S$ ,  $\psi: Y \rightarrow S$  і  $\chi: Z \rightarrow S$  маємо, що  $\varphi \leq \psi \leq \chi$ . Це означає, що для деяких  $\sigma: X \rightarrow Y$  і  $\tau: Y \rightarrow Z$  виконуються рівності  $\varphi = \psi \circ \sigma$  і  $\psi = \chi \circ \tau$ . Але тоді  $\varphi = \psi \circ \tau \circ \sigma$ , тобто  $\varphi \leq \chi$ , чим і доведена транзитивність.

Якщо на деякій множині  $P$  задано відношення передпорядку  $\leq$ , то відношення  $\sim$ , яке визначається умовою  $x \sim y \Leftrightarrow z \leq y \ \& \ y \leq x$ , є відношенням еквівалентності, і відношення  $\leq$  індукує частковий порядок на фактор-множині множини  $P$  по цьому відношенню (яку далі будемо позначати символом  $\bar{P}$ ). Перехід від множини  $C/S$  до множини  $\bar{C/S}$  є виправданим, оскільки якщо  $\varphi, \psi$  – це  $S$ -структури, то еквівалентність  $\varphi \sim \psi$ , тобто  $\varphi \leq \psi, \psi \leq \varphi$  означає, в світлі теореми, доведеної вище, що  $S\varphi = S\psi$ , тобто еквівалентні об'єкти, розрізняючись у інтенціональному сенсі, збігаються в екстенціональному, бо описують ту ж саму множину ВІС.

Тепер дамо основне визначення, пов'язане з теорією узагальнень ВІС.

**Визначення.** Зразок  $\sigma: Z \rightarrow S$  називається мінімальним узагальненням ВІС  $\varphi: X \rightarrow S$  і  $\psi: Y \rightarrow S$ , якщо:

1) існують морфізми  $\lambda$  і  $\mu$  такі, що діаграма (2):

$$\begin{array}{ccccc} S & = & S & = & S \\ \uparrow_{\varphi} & & \uparrow_{\sigma} & & \uparrow_{\psi} \\ X & \xrightarrow{\lambda} & Z & \xleftarrow{\mu} & Y \end{array} \quad (2)$$

є комутативною;

2) якщо  $Z'$  – об'єкт, а  $\sigma', \lambda', \mu'$  – морфізми, для яких діаграма (3):

$$\begin{array}{ccccc}
 S & = & S & = & S \\
 \uparrow_{\phi} & & \uparrow_{\sigma} & & \uparrow_{\psi} \\
 X & \xrightarrow{\lambda'} & Z' & \xleftarrow{\mu'} & Y
 \end{array} \quad (3)$$

комутативна, то існує морфізм, що робить комутативною діаграму (4):

$$\begin{array}{ccc}
 S & = & S \\
 \uparrow_{\sigma} & & \uparrow_{\sigma'} \\
 Z & \xrightarrow{\tau} & Z'
 \end{array} \quad (4)$$

Як видно, мінімальне узагальнення є перекладом на мову морфізмів для визначення точної верхньої межі в множині  $\mathbf{C}/S$ .

Формалізм теорії категорій не тільки дозволяє дати визначення мінімального узагальнення ВІС у досить загальному вигляді, він також дозволяє звести процес побудови мінімального узагальнення до простіших операцій теорії категорій. Одним із прикладів того, як це можна зробити, служить наступна теорема.

**Теорема.** Нехай задані ВІС  $\phi: X \rightarrow S$ ,  $\psi: Y \rightarrow S$ , і нехай об'єкт  $Z$  разом з морфізмами  $\sigma: X \rightarrow Z$  і  $\tau: Y \rightarrow Z$  – пряма сума об'єктів  $X$  і  $Y$ . Розглянемо морфізм  $\chi: Z \rightarrow S$ , що робить комутативною діаграму (5):

$$\begin{array}{ccccc}
 S & = & S & = & S \\
 \uparrow_{\phi} & & \uparrow_{\chi} & & \uparrow_{\psi} \\
 X & \xrightarrow{\lambda} & Z & \xleftarrow{\mu} & Y
 \end{array} \quad (5)$$

(існування і єдиність такого морфізма впливає з визначення прямої суми).

Тоді зразок  $\chi: Z \rightarrow S$  є мінімальним узагальненням для ВІС  $\phi: X \rightarrow S$  і  $\psi: Y \rightarrow S$ .

**Доведення.** Перша діаграма визначення мінімального узагальнення є повторення діаграми з умови теореми. Нехай тепер є комутативною діаграма (6):

$$\begin{array}{ccccc}
 S & = & S & = & S \\
 \uparrow_{\phi} & & \uparrow_{\chi'} & & \uparrow_{\psi} \\
 X & \xrightarrow{\lambda'} & Z' & \xleftarrow{\mu'} & Y
 \end{array} \quad (6)$$

Морфізми  $\lambda': X \rightarrow Z'$  і  $\mu': Y \rightarrow Z'$  визначають морфізм  $\xi': Z \rightarrow Z'$ , для якого  $\lambda' = \xi \circ \lambda$  і  $\mu' = \xi \circ \mu$ , тоді (7), (8):

$$\chi' \circ \xi \circ \lambda = \chi' \circ \lambda' = \phi = \chi \circ \lambda, \quad (7)$$

$$\chi' \circ \xi \circ \mu = \chi' \circ \mu' = \psi = \chi \circ \mu, \quad (8)$$

звідки отримуємо вираз (9):

$$\chi' \circ \xi = \chi, \quad (9)$$

що завершує доведення.

Умова теореми не є необхідною. Мінімальне узагальнення ВІС  $\phi: X \rightarrow S$  і  $\psi: Y \rightarrow S$  може існувати і в тому випадку, коли не існує прямої суми об'єктів  $X$  і  $Y$ . Оскільки у визначенні мінімального узагальнення немає ніяких вимог єдиності, то немає можливості стверджувати, що мінімальне узагальнення визначається однозначно з точністю до ізоморфізму. Крім того, мінімальне

узагальнення визначено не для пари об'єктів, а для пари структур, тобто в загальному випадку може залежати не тільки від об'єктів  $X$  і  $Y$ , але і від морфізмів  $\varphi$  і  $\psi$ , в той час, як пряма сума будується по парі об'єктів.

Застосування формалізму теоретико-категорійного підходу дозволило показати можливість узагальнення ВІС та довело наявність ВІС, що володіє ознаками як матричних кодів, так візуальних маркерів. Перейдемо тепер від формальних ВІС до їх визначення через функціональні вимоги. Нехай задано список вимог  $R_k$  і список відповідних логічних функцій  $\Theta_k(f)$ , кожна з яких приймає істинне значення тоді і тільки тоді, якщо для матричного коду  $f$  задовольняється відповідна вимога  $R_k$ .

**Визначення.** Візуальна інформаційна структура – це матричний код  $f$ , для якого істинна кон'юнкція  $\bigcap_k \Theta_k(f)$ .

Теоретичні основи побудови і використання ВІС доповненої реальності (Augmented Reality Visual Information Structures (ARVIS)) розглядаються у вигляді сукупності моделей, методів та інформаційних технологій побудови і використання ВІС доповненої реальності з урахуванням вимог до ВІС та критеріїв оцінки якості ВІС, які певним чином пов'язані між собою і реалізують прийоми, способи і методи, що забезпечують побудову і використання ВІС доповненої реальності. Метою розробки теоретичних основ побудови і використання ВІС є розробка моделей та методів побудови і використання ВІС.

ARVIS розглядається у вигляді сукупності множин:  $T^{ARVIS}$  – вираз (10),  $\{D_1^{ARVIS}\}$  – вираз (11),  $\{L_j^1\}$  – вираз (12):

$$T^{ARVIS} = \{In^{ARVIS}, \{D_1^{ARVIS}\}\}, \quad (10)$$

$$\{D_1^{ARVIS}\} = \{\{F_i^1\}, \{L_j^1\}\}, \quad (11)$$

$$L_j^1 = \{\{V_j^1\}, \{C_s^1\}, \{I_m^1\}, \{O_n^1\}, \{M_r^1\}\}, \quad (12)$$

де  $In^{ARVIS}$  – сукупність моделей та методів, що забезпечують побудову і використання ВІС доповненої реальності;  $\{D_1^{ARVIS}\}$  – множина рівнів деталізації представлення ARVIS;  $\{F_i^1\}$  – множина складових елементів на  $\{D_1^{ARVIS}\}$  рівні деталізації представлення ARVIS;  $\{L_j^1\}$  – множина внутрішніх та граничних взаємодій елементів ARVIS;  $\{V_j^1\} \subseteq \{L_j^1\}$  – множина внутрішніх взаємодій між елементами ARVIS з множини  $\{F_i^1\}$ ;  $\{C_s^1\} \subseteq \{L_j^1\}$  – множина керуючих взаємодій програмних та технічних засобів, що реалізують ARVIS;  $\{I_m^1\} \subseteq \{L_j^1\}$  – множина вхідних даних ARVIS;  $\{O_n^1\} \subseteq \{L_j^1\}$  – множина вихідних даних ARVIS;  $\{M_r^1\} \subseteq \{L_j^1\}$  – множина, що відображає математичний апарат, що використовується при розробці ARVIS.

На рис. 2 представлено зв'язок множин, що описує область та границі

представлення ARVIS у відповідності з виразом (13):

$$O_1^0 D_0^{ARVIS} = \left\{ \left\{ F_1^0 \right\}, \left\{ C_1^0, I_1^0, I_2^0, O_1^0, O_2^0, M_1^0 \right\} \right\}. \quad (13)$$

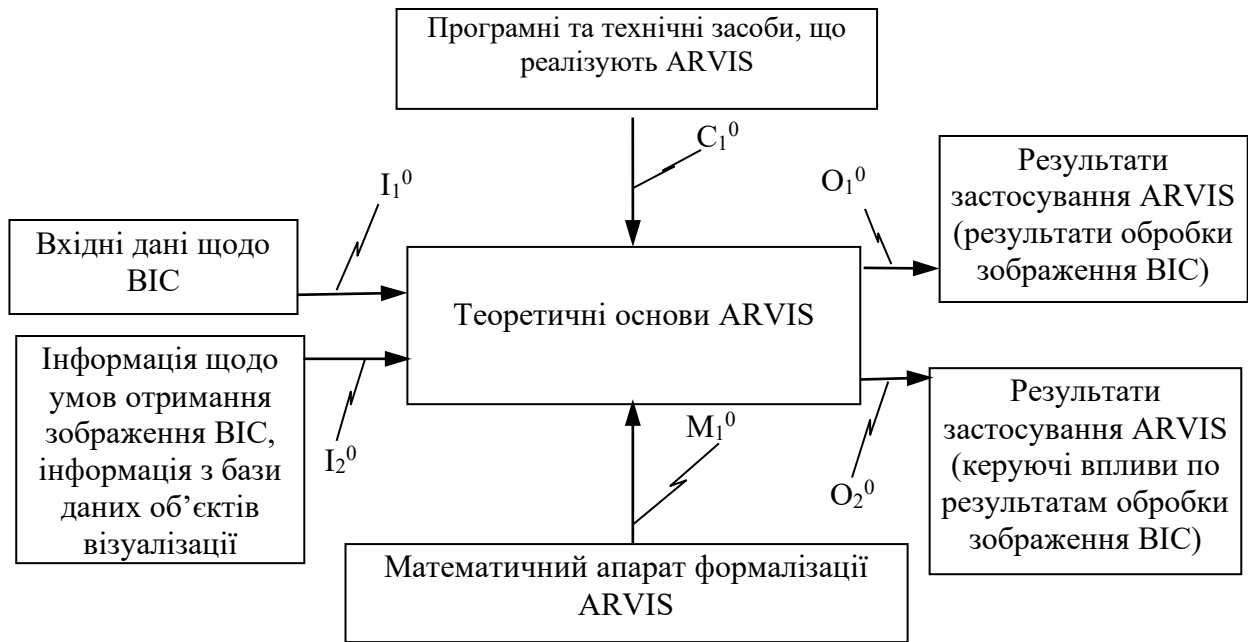


Рисунок 2 – Зв'язок множин верхнього рівня, що описує область та границі представлення ARVIS

На рис. 3 наведено зв'язок множин, що описує елементи ARVIS у відповідності до виразу (14):

$$D_1^{ARVIS} = \left\{ \left\{ F_t^1 \right\}, \left\{ C_1^0, I_1^0, I_2^0, O_1^0, O_2^0, M_1^0, \left\{ V_t^1 \right\} \right\} \right\}, \quad (14)$$

де  $t=1,2,\dots,11$  – кількість внутрішніх взаємодій у верхній дочірній діаграмі.

