

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕМАТИЧНИХ МАШИН І СИСТЕМ**

ШАРИПАНОВ АНТОН ВЕНІАМІНОВИЧ



УДК 004.02, 004.428

**СТРУКТУРНИЙ МЕТОД ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ І СИГНАЛІВ ПРИ
ЗМІННІЙ РОЗДІЛЬНІЙ ЗДАТНОСТІ**

05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті проблем математичних машин і систем НАН України

Науковий керівник кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Калмиків Володимир Григорович,
Інститут проблем математичних машин і систем
НАН України,
старший науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Будник Микола Миколайович,
Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова
НАН України,
головний науковий співробітник відділу
сенсорних пристроїв, систем та технологій
безконтактної діагностики

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Кийко Володимир Михайлович,
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем
НАН України та МОН України,
старший науковий співробітник відділу
розпізнавання образів

Захист відбудеться “24” квітня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.204.01 в Інституті проблем математичних машин і систем НАН України за адресою: 03187, м. Київ-187, проспект Академіка Глушкова, 42.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем математичних машин і систем НАН України за адресою: 03187, м. Київ-187, проспект Академіка Глушкова, 42.

Автореферат розісланий “22” березня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



М. Г. Ієвлєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Велика кількість інформаційних систем накопичує вхідні дані у вигляді візуальної інформації, на підставі аналізу якої необхідно прийняти певне рішення. Однією з основних функцій інформаційної системи є представлення інформації особам, які приймають рішення (далі – ОПР), – операторам системи – у найбільш придатному вигляді для максимально швидкого і повного її сприйняття з метою вироблення якісного рішення. Значний обсяг вхідних даних, що постійно збільшується, спонукає до створення автоматизованих чи навіть автоматичних інструментів для обробки даних, за допомогою яких може бути зменшене навантаження на ОПР.

Представлена робота відноситься до області обробки візуальної інформації, зокрема, зображень.

Поки що не існує таких систем машинного зору, можливості яких були б порівняні з можливостями зорового сприйняття людини. Водночас обсяг візуальної інформації, яка потребує оброблення, постійно зростає. Тому вирішення завдань інформаційних систем або вимагає дуже великої (часто неприйнятної) кількості операторів-експертів, або неприйнятним виявляється час, необхідний для прийняття рішення. Одним із можливих шляхів подолання цих перешкод є використання у складі інформаційних систем засобів розпізнавання зображень, а також засобів аналітичної обробки візуальної інформації. Таким чином, в інформаційній системі, заснованій на обробленні візуальних даних із метою підтримки прийняття рішень, повинні бути вирішені такі задачі:

- автоматична обробка візуальної інформації для підготовки попереднього рішення або множини можливих рішень, з яких ОПР пропонується вибрати відповідне;
- перетворення візуальної інформації до вигляду, що відповідає максимально швидкому і повному її сприйняттю.

Кожна із цих задач може бути вирішена в рамках окремої інформаційної технології. Автоматична обробка зображення може складатися з таких етапів:

- усунення завад;
- визначення меж об'єктів;
- аналіз (визначення кількості об'єктів інтересу, їх площі, параметрів форми контуру);
- отримання інваріантного відносно афінних перетворень опису.

Багато парадигм розпізнавання вимагають, щоб об'єкт на зображенні був виділений і зайняв своє місце в полі зору. Тому, насамперед, повинна бути вирішена задача визначення меж об'єктів на зображенні серед нерівномірного фону та завад і представлення їх (об'єктів) у зручному для сприйняття оператором вигляді. Для усунення завад можуть бути використані фільтри, але доведеться вказати тип фільтра, тобто потрібна апріорна інформація про характер завад, яка зазвичай відсутня.

Бінарні зображення найчастіше представляються у векторному вигляді, тобто контурами об'єктів, причому кожний контур є послідовністю відрізків прямих і дуг кривих ліній. Водночас півтонові зображення досі представлені в растровому вигляді, як множини пікселів, де у кожного пікселя як атрибут визначена його яскравість. Також досі контури в півтонових зображеннях представлялися у вигляді послідовностей пікселів, тобто ліній із ненульовою товщиною, що спричиняє небажані зміни форми об'єктів під час оброблення.

Однією з найважливіших і природних особливостей зорового сприйняття людини є здатність поділяти поле зору на об'єкти, що відрізняються від фону за яскравістю, кольором, текстурою та ін. Основною характеристикою будь-якого об'єкта є його форма, визначена контуром – межею між об'єктом і фоном. Контур, у свою чергу, сприймається людиною як послідовність відрізків прямих і дуг кривих ліній. Форма півтонових і кольорових об'єктів визначається, крім того, функцією яскравості з урахуванням кольору, текстури в середині кожного з об'єктів.

Представлення зображення згідно із цифровою рядковою моделлю дозволяє розглядати його як впорядковану множину дискретних реалізацій невідомих одновимірних функцій яскравості кожного рядка. Структурна модель забезпечує одноманітне за формою представлення довільних зображень, інваріантне щодо афінних перетворень – положення в полі зору, масштабу, повороту. Задача приведення до структурної моделі довільних зображень, заданих у растровому вигляді, які можуть бути спотворені завадами, у загальному випадку ще не вирішена. Проте в окремих випадках опис зображень відповідно до певної структурної моделі дозволяє істотно підвищити швидкість та якість оброблення візуальної інформації.

Застосування структурної моделі зображення дає можливість використовувати поняття контуру об'єкта півтонового зображення, що дає додаткові можливості опису форми об'єкта. Відповідно до цифрової рядкової моделі контур зображення може бути представлений як суперпозиція його окремих елементів. Також під час експериментальних досліджень встановлено, що при обробленні зображень виникають хибні елементи контурів навіть на модельних зображеннях через похибки дискретизації та квантування. Вибір іншого значення дискретності простору не вирішує проблему, оскільки хибні елементи все одно виникають в інших місцях зображення.

Зазвичай зображення розглядається при одному, фіксованому, значенні роздільної здатності. Під роздільною здатністю зображення розуміють кількість мінімальних елементів, що можуть бути розміщені на одиниці площини зображення. Водночас, у зоровому сприйнятті, мінімальний елемент зображення визначається розмірами зони збудження рецептивного поля нейрона зорової системи, а в нейрофізіології зору встановлена динамічна властивість нейронів зорової системи – зміна розмірів зон збудження їх рецептивних полів під час зорового акту (Подвігін М. П., Руксенас О.). Це означає, що під час зорового акту в зоровому сприйнятті людини зображення присутнє з певною кількістю роздільних здатностей. Крім того, визначення контурів зображення (меж об'єктів) у зоровій системі людини відбувається непомітно, на підсвідомому рівні, навіть при значній кількості завад.

Таким чином, актуальною є задача визначення меж об'єктів інтересу на півтонових зображеннях, при неоднорідному фоні та в умовах впливу завад із метою подальшого використання цих результатів у задачах розпізнавання, а також для представлення об'єктів у зручному для оператора вигляді. При цьому перспективним вбачається підхід, при якому сумісно розглядаються відомі методи обробки зображень та актуальні досягнення з області нейрофізіології зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в Інституті проблем математичних машин і систем НАН України у відділі теорії та практики систем обробки та відображення візуальної інформації, у рамках завдання НАН України «Автоматизована класифікація біометричних сигналів на базі структурних методів обробки візуальної інформації» (№ державної реєстрації 0116U004697).

Робота відповідає напрямам дослідження «Розроблення наукових і методологічних основ створення та застосування інформаційних технологій та інформаційних систем для автоматизованої переробки інформації й управління» і «Розроблення інформаційних технологій для аналізу та синтезу структурних, інформаційних і функціональних моделей об'єктів і процесів, що автоматизуються» паспорта спеціальності 05.13.06 – інформаційні технології.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є створення інформаційної технології оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі передбачається вирішення таких завдань:

1) виконати аналіз актуальних праць у нейрофізіології зору, що стосуються змінної роздільної здатності в зоровому сприйнятті. Провести аналіз способів використання роздільної здатності в системах комп'ютерного зору та визначити напрями подальших досліджень;

2) розробити метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями, за наявності завад, при змінній роздільній здатності, на засадах біонічного підходу;

3) розробити із використанням змінної роздільної здатності алгоритм сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями та алгоритм аналізу одновимірних сигналів. Реалізувати їх у інформаційній технології оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності;

4) експериментально дослідити запропонований метод для задач визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях та структурного аналізу одновимірних сигналів в умовах завад.

