

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШАРИПАНОВ АНТОН ВЕНІАМІНОВИЧ

УДК 004.02, 004.428

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ша А.В. Шарипанов

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Калмиков Володимир Григорович, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

Київ – 2019

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.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Представлена робота відноситься до області оброблення візуальної інформації, зокрема зображень.

У першому розділі «Змінна роздільна здатність у зоровому сприйнятті та обробленні зображень» розглядаються відомі методи оброблення зображень та сигналів у системах комп'ютерного зору, що використовують різні роздільні здатності, та динамічні властивості нейронів зорової системи вищих тварин.

Аналіз результатів сучасного стану в областях нейрофізіології зору та створенні систем комп'ютерного зору показав, що в системах комп'ютерного зору оброблення візуальної інформації із застосуванням різних роздільних здатностей використовується спонтанно, як певний інженерний прийом. Водночас нейрофізіологічні дослідження (Подвігін М. П., Руксенас О.) свідчать про наявність механізмів оброблення візуальної інформації зі змінною роздільною здатністю в зоровій системі людини.

На розглянутих прикладах показано, що велика кількість задач розпізнавання зображень, які мають складність NP чи взагалі не можуть бути розв'язані за допомогою традиційних методів, розв'язуються в зоровій системі людини моментально, а задачі, пов'язані з обробленням відеоряду, – у режимі реального часу. При цьому вибір відповідної роздільної здатності суттєво впливає на результат розпізнавання зображень.

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

Наголошується, що, незважаючи на те що дослідження в нейрофізіології зорового сприйняття та створення інформаційних технологій для оброблення візуальної інформації є пов'язаними областями діяльності людини і мають той самий об'єкт дослідження – зорове сприйняття, обміну результатами між дисциплінами як такого не відбувається.

Установлено необхідність розроблення 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 оброблення зображень, для їх подальшого використання в задачах розпізнавання зображень на основі сегментації спотворених завадами зображень та сигналів, при відсутності апріорної інформації про характер завад.

У другому розділі «Теоретичні засади оброблення півтонових зображень при змінній роздільній здатності» викладено новий метод оброблення півтонових зображень при змінній роздільній здатності з урахуванням існуючих методів та актуальних досягнень в області нейрофізіології зору. Визначено місце розроблених у дисертаційній роботі теоретичних положень у процесі оброблення зображень.

Оброблення 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.

Означено ускладнення при описі контурів зображення, що виникають при ототожненні точки поверхні у тривимірному просторі дійсних чисел із пікселем зображення, який є елементом дискретного простору. Розглянуто опис

зображення за допомогою декартова клітинного комплексу за Ковалевським В. А. у рамках цифрової рядкової моделі зображення. Тоді пікселі представляються як двовимірні елементи. Крім пікселів є креки (crack) і точки. Креки – сторони пікселів, що є одновимірними елементами. Точки є кінцевими точками креків і кутовими точками пікселів. Точки є нульвимірними елементами. Контур об'єкта в такому випадку – це зв'язна замкнута послідовність контурних креків, що межують з пікселями об'єкта та фону. У цифровому вигляді контур може бути описаний як послідовність цілочисельних координат точок, що обмежують контурні креки. Представлення площини зображення клітинним комплексом дозволяє розглядати межу області як тонку криву з нульовою товщиною. Згідно з визначенням зображення як двовимірного клітинного комплексу виділення особливих точок регулярних поверхонь повинне бути змінене на пошук особливих креків – вертикальних для горизонтальних рядків і горизонтальних для вертикальних рядків. Особливим креком називається крек між двома сусідніми пікселями рядка, в околі яких порушується неперервність функції яскравості або її градієнта.

На підставі аналізу першоджерел, показано наявність у зоровій системі та розглянуто роботу нейронів, що можуть бути прототипом для одновимірних і нульвимірних клітин при описі зображення за допомогою двовимірного клітинного комплексу.

Описано результати експериментів щодо знаходження контурів як послідовності особливих креків на модельному півтоновому зображенні при єдиному значенні роздільної здатності. Установлено, що після дискретизації навіть на модельних зображеннях з'являються хибні особливі креки, що відповідають регулярним точкам поверхні, яка задана математичною моделлю півтонового зображення. Це відбувається через похибки дискретизації та квантування при переході до цифрового вигляду півтонового зображення. Зазначається, що наявність зміни розмірів зон збудження рецептивних полів нейронів під час зорового акту в зоровій системі людей та вищих тварин дозволяє виконувати сегментацію зображення (визначення контурів) у зоровій системі непомітно, на підсвідомому рівні, навіть при значній кількості завад. Отже,

процес оброблення півтонових зображень із використанням змінної роздільної здатності може також отримати характеристики, що обумовлені властивостями зорової системи, а саме – певну незалежність від впливу завад.

Уперше запропоновано 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.

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

Показано, як інформація про знайдені межі об'єктів на зображенні у вигляді особливих кривих використовується при отриманні аналітичного опису зображення. Послідовності особливих кривих можуть бути перетворені в замкнуті послідовності відрізків цифрових прямих та дуг цифрових кривих існуючими методами опису цифрових контурів зображення. Інформація про межі окремих гладких сегментів кусково-гладкої функції яскравості кожного рядка застосовується в існуючих методах апроксимації неперервних областей півтонового зображення поліноміальними поверхнями третього порядку.

У третьому розділі «Інформаційна технологія оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності» вперше запропоновано алгоритми з використанням поняття змінної роздільної здатності для сегментації сигналів та визначення меж об'єктів на зображеннях. Розглянуто практичну задачу сегментації кардіосигналу на R-R інтервали. Для її розв'язання запропоновано модифікацію алгоритму структурного аналізу одновимірного сигналу при змінній роздільній здатності.

Розроблено інформаційну технологію оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності. Інформаційну технологію реалізовано у вигляді програмного забезпечення, яке має модульну структуру. Це дозволяє

використовувати його не тільки в подальших експериментальних дослідженнях, а й інтегрувати його складові в існуючі інформаційні системи.

Розглянуто комбінований підхід до розроблення програмного забезпечення, застосування якого дозволило скоротити витрати часу на дослідження та створення інформаційної технології. Прототип програмного забезпечення створювався за методологією гнучкого розроблення програмного забезпечення. Даний етап створення інформаційної технології було інкапсульовано в додатковому «циклі 0» методології ітеративно-інкрементного розроблення програмного забезпечення. Під час роботи в «циклі 0» використовувалося інтегроване середовище Matlab. Розроблення відбувалося в процедурній парадигмі програмування, 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. Після завершення «циклу 0» застосування операції зворотного проектування до прототипу дозволило змінити парадигму програмування на об'єктно-орієнтовану, створити модель предметної області та отримати представлення структури для створеної моделі. Представлення варіантів використання та поведінки моделі предметної області були отримані безпосередньо зі створених під час роботи в «циклі 0» документів.

У четвертому розділі «Оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності» із використанням створеної інформаційної технології проведено експериментальні дослідження щодо сегментації сигналів, які є дискретними реалізаціями функцій однієї змінної, на прикладі рядків яскравості модельних зображень, що спотворені завадами. Визначення меж об'єктів на модельних та реальних півтонових зображеннях виконувалося із застосуванням рядкової моделі зображення, а результати представлено як суперпозицію сегментації кожного горизонтального та вертикального рядка при змінній роздільній здатності.

Експериментально перевірено та підтверджено адекватність математичної моделі явища зміни розмірів зон збудження рецептивних полів нейронів зорової системи.

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.

Проведено експерименти щодо структурного аналізу сигналу при змінній роздільній здатності на прикладі розв'язання практичної задачі сегментації кардіосигналу на R-R інтервали та визначення точок Q та S кожного кардіоциклу. Експериментально підтверджено можливість структурного аналізу сигналу при змінній роздільній здатності в умовах наявності завад без його фільтрації та без додаткової інформації про характер завад, на відміну від традиційних методів, де фільтрація сигналу є складовою процесу оброблення.

При обробленні 390 спотворених завадами кардіограм показник кількості оброблених кардіограм вдалося поліпшити на 5,69 %, відносно результатів програми «Оракул», що перебуває в промисловій експлуатації, при застосуванні запропонованого алгоритму сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності, і довести цей показник до 99,49 % від загальної кількості розглянутих кардіограм. Також експериментально підтверджено можливість виконання сегментації кардіосигналу в режимі реального часу при автоматичному визначенні параметрів алгоритму.

Практична цінність отриманих результатів підтверджена актами впровадження від віртуальної організації «Медгрід» та ТОВ «Кардіолайз».

Ключові слова: візуальна інформація, зорова система, зорове сприйняття, розрив неперервності, оброблення зображень, сегментація, змінна роздільна здатність.

ABSTRACT

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

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

The Ph.D. thesis presents new solution for actual scientific task of object edge detection on halftone images.

The manuscript consists of introduction, four sections, conclusion, list of used literature and two appendices. The research relates to image processing field.

In the first section "Variable resolution in visual perception and image processing" the known methods of image and signal processing with different resolution in computer vision systems and dynamic properties of neurons in the visual system of higher animals are discussed.

State of the art analysis in the fields of neurophysiology of vision and creation of computer vision systems showed that processing of visual information with different resolutions in computer vision systems is used spontaneously, as a certain engineering technique. At the same time neurophysiological studies (Podvigin N. F., Ruksenas O.) indicate the presence of mechanisms for visual information processing with variable resolution in the human visual system.

The examples examined show that a large number of image recognition tasks that have NP complexity or can not be solved by traditional methods at all can be solved in the human visual system instantaneously, and the tasks associated with the video processing – in real time. In this case, the choice of the appropriate resolution significantly affects the result of image recognition.

The most well-known Canny edge detection method where different resolutions are used implicitly while detecting edges of objects on images was selected as the prototype for new segmentation method with variable resolution.

It is noted that despite of the fact that researches in neurophysiology of vision and creation of information technologies for visual information processing are related areas of human activities and have the same object of study – visual perception – the exchange of results between disciplines does not happen.

The necessity of developing new methods and algorithms for their further use in image recognition tasks based on segmentation of distorted images and signals with no prior information about the nature of the noise is determined. This should help to combine the results of studying the changes in resolution in human visual system obtained in neurophysiology with the existing methods and image processing algorithms.

In the second section "Theoretical principles of grayscale images processing at variable resolution" the new method for processing of grayscale images taking into account existing methods and actual achievements in the field of neurophysiology of vision is presented. The place of theoretical statements developed during research in image processing techniques was determined.

Grayscale image processing takes place in accordance with the structural model of an image. Grayscale image is represented as piecewise smooth surface in a three-dimensional space. To create a structural model of grayscale image, the mathematical model of grayscale image is considered together with grayscale image model that takes into account neurophysiological concept of visual perception.

The complications in image's contours description that arise while matching the point of a three-dimensional surface in the space of real numbers to pixel of an image, which is an element of discrete space, are described. The description of image with the help of Kovalevsky's V. A. cartesian cellular complex is considered in the framework of digital line model of an image. The D-dimensional cellular complex is a structure consisting of abstract elements called cells. An integer value from 0 to D, which is called measurement, is assigned to each cell. Cell boundary relationships are defined: lower measurement cells can bound cells of a higher dimension. There are "cracks" and "points" in addition to pixels. "Cracks" are sides of pixels. They are one-dimensional elements. "Points" are the endpoints of cracks or angular pixel points. Points are zero-

dimensional elements. In this case, the contour of an object is a coherent closed sequence of contour cracks that represent the boundary between pixels of the object and the background. In the digital form, the contour may be described as a sequence of integer coordinates of points that limit contour cracks. Representation of the plane as a cellular complex allows us to consider the boundary of the region as a thin curve with zero thickness. According to the definition of image as a two-dimensional cellular complex, search for special points of regular surfaces should be changed to search for special cracks – vertical for horizontal lines, and horizontal for vertical lines. Special crack is a crack between two adjacent pixels of a row where the continuity of brightness function of a row or its gradient is disturbed.

The presence of neurons in visual system that can be prototypes for 1-dimensional and 0-dimensional cells in the description of image using two-dimensional cellular complex is shown based on the analysis of literature. The functioning of these neurons is considered.

The results of experiments on finding contours as sequences of special cracks on an artificially constructed grayscale image with a single (maximal) resolution value are described. It was determined that even after sampling of artificially constructed grayscale images false special cracks that correspond to regular points of the surface, described by the mathematical model of grayscale image are found. It happened due to sampling and quantization errors during digitization of original grayscale image. It is noted that changes in sizes of visual neurons' excitation zone of receptive field during visual act in the visual system of humans and higher animals allows segmentation of image (contours finding) in the visual system insensibly, at a subconscious level, even with significant amount of interference. So the new structural method under development for processing grayscale images using variable resolution seems to have new properties inherent to visual system, namely, a certain independence from the influence of interference.

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 piecewise smooth functions using discrete implementations of these functions with variable resolution was presented.

Taking into account the proposed method two tasks were considered: task 1 of finding the discontinuities of piecewise-smooth function using its discrete realization with variable resolution and task 2 of finding intervals of argument at functions' discrete realizations within which the discrete realization of the function can be approximated by a segment of a straight line with an angular coefficient exceeding predefined threshold value. Additional conditions by which task 2 was reduced to task 1 were found out.

The role of object edge detection in obtaining of analytical description of the image is shown. The results of object edge detection in form of sequences of special cracks are used by methods of describing the digital contours of grayscale image in the form of closed sequences of segments of digital lines and arcs of digital curves. The information about smooth segments of each image row is used in approximation methods of grayscale image continuous regions by polynomial surfaces of the third order.

In the third section "Information technology of images and signals processing at variable resolution" for the first time algorithms that use the concept of variable resolution for solving tasks 1 and 2 were proposed. The practical task of cardiac signal partitioning into R-R segments is considered. It was proposed to modify the algorithm for finding the intervals of argument where the function can be approximated by a segment of a straight line having angular coefficient corresponding to chosen constraints in order to solve it.

The information technology of signal processing with variable resolution was developed. The information technology mentioned above is implemented in software that has modular structure. This allows it to be used not only in further studies, but also to integrate its components into existing information systems.