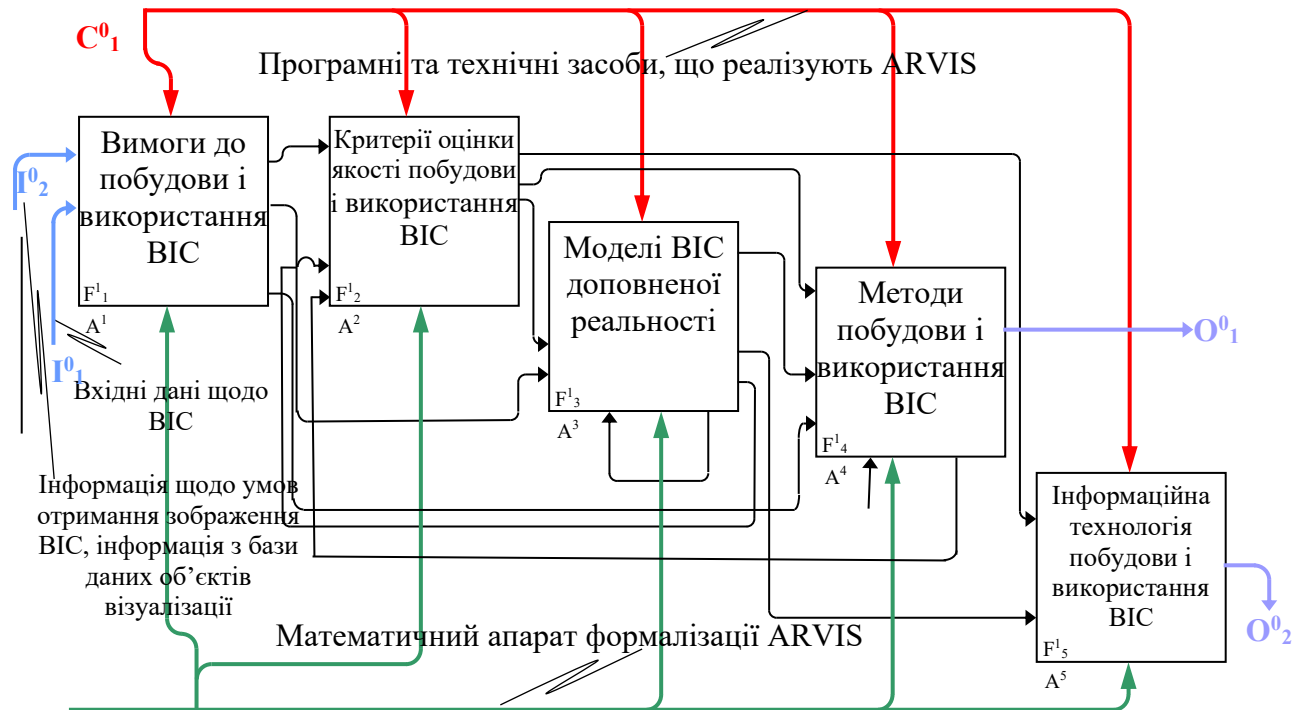


Рисунок 3 – Зв'язок множин, що описує елементи ARVIS

Сформульовано основні вимоги до ВІС доповненої реальності, а саме:

- помітність: ВІС повинні легко і швидко знаходитися у відео-поточці;
- простота: ВІС повинні бути побудовані з використанням мінімальної кількості кольорів (або градацій сірого);
- інформативність: ВІС повинні містити додаткову інформацію (повідомлення); дана вимога – основна, яка відрізняє ВІС від існуючих типів візуальних маркерів доповненої реальності; наявність додаткової інформації дозволяє суттєвим чином розширити сферу застосування ВІС, в першу чергу завдяки розширенню інтерактивності і універсальності застосувань;
- орієнтованість: ВІС повинні дозволяти визначати положення камери в момент отримання кожного кадру, де виявлено ВІС;
- робастність: ВІС повинні задовольняти вимогам інформативності та робастності при втраті до 50% інформації про ВІС (наприклад, при закритті зображення ВІС завадою чи фізичній відсутності будь-якої частини ВІС);
- криптостійкість: повідомлення, що закодоване у ВІС, повинно бути стійким до криптоатак;
- універсальність: технології обробки ВІС повинні використовувати мінімум апріорної інформації.

Визначено показники якості ВІС та критерії їх оцінки.

В роботі удосконалено модель ВІС доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості (вираз (15)), проведення стохастичного перевпорядкування (вираз (16)) та контейнеризації даних (вираз (17)), що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних.

$$f = \hat{S}f_0, \quad (15)$$

де  $f_0$  – зображення-повідомлення;  $f$  – зображення із надлишковістю;  $\hat{S}$  – оператор введення надлишковості;

$$g = \hat{P}f, \quad (16)$$

де  $g$  – перевпорядковане зображення;  $\hat{P}$  – оператор стохастичного перевпорядкування;

$$\gamma = \hat{B}g, \quad (17)$$

де  $\gamma$  – зображення ВІС;  $\hat{B}$  – оператор контейнеризації даних.

Отже, в операторній формі у загальному вигляді дана модель може бути представлена виразом (18):

$$\gamma = \hat{B}\hat{P}\hat{S}f_0 \quad (18)$$

Наведені метод використання ВІС в якості стійкого матричного коду для передачі інформації та метод використання ВІС в якості візуального маркера доповненої реальності. Основні відмінності запропонованих методів у порівнянні з відомими є такі:

- внаслідок відсутності виділених елементів синхронізації ВІС, на відміну від візуальних маркерів, надає можливість зовнішнього калібрування камери по будь-якій зв'язній області ВІС (потребує розробки спеціального алгоритму визначення параметрів проективного перетворення, який описано нижче);
- ВІС, на відміну від візуальних маркерів, надає можливість внутрішнього

калібрування камери, що дозволяє проводити фізично адекватну візуалізацію;

– ВІС, на відміну від візуальних маркерів, надає можливість закодувати у повідомленні посилання на 3d об'єкт і/або відео-файл, які будуть використовуватися для візуалізації.

Так само, не конкретизуючи імплементацію процедур виявлення чи декодування, які суттєвим чином залежать від імплементації обраного методу побудови ВІС, зауважимо, що, завдяки введень надлишковості і стохастичному перевпорядкуванню даних, ВІС, як матричний код, надає можливість стійкого і криптозахищеного відтворення інформації в умовах втрат.

**У третьому розділі** дисертації наведено розроблені модель та метод формування стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності; метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності без врахування додаткової апріорної інформації, метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, метод рендерингу відеопотоку в області маркера доповненої реальності.

Для опису моделі стійкого мозаїчного стохастичного візуального AR-маркера використано QR-код (розмір  $N=21$ , в якому закодовано повідомлення "Hello, world!") у якості зображення-повідомлення. Оператор введення надлишковості  $\hat{S}$  пропонується реалізувати у вигляді процедури масштабування бінарного зображення-повідомлення у задане число разів  $k$  методом найближчого сусіда, що можна формалізувати у вигляді (19):

$$f^{(m,n)}(i,j) = f_0(m,n), \quad (19)$$

де, як і раніше,  $f_0$  – зображення-повідомлення;  $f$  – блочно-збільшене зображення;  $(m,n)$  – координати пікселів у зображенні-повідомленні і, відповідно, блоків у збільшеному зображенні;  $(i,j)=0\dots(k-1)$  – координати пікселів в межах кожного блоку. Теоретична оцінка допустимого розміру блоку  $k$  проводиться нижче на основі аналізу умови робастності.

Оператор стохастичного перевпорядкування даних  $\hat{P}$  пропонується реалізувати у вигляді процедури перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки  $p$ , що можна записати у вигляді (20):

$$g^{(m',n')} = f^{(m',n')}[p] \quad (20)$$

де  $g$  – блочно-пермутоване зображення; індекси  $(m',n')$  нумерують блоки.

Зауважимо, що розмір блоку перемішування  $b$  у загальному випадку не співпадає з  $k$ .

Оператор додавання мозаїчного біт-контейнера  $\hat{V}$  пропонується реалізувати у вигляді процедури кодування кольором клітинок маркера, які розділяються рамкою з проміжним кольором. Зображення  $g$  є бінарним, кожен його піксель приймає значення 0 і 1, які кодуються кольорами клітинок маркера  $c_0$  і  $c_1$ , відповідно; клітинки розділяються рамкою з проміжним кольором  $c_2$ , що можна записати у вигляді (21):

$$\gamma^{(m'',n'')} (i,j) = \begin{cases} c_1 g(m'',n'') + c_0 (1 - g(m'',n'')), & a_1 < (i,j) < a_0 - a_1 \\ c_2, & (i,j) \leq a_1, (i,j) \geq a_0 - a_1 \end{cases} \quad (21)$$

де  $(m'',n'')$  – координати пікселів у пермутованому зображенні  $g$  і, відповідно, блоків у зображенні маркера  $\gamma$ ;  $(i,j) = 0..a_0 - 1$  – координати пікселів в межах кожного блоку;  $a_0$  – розмір клітинки;  $a_1$  – розмір рамки (рис. 4).



Рисунок 4 – Зображення AR-маркера

Вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення. Послідовність дій методу наведена на рис. 5.

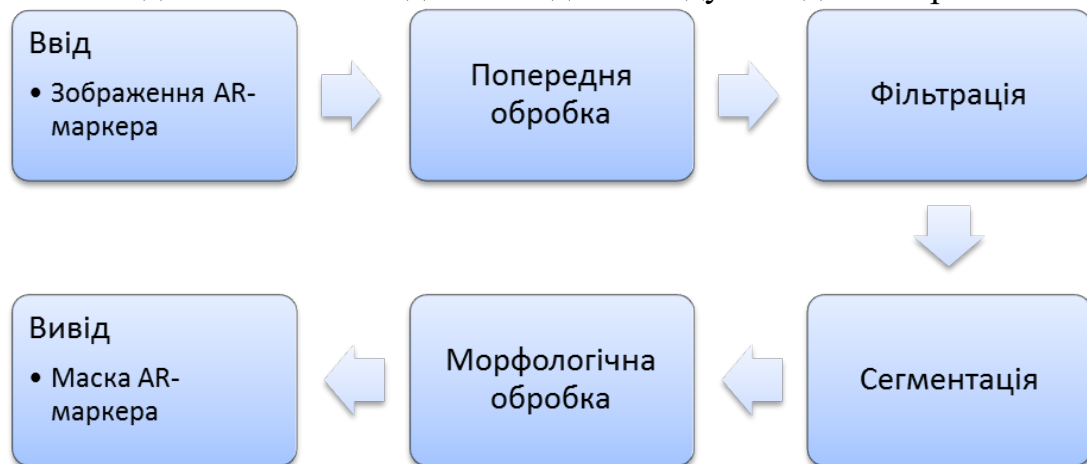


Рисунок 5 – Послідовність дій методу виявлення мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності

Попередня обробка вхідного зображення включає в себе перехід від кольорового до зображення у градаціях сірого. Для знаходження області маркера проводиться фільтрація зображення так званим  $std$ -фільтром. Зауважимо, що максимальний відгук фільтра буде на границях клітинок біт-контейнерів. Маску області маркера отримана шляхом адаптивну бінаризації методом Отсу. Знаходження масок біт-контейнерів знаходиться шляхом сегментації вихідного

зображення методом К-середніх на 3 класи. При цьому, за побудовою, маска контейнера для біта 0 представляє собою клас з мінімальною середньою інтенсивністю, для біт 1 – максимальною.

Наступним кроком є фільтрація масок біт-контейнерів, що якісно виконується за допомогою операції морфологічного розмикання по квадратному вікню. Проведено вибір розміру вікна, такого, щоб максимально відфільтрувалися артефакти і при цьому не видалялись інформаційні елементи.

Вперше розроблено метод визначення параметрів проєктивного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апріорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера. Для детального опису методів відстеження точкових особливостей, калібрування камери і реконструкції тривимірних об'єктів введена модель перспективного проєціювання і описані геометричні властивості цього перетворення. Точки декількох зображень, отриманих за допомогою перспективної проєкції, знаходяться в особливих відношеннях одна з одною, які описуються епіполлярною геометрією.

Розглянемо площину, що задається рівнянням  $Z=0$ , однорідні тривимірні координати будь-якої її точки можна представити у виді  $M=(X, Y, 0, 1)$ . Для будь-якої камери з матрицею проєціювання камери  $P$ , перспективне перетворення площини описується матрицею розмірності  $3 \times 3$  (вираз (22)):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Оскільки будь-яку площину в 3-вимірному просторі можна перевести в площину  $Z=0$  евклідовим перетворенням повороту і перенесення, що еквівалентно домноженню матриці проєціювання камери  $P$  на деяку матрицю перетворення  $E$ , то перспективне відображення довільної площини в просторі описується лінійним перетворенням з матрицею розмірності  $3 \times 3$ . У матричній формі проєктивне перетворення (гомографія) записується як (вираз (23)):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

де введено матрицю (вираз (24)):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Якщо вся сцена або її частина являє собою площину, то її зображення, що

створені камерами з незбіжними центрами, можна перевести одне в одне перетворенням гомографії (вираз (25)):

$$\begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

де  $(x_i, y_i)$  і  $(x'_i, y'_i)$  – набори точок на зображеннях; індекс  $i=1..n$  нумерує відповідні точки;  $n$  – загальна кількість точок.