Об'єктом дослідження є процес оброблення зображень і сигналів.

Предметом дослідження є оброблення зображень та одновимірних сигналів як їх окремого випадку при змінній роздільній здатності.

Методи дослідження. У теоретичному дослідженні використовуються положення теорії комп'ютерної обробки зображень та розпізнавання образів. Опис цифрових зображень здійснюється методами цифрової топології. Формалізація моделі інформаційної технології виконується засобами мови UML. Формалізація

алгоритмів здійснюється за допомогою мов програмування. Перевірка правильності теоретичних побудов виконується за допомогою експерименту та порівняння. У експериментальному дослідженні використовуються методи когнітивного представлення результатів вимірів.

Наукова новизна отриманих результатів

Вперше запропоновано метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності, який відрізняється від існуючих методів тим, що:

- сегментація виконується при певній кількості роздільних здатностей;
- рішення щодо сегментації приймається з урахуванням усіх результатів обробки при всіх використаних роздільних здатностях;
- автоматично визначається підмножина роздільних здатностей, які використовуються при формуванні рішення, що дозволяє не використовувати апріорну інформацію про властивості завад.

Удосконалено процес отримання аналітичного опису зображення шляхом застосування існуючої математичної моделі процесу зменшення розмірів рецептивних полів зорових нейронів до задачі визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях, що дозволило не виконувати попередню обробку зображення незалежно від наявності завад та їх властивостей.

Набув подальшого розвитку аналіз невідомих функцій за їх дискретними реалізаціями, де за рахунок уведення додаткових умов для запропонованого методу стало можливим відшукування на дискретній реалізації функції інтервалів аргументу, у межах яких вона може бути апроксимована відрізком прямої із кутовим коефіцієнтом, що відповідає обраним обмеженням.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами дисертаційного дослідження було створено інформаційну технологію оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності, до складу якої увійшли програмні засоби, що реалізують запропоновані алгоритми сегментації сигналів і визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях при змінній роздільній здатності. Експериментально підтверджено, що сегментація сигналів та визначення меж об'єктів на зображеннях запропонованим методом зі змінною роздільною здатністю можуть виконуватися в автоматичному режимі, без попередньої обробки та апріорної інформації про властивості завад.

Практична цінність роботи підтверджена актами впровадження від ВО «Медгрід» (акт від 27.09.2018) та ТОВ «Кардіолайз» (акт від 09.10.2018).

Створена інформаційна технологія може бути використана при обробленні одновимірних сигналів, зокрема, електрокардіограм.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, представлені в дисертації та статті [1], отримані автором особисто на основі досліджень, проведених у відділі теорії та практики систем обробки та відображення візуальної інформації Інституту проблем математичних машин і систем НАН України. У роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належать: [2, 6 – 7] – аналіз інформаційних джерел, участь у постановці експерименту та інтерпретації результату; [3, 8 – 10] – участь у постановці задачі, розробка алгоритму сегментації, проведення експериментів,

інтерпретація результатів; [4, 11 – 12] – розробка алгоритму сегментації, постановка експериментів, інтерпретація результатів; [5] – аналіз інформаційних джерел та участь у визначенні напрямку подальших досліджень.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на таких наукових конференціях та семінарах:

- Міжнародній конференції «Education and Science and their Role in Social and Industrial Progress of Society» (Kyiv, 2014);
- V-th International Conference «Information – Interaction – Intellect» (Varna (Bulgaria), 2014);
- XX-th International Conference «Knowledge – Dialogue – Solution» (Kyiv, 2014);
- VII міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації» (м. Кам'янець-Подільський, 2016 р.);
- III міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та взаємодії (IT&I–2016)» (м. Київ, 2016 р.);
- Науково-практичній конференції з міжнародною участю «Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика (СППР'2017)» (м. Київ, 2017 р.);
- Міжнародній науковій конференції, присвяченій 60-річчю заснування Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України «Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку» (м. Київ, 2017 р.);
- Науковому семінарі кафедри математики Київського академічного університету (м. Київ, 30.03.2018 р.);
- Тринадцятій міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС'2018» (м. Київ – м. Чернігів – смт. Жукін, 2018 р.);
- Науковому семінарі наукової ради НАН України з проблеми «Кібернетика» «Обчислювальні машини та інформаційні технології спеціального призначення». Секція II «Технічні засоби інформатики» (м. Київ, 30.08.2018 р.);
- Науковому семінарі кафедри інтелектуальних та інформаційних систем факультету інформаційних технологій КНУ імені Тараса Шевченка (м. Київ, 10.10.2018 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 1 одноосібна наукова стаття, 3 статті у наукових фахових виданнях ДАК України, 2 статті в іноземних фахових журналах (1 стаття в електронному вигляді), 5 статей індексуються у міжнародних науково-метричних базах, 7 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 65 найменувань та двох додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 136 сторінок, із яких 124 сторінки основного тексту, що дорівнює 5,17 облікових аркуша, ілюстрованих 64 рисунками.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет, методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено публікації автора.

У **першому розділі** розглянуто відомі методи обробки зображень та сигналів при різних роздільних здатностях у системах комп'ютерного зору та динамічні властивості нейронів зорової системи вищих тварин.

Проведений аналіз сучасного стану в області створення систем комп'ютерного зору показав, що обробка візуальної інформації із застосуванням різних роздільних здатностей використовується спонтанно, як певний інженерний прийом. Водночас нейрофізіологічні дослідження (Подвігіна М. П., Руксенаса О. та ін.) свідчать про наявність механізмів обробки візуальної інформації зі змінною роздільною здатністю в зоровій системі людини.

Прототипом для методу визначення меж об'єктів на зображенні при змінній роздільній здатності було обрано найбільш відомий метод Канні, у якому різні роздільні здатності використовуються неявно.

Установлено необхідність розробки методів та алгоритмів, що поєднують отримані в нейрофізіології результати вивчення процесів, які пов'язані зі зміною роздільної здатності в зоровій системі людини, з існуючими методами та алгоритмами обробки зображень. Таке поєднання повинне допомогти визначати межі об'єктів на спотворених завадами зображеннях при відсутності апріорної інформації про характер завад для подальшого використання цих результатів у задачах розпізнавання зображень.

У **другому розділі** викладено новий метод оброблення півтонових зображень при змінній роздільній здатності з урахуванням існуючих методів та актуальних досягнень в області нейрофізіології зору.

Обробка півтонового зображення відбувається відповідно до структурної моделі зображення. Півтонове зображення представляється як кусково-гладка поверхня у тривимірному просторі. Для створення структурної моделі півтонового зображення розглядаються сумісно опис півтонового зображення за допомогою його математичної моделі та модель півтонового зображення з урахуванням нейрофізіологічних уявлень про зорове сприйняття. Визначено поняття контуру в півтоновому зображенні. Застосовано поняття про декартів клітинний комплекс (за Ковалевським В. А.), що дозволило представити межу області на зображенні тонкою кривою з нульовою товщиною.

Проаналізовано математичний опис явища зміни розмірів зон збудження рецептивних полів нейронів зорової системи та запропоновано метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності. Сформовано гіпотезу про його відносну незалежність від впливу завад.

З урахуванням запропонованого методу розглянуто задачу пошуку розривів неперервності кусково-гладкої функції за її дискретною реалізацією при змінній роздільній здатності.

Задача 1: на відрізку $[a, b]$ спостерігається дискретна реалізація невідомої функції $y = f(x)$, що визначена на цьому відрізку. Значення роздільної здатності, з яким треба розглядати реалізацію цієї функції і при якому може бути виконаний аналіз неперервності цієї функції за її реалізацією, – невідоме. Виходячи з припущення, що наявна реалізація функції є представленням невідомої кусково-гладкої функції, необхідно визначити межі окремих гладких кусків функції $a = t_0 < t_1 < \dots < t_N = b$ та їх кількість $N + 1$.

Під дискретною реалізацією функції $y = f(x)$ розуміють послідовність пар відліків (x_i, y_i) , $i = \overline{1, I}$; $x_1 = a$, $x_I = b$. Оскільки спостерігається лише дискретна реалізація функції, для аналізу її неперервності використовується дискретний аналог розриву неперервності, а саме – оцінка положення особливих точок функції за її дискретною реалізацією. При розгляді значень дискретної реалізації функції окіл значень реалізації функції не може стати нескінченно малим. Якщо різниця двох сусідніх значень реалізації функції за абсолютною величиною не перевищує певного порога d

$$|y_i - y_{i-1}| \leq d,$$

то реалізація невідомої функції в межах даних значень буде сприйматися як неперервна. Згідно з результатами Калмикова В. Г., якщо невідома функція має розрив неперервності в певній точці, то починаючи з певної роздільної здатності на її дискретній реалізації в околі цієї точки буде виявлено різку зміну в послідовності значень сигналу (перевищення порога d), яка не буде зникати при подальшому збільшенні роздільної здатності. Уперше запропоновано розглядати сумісно всі окремі відповіді від усіх роздільних здатностей для отримання остаточної відповіді щодо розташування меж гладких кусків у сигналі.