The combined approach that was used during software development was described. This approach allowed to reduce the time spent on research and creation of information technology. Software prototype was created using agile software

development methodology. This stage of information technology creation was encapsulated in the additional "cycle 0" of the iterative and incremental software development methodology. During "cycle 0" the development was conducted using Matlab integrated environment. The development was conducted in compliance to procedural programming paradigm. The procedures were divided into three groups according to their purpose: 1) input/output; 2) those that implement algorithms for tasks solving; 3) displaying (intermediate) results. Application of reverse design to the prototype allowed to move to the object-oriented programming paradigm, to create a domain model and to obtain the structure view for created model. The use case view and behavior view of the domain model was obtained directly from documents created during the "cycle 0".

In the fourth section "Images and signals processing at variable resolution" experiments on segmentation of signals were carried out. Several cases were considered: 1) lines of brightness of model images distorted by noise as examples of discrete realizations of functions of one variable; 2) object edge detection on modeled and real grayscale images in the framework of digital line model of an image. The results of object edge detection were presented as superposition of segmentation results for each horizontal and vertical line of the image. The experiments were carried out using the information technology that was presented.

The adequacy of mathematical model of changes in sizes of receptive fields' excitatory zones in visual neurons was experimentally verified and confirmed.

It was experimentally proved that proposed images and signals segmentation method at variable resolution allowed performing segmentation of images and signals automatically and without any a priori information about interferences. Proposed method allowed receiving satisfactory stable solutions for segmentation of signals distorted by interferences.

The experiments on structural analysis of the signal at variable resolution were carried out. The practical task of cardiac signal partitioning into R-R segments and determining of Q and S points in each cardiac cycle was considered. The possibility of structural analysis of a signal using variable resolution without its preliminary

processing was confirmed experimentally. Proposed algorithm doesn't use digital filtering of signal contrary to traditional methods.

In experiment with 390 cardiograms distorted by noise the number of processed cardiograms with industrial operation program "Оракул" was improved by 5,69 % when proposed algorithm for cardiac signal partitioning into R-R segments using variable resolution was applied. The total number of processed cardiograms reached 99,49 %.

The possibility of performing the cardiac signal segmentation in real time while automatically determining the parameters of the algorithm was experimentally confirmed.

The practical value of obtained results is confirmed by acts of implementation from virtual organization Medgrid and Cardiolyse Ltd.

Keywords: visual information, visual system, visual perception, discontinuity, image processing, segmentation, variable resolution.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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: ПІММС 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. Жукин, 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.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ЗМІННА РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ У ЗОРОВОМУ СПРИЙНЯТТІ ТА ОБРОБЛЕННІ ЗОБРАЖЕНЬ.....	13
1.1 Змінна роздільна здатність у зоровій системі людини.....	14
1.1.1 Будова зорової системи	14
1.1.2 Нейрони та їх рецептивні поля	17
1.1.3 Зоровий акт та динамічні властивості рецептивних полів нейронів	21
1.2 Змінна роздільна здатність у системах технічного (комп'ютерного) зору .	25
1.2.1 Приклади впливу роздільної здатності на результати оброблення зображень	26
1.2.2 Неявне використання різних роздільних здатностей у системах оброблення зображень	31
1.2.3 Використання змінної роздільної здатності для зменшення обчислювальної складності алгоритмів	33
1.3 Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОБРОБЛЕННЯ ПІВТОНОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ЗМІННІЙ РОЗДІЛЬНІЙ ЗДАТНОСТІ.....	39
2.1 Побудова структурної моделі півтонового зображення	39
2.1.1 Математична модель півтонового зображення	39
2.1.2 Модель півтонового зображення з урахуванням нейрофізіологічних уявлень про зорове сприйняття	42
2.1.3 Структурна модель півтонового зображення.....	44
2.2 Цифрова рядкова модель півтонового зображення як двовимірного клітинного комплексу	45
2.2.1 Контури зображення в зоровій системі	50
2.2.2 Контури об'єктів – відшукування при максимальній роздільній здатності	53

2.2.3	Метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності	55
2.2.4	Визначення інтервалів аргументу, на яких функції можуть бути апроксимовані відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом, що відповідає обраним обмеженням.....	61
2.3	Визначення структурних елементів особливих ліній півтонового зображення.....	65
2.4	Апроксимація неперервних областей півтонового зображення поліноміальними поверхнями третього порядку.....	74
2.5	Висновки до розділу 2	78
РОЗДІЛ 3 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ І СИГНАЛІВ ПРИ ЗМІННІЙ РОЗДІЛЬНІЙ ЗДАТНОСТІ		80
3.1	Алгоритм сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності	80
3.2	Задача сегментації кардіосигналу на окремі кардіоцикли.....	83
3.2.1	Структурна модель R-зубця у кардіоциклі.....	84
3.2.2	Алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності	85
3.3	Обґрунтування обраних проектних рішень.....	89
3.4	Моделі, що описують інформаційну технологію	93
3.4.1	Представлення використання	94
3.4.2	Представлення структури.....	97
3.4.3	Представлення поведінки.....	98
3.5	Склад створеної інформаційної технології	101
3.6	Висновки до розділу 3	102
РОЗДІЛ 4 ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ І СИГНАЛІВ ПРИ ЗМІННІЙ РОЗДІЛЬНІЙ ЗДАТНОСТІ.....		104
4.1	Експерименти з модельними сигналами та півтоновими зображеннями ...	104
4.1.1	Сегментація модельних сигналів.....	106
4.1.2	Визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях	109

	4
4.2 Експеримент щодо структурного аналізу сигналу	114
4.2.1 Знаходження об'єктів інтересу в сигналах при відсутності завад	115
4.2.2 Знаходження об'єктів інтересу в сигналах за умови наявності завад	117
4.2.3 Виділення об'єктів інтересу в сигналах у режимі реального часу	120
4.3 Висновки до розділу 4	121
ВИСНОВКИ	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	125
ДОДАТКИ.....	132
Додаток А Акти впровадження.....	132
Додаток Б Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	135

ВСТУП

Актуальність теми. Велика кількість інформаційних систем накопичує вхідні дані у вигляді візуальної інформації, на підставі аналізу якої необхідно прийняти певне рішення [1 – 4]. 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 [3].

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 апіорну 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 апіорної 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, що представлені в дисертації та статті [5], 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: [6 – 8] – аналіз інформаційних джерел, участь у постановці експерименту та інтерпретації результату; [9 – 12] – участь у постановці задачі, розробка алгоритму сегментації, проведення експериментів, інтерпретація результатів; [13 – 15] – розробка алгоритму сегментації, постановка експериментів, інтерпретація результатів; [16] – 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.

РОЗДІЛ 1

ЗМІННА РОЗДІЛЬНА ЗДАТНІСТЬ У ЗОРОВОМУ СПРИЙНЯТТІ ТА ОБРОБЛЕННІ ЗОБРАЖЕНЬ

Під роздільною здатністю зображення (сигналу) розуміють кількість елементів растрового зображення (сигналу) на одиницю площі (одиницю виміру аргументу – часу, довжини). Значення роздільної здатності, зазвичай, визначають інтуїтивно, зважаючи на задачу, яка повинна бути вирішена стосовно растрового зображення (сигналу).

Дослідження в нейрофізіології зорового сприйняття та створення інформаційних технологій для обробки візуальної інформації пов'язані областями діяльності людини. Дійсно, об'єктом дослідження для кожної з цих дисциплін є зорове сприйняття. Для фізіології зору це зорове сприйняття людини та тварин, у той час як для комп'ютерних наук це створення та налагодження засобів технічного (комп'ютерного) зору. Прогрес в одній з областей мав би впливати на прогрес в іншій. На жаль, обміну результатами, як такого, не відбувається. Можливо, через слабку взаємодію між спеціалістами, що є представниками різних наук, та через відмінність методів, що зазвичай ними використовуються.

Вперше змінна роздільна здатність (динамічні властивості рецептивних полів нейронів зорової системи) була досліджена у зоровій системі вищих тварин (кішок) Подвігіним М. П. [17].

Водночас є досить багато прикладів щодо оброблення зображень (сигналів) з використанням декількох значень роздільної здатності при обробленні одного й того ж зображення [6, 16].

Далі детально розглянуто змінну роздільну здатність зорового сприйняття вищих тварин (кішок), що принципово не відрізняється від людського, а також приклади оброблення зображень (сигналів), що використовують декілька значень роздільної здатності.

1.1 Змінна роздільна здатність у зоровій системі людини

Деякі процеси у зоровій системі, зокрема, сегментація зображення, відбувається на підсвідомому рівні, дуже швидко та без жодних відчутних зусиль, навіть при значній кількості завад у полі зору. Краще розуміння природи зорового сприйняття повинно стати наступним кроком до розроблення нових ефективних методів обробки візуальної інформації в інформаційних системах.

1.1.1 Будова зорової системи

Зорова система [18, 19] складається з таких органів (рис. 1.1): очі (1), на сітківки (2), яких проеціюються ліві і праві половини полів зору; зорові нерви (3); окопушіні нерви (4); хіазму (5); зоровий тракт (6); бічне колінчасте ядро (7); верхні бугри чотиригорбу (8); неспецифічний зоровий шлях (9); зорову кору головного мозку (10).

У сітківці кожного ока відбувається перетворення оптичних сигналів у електричні, а також первинна обробка візуальної інформації. У хіазмі відбувається поділ нервових шляхів, що зіставляються до лівої й правої частин поля зору кожного ока.

Бічне колінчасте ядро являє собою парний шаруватий орган. Для виконання функції керування окопушійними м'язами з метою суміщення сигналів зображень, що сформовані в обох очах, у бічному колінчастому ядрі відбувається виділення певних ознак, наприклад, контрастних перепадів яскравості на зображенні. На підставі сигналів про ці перепади для різних очей у шарах бічного колінчастого ядра виробляються сигнали, що надходять у четверогорб, де, у свою чергу, формуються сигнали до очних м'язів.

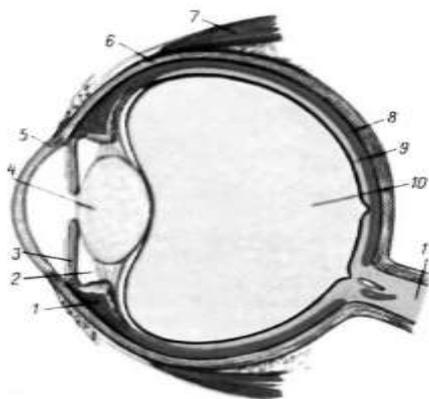


Рисунок 1.2 [18] – Схема будови ока: 1 – ресничне тіло; 2 – задня камера; 3 – райдужна оболонка; 4 – кришталик; 5 – роговиця; 6 – ресничне тіло; 7 – верхній прями м’яз; 8 – судинна оболонка; 9 - сітківка; 10 – скловидне тіло; 11 – зоровий нерв

Сітківка перетворює світло в сигнали нейронів у широкому діапазоні інтенсивності хвиль «видимого» світла й забезпечує роздільну здатність, достатню, щоб вирізнити окремі об’єкти завтовшки з волос людини з кількох метрів [19]. Сітківка – це частина мозку, пов’язана з ним за допомогою зорового нерва. Подібно багатьом іншим структурам центральної нервової системи, сітківка має форму пластинки товщиною приблизно у чверть міліметра. Вона складається з трьох шарів тіл нервових клітин, розділених двома шарами синапсів, утворених аксонами й дендритами цих клітин.

Шар клітин на задній поверхні сітківки містить світлочутливі рецептори – палички й колбочки. Чисельність паличок значно більша, ніж чисельність колбочок. Вони відповідальні за наше зорове сприйняття при слабкому освітленні й відключаються при яскравому освітленні. Колбочки не реагують на слабе світло, але відповідальні за здатність бачити тонкі деталі та за сприйняття кольорів. У самому центрі сітківки, де здатність нашого зору розрізнити тонкі деталі максимальна, є тільки колбочки. Цю, позбавлену паличок, зону діаметром приблизно пів-міліметра називають центральною ямкою. Колбочки є по всій сітківці, але найбільш щільно упаковані саме в центральній ямці.

Оскільки палички й колбочки розташовані на задній поверхні сітківки (рис. 1.3), світло, що надходить до ока, проходить до них через два інших шари клітин. Можливою причиною такого розташування є те, що за рецепторами перебуває шар клітин із вміщенням чорного пігменту – меланіну. Меланін поглинає світло, яке пройшло через сітківку, не даючи йому відбиватися у зворотному напрямку і розсіюватися всередині ока, що створило б паразитне засвічення. Шари перед рецепторами досить прозорі і практично не погіршують чіткість. Однак у центральній частині сітківки два передні шари зміщені до периферії, оголивши центральні колбочки так, що вони виявилися на самій поверхні. Маленьке поглиблення, що утворюється, і є центральна ямка.

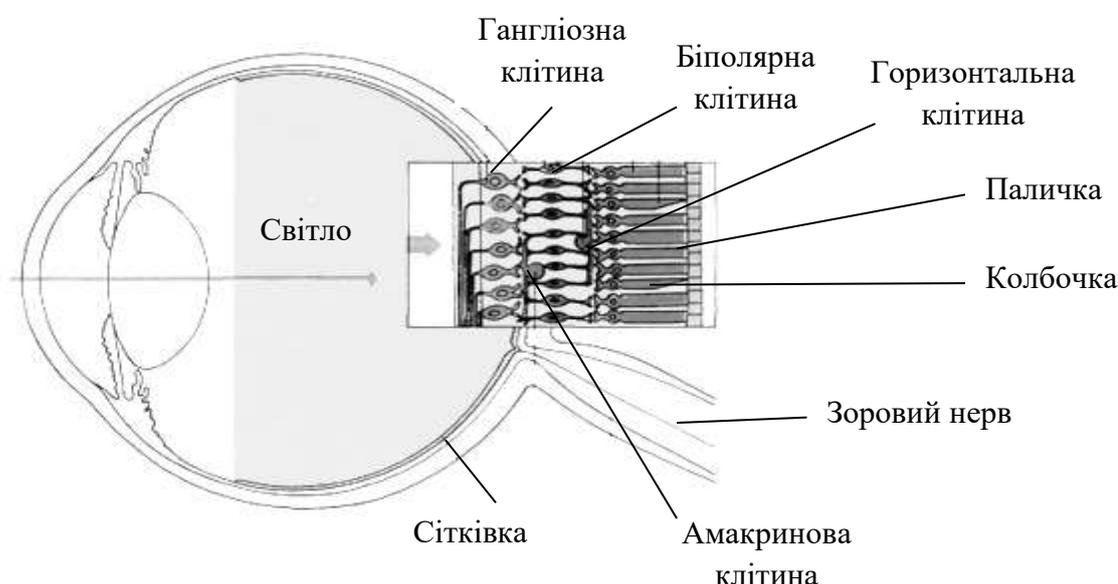


Рисунок 1.3 [19] – Відносне розташування трьох слоїв сітківки всередині ока: світло повинно пройти через слої гангліозних, біполярних та амакринових клітин перш ніж досягне паличок та колбочок

1.1.2 Нейрони та їх рецептивні поля

Середній шар сітківки, що передує паличкам та колбочкам відносно падаючого світла, містить нейрони трьох типів: біполярні, горизонтальні та

амакринові клітини. Біполярні клітини мають входи від рецепторів, як показано на рис. 1.4, і передають сигнали безпосередньо гангліозним клітинам. Горизонтальні клітини з'єднують рецептори й біполярні клітини порівняно довгими зв'язками, що йдуть паралельно шарам сітківки; подібним способом амакринові клітини зв'язують біполярні клітини з гангліозними.