Переходячи від однорідних координат до звичайних, отримуємо систему рівнянь (вирази (26)-(27)):

$$x'_i = \frac{h_{00}x_i + h_{01}y_i + h_{02}}{h_{20}x_i + h_{21}y_i + h_{22}}, \quad (26)$$

$$y'_i = \frac{h_{10}x_i + h_{11}y_i + h_{12}}{h_{20}x_i + h_{21}y_i + h_{22}}, \quad (27)$$

або (вирази (28)-(29)):

$$x'_i (h_{20}x_i + h_{21}y_i + h_{22}) = h_{00}x_i + h_{01}y_i + h_{02}, \quad (28)$$

$$y'_i (h_{20}x_i + h_{21}y_i + h_{22}) = h_{10}x_i + h_{11}y_i + h_{12}, \quad (29)$$

що можна переписати у вигляді рівнянь відносно вектора невідомих коефіцієнтів  $\mathbf{h}$  (вираз (30)):

$$\begin{pmatrix} x_i & y_i & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_i x_i & -x'_i y_i & -x'_i \\ 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & 1 & -y'_i x_i & -y'_i y_i & -y'_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_{00} \\ h_{01} \\ h_{02} \\ h_{10} \\ h_{11} \\ h_{12} \\ h_{20} \\ h_{21} \\ h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (30)$$

Щоб знайти матрицю проєктивного перетворення, необхідно розв'язати систему рівнянь (31):

$$\mathbf{A}\mathbf{h} = \mathbf{0}, \quad (31)$$

де введено матрицю  $\mathbf{A}$  (вираз (32)):

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_1 x_1 & -x'_1 y_1 & -x'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y'_1 x_1 & -y'_1 y_1 & -y'_1 \\ & & & & & & \vdots & & \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x'_n x_n & -x'_n y_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -y'_n x_n & -y'_n y_n & -y'_n \end{pmatrix}, \quad (32)$$

вектор змінних (33)

$$\mathbf{h} = (h_{00} \quad h_{01} \quad h_{02} \quad h_{10} \quad h_{11} \quad h_{12} \quad h_{20} \quad h_{21} \quad h_{22})^T \quad (33)$$

та  $\mathbf{0}$ -вектор.

Система (31) є перевизначеною у загальному випадку, оскільки розмір матриці  $A \in 2n \times 9$ , вектора  $\mathbf{h} : 9 \times 1$ , а вектора  $\mathbf{0} : 2n \times 1$ . Тому розв'язок зводиться до мінімізації методом найменших квадратів (вираз (34)):

$$\min \|\mathbf{A}\mathbf{h} - \mathbf{0}\|_2. \quad (34)$$

Оскільки  $\mathbf{h}$  визначено з точністю до масштабу, то розв'язок шукається для одиничного по модулю вектора  $\tilde{\mathbf{h}}$ , при цьому розв'язок  $\tilde{\mathbf{h}}$  є власним вектором добутку матриць  $A^T A$  для найменшого власного значення цього добутку (псевдообернення Мура-Пенроуза). Отже, проєктивне перетворення задається 8 параметрами, і для їх знаходження достатньо знайти 4 опорні точки, які є вершинами прямокутника у неспотвореному зображенні. Для пошуку опорних точок запропоновано підхід, що ґрунтується на двох основних ідеях, які відрізняють його від існуючих:

– перехід замість координатного простору в індексний, тобто замість прямого задання координат на зображенні задаються індекси клітинок (причому порядок індексування може бути довільним), а координати знаходяться як функція множини точок клітинки, наприклад їх центроїд (центр мас);

– вибір цільової функції, яка приймає гострий екстремум для прямокутної системи точок.

Щодо вибору цільової функції, то зауважимо, що вектори усереднення по рядках (стовпцях) для проєктивно спотвореного бінарного зображення біт-контейнера  $\mathbf{b}$  представляють собою нерегулярні структури (рис. 6), в той час аналогічні вектори, побудовані для прямокутної системи точок є більш регулярними (рис. 7). Очевидно, що у другому випадку дисперсія  $D$  такого вектора буде більше.

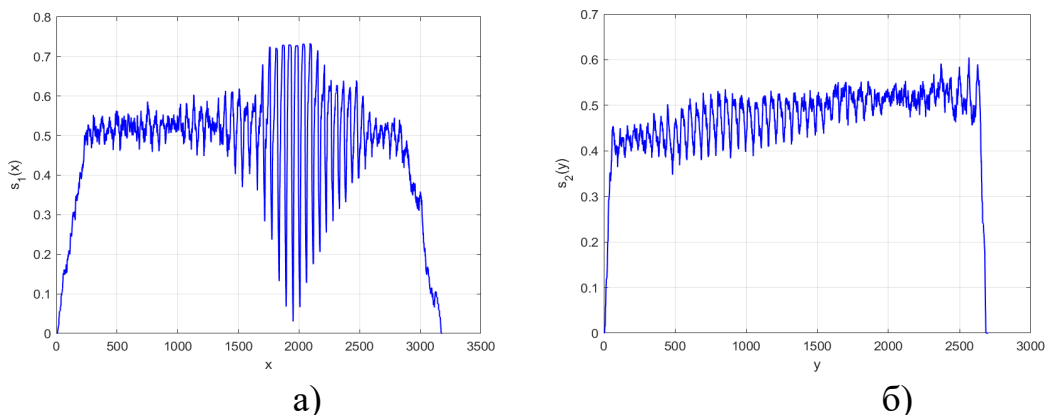


Рисунок 6 – Графіки усереднення для проєктивно спотвореного зображення  $\mathbf{b}$  :

а) по стовпцях; б) по рядках

Алгоритм визначення точок, по яких розраховується трансформація, складається із таких кроків:

1. Встановлюється лічильник ітерацій в 0 (індексація для ненульової кількості елементів проводиться з одиниці; для порожніх множин і початкових ініціалізацій індекс зручно задавати нуль) – вираз (35):

$$t = 0. \quad (35)$$

2. Розраховується цільова функція для бінарного зображення біт-контейнера  $\mathbf{b}$  (вираз (36)):

$$s_0 = s(\mathbf{b}). \quad (36)$$

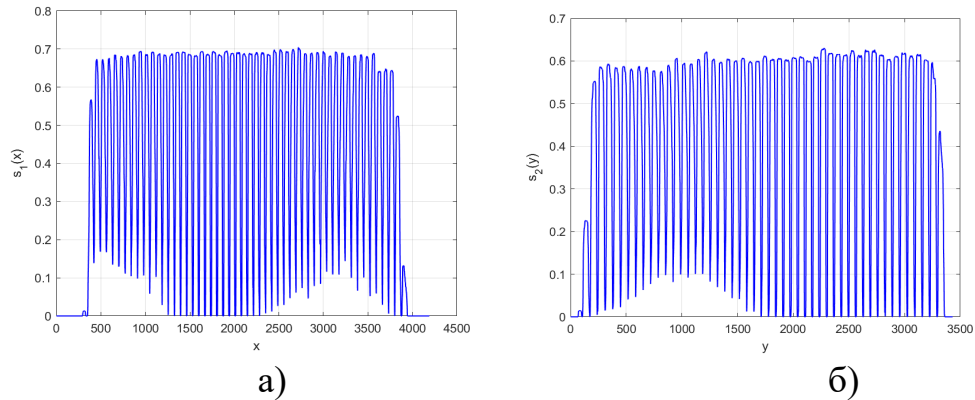


Рисунок 7 – Графіки усереднення для вирівняного зображення  $\mathbf{b}'$ : а) по стовпцях; б) по рядках

3. Вибираються 4 фіксовані точки  $P^0$ , що задають прямокутник у неспотвореному зображенні (вираз (37)):

$$P_1^0 = (1,1), P_2^0 = (1,1), P_3^0 = (w,1), P_4^0 = (w,h). \quad (37)$$

4. Вибираються 4 опорні точки наступним чином. Нехай  $\{x, y\}$  – вектор центроїдів, знайдемо тоді індекси  $ind_1..ind_4$  шуканих точок як (вирази (38)-(41)):

$$ind_1 = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(+x_i + y_i), \quad (38)$$

$$ind_2 = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(-x_i + y_i), \quad (39)$$

$$ind_3 = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(-x_i - y_i), \quad (40)$$

$$ind_4 = \underset{i}{\operatorname{argmin}}(+x_i - y_i). \quad (41)$$

5. Інкрементуємо лічильник ітерацій (вираз (42)):

$$t = t + 1. \quad (42)$$

6. В околі кожної із опорних точок знаходимо по  $k = 5$  (центральна точка і 4 сусідів в  $L_1$ -метриці) найближчих сусідів в  $L_1$ -метриці.

7. Для кожної із  $j = 1..k^4$  комбінацій по 4 точки:

– вибирається поточна комбінація точок  $P^j$  (рухомі точки);

– рахується матриця проєктивного перетворення  $H = H(P^j, P^0)$ ;

– проводиться геометрична трансформація бінарного зображення  $\mathbf{b}$  за допомогою знайденої матриці  $H$  (вираз (43)):

$$\mathbf{b}' = \hat{T}(\mathbf{b}, H); \quad (43)$$

– розраховується цільова функція (вираз (44)):

$$s'_j = s(\mathbf{b}'). \quad (44)$$

8. Знаходиться мінімум цільової функції по всіх комбінаціях рухомих точок (вираз (45)):

$$s_t = \min s', \quad (45)$$

і запам'ятовується комбінація точок  $P'$ , що йому відповідає.

9. Порівнюється поточне значення цільової функції із значенням на попередній ітерації: якщо  $s_t < s_{t-1}$ , тоді виводиться збережена комбінація  $P'$ ,

вихід; інакше – вибирається в якості опорних точок збережена комбінація  $P'$ , перехід до кроку 5.

На виході отримуємо збережену комбінацію точок  $P'$ , з якої розраховується матриця проєктивного перетворення  $H = H(P', P^0)$  і проводиться геометрична трансформація бінарного зображення біт-контейнера. Трансформоване зображення представляє собою прямокутну систему точок.

Вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію пермутованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації. Для декодування маркера необхідно вирішити задачу визначення кількості рядків і стовпців у робочій області, що зручно зробити по трансформованому зображенню маски AR-кода. Для цього скористаємося функціями  $s_1(x)$  (вираз (46)) і  $s_2(y)$  (вираз (47)).

$$s_1(x) = \frac{1}{h} \sum_y b_{x,y}, \quad (46)$$

$$s_2(y) = \frac{1}{w} \sum_x b_{x,y}, \quad (47)$$

де  $w, h$  – довжина і ширина зображення  $b$ , відповідно.

Область значення цих функцій – інтервал  $0..1$ . Так, щоб визначити кількість стовпців  $W$ , необхідно порахувати кількість перетинів знизу вгору функцією  $s_1(x)$  лінії порога  $\theta_1(x)$ ; аналогічно для визначення кількості рядків  $H$  порахуємо кількість перетинів знизу вгору функцією  $s_2(y)$  лінії порога  $\theta_2(y)$  (вирази (48)-(49)):

$$W = \sum_x \frac{d}{dx} \text{sign}(s_1(x) - \theta_1(x)), \quad (48)$$

$$H = \sum_y \frac{d}{dy} \text{sign}(s_2(y) - \theta_2(y)), \quad (49)$$

де  $\text{sign}(x)$  – функція, що повертає знак числа  $x$ .

Графіки функцій  $s_1(x)$  і  $s_2(y)$  ( $s_{1,2}$ ) наведені на рис. 8.

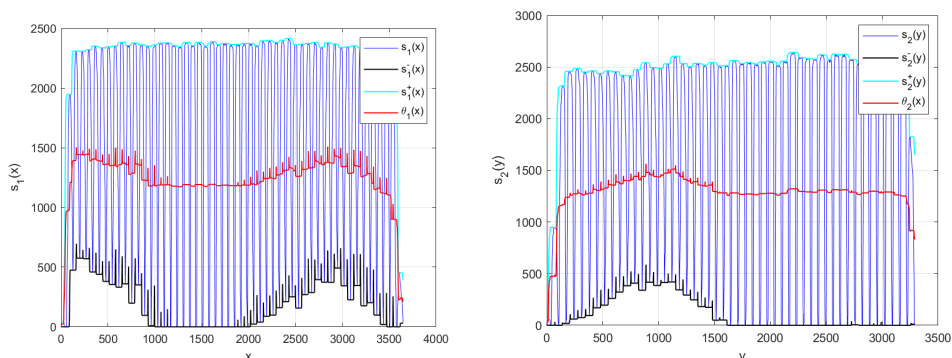


Рисунок 8 – Графіки функцій  $s_1(x)$  і  $s_2(y)$  ( $s_{1,2}$ ) з огинаючими і порогами

Пропонується функції порогів  $\theta_{1,2}$  визначати як середнє між верхньою і нижньою огинаючими відповідних функцій  $s_{1,2}$  (вираз (50)):

$$\theta_{1,2} = \frac{1}{2}(s_{1,2}^+ + s_{1,2}^-), \quad (50)$$

де верхні огинаючі  $s_{1,2}^+$  знаходяться за допомогою операції морфологічного розширення по відрізьку  $[a]$  (що еквівалентно локальному максимуму по цьому відрізьку) (вираз (51)):

$$s_{1,2}^+ = \max_{[a]} s_{1,2}. \quad (51)$$

Аналогічно, нижні огинаючі  $s_{1,2}^-$  знаходяться за допомогою операції морфологічного звуження по відрізьку довжиною  $[a]$  (що еквівалентно локальному мінімуму по цьому відрізьку) (вираз (52)):

$$s_{1,2}^- = \min_{[a]} s_{1,2}. \quad (52)$$

В роботі прийнято  $a = 63$ .