Запропоновано задачу 2 пошуку на дискретних реалізаціях функцій інтервалів аргументу, у межах яких дискретна реалізація функції може бути апроксимована відрізком прямої з кутовим коефіцієнтом, що перевищує задане порогове значення d , тобто: на відрізку $[a, b]$ спостерігається реалізація невідомої функції $y = f(x)$, що визначена на цьому відрізку. Значення роздільної здатності, з яким треба розглядати реалізацію цієї функції, невідоме. Необхідно встановити границі інтервалів $\{(l_j, r_j) \mid j = \overline{1, J}, l_1 \geq a, r_j \leq b\}$, на яких

$$\forall i \in [l_j + 1, r_j], \left(\left| \frac{y_i - y_{l_j}}{x_i - x_{l_j}} \right| < d \right).$$

Визначено додаткові умови для порога d , за допомогою яких задачу 2 зведено до задачі 1:

$$|y_{i+1}^{(m)} - y_i^{(m)}| > d_m \in D,$$

де $d_m = d \cdot q_m$;

$y_i^{(m)}$ – i -те значення дискретної реалізації при роздільній здатності m ;

d_m – значення порога для роздільної здатності m ;

q_m – розмір околу точки при роздільній здатності m .

У **третьому розділі** описано алгоритми з використанням поняття змінної роздільної здатності для розв'язання задач 1 і 2. Запропоновано модифікацію алгоритму структурного аналізу одновимірного сигналу при змінній роздільній здатності для розв'язання задачі сегментації кардіосигналу на R-R інтервали. Описано представлення моделі створеної інформаційної технології обробки зображень і сигналів при змінній роздільній здатності. При створенні інформаційної технології було застосовано комбінований підхід до розробки програмного забезпечення. Завдяки такому підходу вдосконалення програмних засобів, що використовуються у дослідженні, може відбуватися паралельно до розв'язання задач наукового пошуку.

У запропонованих алгоритмах розглядається функція $y = f(x)$, яка визначена на інтервалі $[a, b]$. Під дискретною реалізацією цієї функції розуміють послідовність пар відліків (x_i, y_i) , $i = \overline{1, I}$; $x_1 = a$, $x_I = b$. На область визначення накладена сітка із кроком (інтервалом) r , значення якого встановлюється і змінюється під час роботи алгоритму. Кожен інтервал містить певну й однакову кількість відліків q , яка визначає роздільну здатність. Кількість інтервалів J , що відповідають області визначення функції, визначає кількість «грубих» відліків при даній роздільній здатності. Для кожного з інтервалів r_j , $j = \overline{1, J}$ за послідовністю значень відліків $w_j = \{y_{q \cdot (j-1)+1}, y_{q \cdot (j-1)+2}, \dots, y_{q \cdot (j-1)+q}\}$, що входять до цього інтервалу, обчислюють значення «грубого» відліку $z_j = g(w_j)$. Усі значення «грубих» відліків формують дискретну реалізацію функції $Z^{(m)}$ при даній роздільній здатності m , де $m = \overline{1, M}$, M – загальна кількість роздільних здатностей, що використовуються при розв'язанні певної задачі за допомогою даного алгоритму.

Під подією типу «розрив неперервності функції» розуміють визначення можливого розриву неперервності функції $y = f(x)$, тобто випадок, коли $|z_j - z_{j+1}| > d$, де d – певний поріг. Ця подія відноситься до межі між двома «грубими» відліками j та $j+1$, характеризується відповідним «точним» відліком $i^{(j)} = j \cdot q$ та інтервалом «точних» відліків $s^{(j)} = [q \cdot (j-1) + 1, q \cdot (j+1)]$, на якому зафіксовано подію. Знайдені події цього типу накопичуватимуться у списку $\{s^{(m)}\}$, де m – номер роздільної здатності. Знаходження локальних екстремумів функції $y = f(x)$ розглядається як подія з типом «розрив градієнта функції» і реєструється, коли $\text{sign}(z_j - z_{j+1}) \neq \text{sign}(z_{j-1} - z_j)$.

Подія з типом «розрив градієнта функції» відноситься до «грубого» відліку j , характеризується відповідним «точним» відліком $i^{(j)} = j \cdot q$ та інтервалом «точних» відліків $l^{(j)} = [q \cdot (j-1) + 1, q \cdot (j+1)]$. Знайдені події цього типу накопичуватимуться в списку $\{l^{(m)}\}$, де m – номер роздільної здатності. Списки подій $\{s^{(m)}\}$ та $\{l^{(m)}\}$ для кожної роздільної здатності формуються окремо.

Щоб дійти найкращого збігу можливого розриву неперервності функції з межею «грубих» відліків, використовують накладення $n = \overline{1, N}$ сіток інтервалу r (тобто однієї роздільної здатності), що зсунуті одна відносно одної. Сіткою «грубих» відліків сигналу називається послідовність інтервалів спостережень сигналу без пропусків. В алгоритмі прийнято $N = 3$, тому початок кожного інтервалу зсунуто на $\frac{1}{3}r$ для сіток із номерами, що відрізняються на 1. Кожному накладенню сітки n відповідає список подій $\{i^{(j)}\}_n$ та список інтервалів «точних» відліків $\{s^{(j)}\}_n$, на яких ці події зафіксовано. Елементи списків $\{s^{(j)}\}_n$ та $\{s^{(j)}\}_{n+1}$ характеризують ту саму подію, коли $|i_n^{(j)} - i_{n+1}^{(j)}| = \frac{1}{3}r$. Списки інтервалів «точних» відліків для всіх значень n послідовно об'єднують в один список $\{s^{(m)}\} = \bigcup_{n=1}^N \{s^{(j)}\}_n$, де m – поточна роздільна здатність. Список $\{s^{(m)}\}$ вважається відповіддю щодо сегментації при роздільній здатності m . Кількість елементів у списку $\{s^{(m)}\}$ дорівнює $K^{(m)}$.

Списки $\{s^{(m)}\}$ та $\{s^{(m+1)}\}$ вважаються відповідними, якщо вони знаходяться в однозначній відповідності, тобто $K^{(m)} = K^{(m+1)}$ та $s_k^{(m+1)} \subset s_k^{(m)}$, де $k = \overline{1, K^{(m)}}$.

Правила поєднання списків однотипних подій, що отримані для різних сіток тієї самої роздільної здатності, та правила встановлення відповідності списків однотипних подій для пар сусідніх роздільних здатностей збігаються для двох указаних вище типів подій.

Алгоритм 1 призначений для пошуку точок розриву неперервності та розриву неперервності градієнта кусково-гладкої функції за її дискретною реалізацією при змінній роздільній здатності (наприклад, функції яскравості рядка півтонового зображення).

Основні кроки алгоритму такі:

1. Виходячи із властивостей задачі – зображення чи сигналу – визначають константи: кількість «грубих» відліків J , кількість роздільних здатностей M та значення змінних при початковій роздільній здатності $m=1$, зокрема початкове значення інтервалу $r^{(m)}$ та відповідне йому значення q_m . Значення інтервалу $r^{(m+1)}$ при роздільній здатності $m+1$ приймається як $0,67 \cdot r^{(m)}$, хоча можливі й інші співвідношення. Установлюють нульові значення лічильників відповідності p_1, p_2, p_v, \dots . Установлюють поточний лічильник $p = p_v$, $v = 1$.

2. Формують список подій $\{s^{(m)}\}$ для поточного значення роздільної здатності. Фіксують $K^{(m)}$ – кількість подій для даної роздільної здатності.

3. Якщо $m=1$, то $m=m+1$, перехід до п. 2; інакше, якщо $m=M$, перехід до п. 4; інакше, якщо $m < M$, перевіряють відповідність списків $\{s^{(m)}\}$ та $\{s^{(m-1)}\}$ згідно з означенням відповідності. Якщо списки відповідні, то $p = p + 1$; $m = m + 1$; перехід до п. 2. Інакше, коли $p = 0$, $m = m + 1$; перехід до п. 2. Інакше, коли $p > 0$: $p_v = p$; запам'ятовують список $\{s_v^{(m)}\}$ як проміжну відповідь; $v = v + 1$; $p = p_v$; $m = m + 1$; перехід до п. 2.