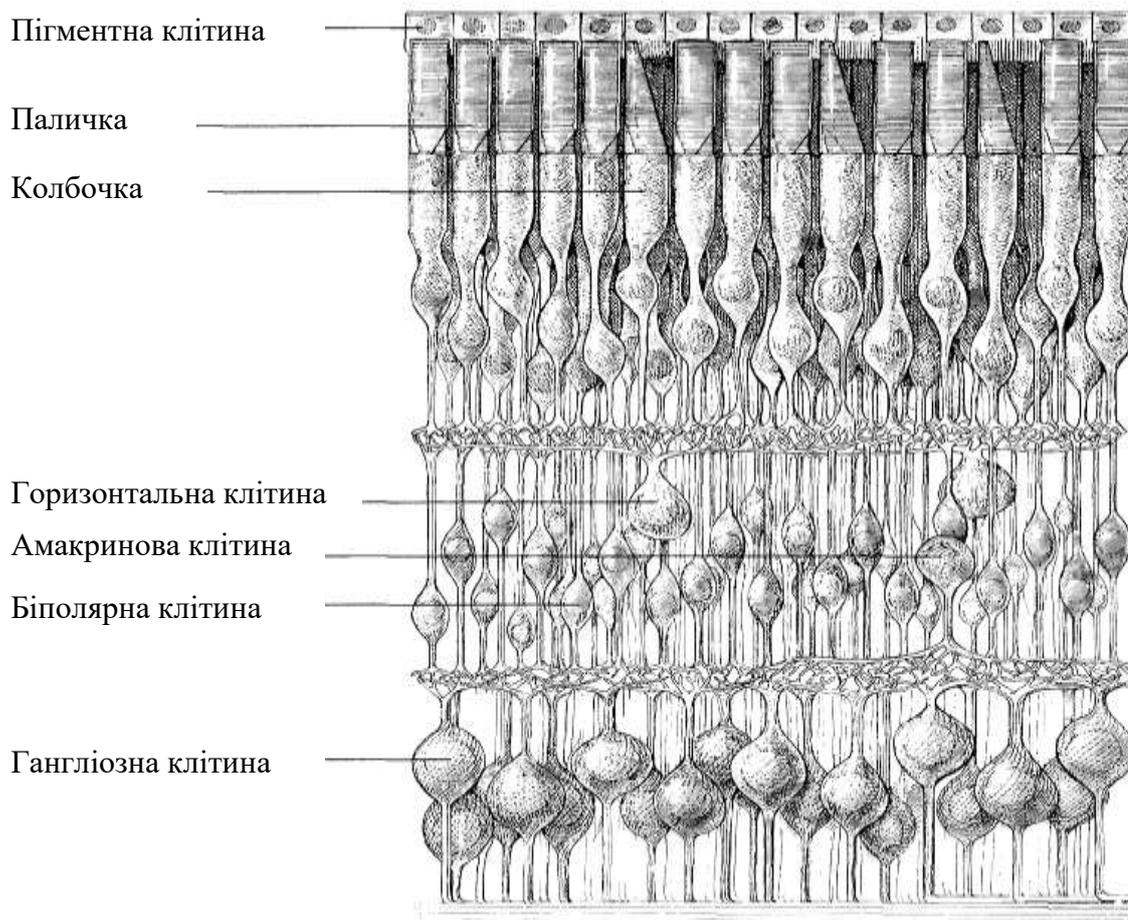


Рисунок 1.4 [19] – Поперечний розтин сітківки посередині між центральною ямкою і дальньою периферією, де паличок більше, ніж колбочок. Повна висота рисунка в натурі відповідає приблизно чверті міліметра

Шар нейронів на передній стороні сітківки містить гангліозні клітини, аксони яких проходять по поверхні сітківки, збираються в пучок у сліпої плями й залишають око, утворюючи зоровий нерв. У кожному оці близько 125 мільйонів паличок і колбочок і близько 1 мільйона гангліозних клітин. Сигнали від фоторецепторів надходять до біполярних і далі до гангліозних клітин, між рецепторами й біполярами можуть бути включені ще й горизонтальні клітини, а

між біполярними й гангліозними клітинами – амакринові клітини (рис. 1.4). Загальна площа, яку займають рецептори, пов'язані з однією гангліозною клітиною, становить усього близько квадратного міліметра. Ця зона є рецептивним полем гангліозної клітини – частиною сітківки, світлова стимуляція якої може впливати на стан і вихідні сигнали даної гангліозної клітини. Кожний рецептор може бути пов'язаний з декількома гангліозними клітинами. Рецептивні поля гангліозних клітин мають форму кола. Рецептивні поля сусідніх гангліозних клітин перетинаються [19].

По аналогії з гангліозними клітинами, які (опосередковано) зв'язані з рецепторами, сукупність сигналів, що підходять до нейрона від нейронів попереднього шару, називають рецептивним полем даного нейрона. Зважаючи на те, що геометричні відношення відносно сітківки в наступних шарах бічного колінчастого ядра зберігаються, рецептивні поля нейронів бічного колінчастого ядра також мають форму кола. Центральна частина рецептивних полів називається зоною збудження, периферійна частина (кільце навкруги центральної частини) – зоною гальмування (рис. 1.5). При пред'явленні світлового стимулу на зону збудження рецептивного поля нейрона генерується певна кількість імпульсів. Чим більше стимул, тим більшу кількість імпульсів буде сгенеровано. Якщо розмір світлового стимулу перевищить діаметр зони збудження, співпадаючи з частиною зони гальмування, кількість імпульсів буде зменшуватися.

На рис. 1.6 ліворуч: чотири записи відповідей типової гангліозної клітини з оп-центром (видає імпульси при впливі світлового стимулу на зону збудження рецептивного поля). Кожний запис отриманий при одиночному розгорненні променя осцилографа тривалістю 2,5 секунди. Через настільки повільне розгорнення висхідна й спадна фази імпульсу зливаються, так що кожний імпульс має вигляд однієї вертикальної лінії. Ліворуч показані стимули. Верхній запис – стан спокою (стимулу немає): імпульси виникають рідко й більш-менш випадково. Три нижні записи – реакції на невелику (оптимальної величини) пляму, на велику пляму, що покриває центр і периферію рецептивного поля, і на

кільце, що покриває тільки периферію. Праворуч: реакції гангліозної клітини з off-центром (видає імпульси при впливі світлового стимулу на зону гальмування рецептивного поля) на такий же набір стимулів.

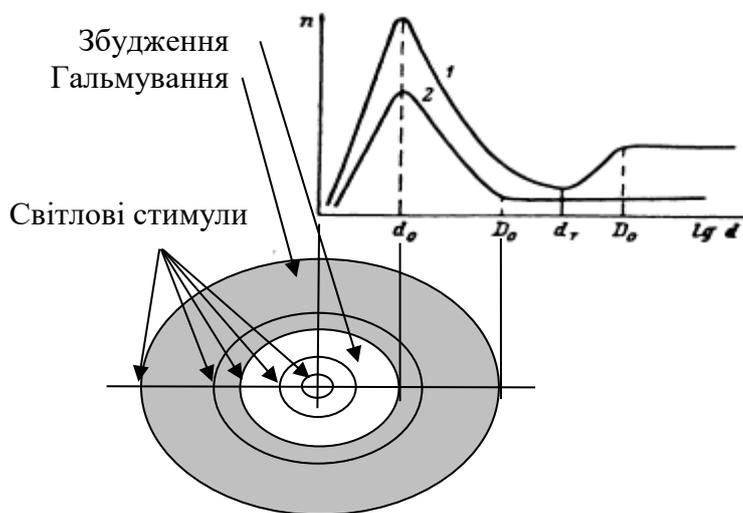


Рисунок 1.5 [17] – Реакція нейрона на стимули різних розмірів: n – кількість імпульсів у відповіді на стимул даного діаметру; d_0 – діаметр зони збудження; D_0 – діаметр зони гальмування; 1,2 – графіки реакцій нейронів різних типів

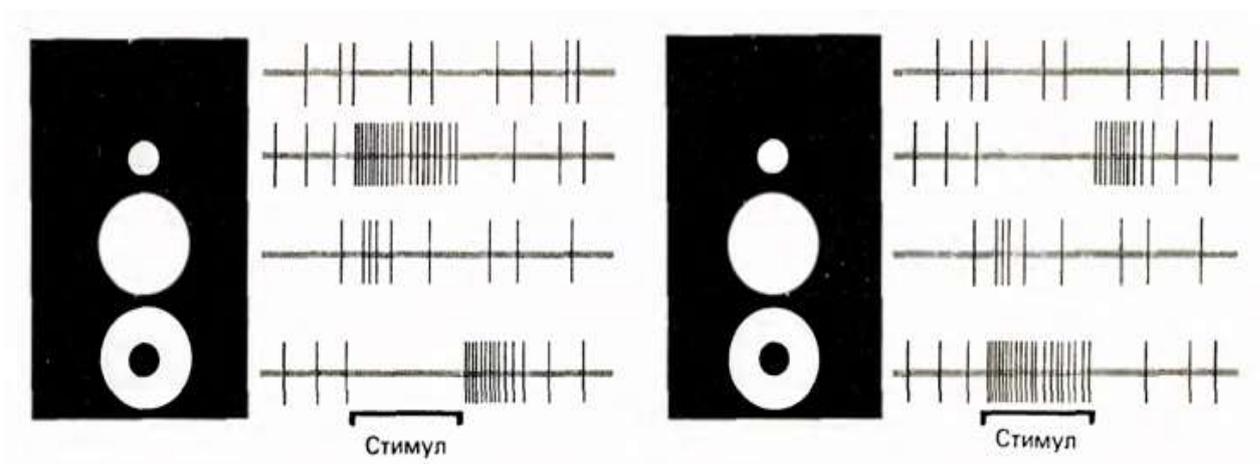


Рисунок 1.6 [19] – Реакції гангліозних клітин з «on» і «off» центрами на стимули

1.1.3 Зоровий акт та динамічні властивості рецептивних полів нейронів

Важливе відкриття було зроблено у 70-х роках минулого сторіччя – зміна зон збудження рецептивних полів під час зорового акту, що означає динамічну зміну роздільної здатності в зоровій системі.

Зорова система людини працює у режимі послідовних зорових актів. Зоровий акт триває приблизно 150 мс. Після чого відбувається саккада – посмикування окорухійних м'язів, у результаті чого зображення на сітківці зміщується і починається наступний зоровий акт.

У результаті досліджень розмірів зон збудження рецептивних полів було встановлено, що їх розміри не залишаються постійними впродовж зорового акту [17]. Пізніше це явище було знов досліджене та підтверджене вже на сучасному рівні [20]. Дослідження цих явищ виконувалися на кішках, зорова система яких у цій частині не суттєво відрізняється від зорової системи людини.

Розглянемо один з методів визначення просторових характеристик рецептивного поля, що має форму кола. Рецептивне поле подразнюється за допомогою світлових стимулів різного діаметра. Відомо, що при збільшенні діаметра світлового стимулу, центр якого співпадає з центром рецептивного поля, відповідь нейрона – кількість імпульсів – спочатку збільшується (рис. 1.5), а потім зменшується [21]. У відповідності з цим, діаметром d_0 зони збудження рецептивних полів, що мають форму кола, вважають найменший діаметр стимулу, при реакції на який кількість імпульсів у відповіді нейрона має максимальне значення [22]. Діаметром рецептивного поля D_0 , якому ставиться у відповідність діаметр зони гальмування, вважають найменший діаметр стимулу, при збільшенні якого не відбуваються зміни у відповідях нейрона.

Однак за такими відповідями безпосередньо можна визначити лише одне значення діаметра зони збудження рецептивного поля (d_0). Це значення не відображає змін розміру зони збудження під час дії стимулу.

З метою отримання кількісного опису змін розмірів зони збудження рецептивного поля з плином часу, тобто знаходження d_0 у впорядкованій послідовності інтервалів часу $\Delta t = \{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots\}$ від початку дії стимулу і визначення залежності $d_0 = f(t)$, був застосований метод часових зрізів [17]. Цей метод базується на доволі обґрунтованому припущенні, що якщо під час зорового акту діаметр зони збудження змінюється, то максимальна кількість імпульсів у відповіді нейрона припадає на той інтервал часу, для якого діаметр зони збудження та діаметр стимулу співпадають або відрізняються один від одного незначною мірою.

При застосуванні методу часових зрізів для побудови залежності кількості імпульсів у відповіді нейрона під час дії світлового стимулу від інтервалу часу, на якому ця відповідь спостерігалася, пост-стимульні гістограми (ПСГ) відповідей нейрона на стимули різної площі розбивають на декілька послідовних часових інтервалів Δt (що дорівнювали 7.5 або 15 мс) та знаходять кількість імпульсів у кожному часовому інтервалі (рис. 1.7).

У відповідності з означенням діаметр зони збудження дорівнює найменшому діаметру стимулу, при якому досягається максимум кількості відповідей нейрона. Метод часових зрізів дозволяє також визначити і номер часового інтервалу, на якому цей максимум досягається. Чим більший діаметр стимулу, тим раніше досягається максимум. Це дозволяє зробити висновок про те, що діаметр зони збудження рецептивного поля, яке має форму кола, під час зорового акту змінюється з плином часу від максимального значення до мінімального.