Зробивши геометричну трансформацію біт-контейнера і визначивши  $H, W$ , є можливість заповнити матрицьку біт-контейнера  $\gamma_{m,n}$  значеннями бітів (вираз (53)):

$$\gamma_{m(y),n(x)} = g'(y, x), \quad (53)$$

де  $g'(y, x)$  – трансформоване зображення біт-контейнера, а індекси  $m, n$  є функціями відповідних координат  $x, y$  і розраховуються як (вирази (54)-(55)):

$$m(y) = \left\lfloor \frac{y - \min y}{\max y - \min y} (H - 1) \right\rfloor + 1, \quad (54)$$

$$n(x) = \left\lfloor \frac{x - \min x}{\max x - \min x} (W - 1) \right\rfloor + 1, \quad (55)$$

де  $\lfloor x \rfloor$  – функція округлення знизу.

На етапі зсуву матрицькі біт контейнеру є вже заповнена матрицька біт-контейнера  $\gamma$ , але, оскільки для обробки міг бути представлений тільки фрагмент зображення, матрицька біт-контейнера може визначитися меншого розміру, і необхідно визначити положення заповненої матрицькі у матрицькі повного розміру  $\Gamma$  (її розмір  $63 \times 63$ ). Недостаючі значення, як і раніше, заповнюються нулями.

Для вирішення цієї задачі проводиться послідовний перебір всіх можливих способів вписування існуючого фрагменту у матрицьку повного розміру, після чого проводиться декодування (інверсна перестановка), для декодованої матрицькі розраховується деяка функція, що має різкий екстремум для правильно дешифрованих зображень. Оскільки у правильно декодованому зображенні його пікселі будуть суттєво корельованими, то функція повинна приймати екстремальні значення для цього випадку. Положення матрицькі біт-контейнера знаходиться з умови мінімуму цільової функції (вираз (56)):

$$\{m_0, n_0\} = \arg \min_{m,n} s(\hat{P}^{-1}\Gamma). \quad (56)$$

В якості такої функції можна взяти (вираз (57)):

$$s(\hat{P}^{-1}\Gamma) = \frac{1}{4} \left\langle \left| \nabla (\hat{P}^{-1}\Gamma) \right|^2 \right\rangle \quad (57)$$

де  $\hat{P}^{-1}$  означає інверсну перестановку, трикутні дужки  $\langle \dots \rangle$  позначають операцію усереднення, а коефіцієнт  $1/4$  введено з міркувань зручності (рис. 9).

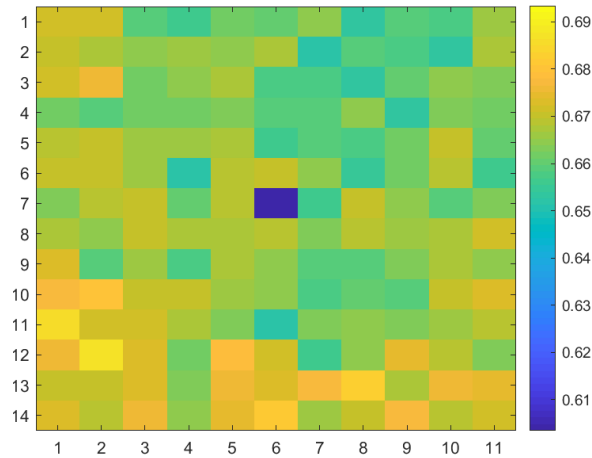


Рисунок 9 – Графік цільової функції  $s(\hat{P}^{-1}\Gamma)$  для всіх можливих положень

В даному випадку мінімум знаходиться в точці з координатами (6, 7), що відповідає індексам розташування верхнього лівого кута матриці біт-контейнера у повній матриці. Тоді повна матриця біт-контейнера заповнюється як (вираз (58)):

$$\Gamma_{m+m_0-1, n+n_0-1} = \gamma_{m,n}. \quad (58)$$

Декодування повної матриці біт-контейнера  $\Gamma$  проводиться за допомогою інверсної псевдовипадкової перестановки  $\hat{P}^{-1}$  (вважається, що вона відома) (вираз (59)):

$$G = \hat{P}^{-1}(\Gamma). \quad (59)$$

Наступним етапом проводиться заповнення невизначених пікселів. Ця операція проводиться для кожного блоку розміром  $3 \times 3$  пікселі, значення блоку присвоюється тому біту, що зустрічається найчастіше (нульові елементи до розгляду не беруться). Це виконується за допомогою  $\lambda$ -функції (у MATLAB-нотації) (вираз (60)):

$$\text{fun} = @(\lambda) \text{mode}(\lambda(\lambda > 0)), \quad (60)$$

де  $\text{mode}(\lambda)$  – функція, що повертає моду послідовності  $\lambda$  (елемент послідовності, що зустрічається найчастіше).

Отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потоків в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення. Найпростіший випадок перспективної проєкції практично завжди не відповідає реальній камері. Відстань від центру проєкції до площини зображення, тобто фокусна відстань, що позначається  $f$ , зазвичай не дорівнює 1. Також координати точки в площині зображення можуть не збігатися з абсолютними координатами. При використанні цифрової камери, співвідношення

між координатами точки в зображенні і абсолютними координатами точки на ідеальній площині визначається формою і розмірами пікселів матриці. Позначимо розміри пікселя матриці цифрової камери  $p_x, p_y$ , кут нахилу пікселя  $\alpha$ , а головну точку через  $(c_x, c_y, 1)$ . Тоді координати точки  $(x, y)$  на зображенні, що відповідає точці  $(x_R, y_R)$  на ідеальній площині, визначаються виразом (61):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{p_x} & \tan \alpha & c_x \\ 0 & \frac{f}{p_y} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (61)$$

Позначимо:  $f_x = \frac{f}{p_x}$ ,  $f_y = \frac{f}{p_y}$ ,  $s = \tan \alpha$ . Тоді вираз (61) перетворюється на вираз (62):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (62)$$

Матриця  $K$  називається матрицею внутрішнього калібрування камери. У більшості випадків у реальних цифрових камер кут нахилу пікселів близький до прямого, тобто параметр  $s = 0$ , а ширина і висота пікселя рівні. Головна точка зазвичай розташовується в центрі зображення. Тому матриця  $K$  може бути записана у вигляді (63):

$$K = \begin{pmatrix} f' & 0 & c_x \\ 0 & f' & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (63)$$

де позначено

$$f' = f_x = f_y. \quad (64)$$

Це припущення (63) про вид матриці  $K$  широко використовуються для спрощення методів визначення внутрішнього калібрування камери, а також при синтетичному моделюванні зображень, необхідних для оцінки якості методів тривимірної реконструкції.

Нехай  $\mathbf{m}$  – точка сцени в 3-вимірному просторі. Будь-який рух є евклідовим перетворенням простору, тому в однорідних координатах результат переміщення  $\mathbf{m}'$ , може бути записаний виразом (65):

$$\mathbf{m}' = \begin{pmatrix} R & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \mathbf{m}, \quad (65)$$

де  $R$  – матриця повороту,  $\mathbf{t}$  – вектор переносу.

Рух камери відносно сцени еквівалентний зворотньому руху точок сцени відносно камери, тому (вираз (66)):

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \mathbf{m}' = \mathbf{C} \mathbf{m}'. \quad (66)$$

Матриця (вираз (67))

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (67)$$

називається матрицею зовнішнього калібрування камери. Матриця  $\mathbf{C}^{-1}$  називається матрицею руху камери. Таким чином, матриця зовнішнього калібрування камери переводить координати точок сцени з системи координат сцени в систему координат камери.

З виразів (62), (63), (67) можна вивести загальний вираз перспективної проєкції будь-якої камери з довільною орієнтацією і положенням у просторі (вираз (68)):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (68)$$

З урахуванням попередніх позначень, ця формула може бути записана як:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (69)$$

Матриця (вираз (70))

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{C} \quad (70)$$

називається матрицею проєкції камери (або проєктором), іноді вираз (70) скорочено записують у вигляді (71):

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}]. \quad (71)$$

Задача калібрування камери формулюється таким чином: з  $n$  відповідностей

$$\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{X}_i, \quad (72)$$

де  $\mathbf{X}_i$  – точки 3-вимірної сцени, а  $\mathbf{x}_i$  – відповідні точки зображення, потрібно знайти матрицю  $\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ , таку, що задовільняються умови (73):

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{P} \mathbf{X}_i. \quad (73)$$

Задача складається з 2 етапів:

1) знаходження матриці  $\mathbf{P}$  по набору відповідностей (72) між точками сцени і зображення;

2) декомпозиція матриці  $\mathbf{P}$  на матрицю внутрішнього калібрування  $\mathbf{K}$ , матрицю повороту камери  $\mathbf{R}$  і вектор зміщення  $\mathbf{t}$  за допомогою QR-розкладу.

Перший етап зводиться до розв'язування оптимізаційної задачі (вираз (74)):

$$\min_p \sum_i (x_i - pX_i)^2. \quad (74)$$

Вводячи 12-ти мірний вектор  $\mathbf{p}$ , який складається з елементів матриці  $P$ :

$$\mathbf{p} = (p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ p_{14} \ p_{21} \ p_{22} \ p_{23} \ p_{24} \ p_{31} \ p_{32} \ p_{33} \ p_{34})^T, \quad (75)$$

можемо сформулювати (74) у еквівалентному матричному вигляді (76):

$$A\mathbf{p} = \mathbf{0}, \quad (76)$$

де введено матрицю (вираз (77))

$$A = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & -x_1 Z_1 & -x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & -y_1 Z_1 & -y_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_n X_n & -x_n Y_n & -x_n Z_n & -x_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -y_n X_n & -y_n Y_n & -y_n Z_n & -y_n \end{pmatrix}, \quad (77)$$

$\mathbf{0}$  – нульовий 12-ти мірний вектор.

Розв'язок системи (76) знаходиться у вигляді власного вектора (з найменшим власним значенням) добутку матриць  $A^T A$ .

Другий етап робиться таким чином:

– береться  $M$  – верхня  $3 \times 3$  підматриця матриці  $P$  і за допомогою QR-розкладу розкладається на добуток матриці внутрішнього калібрування  $K$  та матрицю повороту камери  $R$  (вираз (78)):

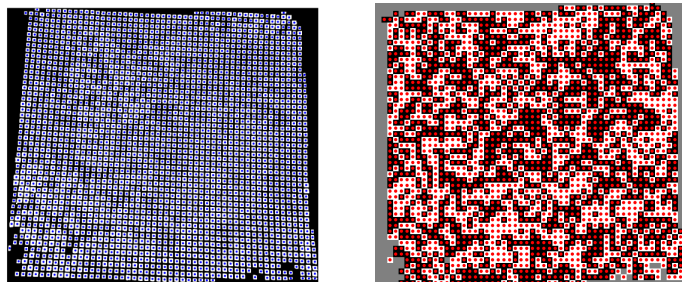
$$M = KR; \quad (78)$$

– знаходимо вектор зміщення  $\mathbf{t}$  (вираз (79)):

$$\mathbf{t} = K^{-1} \begin{pmatrix} p_{14} \\ p_{24} \\ p_{34} \end{pmatrix}, \quad (79)$$

що й дає розв'язок задачі калібрування.

Розглянуто моделі радіальних спотворень зображення – "подушка", "бочка", запропоновано використання в якості калібраційного маркера сам мозаїчний AR-маркер (рис. 10), при цьому точки  $x_i$  на зображенні – це центроїди клітинок біт-контейнерів, а точки  $X_i$  – центроїди відповідних клітинок біт-контейнерів у AR-маркері, який згенеровано з декодованого зображення-повідомлення.



а)

б)

Рисунок 10 – Використання AR-маркера для калібрування: а) точки  $x_i$  на зображенні; б) точки  $X_i$  на AR-маркері, який згенеровано з декодованого зображення-повідомлення

Єдиним додатковим параметром є фізичний розмір клітинки AR-маркера (у міліметрах), але його можна вважати стандартним. Загальна кількість точок, що використовуються для калібрування, – близько 2000 (загальна кількість клітинок  $63^2 = 3969$ , з умови робастності 50% можуть бути відсутніми).

Також розглянуто метод рендерингу відеопотоку в області маркера доповненої реальності.

**У четвертому розділі** дисертації наведена загальна реалізація методів побудови та виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, а саме:

- побудова мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності (дублювання даних, перемішування даних, створення біт-контейнеру);

- виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності (звід зображення, застосування std-фільтра, бінаризація, морфологічне очищення, вибір максимального по площі об'єкта, знаходження біт-контейнерів);

- знаходження параметрів проєктивного перетворення без врахування апріорної інформації (ітеративний алгоритм визначення опорних точок);

- декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності (визначення кількості рядків і стовпців, заповнення матриці біт-контейнера, визначення зсуву у повній матриці бітів, декодування повної матриці біт-контейнера);

- використання мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності (проєціювання віртуального об'єкта на площину AR-маркера, рендеринг відеопотоку в області AR-маркера).

Проведені теоретичні оцінки якості мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності (оцінки помітності маркерів, оцінки простоти маркерів, оцінки інформативності маркерів, оцінки орієнтованості маркерів, оцінки робастності маркерів, оцінки криптостійкості маркерів, оцінки універсальності маркерів). Проведені оцінки роботи методів по часу і складності.