4. Як остаточну відповідь S приймають ту проміжну відповідь $\{s_v^{(m)}\}$, для якої p_v є максимальним серед усіх обчислених.

Якщо два або більше значень p_v мають одне й те саме значення, то обирається послідовність з максимальним значенням v .

У загальному випадку алгоритм розв'язання задачі 2 визначення інтервалів аргументу, на яких функції можуть бути апроксимовані відрізками прямих із кутовим коефіцієнтом, що відповідає обраним обмеженням, буде відрізнятися від описаного вище алгоритму лише наявністю додаткових вихідних умов на етапі 1 (ініціалізації алгоритму): для кожної роздільної здатності $m = \overline{1, M}$ розраховують значення порогів $d_m = d \cdot q_m$, які будуть використовуватися на відповідних роздільних здатностях при формуванні списків подій.

На базі алгоритмів для розв'язання задач 1 і 2 було створено алгоритм 2 для розв'язання практичної задачі сегментації кардіосигналу на R-R інтервали із застосуванням змінної роздільної здатності.

Алгоритм 2 сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності призначений для визначення точок Q, R, S у кожному кардіоциклі кардіосигналу (рис. 1). У моделі R-зубця застосовуються поняття інтервалу аргументу, на якому функція може бути лінійно апроксимована (задача 2), та локального екстремуму (розриву неперервності градієнта).

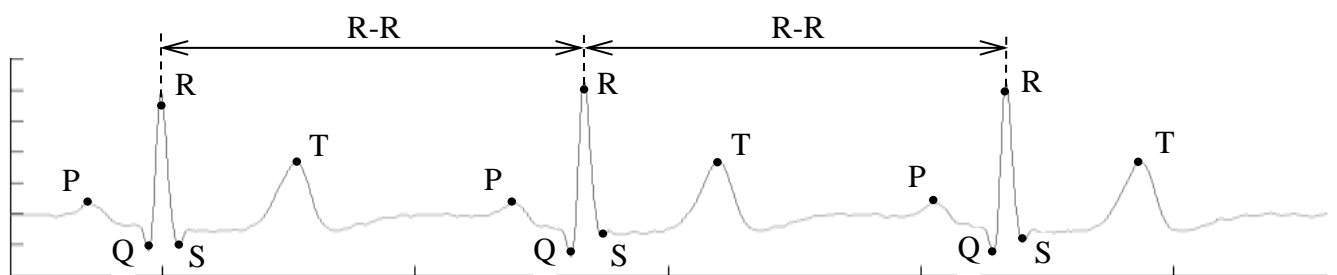


Рисунок 1 – Характерні ознаки кардіосигналу

Основні кроки алгоритму такі:

1. Визначають константи: кількість «грубих» відліків J , кількість роздільних здатностей M та значення змінних при початковій роздільній здатності $m=1$, зокрема початкове значення інтервалу $r^{(m)}$ та відповідне йому значення q_m . Значення інтервалу $r^{(m+1)}$ при роздільній здатності $m+1$ приймається як $0,67 \cdot r^{(m)}$, хоча можливі й інші співвідношення. Встановлюють нульові значення лічильників відповідності p_1, p_2, p_v, \dots . Встановлюють поточний лічильник $p = p_v$, $v = 1$. Задають

ширину ковзного вікна, через яке переглядається сигнал. Обирають значення порога d , що характеризує кутовий коефіцієнт відрізка прямої, який поєднує дві сусідні точки на графіку при максимальній роздільній здатності. Для кожної роздільної здатності розраховують індивідуальне значення порога $d_m = d \cdot q_m$.

2. Формують список подій $\{s^{(m)}\}$ для поточного значення роздільної здатності. Фіксують $K^{(m)}$ – кількість подій для даної роздільної здатності.

3. Якщо $m=1$, то $m=m+1$, перехід до п. 2; інакше, якщо $m < M$, перехід до п. 4; інакше, якщо $m = M$, перехід до п. 5.

4. Перевіряють відповідність списків $\{s^{(m)}\}$ та $\{s^{(m-1)}\}$ згідно з означенням відповідності. Якщо списки відповідні, то $p = p + 1$; $m = m + 1$. Інакше, коли $p = 0$: $m = m + 1$. Інакше, коли $p > 0$: $p_v = p$; запам'ятовують список $\{s_v^{(m)}\}$ як проміжну відповідь; $v = v + 1$; $p = p_v$; $m = m + 1$. Перехід до п. 2.

5. Визначають відповідь $S = \{s_v^{(m)}\}$, для якої p_v є максимальним серед усіх обчислених та фіксують номер роздільної здатності, при якій отримано відповідь: $m1 = m$.

6. Для роздільної здатності $m1$ розраховують відповідь $L = \{l^{(m1)}\}$ – положення локальних екстремумів.

7. Відповіді S та L перевіряються сумісно на відповідність моделі R-зубця. Формується список L^* , до якого з L переносяться лише ті елементи, що описують локальні екстремуми, які можуть бути складовими R-зубця.

8. Для роздільних здатностей $m = (m1 + 1) \dots M$ на інтервалах, що є елементами списку L^* , розраховуються можливі розташування локальних екстремумів й отримана відповідь розглядається сумісно з відповіддю від попередньої роздільної здатності, з метою якомога точнішого визначення розташування локальних екстремумів, що представляють точки Q, R, S у моделі R-зубця.

9. Створюється список трійок номерів відліків, що визначають положення точок Q, R та S кожного кардіоциклу.

Розроблено інформаційну технологію оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності у вигляді програмного забезпечення (ПЗ), яке має модульну структуру, що дозволяє використовувати його не тільки цілком, у подальших експериментальних дослідженнях, а й інтегрувати окремі складові частини до існуючих інформаційних систем.

Застосовано комбінований підхід до розробки, що дозволило скоротити витрати часу на дослідження та створення інформаційної технології. Прототип ПЗ створювався за методологією гнучкої розробки. Даний етап створення інформаційної технології був інкапсульований у додатковому «циклі 0» методології ітеративно-інкрементної розробки ПЗ. У «циклі 0» розробка велась у процедурній парадигмі програмування з використанням інтегрованого середовища Matlab. При цьому процедури умовно розподілялися на 3 групи: 1) зчитування/запису даних;

2) ті, що реалізують алгоритми розв’язання задач; 3) ті, що відображають (проміжні) результати.

Документами, що були створені у «циклі 0», є описи алгоритмів розв’язання поставлених задач та опис внутрішньої структури прототипу. Застосування операції зворотного проектування до прототипу дозволило перейти до об’єктно-орієнтованої парадигми програмування, створити модель предметної області та отримати представлення її структури (рис. 2). Представлення варіантів використання та поведінки моделі предметної області були отримані безпосередньо зі створених під час роботи в «циклі 0» документів.