Якщо на початку зорового акту розмір рецептивного поля є максимальним, то наприкінці зорового акту він зменшується до мінімально можливого. У випадку гангліозної клітини це 1 – 2 рецептори.

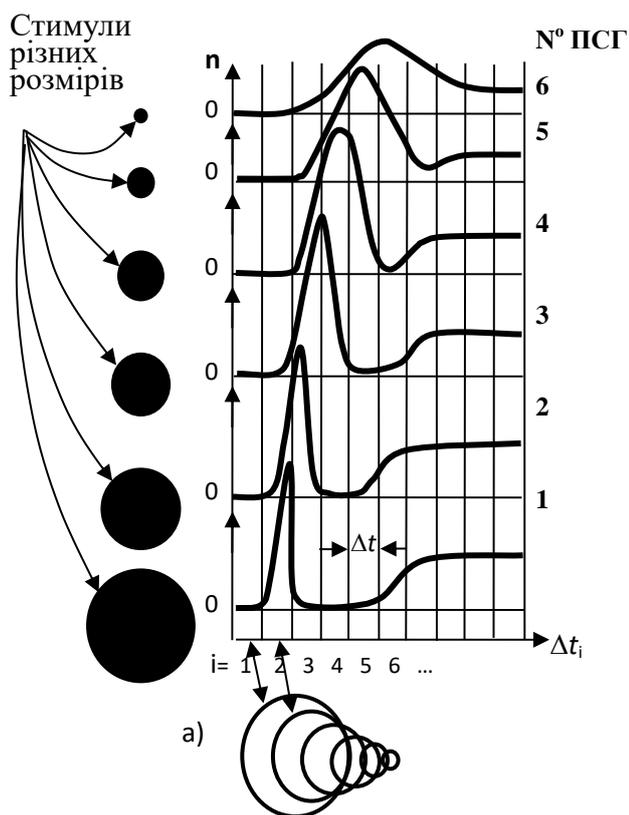


Рисунок 1.7 [17] – Обробка відповідей нейрона на стимули різних розмірів методом часових зрізів. На осі n для кожної ПСГ відкладена кількість імпульсів у відповідному часовому інтервалі Δt_i . Максимальна кількість імпульсів відповідає рівності розмірів зони збудження і стимулу; а) – зміна розмірів зони збудження нейрона під час зорового акту

Залежність відповіді нейрона від часу дії стимулу та динамічні властивості рецептивного поля нейрона бічного колінчастого ядра кішки досліджено у [20]. Рецептивне поле подразнювалося за допомогою світлових стимулів упродовж 400 – 500 мс. Просторові параметри рецептивного поля оцінювалися за просторовими інтегральними кривими, що визначалися для послідовних часових інтервалів по 5 мс упродовж всього часу пред'явлення стимулу. Таким чином, було можливо дослідити динамічні характеристики властивостей відповідей у подібних до природних умов станах та за допомогою методів, що не розглядають модельовану систему як лінійну.

Отримані результати показали виражені зміни у структурі рецептивного поля під час пред'явлення стимулу. На початку спостереження нейрони мали велику зону збудження рецептивного поля. Центральна частина рецептивного поля швидко зменшувалася до мінімального розміру, що спостерігалось приблизно через 70 мс від моменту пред'явлення стимулу, після чого спостерігалось незначне збільшення її розміру. Таким чином, максимальна просторова роздільна здатність досягалася за невеликий проміжок часу після пред'явлення стимулу. Автори наголошують на узгодженості їх результатів із гіпотезою про те, що під час пред'явлення світлового стимулу сильний початковий сигнал від нейронів містить просторово «грубе» повідомлення до зорової кори, який поступово змінюється слабкішим, але таким, що містить більш точну просторову інформацію.

Була перевірена гіпотеза про те, що стимул малого діаметра спочатку активує багато нейронів, але більшість з них – лише тимчасово (рис. 1.8). Моделювалися умови, коли стимул випадав із зон збудження рецептивних полів нейронів під час їх зменшення. Для всіх трьох розташувань стимулу відносно центру рецептивного поля спостерігався початковий тимчасовий відгук, але наступна стійка частина відповіді, яка повинна виникати при знаходженні стимулу малого розміру у центрі зони збудження мінімального діаметра, у цьому випадку була відсутня.

Також встановлено, що схожі зміни просторових характеристик спостерігалися і для рецептивних полів нейронів бічного колінчастого ядра [20].

Таким чином, можна вважати, що для зорової системи існує максимальна роздільна здатність, яка визначається кількістю рецепторів у центральній частині рецептивного поля і змінювана під час зорового акту змінна роздільна здатність, що визначається поточним значенням розміру зони збудження рецептивного поля нейрона.

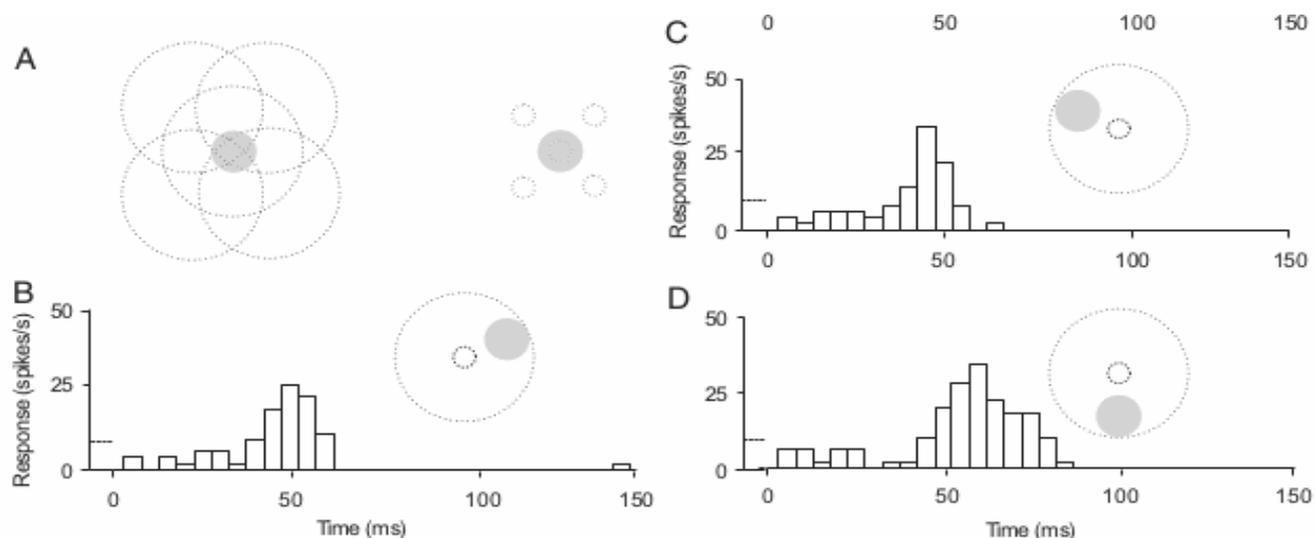


Рисунок 1.8 [20] – Великий початковий розмір зон збудження рецептивних полів передбачає, що кількість активованих нейронів зменшується під час моделювання. А: схематичне подання гіпотези. В – D: стимул, що пред’являється в межах рецептивного поля, але за межами мінімального розміру зони збудження спочатку швидко видає відповідь, яка зникає при подальшому зменшенні зони збудження рецептивного поля до мінімальних розмірів. Побудовані лише відповіді для перших 150 мс з 500 мс інтервалу моделювання. Пунктирна лінія перед початком пред’явлення стимулу показує рівень спонтанної активності. Ширина стовпчика гістограми відповідає інтервалу 5 мс. Для кожного розміщення було виконано 100 випробувань

1.2 Змінна роздільна здатність у системах технічного (комп’ютерного) зору

Методи оброблення зображень, що використовують різні значення роздільної здатності, відомі під загальною назвою «coarse-to-fine». Ідея цих методів полягає в тому, що початковий набір даних переглядається із різною роздільною здатністю для виключення невідповідних або не релевантних областей зображення на ранніх стадіях під час оброблення. Результат, отриманий

при «грубій» роздільній здатності, використовується як початкове наближення на наступному кроці при збільшеній роздільній здатності. Тоді найбільш складна частина алгоритму буде застосована до меншого об'єму даних [6]. Один з варіантів такого підходу – використання модифікації відомого алгоритму, яка реалізує підхід «coarse-to-fine» та придатна для розв'язання конкретного класу задач.

1.2.1 Приклади впливу роздільної здатності на результати оброблення зображень

Зазвичай вважається, що вихідне зображення для подальшого оброблення подано у аналоговій формі [23]. Як правило, розглядається зображення, що обмежено прямокутником (полем зору), який має придатні для обробки розміри. Зображення повинно повністю вміщуватися в цьому прямокутнику та заповнювати його, якщо це можливо.

Оброблення починається з дискретизації поля зору та квантування яскравості за рівнями, що відповідають кольорам у палітрі зображення (півтони, RGB, т.і.). Такі параметри системи комп'ютерного зору обираються із практичних міркувань: роздільна здатність – кількість дискретних елементів зображення (пікселів, зазвичай мають квадратну форму), що можна розмістити у одиниці довжини (дюймі, сантиметрі) та, відповідно, розмір зображення у пікселях; множина рівнів яскравості, що є областю визначення функції яскравості для представлення кожного з кольорів.

Вважається, що обрана роздільна здатність системи комп'ютерного зору якнайкраще підходить для класу зображень, які необхідно обробляти. Тобто непотрібні деталі не будуть відображені з надзвичайно великою роздільною здатністю (як-то спотворені завадами контури об'єктів) та суттєві деталі об'єктів не зникнуть через дуже низьку роздільну здатність. До функції квантування та

множини рівнів яскравості для подання кольорів зображення висуваються такі ж самі вимоги: можливість відобразити суттєві деталі об'єктів.

Таким чином, зображення може бути подане як двовимірний масив $V(M, N)$, що містить M рядків та N стовпчиків. Кожний елемент $v(m, n)$ цього масиву відповідає або яскравості пікселя з координатами (m, n) для півтонового зображення, або значенням яскравості базових кольорів (наприклад, червоного, зеленого, синього) для кольорового зображення. Цей масив може розглядатися як матриця або вектор у залежності від обраних математичних методів.

Розроблено та успішно застосовується велика кількість методів та алгоритмів для обробки зображень, що використовують векторне або матричне представлення зображення [24, 25]. Більшість цих методів може бути успішно застосована для обробки півтонових зображень, якщо для класу зображень, що розглядаються, були вдало обрані параметри дискретизації та квантування. Однак необхідно наголосити на обмеженнях такого підходу. Наприклад, для визначення міри схожості двох зображень, як $f(V_1, V_2)$ із використанням методів статистичного розпізнавання, використовуються значення яскравостей усіх пікселів, що належать до зображення [26]. Але ж пікселі зображення відносяться або до об'єкта, або до фону. Тобто результат розпізнавання залежить не тільки від значень яскравості пікселів об'єкта інтересу, а й від значень яскравості пікселів фону, що у багатьох випадках не прийнятно.

Розглянемо зображення, що містять довільний текст на однотонному фоні та на фоні деякої довільної решітки (рис. 1.9) [6]. Текст на рис. 1.9 а може бути розпізнаний як статистичними, так і структурними методами розпізнавання. Розпізнавання тексту на рис. 1.9 б є складнішою задачею. Якщо спробувати застосувати статистичні методи, результат обчислення схожості із еталонним зображенням буде спотворений через наявність пікселів зображення решітки із кольором об'єкта у полі фону. Також взаємне розташування тексту та решітки може змінюватися після застосування до зображення операцій дискретизації та квантування. При застосуванні до зображень, як на рис. 1.9 б, структурних методів замість контурів об'єктів будуть виділені контури клітин решітки. Схожу

картину можна спостерігати, коли накладена на текст решітка має колір фону (рис. 1.10). У даному випадку при застосуванні статистичних методів розпізнавання результат обчислення схожості буде також спотворено через наявність в полі зображення пікселів, що належать до об'єкта, але мають колір фону. Знову ж, не гарантується однакове взаємне розташування тексту і решітки після накладення на зображення решітки та застосування до зображення операцій дискретизації та квантування. При спробі застосувати структурні методи розпізнавання до зображень на рис. 1.10, будуть отримані такі ж самі результати, як і для рис. 1.9 б: будуть виділені контури клітин решітки.



Рисунок 1.9 [6] – Приклади зображень, що містять довільний текст:

а) однорідний фон; б) фон містить прямокутну решітку

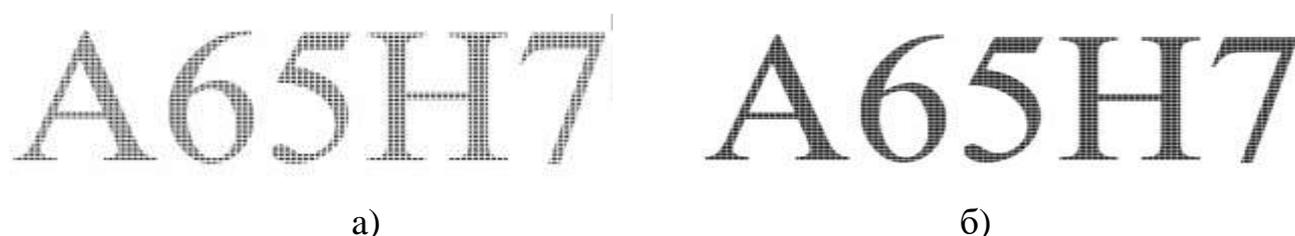


Рисунок 1.10 [6] – Решітка із кольором фону накладена випадковим образом на зображення тексту: лінії решітки на зображеннях (а) та (б) різної товщини

Задача розпізнавання тексту з накладеною на нього довільною решіткою може розглядатися як окремий випадок розпізнавання текстур. Але обчислювальна складність методів розпізнавання текстур зазвичай суттєво перевищує складність методів розпізнавання тексту. Тому їх застосування унеможлиблюється або взагалі виключається для розв'язання вказаних вище задач.

У зоровому сприйнятті людини всі чотири наведені задачі розпізнавання розв'язуються непомітно, без видимих зусиль, судячи з усього, на підсвідомому рівні, у той час як сучасні засоби обробки візуальної інформації впевнено справляються лише з розпізнаванням задач, подібних до рис. 1.9 а.