**У п'ятому розділі** дисертації наведена інформаційна технологія побудови і використання маркерів доповненої реальності, опис та результати експериментів, що проводилися, порівняльні оцінки показників якості для основних типів візуальних маркерів доповненої реальності. В IDEF0-нотації основний процес побудови мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності на вході має текстове повідомлення (зазвичай представляє собою url-посилання на інформаційний ресурс); управління представляє собою вимоги помітності, простоти, інформативності, орієнтованості, робастності, криптостійкості та універсальності; механізмами є сам користувач, генератор QR-кодів (або інший кодер, що перетворює повідомлення у зображення), система програмування MATLAB, що використовується для прототипування функцій і процедур методу, а також спеціалізовані модулі MATLAB, такі як Statistics and Machine Learning Toolbox, Image Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox; на виході маємо зображення мозаїчного стохастичного AR-маркера. Для прикладу, основний процес побудови мозаїчного стохастичного AR-маркера наведено на рис. 11, декомпозиція основного процесу – на рис. 12. Наведено опис експериментів, що проводилися в роботі (табл. 1), використовувались такі припущення і обмеження:

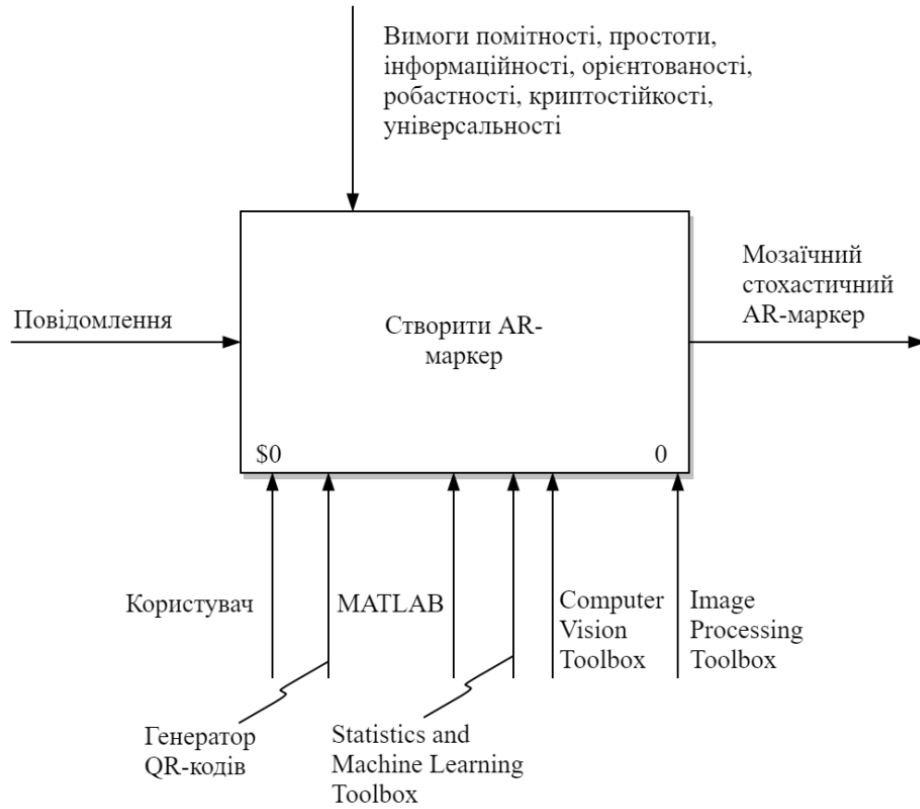


Рисунок 11 – Основний процес методу формування маркера

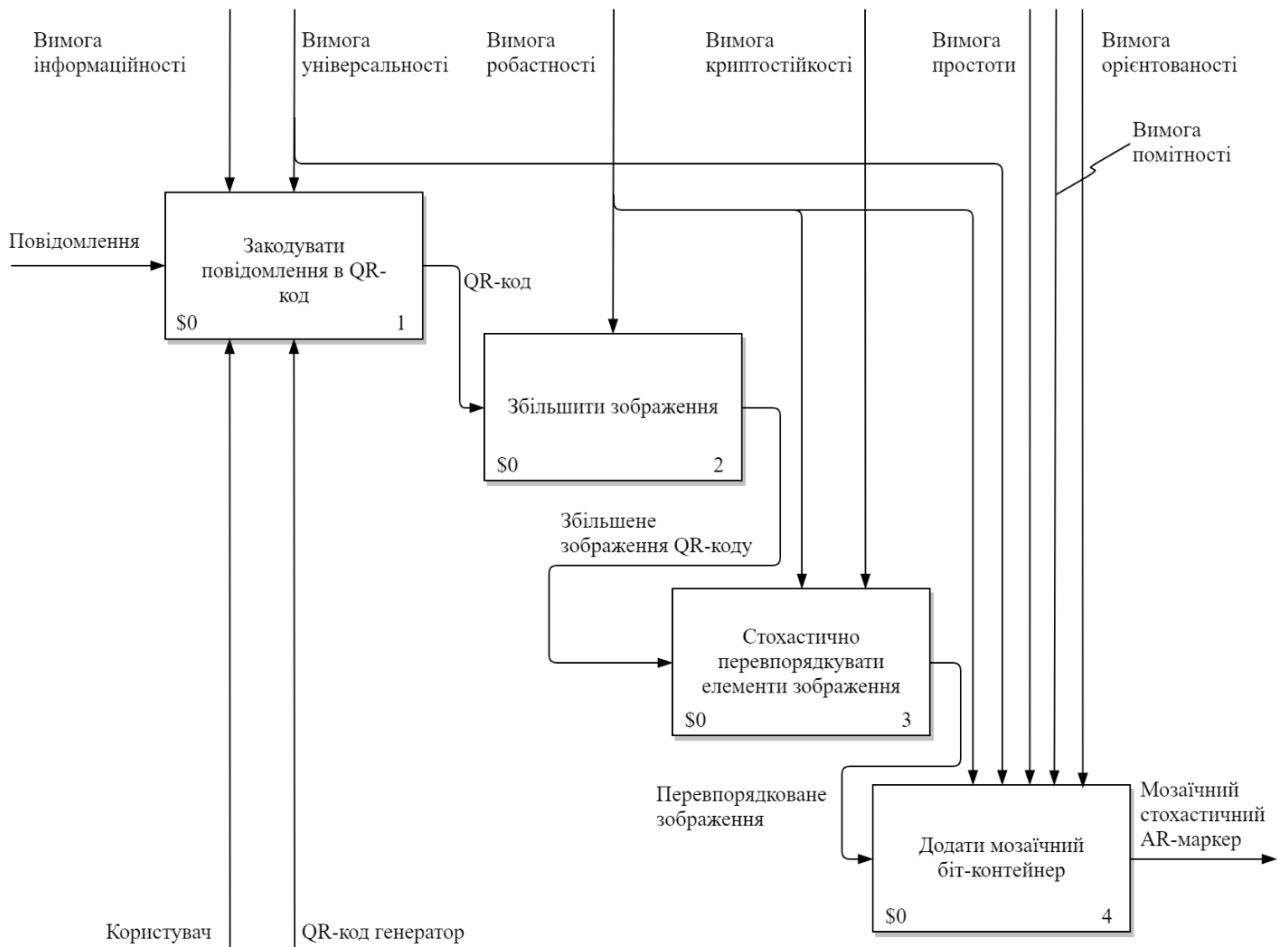


Рисунок 12 – Декомпозиція основного процесу методу формування маркера

1) розглядаються тільки оптико-електронні зображення;

2) мінімальний фізичний розмір AR-маркера 21x21 мм (AR-маркер розміром 63x63 клітинки, розмір клітинки 8x8, віддруковано на принтері з роздільною здатністю 600 dpi);

3) умови зйомки і розташування маркера:

– при зйомці AR-маркер займає приблизно 1/9 загальної площі зображення і знаходиться у його центрі;

– мінімальна роздільна здатність камери 8 МП (при цьому 1 пікселю надрукованого зображення буде відповідати  $\sqrt{1/9 \cdot 8 \cdot 10^6} / (63 \cdot 8) \sim 2$  пікселя сфотографованого зображення, що гарантує розділюваність клітинок);

– кут повороту AR-маркера відносно камери не більше  $\pm 45^\circ$  відносно вертикальної осі камери (інакше буде порушено орієнтованість маркера – результатом роботи методу декодування буде транспонована бітова матриця, що не дасть можливості правильно застосувати інверсну перестановку; в принципі цю проблему можна вирішити послідовним перебором всіх орієнтацій матриці  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  з вибором правильної за критерієм мінімуму цільової функції від інверсно-пермутованого зображення, але при виконанні роботи прийнято, що маркер є правильно орієнтованим);

– зйомка проводиться у звичайних умовах освітлення (як денного, так і штучного);

– зображення знаходиться у фокусі, і рух камери незначний, що дозволяє не враховувати змазування;

– кут між площинами маркера і камери не більше  $\pm 30^\circ$ ;

4) характер завад:

– завадами закрито не більше 1/2 площі маркера;

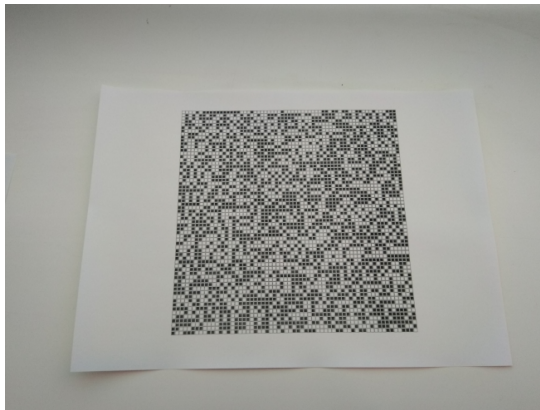
– завада повинна бути такою, щоб маска маркера була однозв'язною (якщо маска маркера розпадається на декілька незв'язних областей, то запропоновані методи визначення кількості рядків/стовпців повертають некоректне значення).

Отримані роздруки сфотографовані смартфоном Nokia 6.1 Plus, роздільна здатність камери 12 МП, збережено у JPEG форматі, вихідні кольорові зображення наведено на рис. 13а–з (повідомлення "Hello, world!"); рис. 13і–л (повідомлення "FpurF\_Ci2TQ"). Результати декодування візуалізовано на рис. 14 (з метою економії місця показані тільки ті зображення, що не повторюються).

Таблиця 1 – Детальний опис умов експериментів

Повідомлення	Фон, освітлення	Ракурс зйомки	Розмір маркера	Завади	Рис.
"Hello, world!"	однорідний фон, природне освітлення	незначні проективні спотворення, здалеку, без повороту	повне зображення	без завад	13а
"Hello, world!"	однорідний фон, природне освітлення	незначні проективні спотворення, зблизька, без повороту	повне зображення	без завад	13б
"Hello, world!"	однорідний фон, природне освітлення	проективні спотворення, зблизька, без повороту	повне зображення	завада у центрі (приблизно 1/4 площі зображення)	13в
"Hello, world!"	однорідний фон, природне освітлення	проективні спотворення, здалеку, без повороту	повне зображення	завада у центрі (приблизно 1/4 площі зображення)	13г

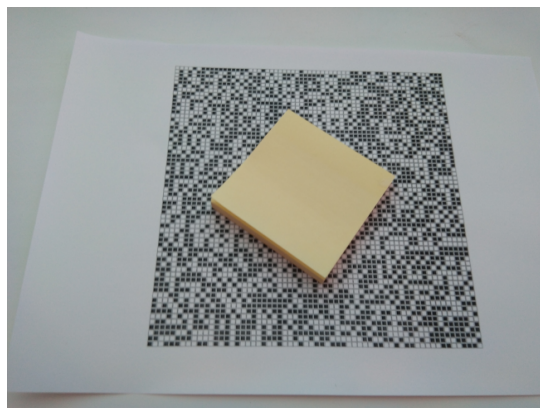
"Hello, world!"	однорідний фон, природне освітлення	незначні проєктивні спотворення, зблизька, без повороту	ліва частина зображення (приблизно 1/2 площі)	без завад	13д
"Hello, world!"	однорідний фон, природне освітлення	проєктивні спотворення, здалеку, без повороту	права частина зображення (приблизно 1/2 площі)	без завад	13е
"Hello, world!"	складний фон, штучне освітлення	проєктивні спотворення, здалеку, без повороту	центральна частина зображення (приблизно 2/3 площі)	без завад	13ж
"Hello, world!"	складний фон, штучне освітлення	проєктивні спотворення, зблизька, без повороту	центральна частина зображення (приблизно 2/3 площі)	без завад	13з
"ґруґ_Ci2TQ"	складний фон, штучне освітлення	проєктивні спотворення, здалеку, повороту приблизно 45°	повне зображення	без завад	13і
"ґруґ_Ci2TQ"	складний фон, штучне освітлення	проєктивні спотворення, зблизька, кут повороту приблизно 45°	повне зображення	без завад	13й
"ґруґ_Ci2TQ"	складний фон, штучне освітлення	проєктивні спотворення, здалеку, кут повороту приблизно 30°	повне зображення	без завад	13к
"ґруґ_Ci2TQ"	складний фон, штучне освітлення	проєктивні спотворення, здалеку, кут повороту приблизно 30°	повне зображення	завада знизу (більше 1/2 площі зображення)	13л