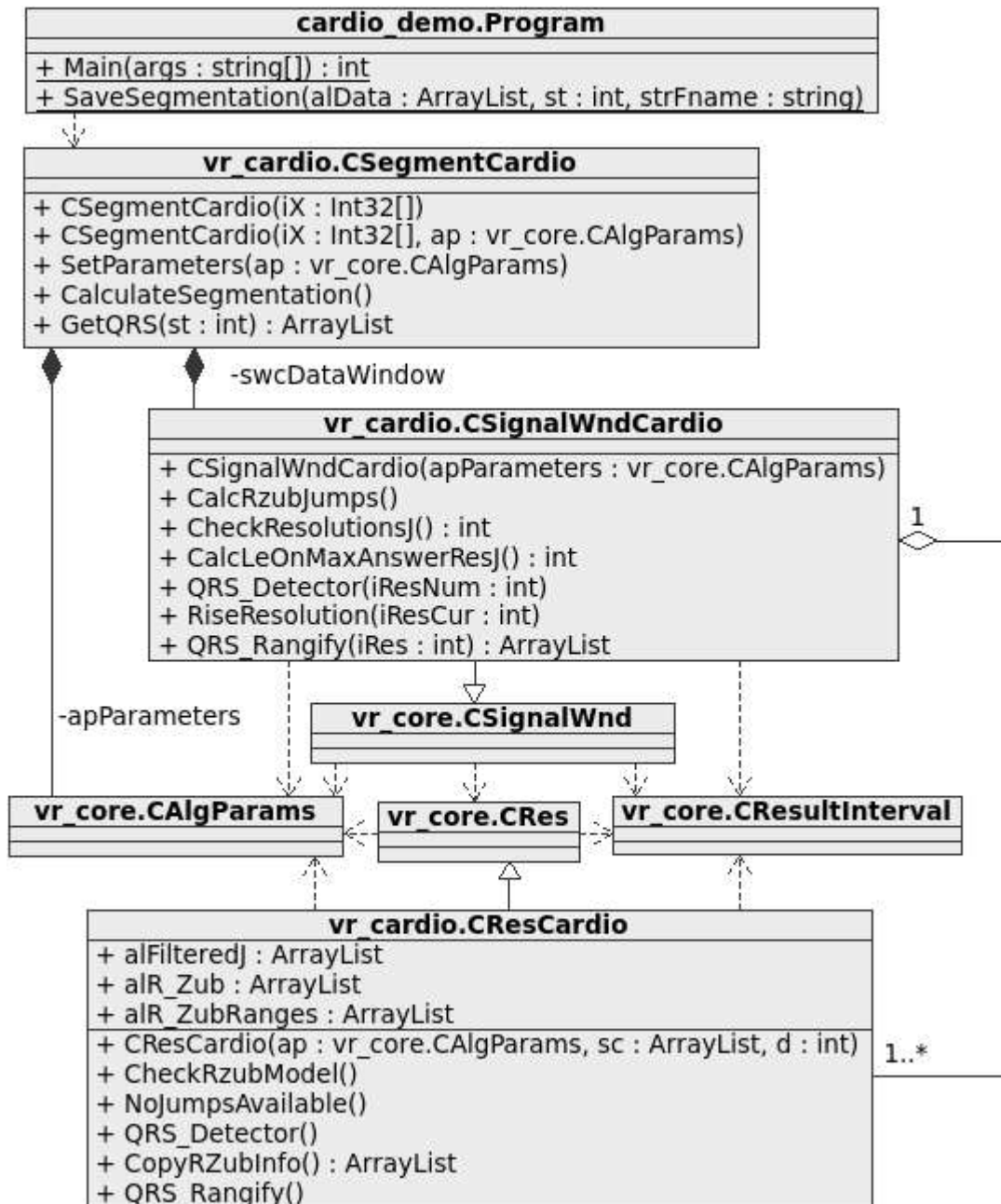


Рисунок 2 – UML діаграма класів застосування для знаходження точок Q, R, S кардіоциклів у кардіосигналі

У четвертому розділі із застосуванням створеної інформаційної технології проведено експериментальні дослідження щодо сегментації сигналів, що є дискретними реалізаціями функцій однієї змінної (рис. 3), на прикладі рядків яскравості спотворених завадами модельних зображень; пошук меж об'єктів на модельних (рис. 4) та реальних півтонових зображеннях (рис. 5).

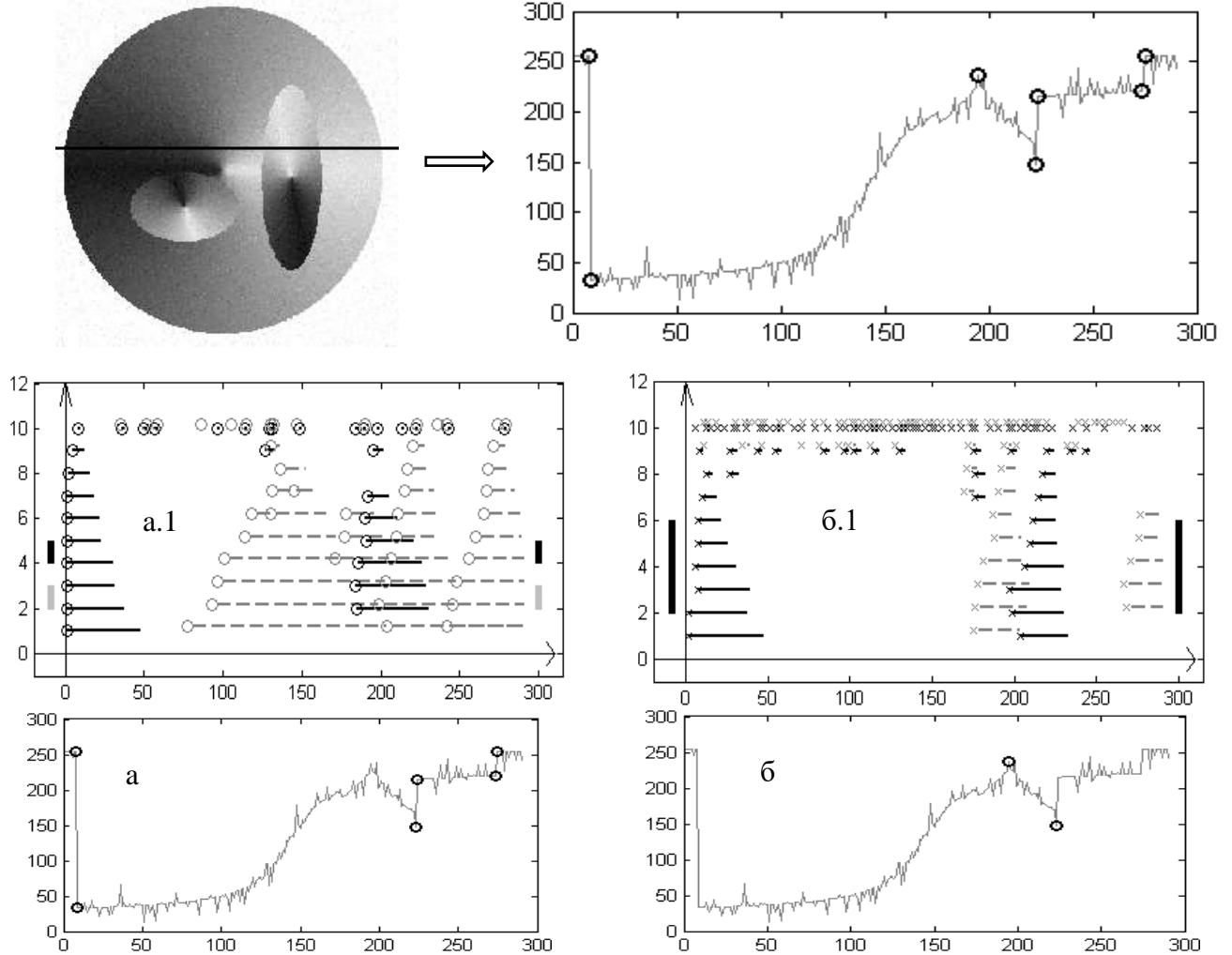


Рисунок 3 – Визначення меж окремих сегментів кусково-гладкої функції за її спотвореною завадами дискретною реалізацією при застосуванні алгоритму зі змінною роздільною здатністю: (а) – знаходження розривів неперервності функції; (б) – знаходження локальних екстремумів

На рис. 3 а.1,б.1 по осі абсцис відкладено номери дискретних відліків, по осі ординат – номери роздільних здатностей, при яких розглядався сигнал. Підмножини роздільних здатностей, які беруть участь у формуванні відповіді, позначені чорними вертикальними лініями.

Ці експерименти підтвердили, що: 1) запропонований алгоритм сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності може бути застосований до задачі сегментації одновимірних сигналів; 2) метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності дозволяє приймати задовільні стійкі рішення щодо сегментації спотворених завадами сигналів.