Як було показано вище, під час одного акту зорового сприйняття в зоровій системі людини зображення обробляється зі змінною роздільною здатністю. Можливо припустити, що саме спостереження послідовності зображень з різною роздільною здатністю на початку зорового акту робить можливим цілісне візуальне сприйняття символів на довільному фоні. Тоді можливо припустити, що якщо деяка програма розпізнавання текстів успішно впорається з розпізнаванням зображення на рис. 1.9 а зі зменшеною роздільною здатністю, то вона також успішно впорається з розпізнаванням зображень з такою ж самою, зменшеною, роздільною здатністю, що наведені на рис. 1.9 б, 1.10 а, 1.10 б. Для перевірки цього твердження можна провести простий експеримент з відомою програмою розпізнавання текстів FineReader.

Вихідний набір даних складається з чотирьох зображень (рис. 1.9 а, 1.9 б, 1.10 а, 1.10 б). Розмір кожного зображення складає 900x280 пікселів, при роздільній здатності 72x72 пікселі на дюйм. Довільна комбінація символів «А65Н7» була обрана спеціально, щоб виключити вплив на результат розпізнавання використання словників [6, 8].

Текст на рис. 1.9 а був успішно розпізнаний. Розпізнавання інших трьох зображень дало відмову від розпізнавання через неможливість визначити об'єкт на зображенні. Зображення на рис. 1.11 отримані шляхом зменшення у 6 разів роздільної здатності відповідних зображень з рис. 1.9, 1.10. На всіх цих зображеннях рядок тексту був успішно розпізнаний.

Проведений експеримент показує, що поняття оптимальної роздільної здатності може бути застосоване не лише до всього зображення, а й до кожного об'єкта на ньому. У цьому випадку достатньо було просто зменшити роздільну здатність зображень, щоб розв'язати задачу, яку інакше неможливо було вирішити традиційними методами. Тобто, при розглянутій зменшеній роздільній

здатності зображень інформації про форму об'єктів у полі зору достатньо для прийняття рішення. У той самий час завади з великою просторовою частотою (решітки) майже не помітні і не впливають на прийняття рішення.



Рисунок 1.11 [6] – Зображення з рис. 1.9 (а, б) та рис. 1.10 (в, г) при зменшеній у 6 разів роздільній здатності під час дискретизації

Природним чином розгляд зображень при різній роздільній здатності застосовується під час фотозйомки біологічних об'єктів із використанням звичайного світлового мікроскопа. Тут дослідники стикаються з обмеженням глибини різкості, яке не дозволяє отримати чітке зображення на одному знімку. Якщо зразок товщий за максимальну глибину різкості, ділянки поверхні об'єкта за межами фокальної площини будуть розфокусовані. Для подолання цих обмежень зйомка зразка повторюється багато разів водночас зі зміною глибини різкості вздовж оптичної осі. Це дає послідовність зображень, де різні частини зразка з'являються та виходять із фокуса – різні частини зображення з'являються у полі спостереження з різним ступенем розмиття. Для отриманої послідовності зображень за допомогою вейвлет-перетворення виконується процедура відновлення, щоб отримати єдине різке зображення [27]. Таким чином, використання послідовності зображень з різним ступенем розмиття окремих областей (розгляд областей зображення при різній роздільній здатності) є ще

одним прикладом задачі, що інакше не може бути розв'язана за допомогою існуючих методів.

1.2.2 Неявне використання різних роздільних здатностей у системах оброблення зображень

У описаному вище експерименті зменшення роздільною здатності під час дискретизації зображення призводить до розмиття кінцевого зображення. Як правило, зображення, що призначені для оброблення, спотворені завадами. У найпростішому випадку ці зображення обробляються за допомогою фільтра Гауса з метою усунення небажаних деталей та алгоритм обробки застосовується до розмитих зображень. Саме така попередня обробка є, наприклад, складовою частиною широкоживаного [4, 28, 29] методу Канні для визначення меж об'єктів на зображенні [30]. Для вихідного зображення $V = \{v(m,n) | m = \overline{1, M}; n = \overline{1, N}\}$ виконують операцію розмиття зображення, використовуючи фільтр Гауса для зниження рівня завад, виключення небажаних деталей і елементів текстури зображення:

$$g(m,n) = G(\sigma) * v(m,n),$$

де $G(\sigma)$ – фільтр Гауса для значення середньоквадратичного відхилення σ , $g(m,n)$ – елемент «розмитого» зображення V_g .

Обчислюють часткові значення градієнтів для горизонтального – $g_m(m,n)$ і вертикального – $g_n(m,n)$ напрямків на розмитому зображенні $g(m,n)$, використовуючи, наприклад, оператор Собеля, щоб отримати значення загального градієнта $M(m,n)$ і його напрямку $\theta(m,n)$ як

$$M(m, n) = \sqrt{g_m^2(m, n) + g_n^2(m, n)},$$

$$\theta(m, n) = \operatorname{arctg} \left(\frac{g_n(m, n)}{g_m(m, n)} \right).$$

За значеннями $M(m, n)$, з використанням порога T , який повинен бути підібраний так, щоб усі контурні елементи були виділені, у той час як більшість завад було б усунуто, отримують значення $M_T(m, n)$:

$$M_T(m, n) = \begin{cases} M(m, n), & \text{якщо } M(m, n) > T \\ 0, & \text{у іншому випадку} \end{cases}.$$

Для підвищення якості роботи методу використовують два пороги T_1 і T_2 , причому $T_1 < T_2$. Якщо піксель $v(m, n)$ зі значенням $T_1 < M_T(m, n) < T_2$ має в напрямку градієнта $\theta(m, n)$ два сусідні пікселі, для кожного з яких $M_T(m, n) > T_2$, його значення як контурного елемента зберігається, а якщо ні, то прирівнюється до 0.

Усі ненульові елементи об'єднують, щоб вийшов замкнений контур об'єкта, для чого використовується спеціальний алгоритм.

У методі Канні змінна роздільна здатність використовується у неявному вигляді, оскільки оператор підбирає ступінь розмиття σ , але це робиться, виходячи з його суб'єктивних міркувань стосовно характеру завад.

Недоліки методу Канні:

- результатом його роботи є межі об'єктів у вигляді послідовностей пікселів, але піксель є двовимірним утворенням, у той час як межа об'єкта уявляється як лінія, зокрема, ламана лінія без товщини;
- оскільки модель зображення при застосуванні методу Канні не використовується, то метод не може автоматично розрізнити контури об'єктів та контури, що належать до текстури фону;

– результат обробки зображення за методом Канні залежить від змінного параметра фільтра Гауса – σ , який має значення середньоквадратичного відхилення нормального закону розподілу ймовірності (рис. 1.12). У першоджерелі не надано жодних рекомендацій стосовно вибору значення цього параметра.

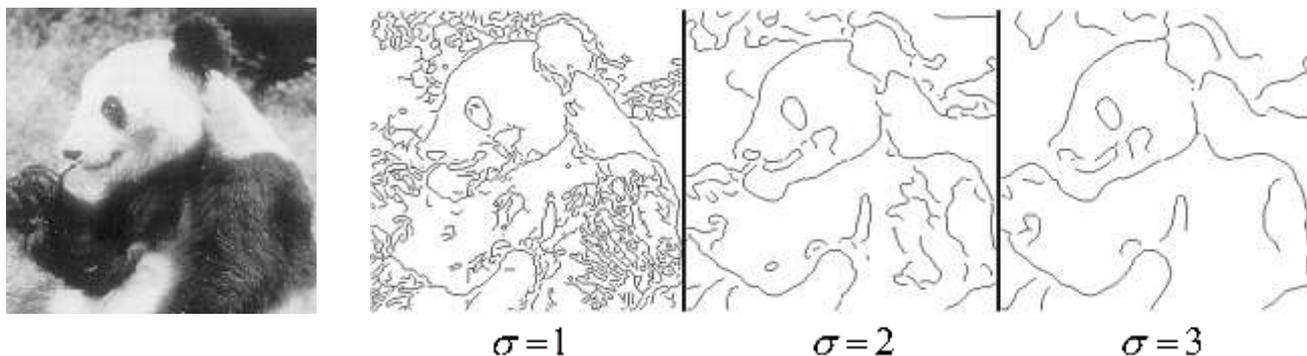


Рисунок 1.12 – Застосування методу Канні для виділення контурів на зображенні при різних значеннях параметра σ

З метою усунення завад у вихідному сигналі можуть бути застосовані й інші фільтри, але результат буде також залежати від розміру апертури фільтра, який, у свою чергу, є невідомим параметром.

1.2.3 Використання змінної роздільної здатності для зменшення обчислювальної складності алгоритмів

Зменшення роздільної здатності широко використовується для зменшення обчислювальної складності та підвищення швидкодії існуючих алгоритмів обробки і розпізнавання зображень [6, 7, 16].

Наприклад, у [31] модель еталонів, яка складається з окремих частин, поєднаних не жорсткими зв'язками, розглядається з різною роздільною здатністю. Визначено алгоритм переходу від низької роздільної здатності до високої. Запропонований метод обробки заснований на спостереженні, що пошук

відповідностей між областями зображення та кожною частиною еталона є найбільш обчислювально-витратною операцією у порівнянні з виявленням суттєвих частин та розрахунком їх оптимальної конфігурації. Мінімізація кількості операцій порівняння частин еталонів із зображенням тягне за собою прискорення операції виявлення. Починаючи з найменшої роздільної здатності, еталони порівнюються із зображенням. Відбираються лише найбільш ймовірні їх розташування. Потім знайдені локально оптимальні розташування рекурсивно розповсюджуються на частини моделі з більшою роздільною здатністю. За допомогою рекурсивного видалення невідповідних розташувань з простору пошуку множина можливих розташувань зменшується так, що при максимальній роздільній здатності потрібно виконати лише декілька порівнянь еталонів з зображенням. Запропонований метод дозволяє отримати десятикратне прискорення обчислень у порівнянні зі стандартним методом динамічного програмування.

Алгоритм, що розглядається у [32], використовує подібну ідею виключення великих областей із простору гіпотез на ранніх стадіях розпізнавання, однак для кожної роздільної здатності використовується послідовність детекторів об'єктів. Результатом роботи детектора є кількісна оцінка розглянутої області зображення. Рішення щодо застосування наступних детекторів з послідовності до цієї області приймається на підставі порівняння отриманої кількісної оцінки з певним порогом. Область буде розглянуто при наступній роздільній здатності, якщо її кількісні оцінки від кожного детектора перевищили відповідні порогові значення. Всі пороги встановлюються автоматично, на підставі ймовірнісних оцінок.

У [33] розглядається застосування стратегії *coarse-to-fine* до задачі кластеризації траєкторій руху транспортних засобів. Вихідні траєкторії об'єднуються у «грубі» кластери. До кожного «грубого» кластеру входять траєкторії з приблизно однаковим напрямом, але з різними характеристиками розташування. Для подальшої точної кластеризації використовується перерахування множини точок траєкторії з застосуванням евклідової відстані як міри близькості.

При розпізнаванні облич процедура «coarse-to-fine» може бути реалізована шляхом застосування різних методів розпізнавання для скорочення кількості кандидатів на кожному кроці. В [34] процес прийняття рішення має декілька стадій: 1) оцінка приналежності одному з усіх можливих класів (one-against-all of SVM); 2) визначення приналежності кожного кандидата одному з пари класів (one-against-one of SVM); 3) алгоритм Eigenface; 4) метод RANSAC. Стадії 1) та 2) використовують характеристики усього зображення обличчя, отримані з дискретного косинусного перетворення. На стадії 3) розглядаються проєкції зображень облич у простір характеристик. Простір облич визначається власними векторами множини облич та на підставі інформації про інтенсивність зображення обличчя. Метод RANSAC застосовується на останній стадії, де просторова інформація, отримана за допомогою методів епіполлярної геометрії із зображення, що перевіряється, порівнюється з двома еталонними зображеннями і обирається зображення з найбільшим значенням подібності та з найкоротшою відстанню до відповідних характерних точок.

Задача встановлення відповідності між пікселями двох зображень облич людини (знаходження розмітки) [35] ефективно розв'язується за допомогою побудови «каскадів» розміток. В одному «каскаді» розміри всіх зображень зменшуються вдвічі та будується нова розмітка. Після цього визначається початкове наближення для вихідної розмітки на підставі нової розмітки й виконується пошук поля руху відносно цього початкового наближення, але з меншою кількістю міток. При використанні одного «каскаду» алгоритм розв'язання задачі виконується у вісім разів швидше, зберігаючи при цьому точність знаходження поля руху для двох зображень. Хоч автор і описує цей метод як певний інженерний прийом, але слід зауважити, що фактично тут використовується обробка зображення зі змінною роздільною здатністю, оскільки в межах одного «каскаду» зображення обличчя розглядається зі зменшеною вдвічі роздільною здатністю, а отримана для зображень зі зменшеною роздільною здатністю розмітка використовується як початкове наближення при пошуку розмітки для зображень зі збільшеною роздільною здатністю.

Динамічне програмування дуже часто використовується у задачах розпізнавання мови, розпізнавання символів, пошуку відповідності за шаблоном для об'єктів, що можуть деформуватися, відстеження дороги. Однак постановки таких задач дуже часто призводять до простору станів величезних розмірів, через що розрахунки можуть стати нездійсненними, навіть із використанням динамічного програмування. Для подолання такого роду перешкод у [36] пропонується використовувати динамічне програмування coarse-to-fine (CFDP). Основна ідея цього підходу – сформувати послідовність грубих наближень вихідного графа динамічного програмування шляхом об'єднання станів графа у «надстани». Для кожної грубої апроксимації оптимальний шлях розраховується з «оптимістичними» вагами дужок між надстанами. Надстани вздовж цього оптимального шляху переглядаються, і процес повторюється знову, доки не буде знайдено доказово оптимальний глобальний шлях. У багатьох випадках глобальний оптимум досягається зі значно меншими витратами на розрахунки, ніж при прямому використанні динамічного програмування. Запропонований алгоритм особливо добре підходить для задач з великим простором станів. Відповідно до [37], швидкість алгоритму CFDP залежить від структури об'єднання і від природи задачі. У найліпшому випадку CFDP дозволяє отримати значне скорочення обчислень у порівнянні зі звичайним методом динамічного програмування; у найгіршому випадку він фактично буде працювати повільніше.