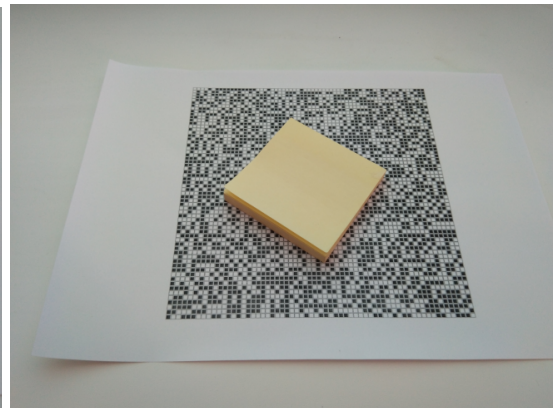
а)



б)

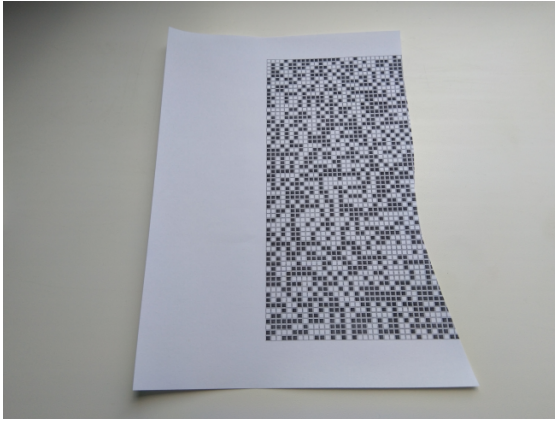


в)

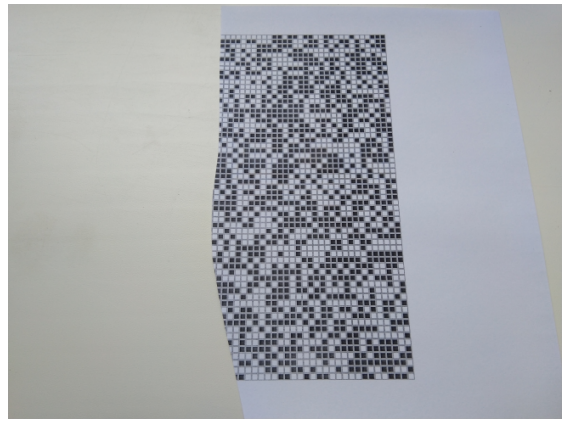


г)

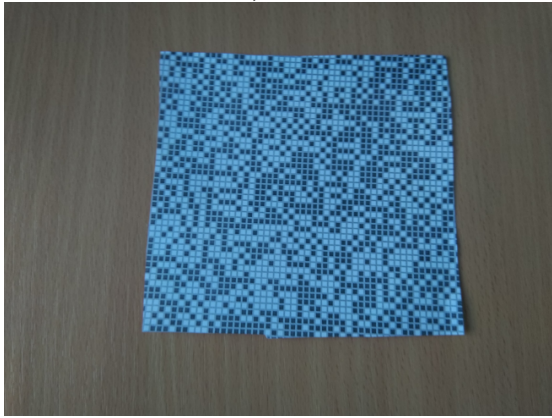
Рисунок 13 – Вихідні зображення, аркуш 1



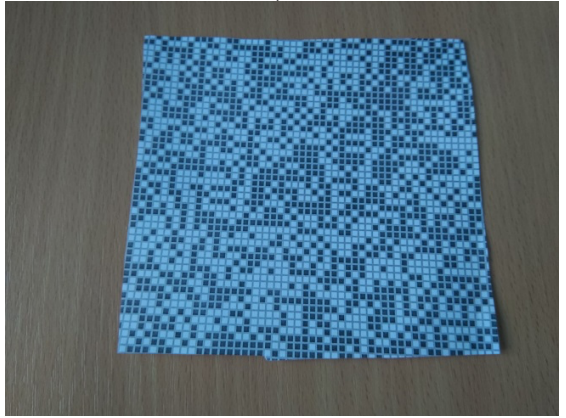
д)



е)



ж)



з)



и)



й)



к)



л)

Рисунок 13, аркуш 2

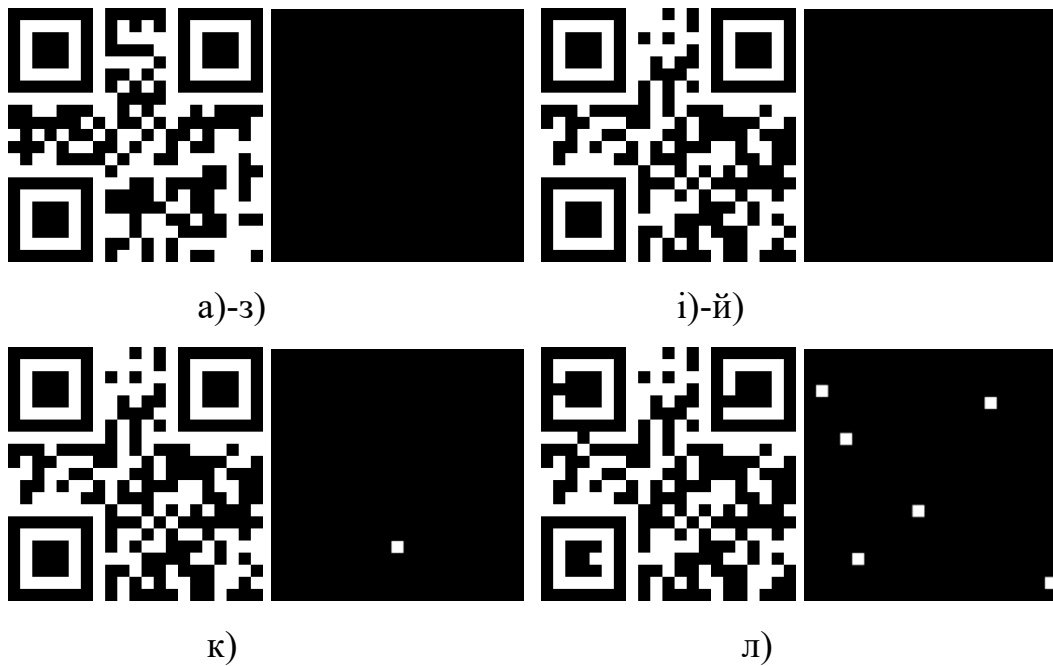


Рисунок 14 – Декодоване з AR-маркера зображення повідомлення (зліва) і помилки декодування (справа): а–з) "Hello, world!" помилок – 0; і–й) "FpyrF\_Ci2TQ", помилок – 0; к) "FpyrF\_Ci2TQ", помилок – 1; л) "FpyrF\_Ci2TQ", помилок – 6

Всі 8 зображень AR-маркера (див. рис. 13а–13з), які було створені з використанням QR-коду, в якому закодовано повідомлення "Hello, world!", декодовано абсолютно правильно, рівень помилок – 0. Всі 4 зображення AR-маркера (рис. 13і–13л), які було створені з використанням QR-коду з повідомленням "FpyrF\_Ci2TQ", в основному декодовано правильно: 2 зображення (рис. 13і–13й) мають рівень помилок – 0; 1 зображення (рис. 13к) – 1 помилка; 1 зображення (рис. 13л) – 6 помилок. Зауважимо, що в останньому випадку площа завади більша за 50% зображення маркера, тим не менш QR-код декодується правильно, оскільки має власну надлишковість (використовуються коди Ріда-Соломона), додатковим фактором є те, що 3 помилки попали в область синхронізаційних маркерів, що не впливає на якість декодування. В результаті всі 12 QR-кодів декодовано абсолютно правильно.

Наведені результати проєціювання тестового 3d-об'єкта ("чайник") на площину AR-маркера при використанні запропонованих у роботі точних методів калібрування і проєціювання. Встановлено, що всі 12 AR-маркерів незалежно від рівня завад і умов зйомки дозволяють правильно спроеціювати тестовий 3d-об'єкт ("чайник") на площину AR-маркера. Також наведені результати рендерингу відео-потoku в області маркера. При цьому використовувались тільки AR-маркери, в яких закодовано посилання на реальне відео у YouTube – "FpyrF\_Ci2TQ". Встановлено, що всі 4 AR-маркерів незалежно від рівня завад і умов зйомки дозволяють: правильно декодувати url-адресу і відкрити відео-файл; правильно визначити параметри проєктивного перетворення і вивести кожен кадр в області AR-маркера.

Проведені дослідження щодо впливу шуму різного типу на точність декодування візуальних маркерів. Встановлено, що при моделюванні впливу точкових завад запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер дає кількість

помилки – 0; модельний AR-маркер QR-код (1x9) – 2 помилки; модельний AR-маркер QR-код (3x3) – 1 помилку.

Досліджено вплив протяжної завади, що локалізована в центрі зображення, на точність декодування AR-маркерів. Встановлено, що при моделюванні впливу завади, що локалізована в центрі зображення, запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер дає кількість помилок – 0; модельний AR-маркер QR-код (1x9) – кількість помилок співпадає з розміром завади; модельний AR-маркер QR-код (3x3) – 0 помилок.

Досліджено вплив протяжної завади, що локалізована внизу зображення, на точність декодування AR-маркерів. Встановлено, що при моделюванні впливу завади, що локалізована внизу зображення, запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер дає кількість помилок – 0; модельний AR-маркер QR-код (1x9) – кількість помилок співпадає з розміром завади; модельний AR-маркер QR-код (3x3) – 1 помилку.

Таким чином, запропонований мозаїчний стохастичний AR-маркер завжди дає найкращі результати; модельний AR-маркер QR-код (1x9) для протяжних завад дає кількість помилок, що співпадає з розміром завади; модельний AR-маркер QR-код (3x3) за умови спеціального типу обробки (що має лише теоретичний інтерес у зв'язку із складністю його реалізації) та 1-2 помилки для всіх типів завад.

Проведено порівняння теоретично розрахованих та експериментальних розподілів імовірності правильного декодування в залежності від імовірності помилки і пропуску даних. Порівняльні оцінки показників якості для основних типів візуальних маркерів доповненої реальності наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняльні оцінки показників якості

Показник	Теоретична оцінка	Експериментальна оцінка				
		мозаїчний стохастичний AR-маркер	шаблонний AR-маркер	коловий AR-маркер	QR-код	AR-маркер-зображення
Помітність (час у секундах $\tau_D$ виявлення тестового AR-маркера)	<1/30	<1/30	<1/30	<1/30	<3/30	<5/30
Простота (кількість кольорів $n_c$ , що необхідні для побудови маркера)	3 (бінарне зображення з проміжним кольором)	3 (бінарне зображення з проміжним кольором)	2 (бінарне зображення)	2 (бінарне зображення)	2 (бінарне зображення)	3x256 (кольорове зображення)
Інформативність (середня ентропія повідомлення $e_m$ у бітах/піксел)	$1/k^2$	1/9	0	~0	~1/2	0
Орієнтованість (можливість визначення положення камери по зображенню маркера)	+	+	+	+	+	+

Робастність (кількість помилково декодованих бітів повідомлення $n_e$ при $q \leq 1/2$ )	$n_e < 1$	$\sim 0$	-	-	$\sim 2-3$	-
Криптостійкість (середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації)	$n_p = (b^2)!$	$n_p \sim 64!$	-	-	-	-
Універсальність (кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера)	$\sim 1$	$\sim 1$	$\sim 1$	$\sim 1$	$\sim 10$	$\sim 100$

Примітка 1. Оцінка помітності (як середній час детектування тестових AR-маркерів в однакових умовах спостереження, сек) знаходилася для смартфона Nokia 6 Plus (операційна система Android 9), при створенні тестової аплікації використовувалась бібліотека обробки зображень OpenCV 4.1.1; час вимірювався у кадрах при задані частоті кадрів 30 Гц.

Примітка 2. Оцінка інформативності QR-коду залежить від заданого рівня надлишковості, що використовується при його створенні, і площі синхронізаційних областей, які не використовуються при кодуванні повідомлення.

Примітка 3. Всі оцінки інформативності і робастності розраховувались для значення коефіцієнта масштабування  $k=3$ , при якому для мозаїчних стохастичних AR-маркерів повідомлення гарантовано відновлюється при втраті до  $1/2$  площі маркера.

Примітка 4. Оцінка криптостійкості для розміру блоку пермутації  $b$  буде  $n_p = (b^2)!$ , якщо виконується умова (80) ( $r_p$  – пермутаційний радіус):

$$b < r_p. \quad (80)$$

Якщо умова (80) не виконується, то  $n_p \sim \log(b^2!)$ . Для типових бінарних зображень значення пермутаційного радіусу  $r_p \sim 1$ , а процедура масштабування методом найближчого сусіда збільшує пермутаційний радіус у  $k$  разів, отже  $r_p \sim k$ . Для значення  $k=3$  для типового значення розміру блоку пермутації  $b=8$  умова (80), вочевидь, виконується.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота має теоретичне значення та містить нові науково-обґрунтовані результати, які розв'язують актуальну наукову проблему розробки теоретичних основ створення моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур в системах доповненої реальності для застосування в різних сферах обробки інформації, що має істотне значення в галузі технічних наук.