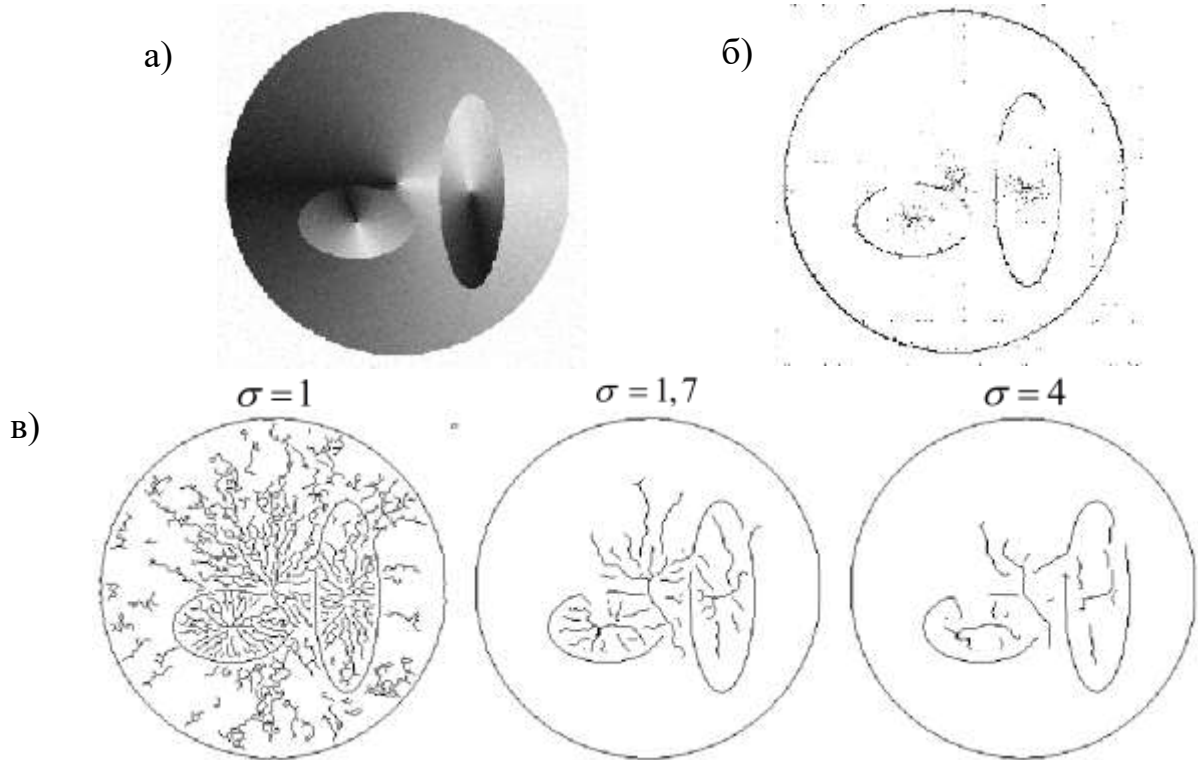


Рисунок 4 – Зображення з рис. 3 (а) та результати визначення меж об'єктів на ньому запропонованим методом (б) і методом Канні (в)

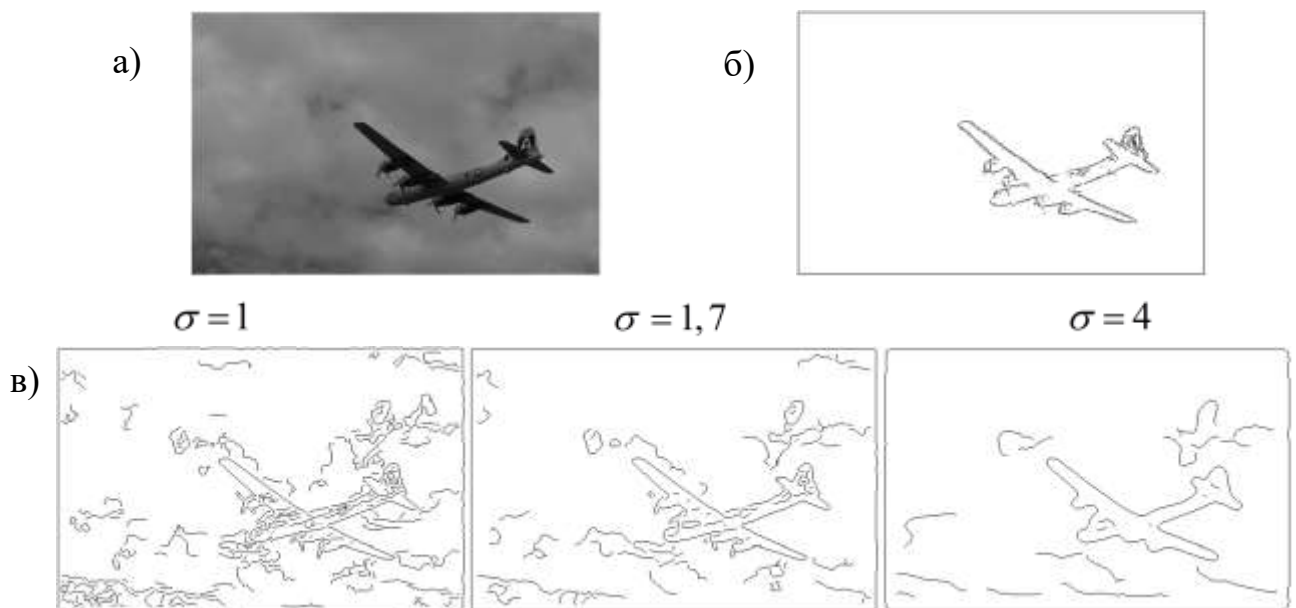


Рисунок 5 – Визначення меж об'єктів на півтоновому зображенні (а) запропонованим методом (б) та методом Канні (в)

При застосуванні методу визначення меж об'єктів Канні, зі зміною параметра σ в інтерактивному режимі, у визначених на кожній ітерації межах об'єктів залишалися зайві деталі. При застосуванні рядкової моделі зображення та визначенні меж об'єктів на зображенні алгоритмом сегментації кусково-гладких

функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності спостерігалось автоматичне відсіювання несуттєвих деталей у полі зору, що дозволило отримати задовільні результати у розглянутих випадках.

Проведено експерименти щодо структурного аналізу сигналу при змінній роздільній здатності на прикладі сегментації кардіосигналу на R-R інтервали та визначення точок Q та S.

Для експериментальної перевірки алгоритму від віртуальної організації «Медгрід» (далі – ВО «Медгрід») було отримано 390 спотворених завадами кардіограм різних пацієнтів. Результати сегментації цих кардіосигналів, отримані за вказаним алгоритмом, порівнювалися з результатами програми-еталону «Оракул», розробленою у відділі сенсорних пристроїв, систем та технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України з використанням традиційних методів обробки сигналів. Програму «Оракул» впроваджено в програмно-апаратних комплексах Monebo Technologies Inc, Austin, Texas, USA та «Кардіо+» НВП «Метекол», Ніжин, Україна. Також вона використовується в дослідженнях Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України.

У 24 випадках від програми-еталону було отримано відмову від обробки. На рис. 6 а представлено фрагмент однієї із цих кардіограм, на рис. 6 б – той самий фрагмент із нанесеною розміткою після обробки кардіограми за допомогою програми, що реалізує алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності. Сигнал було значно спотворено лише в певні короткі проміжки часу. Решта даних у кардіосигналі, за винятком цих інтервалів часу, підлягала сегментації (рис. 6 в). Сегментований сигнал містить достатньо інформації про виділені R-зубці та R-R інтервали для подальшого оброблення.

Для двох із 24 кардіограм, за якими від програми-еталону було отримано відмову від обробки, не вдалося отримати відповідь щодо сегментації також і за допомогою створеного алгоритму через слабкість сигналу або високий рівень завад.

Таким чином, програмою-еталоном, що знаходиться в промисловому використанні, вдалося обробити 366 кардіограм із загальної множини кардіограм, які брали участь в експерименті, що становить 93,85 % від їх загальної кількості. Застосування програмного забезпечення, яке базується на створеному методі і реалізує алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності, дозволило збільшити цей показник на 5,64 % і довести кількість вдало сегментованих кардіограм до 388, що становить 99,49 % від їх загальної кількості.

Використання апріорної інформації про кардіосигнал (майже циклічний, кількість, послідовність виникнення та тривалість структурних елементів, неможливість раптової зміни тривалості кардіоциклу) дозволило створити процедуру автоматичного визначення параметрів алгоритму 2 під час його роботи. Програмна реалізація цієї процедури покладена в основу прототипу програмного забезпечення для сегментації кардіосигналу від одноканального контактного кардіодатчика, у реальному масштабі часу оператора, без попередньої обробки та без жодної апріорної інформації про характер завад у сигналі (рис. 7).