Метою застосування методів зі змінною роздільною здатністю у розглянутих вище випадках є визначення частин вихідного зображення або частин вихідного набору даних, що містять інформацію, яка здається корисною для розв'язання поставленої задачі. Складні розрахунки виконуються лише над цими частинами. При цьому природі механізму зміни роздільної здатності, що використовується у кожному конкретному випадку, не надається значення.

Зауважимо, що велика кількість задач розпізнавання зображень, які мають складність NP чи взагалі не можуть бути розв'язані за допомогою традиційних методів, розв'язуються у зоровій системі людини ментально, а задачі, що пов'язані з обробкою відеоряду, у режимі реального часу. Тому природним буде

звернення до результатів вивчення процесів у зоровій системі людини, що отримані у нейрофізіології, для подальшого розвитку методів та алгоритмів обробки візуальної інформації.

У попередні роки дослідники вже намагалися просунути у цьому напрямі, використовуючи актуальні на той час результати з нейрофізіології зору.

Наприклад, чутливі до напрямку руху стимулу клітини зорової системи приматів показують наявність певного діапазону просторових розмірів, зокрема, якщо розміри рецептивних полів порівнюються між різними ділянками кори, такими як первинна зорова кора та середня частина скроневої частки [38]. З урахуванням цього, у [39] досліджено, як інтегрування інформації про рух об'єкта по всіх просторових масштабах може допомогти покращити оцінку оптичного потоку. Було запропоновано адаптивний, багатомасштабний метод, де масштаб дискретизації обирається локально, відповідно до оцінки відносної помилки визначення швидкості щодо властивостей зображення. Було показано, що запропонований метод дає суттєво кращі оцінки оптичного потоку, ніж традиційні алгоритми, при незначному збільшенні витрат на розрахунки. На думку авторів це є важливим, з огляду на велику кількість ітерацій, необхідних для релаксаційних алгоритмів та дивовижної швидкості, з якою людина може надійно оцінити швидкість руху. На засадах цього підходу у [40] представлено дворівневу багатомасштабну адаптивну нейромережеву модель обрахування параметрів руху в середній частині скроневої частки приматів. На першому етапі локальні швидкості вимірюються при багатьох просторових роздільних здатностях, після чого поле оптичного потоку обраховується мережею чутливих до напрямку нейронів при багатьох просторових роздільних здатностях. При виникненні конфліктів між сигналами від клітин при різних роздільних здатностях застосовується схема ветування coarse-to-fine, згідно з якою перевагу мають сигнали від клітин на «грубіших» роздільних здатностях. Подальші експерименти з моделювання властивостей неklasичного рецептивного поля виявилися цілком узгодженими із результатами, що були отримані у нейрофізіології. Також було запропоновано нове пояснення феномена захоплення

руху з застосуванням стратегії розв'язання конфліктів coarse-to-fine при розгляді інформації з різних вхідних каналів.

1.3 Висновки до розділу 1

1. На підставі аналізу сучасного стану досліджень в області створення систем комп'ютерного зору встановлено, що обробка візуальної інформації з використанням різних роздільних здатностей використовується спонтанно, як певний інженерний прийом. У той самий час нейрофізіологічні дослідження свідчать про наявність механізмів обробки візуальної інформації зі змінною роздільною здатністю в зоровій системі людини.

2. На розглянутих прикладах показано, що велика кількість задач розпізнавання зображень, які мають складність NP чи взагалі не можуть бути розв'язані за допомогою традиційних методів, розв'язуються у зоровій системі людини ментально, а задачі, що пов'язані з обробкою відеоряду – у режимі реального часу. При цьому вибір відповідної роздільної здатності суттєво впливає на результат розпізнавання зображень.

Тому існує необхідність розробки методів та алгоритмів, що поєднують отримані у нейрофізіології результати вивчення процесів, які пов'язані зі зміною роздільної здатності у зоровій системі людини, з існуючими методами і алгоритмами обробки зображень. Таке поєднання повинно 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.

Основні результати розділу опубліковані автором у роботах [6 – 8, 16].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОБРОБЛЕННЯ ПІВТОНОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ЗМІННІЙ РОЗДІЛЬНІЙ ЗДАТНОСТІ

2.1 Побудова структурної моделі півтонового зображення

Структурна модель дає можливість одноманітного за формою представлення довільних зображень, інваріантного щодо афінних перетворень – положення у полі зору, масштабу, повороту. В окремих випадках [3] опис зображень відповідно до певної структурної моделі дозволяє істотно підвищити швидкість та якість оброблення візуальної інформації.

2.1.1 Математична модель півтонового зображення

Під зображенням будемо розуміти частину площини, що обмежена певною геометричною фігурою, звичайно прямокутником, кожна точка якої характеризується певним значенням яскравості.

Інакше кажучи, на частині площини, що обмежена прямокутником з розмірами X, Y визначена функція яскравості $\rho = f(x, y)$, ($0 \leq x \leq X; 0 \leq y \leq Y$). Цій функції можна поставити у відповідність певну поверхню $z = f(x, y)$ у просторі $Oxyz$.

Заздалегідь приведемо необхідні відомості з області аналітичної геометрії в просторі [41, с. 81 – 82].

Множина точок $P(x, y, z)$, координати яких задовольняють системі рівнянь

$$x = x(u, v); y = y(u, v); z = z(u, v), \quad (2.1)$$

при відповідних значеннях дійсних параметрів u, v – безперервна поверхня, якщо праві частини рівнянь є безперервними функціями параметрів. Поверхня може бути також визначена рівнянням:

$$\varphi(x, y, z) = 0 \text{ або } z = f(x, y).$$

Простою поверхнею називається безперервна поверхня, що складається з однієї порожнини і не має самоперетинів (кратних точок). При цьому йдеться про те, що прості поверхні є двосторонніми (односторонні поверхні, такі як лист Мебіуса, виключаються).

Точка поверхні (2.1) називається регулярною точкою, якщо при певному параметричному завданні поверхні функції (2.1) мають в достатній близькості до даної точки безперервні окремі похідні першого порядку і щонайменше один з визначників

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial v} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \\ \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial z}{\partial v} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial u} \\ \frac{\partial z}{\partial v} & \frac{\partial x}{\partial v} \end{vmatrix},$$

відмінний від нуля. Точки, що не є регулярними, називаються особливими. Простий кусок поверхні, обмежений замкнутою кривою, називається регулярним, якщо всі його внутрішні точки регулярні. Регулярною поверхнею називається двостороння проста (замкнута або незамкнута) поверхня, яка складена з кінцевого числа регулярних кусків із спільними регулярними дугами і точками.

Таким чином, кожному півтоновому зображенню можна поставити у відповідність незамкнуту кусково-гладку поверхню в просторі $Ox_1y_1z_1$, яка складається з простих регулярних кусків поверхні (рис. 2.1).

Для поверхні, яка відповідає півтоновому зображенню, справедливе таке обмеження: кожному значенню пари координат (x, y) відповідає одне і лише одне

значення функції $\rho(x, y)$. Тобто перпендикуляр до площини зображення в будь-якій точці (x, y) перетинає уявну поверхню лише один раз.

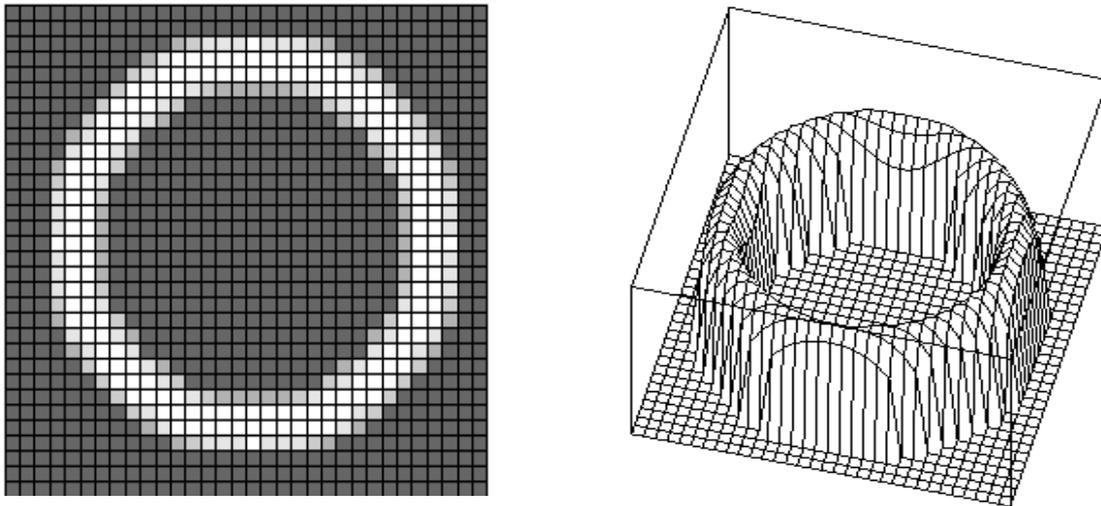


Рисунок 2.1 – Півтонове зображення як кусково-гладка поверхня

Контур кожного регулярного куска кусково-гладкої поверхні є замкнутою послідовністю регулярних дуг кривих і відрізків прямих ліній у проекції на площину xOy . Точки контуру не є регулярними точками кусків простих поверхонь. Точки контуру – це граничні точки кусків простих поверхонь. Отже точки контуру є не регулярними точками поверхні зображення, що належать до особливих (граничних) ліній поверхні, тобто такими, що розділяють різні куски простих поверхонь. У півтоновому зображенні завжди можна виділити області, для яких значення яскравості постійне або змінюється за певним законом. Закон зміни яскравості визначається $grad \rho$ – градієнтом яскравості. Зазвичай в межах однієї області $\rho = const$, або $\partial\rho/\partial x + \partial\rho/\partial y = const$, або $\partial^2\rho/\partial x^2 + \partial^2\rho/\partial y^2 = const$. Водночас можливі й інші закони зміни яскравості.

В проекції на площину xOy замкнуті особливі лінії задають область визначення для функції яскравості $\rho(x, y)$, яка описує відповідний кусок поверхні. Таким чином, знаходження особливих ліній на півтоновому зображенні в рамках математичної моделі півтонового зображення є задачею відшукування областей визначення функції яскравості $\rho(x, y)$ для кожного регулярного куска кусково-гладкої поверхні. Оскільки математична модель півтонового

зображення – кусково-гладка поверхня, то особливими лініями повинні також вважатися лінії границь зображення.

Математична модель півтонового зображення (рис. 2.2) – концептуальна [42], адже вона встановлює основні вимоги до структурного опису півтонового зображення як сукупності регулярних кусків кусково-гладкої поверхні.

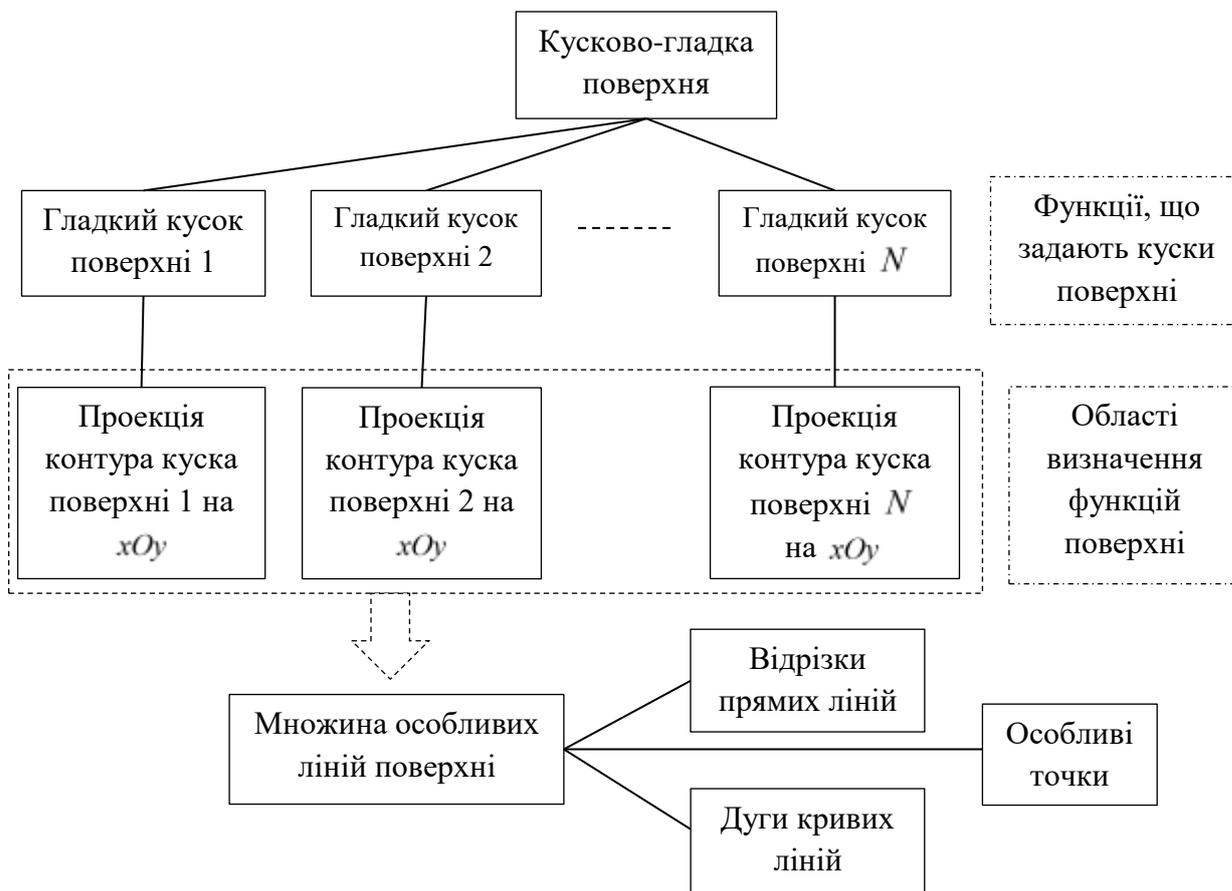


Рисунок 2.2 – Математична модель півтонового зображення як кусково-гладкої поверхні

2.1.2 Модель півтонового зображення з урахуванням нейрофізіологічних уявлень про зорове сприйняття

Для оптимального сприйняття людиною-оператором довільної візуальної інформації вона повинна бути відтворена з урахуванням фізіологічних особливостей зорового сприйняття. Зокрема, однією з найважливіших і

природних особливостей зорового сприйняття людини є її здатність визначати об'єкти в полі зору та класифікувати їх на об'єкти інтересу та фон. Об'єкти інтересу можуть відрізнитися від фону яскравістю, кольором та ін. Основною характеристикою будь-якого об'єкта є його форма, яка 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 всередині кожного з об'єктів.