В результаті проведення дослідження отримано такі наукові і практичні результати.

1. Проведено критичний аналіз існуючих моделей, методів та інформаційних технологій доповненої реальності, визначено основні галузі їх застосування; встановлено, що найбільш перспективними з точки зору застосування є маркерні системи доповненої реальності. Встановлено основні особливості застосування та сформульовано основні вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності.

2. Отримали подальший розвиток теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності, які, на відміну від відомих, базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного формування, перетворення та декодування візуальної інформації, що забезпечує в умовах несприятливих зовнішніх впливів стійке функціонування систем доповненої реальності.

3. Удосконалено модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості, проведення стохастичного перевпорядкування та контейнеризації даних, що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних.

4. Вперше розроблено модель стійких мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності та метод їх формування, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення методом найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою, що дозволяє забезпечити стійку передачу даних та коректне відображення візуальних об'єктів доповненої реальності.

5. Вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення.

6. Вперше розроблено метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апріорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера.

7. Вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію пермутованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації.

8. Отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потоків в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення.

9. Удосконалено інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє задовільнити зростаючі вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності.

10. Наведено порівняльні оцінки показників якості для основних типів візуальних AR-маркерів – розробленого мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності, а також шаблонного, колового, штрих-кодового маркерів і маркера-зображення.

Встановлено, що розроблений мозаїчний стохастичний маркер доповненої реальності має такі показники якості:

- час виявлення  $\tau_D < 1/30$  сек, що в 3 рази менше, ніж час виявлення QR-кодів і приблизно у 5 разів менше ніж для маркерів-зображень;
- кількість кольорів, що необхідні для побудови маркера,  $n_c = 3$  – бінарне зображення і додатковий проміжний колір;
- середня ентропія повідомлення що закодована в ньому, за побудовою складає  $e_m = 1/9$  біт/піксел, що приблизно у 4,5 разів менше за інформативність QR-кодів і приблизно у 50 разів більше ніж у колових маркерів, у решта маркерів інформативність – 0;
- кількість помилково декодованих бітів повідомлення  $n_e < 1$  при  $q \leq 1/2$ , для QR-кодів  $n_e > 1$ , для решта маркерів робастність – 0;
- існує можливість визначення положення камери по зображенню маркера;
- середня кількість спроб, що необхідні для оптимального алгоритму декодування при відсутності додаткової апріорної інформації,  $n_p = 63^2!$  при розмірі блоку рівним розміру зображення, для решта маркерів криптостійкість 0;
- кількість додаткових параметрів, що необхідні для використання AR-маркера  $\sim 1$ , в той час, як для QR-кодів  $\sim 10$ , для маркерів-зображень  $\sim 100$ .

11. Практичне значення отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи полягає у розробці інформаційної технології побудови і використання маркерів доповненої реальності, автоматизації процесу побудови візуальних об'єктів в існуючих та перспективних інформаційних системах доповненої реальності. Результати дисертаційної роботи впроваджені та реалізовані: у військовій частині А2667, м. Київ (акт від 28.02.2020); в приватному акціонерному товаристві "Авікос", м. Львів (акт від 28.05.2020); в Державному підприємстві "Центр державного земельного кадастру" Державного агентства

земельних ресурсів України, м. Київ (акт від 29.05.2020); в Національному центрі управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, м. Київ (акт від 26.05.2020); в освітньому процесі Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків (акт від 05.05.2020). Впровадження розроблених у дисертаційній роботі моделей і методів в модернізацію існуючих і розробку перспективних систем доповненої реальності дозволить забезпечити стійке функціонування інформаційних технологій та систем доповненої реальності шляхом побудови і використання мозаїчних стохастичних маркерів.

12. На користь обґрунтованості до достовірності наукових результатів дисертаційної роботи свідчать такі фактори:

– використання в роботі теоретично-обґрунтованих та апробованих на практиці методів дослідження;

– добре співпадіння (довірча імовірність 0,95) теоретичних розрахунків та експериментальних результатів, отриманих при побудові та використанні мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності;

– залучення широкої наукової громадськості до апробації наукових результатів на представницьких наукових форумах, їх публікація у визнаних фахових наукових виданнях.

14. Наукове значення роботи полягає у подальшому розвитку теорії обробки цифрових зображень та комп'ютерного зору у напрямку забезпечення стійкого функціонування систем доповненої реальності шляхом побудови і використання мозаїчних стохастичних маркерів.

15. Подальші дослідження рекомендовано продовжити у напрямку узагальнення розроблених моделей і методів побудови і використання візуальних інформаційних структур для вирішення завдань стеганографії, цифрових "водяних знаків" та матричних кодів.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Маковейчук О. М. Інформаційна технологія побудови та використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 4 (10). С. 55–68.

2. Маковейчук О. М. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Том 3, № 3. С. 43–48.

3. Маковейчук О. М. Метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчного стохастичного маркера без врахування додаткової апріорної інформації. *Системи обробки інформації*. 2019. Вип. 4 (159). С. 36–43.

4. Маковейчук О. М. Науково-прикладні основи побудови стійких маркерів доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 5 (57). С. 59–66.

5. Маковейчук О. М. Метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності. *Сучасні інформаційні системи*. 2019. Том 3, № 4. С. 80–86.

6. Маковейчук О. М. Метод декодування мозаїчного стохастичного маркера доповненої реальності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 6 (58). С. 54–57.

7. Бутко І. М., Маковейчук О. М. Визначення джерел лісових пожеж за

спутниковими знімками. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.3. С. 80–84.

8. Маковейчук А. Н., Бутко І. Н., Жуйков Д. Б., Худов Г. В. Аналіз показателів оцінки якості обробки зображень фрактальним методом при впливі протяжених маскуючих шумів. *Системи обробки інформації*. 2012. Вип. 7 (105). С. 104–108.

9. Пелешко Д., Маковейчук О., Ковальчук А., Ключак А. Усунення динамічних часткових спотворень для відтворення зображень на основі інтегрально-диференціального підходу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 751. С. 320–332.

10. Павлій В. О., Маковейчук О. М., Худов Г. В. Показники ефективності відновлення дефокусованих оптико-електронних зображень та зображень, що спотворені змазом. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: технічні науки*. 2013. № 3 (66). С. 106–112.

11. Худов В. Г., Маковейчук О. М. Генетичні алгоритми для сегментування зображень систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 2 (23). С. 142–145.

12. Худов В. Г., Кучук Г. А., Маковейчук О. М., Крижний А. В. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 9 (146). С. 77–80.

13. Ключак А., Пелешко Д., Маковейчук О., Ізонін І. Двоетапне сегментування зображення із складним фоном на основі методу Отсу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2016. № 843. С. 335–341.

14. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості еволюційного методу сегментування зображення, що отримано з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 4 (44). С. 133–137.

15. Худов В. Г., Маковейчук О. М., Хижняк І. А. Оцінка якості сегментування оптико-електронного зображення шляхом оцінки комплексних показників та відстані Кульбака-Лейблера. *Системи обробки інформації*. 2017. Вип. 4 (150). С. 27–30.

16. Ruban I., Khudov H., Khudov V., Khizhnyak I., Makoveichuk O. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/9 (89). P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109904> (входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

17. Ruban I.V., Khudov V.G., Khizhnyak I.A., Makoveichuk O.M. Segmentation of multiple image sequences, which obtained from optoelectronic observations of the aircraft. *News of Science and Education*. 2017. № 5 (53). P. 103–110.

18. Хижняк І. А., Маковейчук О. М., Худов В. Г., Рубан І. В., Худов Г. В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення роєвим методом. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 1 (47). С. 146–152.

19. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Р.Г., Подліпаєв В.О., Горбань Г.В., Худов Г.В. Метод ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії (АВС)) тематичного сегментування оптико-електронного зображення. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 2 (48). С. 91–96.

20. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Інформаційна ройова технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 3 (49). С. 26–32.

21. Хижняк І.А., Худов Г.В., Рубан І.В., Маковейчук О.М., Соломоненко Ю.С., Худов В.Г. Метод тематичного сегментування кольорового зображення бортової системи оптико-електронного спостереження. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 5 (51). С. 13–19.

22. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Худов Р.Г. Цільова функція методу тематичного сегментування зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 4 (33). С. 36–42.

23. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод визначення об'єктів міської забудови на зображеннях бортових систем оптико-електронного спостереження з використанням перетворення Хафа. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 6 (52). С. 20–24.

24. Худов Г.В., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Ройовий метод тематичного сегментування зображень бортових систем екологічного моніторингу. *Екологічні науки*. 2018. № 4 (23). С. 24–28.

25. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Khudov V., Podlipaiev V., Shumeiko V., Atrasevych O., Nikitin A., Khudov R. Segmentation of optical-electronic images from on-board systems of remote sensing of the Earth by the artificial bee colony method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2/9 (98). P. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161860> (входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

26. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Березіна С.І., Соломоненко Ю.С. Метод багатомасштабного оброблення зображень з бортових систем оптико-електронного спостереження для визначення елементів міської інфраструктури. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 3 (55). С. 3–7.

27. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Khizhnyak I., Lukova-Chuiko N., Pevtsov G., Sheviakov Y., Yuzova I., Drob Y., Tytarenko O. Method for determining elements of urban infrastructure objects based on the results from air monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/9 (100). P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174576> (входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

28. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Використання генетичних алгоритмів для знаходження інверсних псевдовипадкових блочних перестановок. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 4 (56). С. 72–81.

29. Ruban I., Khudov H., Makoveichuk O., Chomik M., Khudov V., Khizhnyak I., Podlipaiev V., Sheviakov Y., Baranik O., Irkha A. Construction of methods for determining the contours of objects of tonal aerospace images based on the ant algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/9 (101).

P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.177817> (входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

30. Khudov H., Ruban I., Makoveichuk O., Pevtsov H., Khudov V., Khizhnyak I., Fryz S., Podlipaiev V., Polonskyi Y, Khudov R. Development of methods for determining the contours of objects for a complex structured color image based on the ant colony optimization algorithm. *Eureka: Physics and Engineering*. 2020. № 1, P. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001108> (входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

31. Павлій В. А., Маковейчук А. Н., Худов Г. В. Функция размытия точки оптико-электронных изображений при смазе и дефокусировке, обусловленных неоднородностью атмосферы. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2013. Вип. 4 (37). С. 75–78.

32. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Жуйков Д.Б. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах впливу маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 8 наук. конф. (Харків, 18–19 квіт. 2012). Харків: ХУПС, 2012. С. 315.

33. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Бутко І.М., Жуйков Д.Б. Методи захисту зображень технічних систем розвідки і спостереження від дії маскуючих перешкод. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 9 наук. конф. (Харків, 17–18 квіт. 2013). Харків: ХУПС, 2013. С. 325.

34. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Павлій В.О., Подліпаєв В.О. Метод обробки оптико-електронних зображень в умовах розфокусування та змазу. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 11 наук. конф. (Харків, 08–09 квіт. 2015). Харків: ХУПС, 2015. С. 363.

35. Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Кухарський І.А., Худов Р.Г. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 14 наук. конф. (Харків, 11–12 квіт. 2018). Харків: ХНУПС, 2018. С. 469–470.

36. Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Худов Г.В. Двоетапний метод визначення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях з використанням перетворення Хафа. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: Тези допов. 15 Міжнар. наук. конф. (Харків, 10–11 квіт. 2019). Харків: ХНУПС, 2019. С. 525.

37. Izonin I., Malets I., Makoveichuk O., Peleshko D., Ivanov Y., Batyuk D., Lotoshunhska N. Adaptive Moving Object Segmentation Algorithms in Cluttered Environments. *Proceeding in 13 International scient.-pract. confer Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. 2015. P. 97–99. DOI: [10.1109/CADSM.2015.7230806](https://doi.org/10.1109/CADSM.2015.7230806) (входить до міжнародних наукометричних баз IEEE Xplore, Scopus та Web of Science).

38. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Худов В.Г., Сердюк О.В. Мультиагентний метод сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО*: Тези допов. ІХ наук.-практ. конф. (Київ, 25 листопада 2016). Київ: ВІТІ, 2016. С. 194.

39. Хижняк І.А., Сердюк О.В., Маковейчук О.М. Ройовий метод

сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах*: Тези допов. 17 наук.-техн. конф. (Чернігів, 7-8 вересня 2017). Чернігів: ДНДІ ОВТ, 2017. С. 369–370.

40. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Хижняк І.А. Удосконалений еволюційний метод сегментування багатомасштабної послідовності зображень, отриманих з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Спільні дії військових формувань та правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи*: Тези допов. четвертої Всеукр. наук.-практ. конф. (Одеса 7–8 вересня 2017). Одеса: Військова академія, НА ДПС України, 2017. С. 172–173.

41. Бутко І., Маковейчук О., Медвецька Т. Використання даних дистанційного зондування для контролю за станом земель запасу та резервного фонду. *Ukraine – EU. Innovation in Education, Technology, Business and Law*: Збірник міжнар. наук. праць (Словаччина-Чехія-Чернігів, 24-28 квітня 2018). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 131–134.

42. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук О.М. Тематичне сегментування оптико-електронного зображення методом ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії (АВС)). *Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції*: Тези допов. ХХІІ Всеукр. наук.-практ. конф. (Житомир, 26–27 квітня 2018). Житомир: ЖВІ, 2018. С. 251–252.

43. Рубан І.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Сердюк О.В. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 17-18 травня 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 241.

44. Рубан І.В., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Генетичні методи обробки зображень в системах доповненої реальності військового призначення. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ*: Тези допов. Міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 16-17 травня 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 256.

45. Рубан І.В., Худов В.Г., Маковейчук О.М., Подліпаєв В.О. Інформаційна технологія тематичного сегментування тонових та кольорових зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. восьмої Міжнар. наук.-техн. конф. (Полтава, Баку, Харків, Жиліна, 26–27 квітня 2018). Полтава: ПНТУ; Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2018. С. 58.

46. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В. Двоетапний метод виявлення елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: Тези допов. дев'ятої Міжнар. наук.-техн. конф. (Баку, Харків, Жиліна, 11–12 квітня 2019). Баку: ВА ЗС АР; Харків: НТУ "ХПІ", ДП "ХНДІ ТМ"; Жиліна: Університет міста Жиліна, 2019. С. 12.

47. Ruban I., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I. A swarm method for segmentation of images obtained from on-board optoelectronic surveillance systems. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 5<sup>th</sup> International scientific-practical conference (Kharkiv, October, 9–12, 2018). Kharkiv: IEEE, 2018. P. 613–618. DOI: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632045> (входить до міжнародних наукометричних баз IEEE Xplore, Scopus та Web of Science).

48. Ruban I., Makoveichuk O., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I., Yuzova I., Drob Y. The Method for Selecting the Urban Infrastructure Objects Contours. *Problems of infocommunications science and technology*: Thesis of 6<sup>th</sup> International scientific-practical conference (Kiev, October, 8–11, 2019). Kiev: IEEE, 2019. P. 689–693. DOI: [10.1109/PICST47496.2019.9061267](https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061267) (входить до міжнародних наукометричних баз IEEE Xplore, Scopus та Web of Science).

49. Соломоненко Ю.С., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В., Худов Р.Г., Сердюк О.В. Метод тематичного сегментування оптико-електронних зображень. *Наукові проблеми створення, бойового застосування та підготовки фахівців безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів*: Тези допов. XXII Всеукр.наук.-практ.конф. (Житомир, 1–2 лист. 2018). ЖВІ, 2018. С. 164–168.

50. Худов Г.В., Худов В.Г., Хижняк І.А., Маковейчук О.М. Метод обробки багатомасштабної послідовності зображень бортових систем оптико-електронного спостереження. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 15 листопада 2018). Львів: НАСВ, 2018. С. 159.

51. Худов Г.В., Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Р.Г. Застосування алгоритмів ройового інтелекту для вирішення задачі сегментування аерокосмічних зображень. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності*: Тези допов. наук.-техн. конф. (Львів, 14-15 листопада 2019). Львів: НАСВ, 2019. С. 209–210.

52. Худов Г.В., Хижняк І.А., Подліпаєв В.О., Худов Р.Г. Удосконалений метод обробки багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень. *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine*: Thesis of International scientific and practical conference (Wloclawek, Republic of Poland, December, 21-22, 2018). Wloclawek: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2018. P. 29–32.

53. Khudov H., Pavlii V., Khizhnyak I., Makoveichuk O., Khudov R. Image segmentation method for onboard environmental monitoring systems. *Science, Research, Development # 14. Technics and Technology*: Thesis of International scientific and practical conference (London, February, 27-28, 2019). London, 2019. P. 23–25.

54. Рубан І.В., Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод визначення контурів елементів міської інфраструктури на оптико-електронних зображеннях бортових систем. *Комп'ютерні та інформаційні системи і технології*: Тези допов. третьої Міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 23-24 квітня 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 20–21.

55. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Соломоненко Ю.С., Юзова І.Ю. Метод виявлення об'єктів міської інфраструктури на багатомасштабній послідовності зображень з бортових систем дистанційного

зондування Землі. *Наукоємні технології в інфокомунікаціях (НІСТ`2019)*: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, Кам'янець-Подільський, 23-25 травня 2019). Харків: ХНУПС, ХНУРЕ; Кам'янець-Подільський: Кам.-Поділ. нац. ун-т ім. І. Огієнка, 2019. С. 93–94.

56. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Рубан І.В. Метод визначення інверсних псевдовипадкових блочних перестановок на основі генетичних алгоритмів. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки*: Тези допов. VII наук.-техн. конф. (Київ, 09-10 жовтня 2019). Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України, 2019. С. 413–414.

57. Худов Г.В., Маковейчук О.М., Хижняк І.А., Юзова І.Ю., Худов Р.Г. Метод виявлення об'єктів інтересу на зображеннях з безпілотних літальних апаратів в інтересах охорони державного кордону. *Освітньо-наукове забезпечення діяльності складових сектору безпеки і оборони України*: Тези допов. Міжнар. наук.-практ. конф. (Хмельницький, 22 листопада 2019). Хмельницький: Нац. академія держ. прикор. служби ім. Б. Хмельницького, 2019. С. 828–829.

58. Маковейчук О.М., Рубан І.В., Худов Г.В. Новий тип маркерів доповненої реальності. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил*: Тези допов. XII наук.-практ. конф. (Київ, 14-15 листопада 2019). Київ: ВІТІ, Київ, 2019. С. 189–190.

59. Маковейчук О.М. Знаходження інверсних блочних перестановок в задачах комп'ютерного зору. *Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики АРАМС-2019*: Тези допов. XXV Всеукр. наук. конф. (Львів, 24–27 вересня 2019). Львів: Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка, 2019. С. 102–105.

60. Ruban I., Khudov H., Makoveychuk O., Khizhnyak I., Khudov V., and Lishchenko V. The model and the method for forming a mosaic sustainable marker of augmented reality. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Engineering (TCSET)*: Thesis of 2020 IEEE 15<sup>th</sup> International Conference (Slavske, February 25–29, 2020). Slavske: IEEE, 2020. P. 402–406. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235463> (входить до міжнародних наукометричних баз IEEE Xplore, Scopus та Web of Science).

### АНОТАЦІЯ

Маковейчук О.М. Моделі, методи та інформаційна технологія побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2020.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова проблема розробки теоретичних основ створення моделей, методів та інформаційної технології побудови і використання візуальних інформаційних структур в системах доповненої реальності для застосування в різних сферах обробки інформації, що має істотне значення в галузі технічних наук.

Вперше розроблено модель стійких мозаїчних стохастичних маркерів

доповненої реальності та метод їх формування, який базується на процедурах масштабування зображення-повідомлення методом найближчого сусіда, перемішування пікселів за допомогою відомої псевдовипадкової перестановки та їх кодування кольором клітинок зображення маркера, які розділяються рамкою, що дозволяє забезпечити стійку передачу даних та коректне відображення візуальних об'єктів доповненої реальності.

Вперше розроблено метод виявлення мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі бінаризації локальної дисперсії детектує область маркера на вихідному зображенні та знаходить маски біт-контейнерів шляхом сегментування та подальшої морфологічної фільтрації маскованої області зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів коректно декодувати повідомлення.

Вперше розроблено метод визначення параметрів проективного перетворення мозаїчних стохастичних маркерів, який реалізує знаходження чотирьох опорних точок, ітеративно максимізуючи суму дисперсій середніх значень об'єднання масок біт-контейнерів, розрахованих по рядках і стовпцях без врахування додаткової апріорної інформації, що дозволяє забезпечити уніфіковане виявлення та декодування незалежно від умов реєстрації маркера.

Вперше розроблено метод декодування мозаїчних стохастичних маркерів доповненої реальності, який на підставі запропонованої системи показників визначає розміри матриці бітів маркера, будує матрицю бітів маркера із трансформованого зображення біт-контейнера, визначає зсув у повній матриці бітів та реалізує фільтрацію пермутованого зображення, що дозволяє в умовах несприятливих зовнішніх впливів забезпечити коректне відтворення та візуалізацію інформації.

Отримали подальший розвиток теоретичні основи побудови і використання візуальних інформаційних структур доповненої реальності, які, на відміну від відомих, базуються на науково-обґрунтованих моделях та методах системного формування, перетворення та декодування візуальної інформації, що забезпечує в умовах несприятливих зовнішніх впливів стійке функціонування систем доповненої реальності.

Удосконалено модель візуальних інформаційних структур доповненої реальності, яка, на відміну від відомих, побудована шляхом введення надлишковості, проведення стохастичного перевпорядкування та контейнеризації даних, що забезпечує стійке відновлення інформації в умовах втрати частини даних.

Отримав подальший розвиток метод проєціювання віртуальних об'єктів на площину маркера доповненої реальності, який, на відміну від відомих, реалізує запропоновані процедури калібрування камери по наявному зображенню мозаїчного стохастичного маркера, що дозволяє візуалізувати тривимірні об'єкти та рендерінг відео-потоків в області маркера та забезпечує універсальність та уніфікацію незалежно від фізичних та геометричних властивостей засобів реєстрації зображення.

Удосконалено інформаційну технологію побудови і використання маркерів доповненої реальності, в якій, на відміну від відомих, застосовуються моделі та методи обробки стійких мозаїчних стохастичних маркерів, що дозволяє

задовільнити зростаючі вимоги до візуальних інформаційних структур доповненої реальності, формалізувати та автоматизувати процес побудови візуальних об'єктів в проектах створення нових інформаційних систем доповненої реальності.

Впровадження розроблених у дисертаційній роботі моделей і методів в модернізацію існуючих і розробку перспективних систем доповненої реальності дозволить забезпечити стійке функціонування інформаційних технологій та систем доповненої реальності шляхом побудови і використання мозаїчних стохастичних маркерів.

**Ключові слова:** модель, метод, інформаційна технологія, обробка зображень, візуальна інформаційна структура, доповнена реальність, стійкий мозаїчний стохастичний маркер, проєктивне перетворення, декодування, проєціювання, віртуальний об'єкт.

### АННОТАЦІЯ

Маковейчук А.Н. Модели, методы и информационная технология построения и использования визуальных информационных структур дополненной реальности. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2020.

В диссертационной работе решена актуальная научная проблема разработки теоретических основ создания моделей, методов и информационной технологии построения и использования визуальных информационных структур в системах дополненной реальности для применения в различных сферах обработки информации, имеющая существенное значение в области технических наук.

Впервые разработаны модель и метод формирования устойчивых мозаичных стохастических маркеров дополненной реальности; впервые разработан метод обнаружения мозаичных стохастических маркеров дополненной реальности; впервые разработан метод определения параметров проєктивного преобразования мозаичных стохастических маркеров; впервые разработан метод декодирования мозаичных стохастических маркеров дополненной реальности; получили дальнейшее развитие теоретические основы построения и использования визуальных информационных структур дополненной реальности; усовершенствована модель визуальных информационных структур дополненной реальности; получил дальнейшее развитие метод проєцирования виртуальных объектов на плоскость маркера дополненной реальности; усовершенствована информационная технология построения и использования маркеров дополненной реальности. Внедрение разработанных в диссертационной работе моделей и методов в модернізацію існуючих і розробку перспективних систем доповненої реальності дозволить забезпечити стійке функціонування інформаційних технологій і систем доповненої реальності шляхом побудови і використання мозаїчних стохастичних маркерів. Практичне значення отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи заключається в розробці інформаційної технології побудови і

использования устойчивых мозаичных стохастических маркеров дополненной реальности.

**Ключевые слова:** модель, метод, информационная технология, обработка изображений, визуальная информационная структура, дополненная реальность, устойчивый мозаичный стохастический маркер, проективное преобразование, декодирование, проецирование, виртуальный объект.

### ABSTRACT

Makoveichuk O. M. Models, Methods and Information Technology of Designing and Use of Visual Information Structures of Augmented Reality. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Engineering Sciences in specialty 05.13.06 "Information technologies" (05 – technical sciences). – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The actual scientific problem of the development of a theoretical base for the creation of models, methods, and information technology of designing and use of visual information structures in augmented reality systems for application in various spheres of information processing that has essential value in technical sciences is solved in the thesis.

For the first time, there have been developed a model and method of forming stable mosaic stochastic augmented reality markers. For the first time, there has been developed a method for detecting mosaic stochastic augmented reality markers. For the first time, there has been developed a method for determining the parameters of the projective transformation of mosaic stochastic markers. For the first time, there has been developed a method for decoding mosaic stochastic augmented reality markers. Theoretical bases of the designing and use of visual information structures of augmented reality received further development. The model of visual information structures of augmented reality has been improved. The method for projecting virtual objects on the plane of the augmented reality marker has been further developed. The information technology of the designing and use of augmented reality markers has been improved. The introduction of models and methods developed in the dissertation in the modernization of existing systems and in the development of advanced augmented reality systems will ensure the sustainable operation of information technology and augmented reality systems by designing and using mosaic stochastic markers. The obtained practical results are confirmed by acts of implementation and prove the correctness of the theoretical provisions of the dissertation, the high quality of the developed methods and information technology.

**Keywords:** model, method, information technology, image processing, visual information structure, augmented reality, stable mosaic stochastic marker, projective transformation, decoding, projection, virtual object.