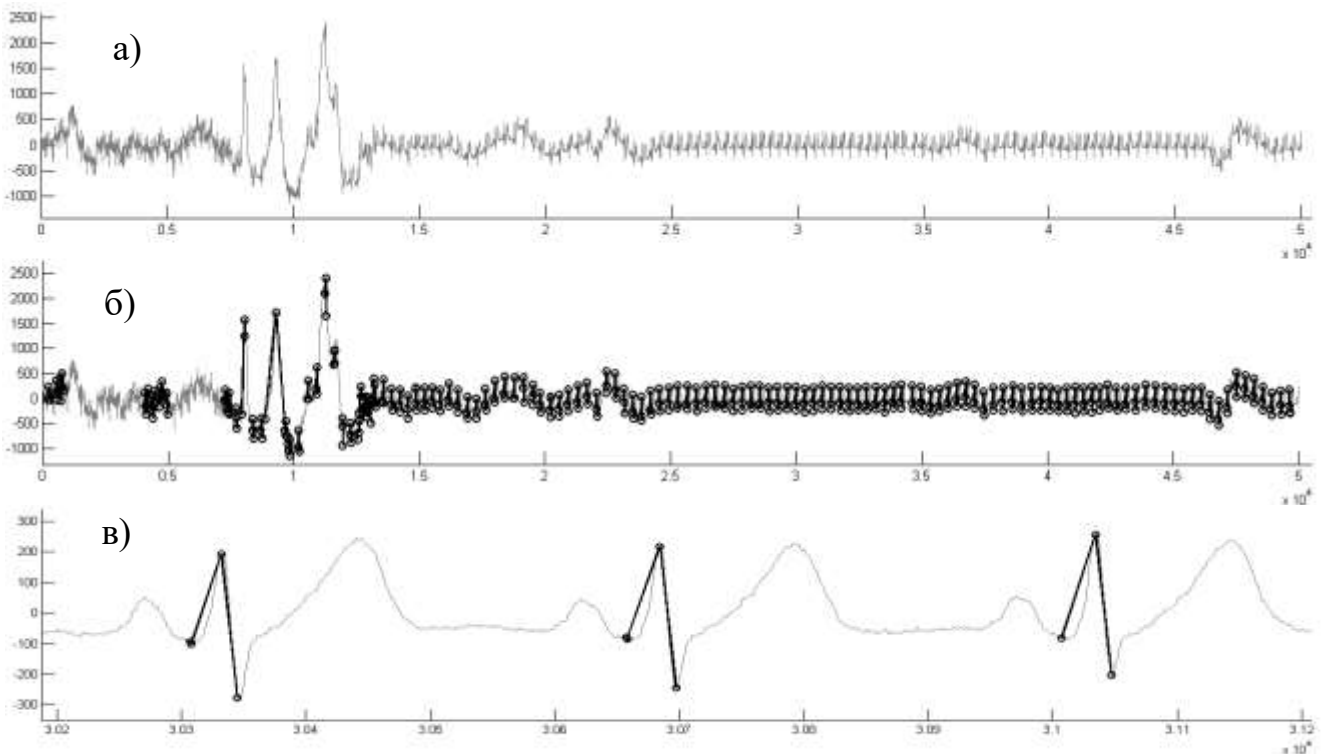


Рисунок 6 – Фрагмент кардіограми тривалістю 100 секунд (а) із нанесеною розміткою (б) та фрагмент цієї ж кардіограми тривалістю 2 секунди (в)

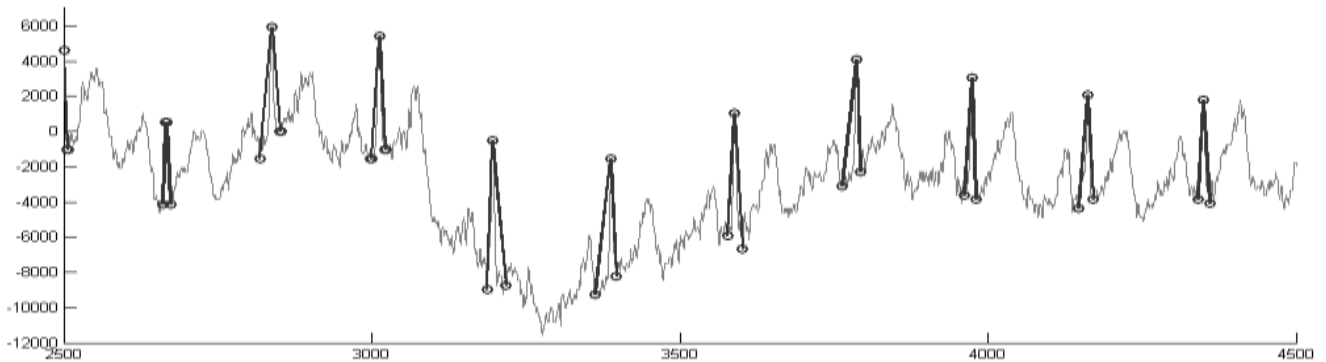


Рисунок 7 – Результати сегментації спотвореного завадами кардіосигналу без жодної апріорної інформації про характер завад та при автоматичному визначенні параметрів алгоритму

ВИСНОВКИ

У дисертації викладено нове розв'язання актуального наукового завдання визначення меж об'єктів на півтоновому зображенні.

1. За результатами аналізу сучасного стану досліджень у нейрофізіології зору та створенні систем комп'ютерного зору обґрунтовано необхідність розробити метод та алгоритми визначення меж об'єктів на зображенні з використанням поняття змінної роздільної здатності для їх подальшого застосування в задачах

розпізнавання на основі сегментації спотворених завадами зображень при відсутності апріорної інформації про характер завад.

2. Вперше розроблено метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності на засадах існуючого математичного опису явища зміни розмірів зон збудження рецептивних полів нейронів зорової системи вищих тварин. На підставі аналізу нейрофізіологічних досліджень зорової системи сформовано гіпотезу про відносну незалежність запропонованого методу від впливу завад. Запропонований метод набув подальшого розвитку через визначення додаткових умов, задоволення яких дозволяє використовувати його для структурного аналізу кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності, а саме: встановлювати інтервали аргументу, на яких кусково-гладка функція може бути апроксимована відрізком прямої з кутовим коефіцієнтом, що відповідає обраним обмеженням.

3. Вперше запропоновано алгоритм сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності, який можна використовувати для визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях, застосувавши рядкову модель зображення, та алгоритм структурного аналізу одновимірного сигналу при змінній роздільній здатності. Вперше запропоновано алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності. Створено інформаційну технологію оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності. Бібліотеки класів з її складу реалізують запропоновані алгоритми та можуть бути застосовані в існуючих інформаційних системах, що використовують результати обробки одновимірних сигналів, результати визначення меж об'єктів на півтоновому зображенні та в подальших дослідженнях.

4. Ефективність запропонованих методу та алгоритму сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності експериментально перевірено та підтверджено під час обробки спотворених завадами сигналів, модельних та реальних півтонових зображень. Удосконалено процес отримання аналітичного опису зображення шляхом застосування існуючої математичної моделі процесу зменшення розмірів рецептивних полів зорових нейронів до задачі визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях, що дозволило не виконувати попередню обробку зображення незалежно від наявності завад та їх властивостей. Розглянуто задачу структурного аналізу сигналу на прикладі сегментації кардіосигналу на R-R інтервали. Застосування алгоритму сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності, що реалізує запропонований метод із додатковими умовами та використовує структурну модель об'єкта інтересу, дозволило виконати сегментацію кардіосигналу на R-R інтервали без його попередньої обробки. При цьому жодна апріорна інформація про характер завад не використовувалася. Практичну цінність отриманих результатів підтверджено актами впровадження від ВО «Медгрід» та ТОВ «Кардіолайз».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Шарыпанов А. В. Об определении точек разрыва непрерывности на искаженных помехами графиках функций. *Математичні машини і системи*. 2018. № 2. С. 157 – 164.
2. Sharypanov A., Antoniouk A., Kalmykov V. Joint study of visual perception mechanism and computer vision systems that use coarse-to-fine approach for data processing. *Information content & processing*. 2014. Vol. 1, N 3. P. 287 – 299.
3. Kalmykov V., Sharypanov A. Segmentation of Experimental Curves Distorted by Noise. *Journal of Computer Science Systems Biology*. 2017. Vol. 10, Issue 3. P. 50 – 55.
4. Kalmykov V., Sharypanov A. Segmentation of the Experimental Curves as the Implementations of Unknown Piecewise Smooth Functions. *Control Systems and Computers*. 2018. N 2. P. 12 – 18.
5. Шарыпанов А. В., Калмыков В. Г. Змінна роздільна здатність у зоровому сприйнятті та обробленні зображень. *Математичні машини і системи*. 2018. № 3. С. 60 – 75.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Sharypanov A., Antoniouk A., Kalmykov V. Joint Study of Visual Perception Mechanism and Computer Vision Systems that Use Coarse-To-Fine Approach for Data Processing. *Education and Science and their Role in Social and Industrial Progress of Society: Conference* (Kyiv, June 12 – 15, 2014). Kyiv, 2014. P. 51 – 52.
7. Sharypanov A., Antoniouk A., Kalmykov V. Joint Study of Visual Perception Mechanism and Computer Vision Systems that Use Coarse-To-Fine Approach for Data Processing. *Knowledge – Dialogue – Solution: proceedings of XX-th International Conference* (Kyiv, Sept 8 – 10, 2014). Kyiv, 2014. P. 134 – 135.
8. Шарыпанов А. В., Калмыков В. Г. Сегментация экспериментальных кривых с использованием переменной разрешающей способности. *Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика (СППР'2017): збірник доповідей наук.-практ. конф. з міжнар. участю* (м. Київ, 5 червня 2017 р.). Київ: ІПММС НАНУ, 2017. С. 121 – 124.
9. Шарыпанов А. В., Калмыков В. Г. Применение переменной разрешающей способности для сегментации экспериментальных кривых, искаженных шумами. *Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку: тези доповідей міжнар. наук. конф., присвяченої 60-річчю заснування Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України* (м. Київ, 13 – 15 грудня 2017 р.). Київ, 2017. С. 238 – 240.
10. Sharypanov A., Kalmykov V. Structural methods of signal and image processing using variable resolution. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2018: тези доповідей тринадцятої міжнар. наук.-практ. конф.* (м. Київ – м. Чернігів – смт. Жукін, 25 – 29 червня 2018 р.). Чернігів: ЧДТУ, 2018. С. 273 – 276.