Побудова структурного опису півтонового зображення (аналіз півтонового зображення) відбувається в рамках моделі, що визначає його структурні елементи (рис. 2.3). Відповідно до відомих уявлень про механізми зорового сприйняття такими структурними елементами, зокрема, є об'єкти в полі зображення, що визначаються просторовою функцією яскравості, які, в свою чергу, поділяються на об'єкти фону та об'єкти інтересу. Для об'єктів інтересу також розглядаються контури, що їх обмежують. Контури є замкнутими послідовностями, що утворені відрізками прямих та дугами кривих ліній [43].

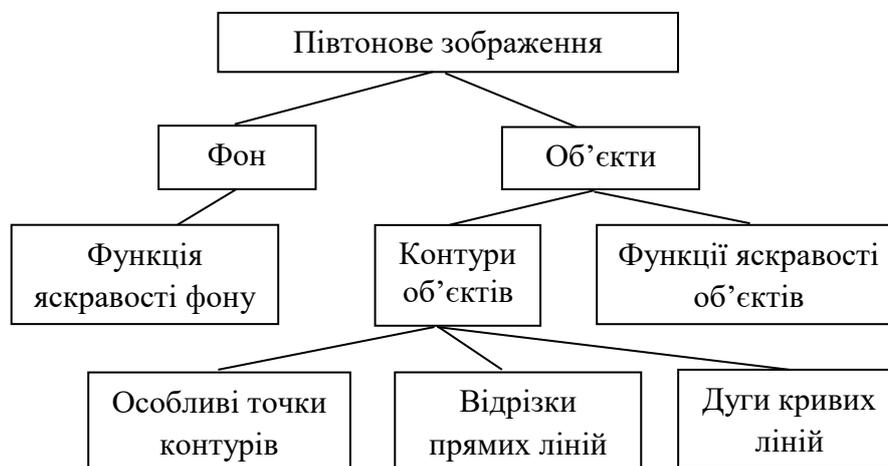


Рисунок 2.3 – Модель півтонового зображення з урахуванням нейрофізіологічних уявлень про зорове сприйняття

Зазначимо також, що такий структурний аналіз форми візуальних об'єктів, добре узгоджується із відомим стандартом MPEG-7 – «Інтерфейс опису мультимедійного вмісту» [44] і може бути до нього адаптований.

2.1.3 Структурна модель півтонового зображення

Для побудови структурної моделі півтонового зображення, яка б дозволила отримувати структурний опис півтонового зображення у автоматизованому або автоматичному режимі (рис. 2.4), математична модель півтонового зображення повинна бути доповнена певними визначеннями. В рамках структурної моделі півтонове зображення розглядається як відображення невідомої функції двох змінних у табличному вигляді, яка задає кусково-гладку поверхню. Об'єкти в полі зору це регулярні куски кусково-гладкої поверхні. Проекції контурів кусків поверхні співпадають з межами областей визначення невідомих функцій, що задають куски поверхні, та є контурами об'єктів у полі зору. Об'єктами, що утворюють фон, будемо називати об'єкти в полі зору, контури яких частково або повністю співпадають з границями зображення. До можливих об'єктів інтересу можуть бути віднесені об'єкти в полі зору, які не мають спільних границь з границями зображення.

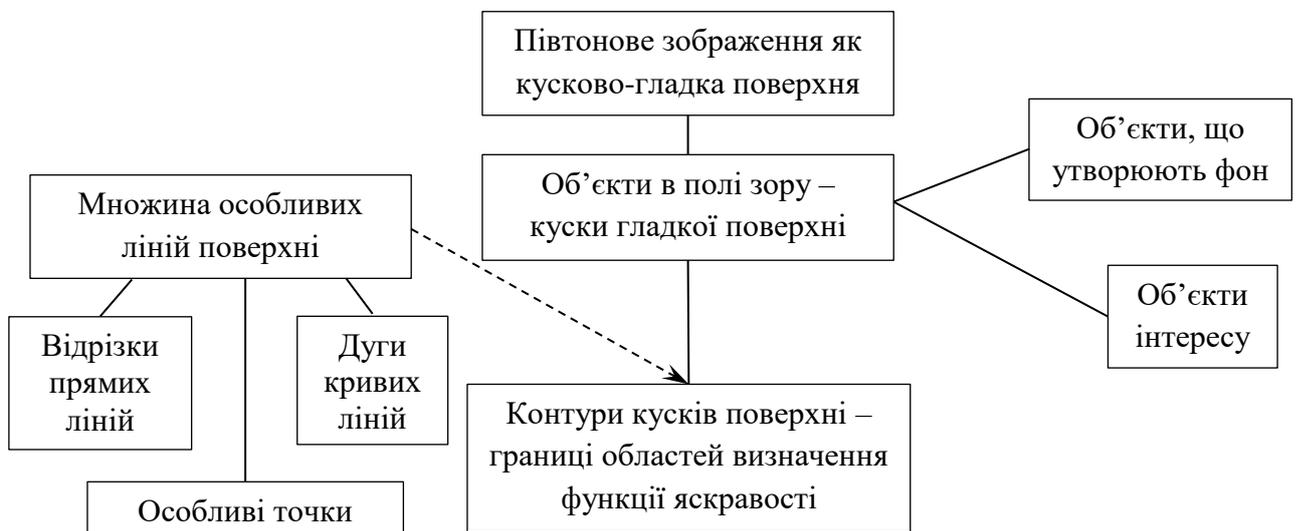


Рисунок 2.4 – Структурна модель півтонового зображення

Структурний аналіз півтонового зображення дозволяє визначити параметри регулярних поверхонь в полі зображення, тобто визначити контури простих кусків регулярних поверхонь, що відповідають об'єктам на зображенні,

структурні елементи контурів (відрізки прямих та дуги кривих ліній), закони зміни яскравості для кожного простого куска регулярної поверхні.

Необхідність виділити в окремий клас об'єкти, що утворюють фон, зумовлена особливостями статистичних методів оброблення зображення. Об'єкти в полі зору можуть бути виділені і після розпізнавання зображення статистичними методами, але під час розпізнавання будуть розглянуті всі пікселі зображення. Якщо не враховувати вплив фону, що може змінюватися випадково, результат оброблення зображення може бути незадовільним. Таким чином, операцію визначення об'єктів інтересу серед об'єктів у полі зору корисно застосовувати у процесі оброблення зображень.

Представлення півтонових зображень у вигляді такої чи подібної моделі є інваріантним відносно афінних перетворень об'єктів, завдяки чому стає можливим автоматизоване, а в окремих випадках і автоматичне оброблення півтонових зображень у інформаційних системах.

2.2 Цифрова рядкова модель півтонового зображення як двовимірного клітинного комплексу

Перехід від поверхні у тривимірному просторі дійсних чисел, що відповідає функції яскравості зображення $\rho(x, y)$; $x = \overline{0, X}$; $y = \overline{0, Y}$, до цифрової поверхні не тривіальний. Ототожнення точки поверхні у тривимірному просторі дійсних чисел з пікселем дискретного зображення некоректне, зважаючи на те, що точка – це математичний об'єкт, який має нескінченно малі розміри, водночас як піксель зображення має цілком визначені розміри. Проте наведені у п. 1.2.2 приклади свідчать про розповсюдженість такого ототожнення: тобто, значення градієнта присвоєно пікселю зображення, хоча піксель є двовимірним об'єктом з розмірами, що не можуть вважатися нескінченно малими, а градієнт – це властивість точки скалярної неперервної функції. Оскільки межа об'єкта у такому вигляді

визначається пікселем, то вона має ненульову ширину. Простий приклад показує небажані наслідки такого припущення. На рис. 2.5 а представлені два об'єкти у вигляді прямокутників. Контури об'єктів утворені пікселями, що межують з об'єктами ззовні. У цьому разі об'єкти зіллються в один, якщо відстань між ними не буде перевищувати двох пікселів. На рис. 2.5 б зверху представлені два об'єкти у вигляді трикутників. Нижче – вид тих самих об'єктів, коли їх контури утворені пікселями, що знаходяться на межі об'єктів, але усередині. Зважаючи на те, що контур – це замкнута однозв'язна послідовність, у кожного контурного пікселя повинно бути тільки двоє сусідів. Але кутові пікселі мають тільки одного сусіда, тому не можуть вважатися такими, що належать контуру. У результаті контури об'єктів суттєво змінюють форму об'єктів. Для уникнення таких ускладнень зображення повинно бути представлене у вигляді двовимірного клітинного комплексу [45].



Рисунок 2.5 – Спотворення об'єктів через представлення контурів послідовністю пікселів

Взагалі D -вимірний клітинний комплекс це структура, що складається з абстрактних елементів, які називаються клітинами. Кожній клітині привласнена цілочисельна величина від 0 до D , яку називають виміром. Визначені граничні відносини клітин: клітина більш низького виміру може обмежувати клітини більш високого виміру. У цьому випадку двовимірні елементи – це пікселі. Крім пікселів є креки (crack) і точки. Креки – сторони пікселів, що є одновимірними

елементами. Точки є кінцевими точками крєкїв і кутовими точками піксєлів. Точки є нульвимірними елементами. На рис. 2.6 наведено приклад бїнарного об'єкта.

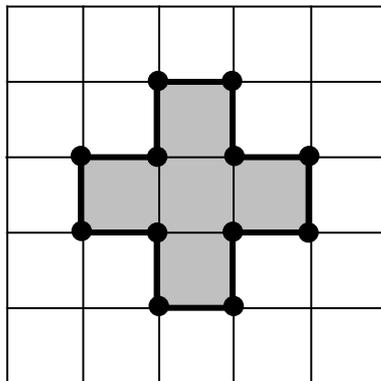


Рисунок 2.6 [46] – Зображення як двовимірний клітинний комплекс

Контур об'єкта в такому випадку – це зв'язна замкнута послїдовність контурних крєкїв, граничних між піксєлями об'єкта і фону. У цифровому вигляді контур може бути описаний як послїдовність цілочисельних координат точок, що обмежують контурні крєки. Як показано у [45], представлення площини як клітинного комплексу дає багато переваг, зокрема, межа області стає тонкою кривою з нульовою товщиною.

З поверхнею в просторї $Ox\rho$, якї відповідає пївтонове зображення, сумїщена гратка $N \times M$ у площинї xOy (рис. 2.7) і для кожного піксєля зображення в межах його площї визначено середнє значення яскравостї $\rho(n,m)$, що приймає цілочисельні значення $\rho(n,m) = \overline{0,R}$; $n = \overline{0,N}$; $m = \overline{0,M}$. Сторона гратки з N клітками розташована вздовж осї Ox , сторона гратки з M клітками розташована вздовж осї Oy . Отже будемо розглядати вертикальні та горизонтальні рядки піксєлів, а точнїше, послїдовностї значень яскравостей вздовж цих рядків. Рядки мають скїнченну ширину в один піксель. Послїдовність $\rho(n,m)$; $n = \overline{0,N}$ при кожному фіксованому m утворює горизонтальний рядок та відповідає функції $\rho_m(x)$. Послїдовність $\rho(n,m)$; $m = \overline{0,M}$ при кожному фіксованому n утворює вертикальний рядок та відповідає функції $\rho_n(y)$. Згїдно з

визначенням зображення як двовимірного клітинного комплексу, виділення особливих точок регулярних поверхонь повинно бути змінено на пошук особливих крєків – вертикальних для горизонтальних рядків, та горизонтальних для вертикальних рядків. Особливим крєком будемо називати крєк між двома сусідніми пікселями рядка, в околі яких порушується неперервність функції яскравості або її градієнта. Визначення таких крєків може бути виконано у процесі структурного аналізу дискретних реалізацій функцій яскравості $\rho_n(m)$ і $\rho_m(n)$ дискретизованого півтонового зображення, що дає можливість представити їх послідовностями відрізків цифрових прямих і дуг цифрових кривих ліній в площинах $\rho O n$ при всіляких значеннях $m = \overline{0, M}$ і $\rho O m$ при всіляких значеннях $n = \overline{0, N}$ відповідно. Граничні точки відрізків цифрових прямих і дуг цифрових кривих ліній відповідають особливим крєкам рядків, тоді як інші точки є регулярними крєками.

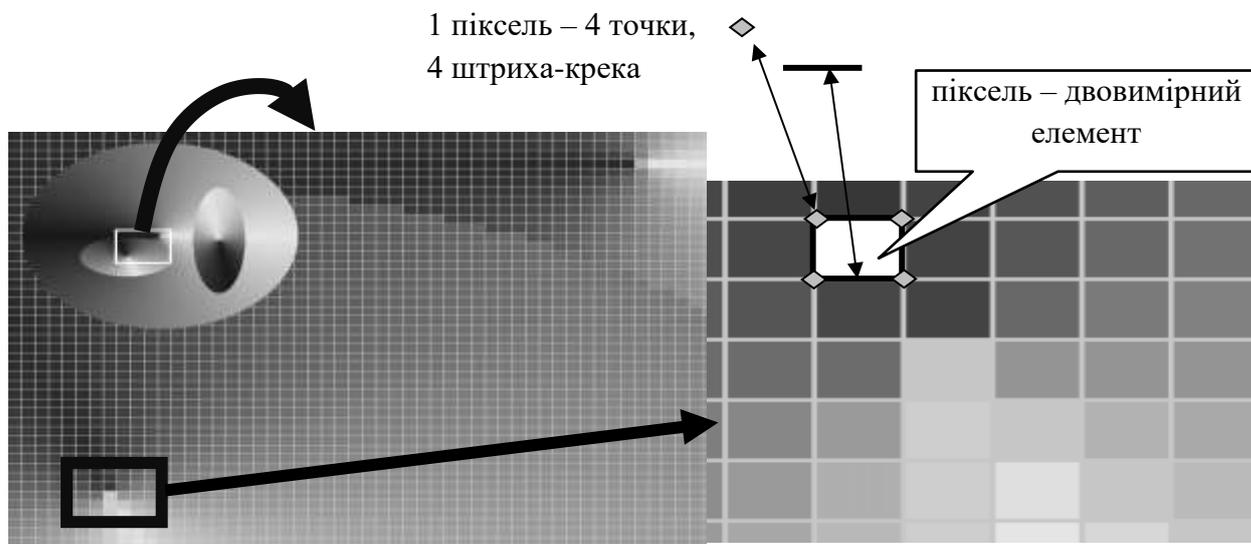


Рисунок 2.7 – Півтонове зображення як двовимірний клітинний комплекс

Послідовності особливих крєків у півтоновому зображенні (якщо вони не є результатом завад) повинні утворювати цифрові контури (рис. 2.8).