11. Шарыпанов А. В., Калмыков В. Г. Сегментация экспериментальных кривых с использованием переменной разрешающей способности. *Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації*: тези доповідей VII міжнар. наук. конф. (м. Кам'янець-Подільський, 21 – 22 квітня 2016 р.). Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2016. С. 244 – 246.

12. Шарыпанов А. В., Калмыков В. Г. Сегментация экспериментальных кривых как реализаций кусочно-гладких функций. *Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2016)*: тези доповідей III міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 8 – 10 листопада 2016 р.). Київ: Київський національний університет, 2016. С. 163 – 164.

АНОТАЦІЯ

Шарипанов А. В. Структурний метод обробки зображень і сигналів при змінній роздільній здатності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Інститут проблем математичних машин і систем НАН України. – Київ, 2019.

У дисертації викладено нове розв'язання актуального наукового завдання визначення меж об'єктів на півтоновому зображенні.

Вперше запропоновано метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності, який відрізняється від існуючих методів тим, що сегментація виконується при певній кількості роздільних здатностей, рішення щодо сегментації приймається з урахуванням усіх результатів обробки при всіх використаних роздільних здатностях та автоматично визначається підмножина роздільних здатностей, які використовуються при формуванні рішення, що дозволяє не використовувати апріорну інформацію про властивості завад.

Вперше запропоновано та експериментально перевірено в умовах завад алгоритми обробки зображень і сигналів, що використовують змінну роздільну здатність. Розроблено інформаційну технологію оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності.

Практична цінність отриманих результатів підтверджена актами впровадження створеної інформаційної технології від ВО «Медгрід» та ТОВ «Кардіолайз».

Ключові слова: кусково-гладка функція, сегментація, обробка зображень, змінна роздільна здатність.

АННОТАЦИЯ

Шарыпанов А. В. Структурный метод обработки изображений и сигналов при переменной разрешающей способности. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Институт проблем математических машин и систем НАН Украины. – Киев, 2019.

В диссертации изложено новое решение актуальной научной задачи сегментации полутоновых изображений.

Рассмотрены методы обработки сигналов и изображений при переменной разрешающей способности в системах компьютерного зрения и динамические свойства нейронов зрительной системы высших животных. Показано, что разрешающая способность, которая обычно является ненаблюдаемым параметром при обработке изображений, существенно влияет на результаты их обработки.

Установлена необходимость разработки методов и алгоритмов, которые объединят полученные в нейрофизиологии результаты изучения процессов, связанных с изменением разрешающей способности в зрительной системе человека, с существующими алгоритмами обработки изображений. Такое объединение должно сделать возможным выполнение сегментации сигналов и выделение границ объектов на изображениях в условиях действия помех, при отсутствии априорной информации об их характере, для дальнейшего использования этих результатов в задачах распознавания.

Проанализированы недостатки наиболее известного и до сих пор широко применяемого метода выделения границ объектов на изображениях Канни, который был выбран в качестве прототипа для создаваемого метода.

Обработка полутонового изображения осуществляется в соответствии со структурной моделью изображения. Полутоновое изображение представляется как трехмерная кусочно-гладкая поверхность. Определено понятие контура в полутоновом изображении.

Впервые предложен метод сегментации кусочно-гладких функций по их дискретным реализациям при переменной разрешающей способности, который учитывает существующую математическую модель процесса уменьшения размеров рецептивных полей нейронов зрительной системы, как дискретного случая определения разрыва непрерывности функции в точке.

Получил дальнейшее развитие анализ неизвестных функций по их дискретным реализациям, где, за счет введения дополнительных условий в предложенном методе, стало возможным отыскание на дискретной реализации функции интервалов аргумента, на которых она может быть аппроксимирована отрезком прямой с угловым коэффициентом, отвечающим выбранным ограничениям.

Усовершенствован процесс получения аналитического описания изображения путем применения существующей математической модели процесса уменьшения размеров рецептивных полей зрительных нейронов к задаче определения границ

объектов на полутоновых изображениях, что позволило не выполнять предварительную обработку изображения не зависимо от наличия помех и их свойств.

Впервые предложены и проверены экспериментально в условиях действия помех алгоритмы обработки изображений и сигналов, использующие переменную разрешающую способность. В указанных алгоритмах не используется никакая априорная информация о характере помех. Решение о сегментации принимается с учетом всех ответов для всех разрешающих способностей, с которыми рассматривался сигнал, а последовательность разрешающих способностей, по которой формируется ответ, определяется автоматически.

Рассмотрена практическая задача сегментации кардиосигнала на R-R интервалы. Для ее решения предложен модифицированный алгоритм структурного анализа одномерного сигнала при переменной разрешающей способности.

Создана информационная технология обработки изображений и сигналов при переменной разрешающей способности, в состав которой вошли алгоритмы и программные средства, реализующие обработку сигналов при переменной разрешающей способности. Информационная технология построена по модульному принципу. Ее составные части могут быть использованы в исследованиях, где выполняется обработка одномерных сигналов, в частности, при исследованиях электрокардиограмм.

В экспериментальных исследованиях с применением созданной информационной технологии была проверена и подтверждена адекватность математической модели функционирования нейрона зрительной системы. Экспериментально доказано, что использование предложенного метода сегментации кусочно-гладких функций по их дискретным реализациям при переменной разрешающей способности позволяет выполнять сегментацию сигналов и выделять границы объектов на изображениях (при использовании строковой модели изображения) в отсутствие априорной информации о характере помех.

Проведены эксперименты по структурному анализу сигнала при переменной разрешающей способности на примере решения практической задачи сегментации кардиосигнала на R-R интервалы и определения точек Q и S в каждом кардиоцикле. Экспериментально подтверждена возможность структурного анализа сигнала при переменной разрешающей способности без его предварительной обработки.

Практическая ценность полученных результатов подтверждена актами внедрения от ВО «Медгрид» и ООО «Кардиолайз».

Ключевые слова: зрительная система, разрыв непрерывности, обработка изображений, выделение границ объекта, переменная разрешающая способность.

ABSTRACT

Sharypanov A. V. Structural method of image and signal processing using variable resolution. – Qualification scientific work as a manuscript.

Ph.D. thesis in specialty 05.13.06 – information technologies. – Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of National Academy of Sciences of Ukraine. – Kyiv, 2019.

The Ph.D. thesis presents new solution for actual scientific task of halftone image segmentation.

For the first time on the basis of existing mathematical description of changes in sizes of the excitation zones of visual neuron's receptive field the method for finding discontinuities of a piecewise smooth function using discrete implementation of this function with variable resolution was presented.

For the first time the new algorithms of image and signal processing that used variable resolution were proposed and experimentally verified for noisy examples. No a priori information about noise was used. The decision was made taking into account all segmentation answers for all resolutions that were used for processing. The sequence of resolutions that was used for answer generation was detected automatically. The information technology of signal processing with variable resolution was developed.

The practical value of obtained results was confirmed by acts of implementation of created information technology from virtual organization Medgrid and Cardiolyse Ltd.

Keywords: discontinuity, image processing, segmentation, variable resolution.