Отже крєки – одновимірні елементи зображення, представленого як двовимірний клітинний комплекс. Кожен крєк визначається двома точками: горизонтальний – $n, n+1$, вертикальний – $m, m+1$. Замкнутий цифровий контур

утворюється однозв'язною замкнутою послідовністю крєків. Кожна визначальна точка кожного крєка повинна співпадати лише з однією визначальною точкою іншого крєка.

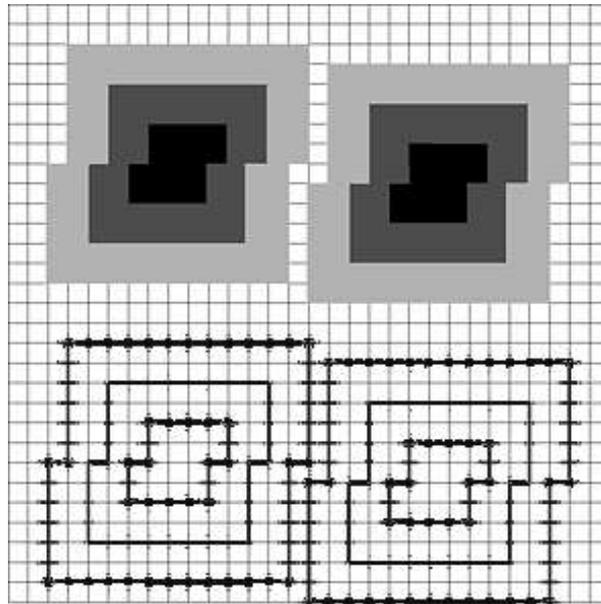


Рисунок 2.8 – Утворення контурів півтонового зображення

Структурний аналіз півтонового зображення, зокрема, повинен складатися з таких операцій:

- 1) виділення особливих крєків;
- 2) побудову особливих ліній зображення (цифрових контурів) по особливих крєках;
- 3) виділення структурних елементів цифрових контурів – відрізків цифрових прямих та дуг цифрових кривих ліній;
- 4) апроксимація параметрів неперервних функцій яскравості у межах кожного замкнутого контуру.

Тобто виконання структурного аналізу півтонового зображення набуває сенсу оцінки параметрів регулярних поверхонь та контурів півтонового зображення в полі цифрованого зображення.

При розгляді значень яскравості вздовж рядків зображення ми не використовуємо ширину рядка, яка дорівнює 1. Перейдемо до розгляду реалізації невідомої функції, послідовність значень якої відповідає послідовності значень

яскравості пікселів вздовж рядка. Таким чином, задача пошуку особливих кривих у рядку стає еквівалентною до задачі відшукування точок розриву неперервності невідомої кусково-гладкої функції за її реалізацією у вигляді певної експериментальної кривої у дискретному двовимірному просторі.

2.2.1 Контури зображення в зоровій системі

У нейрофізіологічних дослідженнях зорових систем ссавців виявлені групи нейронів [19], що реалізують представлення зображень у вигляді, що відповідає клітинним комплексам.

Ці нейрофізіологічні дослідження були проведені абсолютно незалежно від математичних робіт в області опису цифрованих зображень методами цифрової топології.

У приведеній нижче цитаті описано функціонування нейронів, що можуть бути порівняні з одновимірними клітинами:

«Більшість коркових клітин (нейронів) погано відповідають на дифузне освітлення і добре – на лінії з відповідною орієнтацією. Так, при пред'явленні фігури, що нагадує за формою нирку (рис. 2.9), такого роду клітина відповідатиме лише тоді, коли ділянка межі з певною орієнтацією перетинатиме її рецептивне поле. Ті ж клітини, рецептивні поля яких розташовані всередині меж фігури, ніяк не відреагують – вони продовжуватимуть давати спонтанний імпульсний розряд незалежно від присутності або відсутності цієї фігури.

Так поведуться клітини з орієнтаційною вибірковістю. Проте для збудження простої клітини недостатньо того, щоб ділянка контуру відповідала оптимальній орієнтації – контур повинен ще майже точно потрапляти на межу гальмівної і збуджуючої зон рецептивного поля, адже для відповіді треба, щоб світло падало на збуджуючу зону, але не розповсюджувалося на гальмівну. Якщо хоч трохи зрушити ділянку контуру, не міняючи його орієнтації, стимуляція цієї клітини

виявиться недостатньою, і тепер уже почне збуджуватися інша популяція простих клітин» [19, с. 93 – 94].

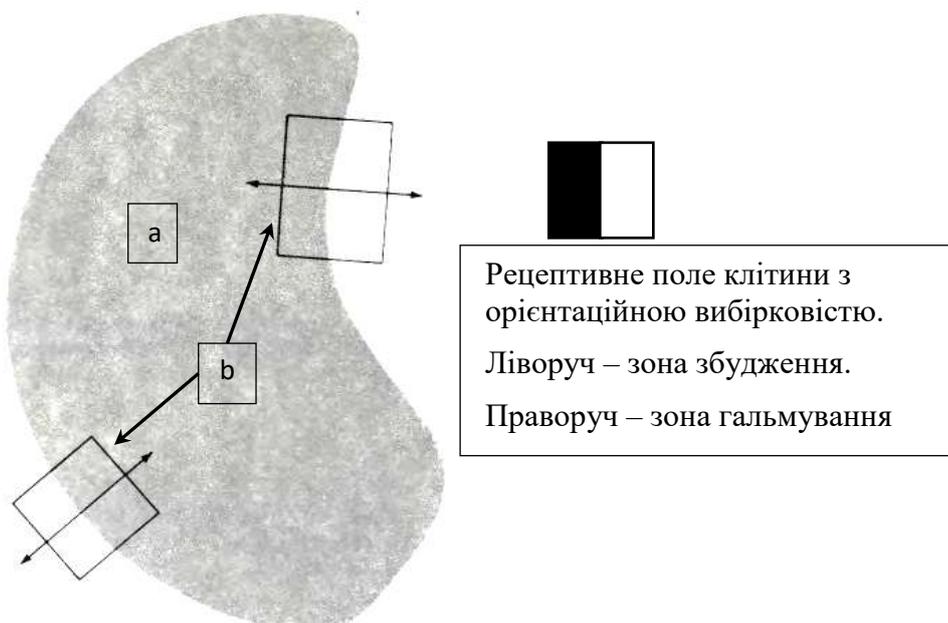


Рисунок 2.9 [19] – Формування контуру об'єкта – ниркоподібної фігури в полі зору: а) об'єкт; б) просторово орієнтовані рецептивні поля нейронів

Відомо, що кожній точці поля зору відповідає набір нейронів (клітин) з різною орієнтаційною вибірковою. Відповіді видаватимуть клітини, рецептивні поля і орієнтація яких співпадають з контуром фігури. Неважко бачити, що множина відповідей таких клітин повністю описує контур фігури.

Примітно і таке: вихідні сигнали клітин, рецептивні поля яких співпадають з контуром фігури і орієнтовані відповідним чином, відповідають ділянкам контуру, одновимірним відріzkам ліній, що не мають ширини. Тобто матеріальний об'єкт – нейрон і його рецептивне поле, що відповідає частині зображення, поставлені у відповідність нематеріальному об'єкту – відріzkу прямої, елементу контуру. Кожен з даних елементів контуру може розглядатися як одновимірна клітина клітинного комплексу.

Вважаємо за необхідне навести цитату:

«У стріарній корі зустрічається ще один вид клітин. Зазвичай для простих і складних клітин характерна просторова сумація – чим довша стимульна лінія, тим

краща відповідь. Проте реакція посилюється лише до тих пір, поки довжина лінії не досягне розмірів рецептивного поля: подальше подовження лінії не призводить до енергійнішої відповіді (рис. 2.10 А). На відміну від цього, у клітин, що реагують на кінці ліній (end stopped cells), подовження лінії до відомої межі продовжує покращувати відповідь, а якщо лінія виходить за цю межу (у одному або в обох напрямках), то відповідь слабшає (рис. 2.10 Б).

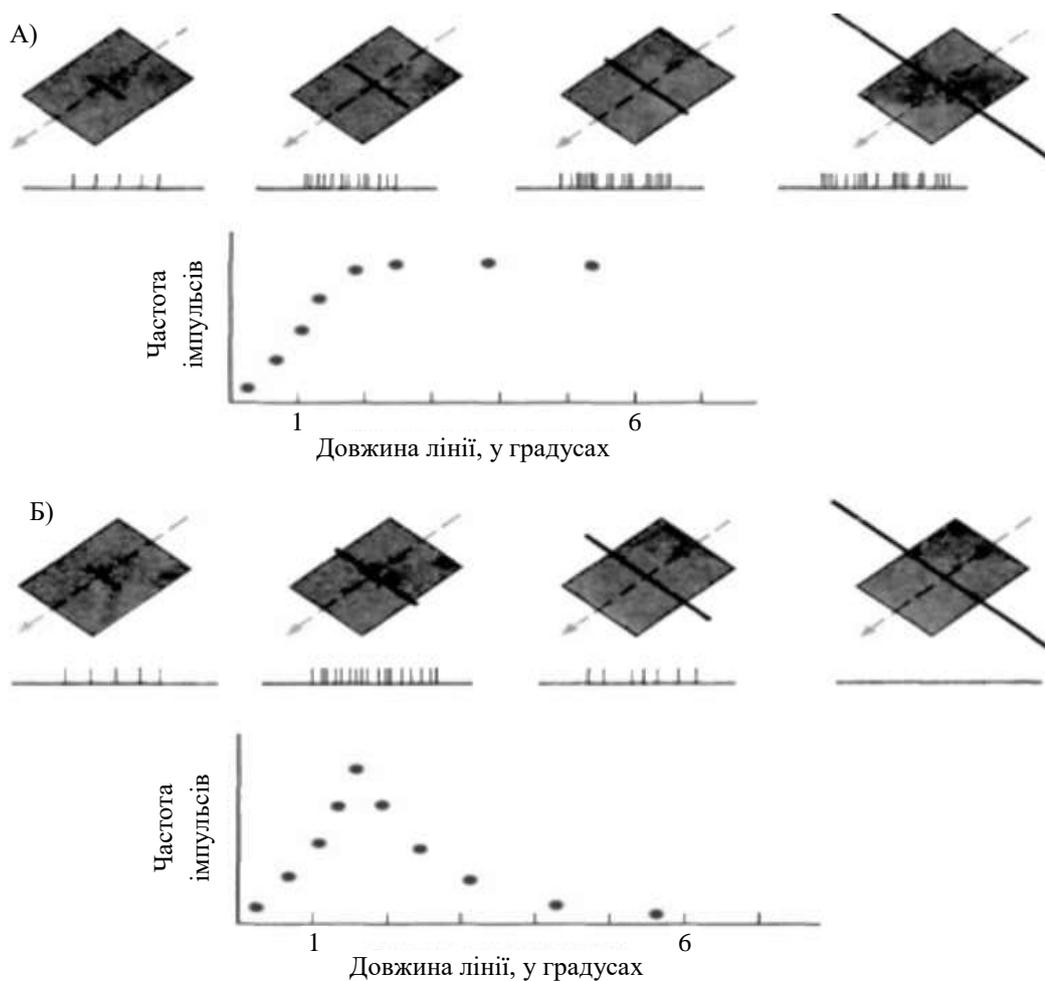


Рисунок 2.10 [19] – А) відповідь звичайної складної клітини на світлу лінію різної довжини. Тривалість кожного запису – 2 секунди. Як показує графік залежності відповіді від довжини лінії, реакція цієї клітини посилюється, поки лінія не досягає довжини біля 2° , після чого відповідь залишається незмінною; Б) для клітини, що реагує на кінці ліній, відповідь зростає, поки довжина лінії не досягне 2° , а потім знижується і лінія завдовжки 6° не викликає ніякої відповіді

Деякі клітини, які ми називаємо такими, що «реагують виключно на кінець лінії» (completely end stopped cells), взагалі не відповідають на пред'явлення стимулу у вигляді довгої лінії. Ту зону, з якої можна викликати відповідь клітини, ми називаємо зоною активації (чи збуджуючою зоною), а зони, розташовані з одного або з двох кінців, – зонами гальмування (чи гальмівними зонами). Таким чином, усе рецептивне поле подібної клітини складається зі збуджуючої зони і гальмівної зони (чи зон) по краях. Стимул оптимальної орієнтації, що активує клітину зі збуджуючої зони, викликає максимальне гальмування за межами цієї зони (з однією або з двох сторін)» [19, с. 89].

З позиції представлення зображення як клітинного комплексу наведене ствердження може розглядатися як підтвердження існування структур у зоровій системі живого організму, що відповідають нульвимірним клітинам клітинного комплексу.

2.2.2 Контури об'єктів – відшукування при максимальній роздільній здатності

Застосування структурної моделі півтонового зображення разом із цифровою рядковою моделлю зображення дає можливість використовувати поняття цифрового контуру об'єкта півтонового зображення, що, насамперед, дає додаткові можливості опису форми об'єкта. Зазвичай зображення розглядається при одному, фіксованому, значенні роздільної здатності. При використанні цифрової рядкової моделі півтонового зображення в експериментальних дослідженнях було встановлено, що під час обробки півтонових зображень у загальному випадку з'являються хибні особливі креки навіть на модельних зображеннях [В. Г. Калмиков, виступ на науковому семінарі 25.11.2010 р.].

Тобто в рамках математичної моделі півтонового зображення після дискретизації з'являються хибні особливі креки, що відповідають регулярним

точкам поверхні. Цей феномен зумовлений похибками дискретизації та квантування при переході до цифрового вигляду півтонового зображення. На рис. 2.11 представлено графік значень реалізації функції яскравості вздовж певного рядка зображення. Всередині кругів позначені особливі креки, що утворилися після перетворення до цифрового вигляду регулярного куска поверхні.

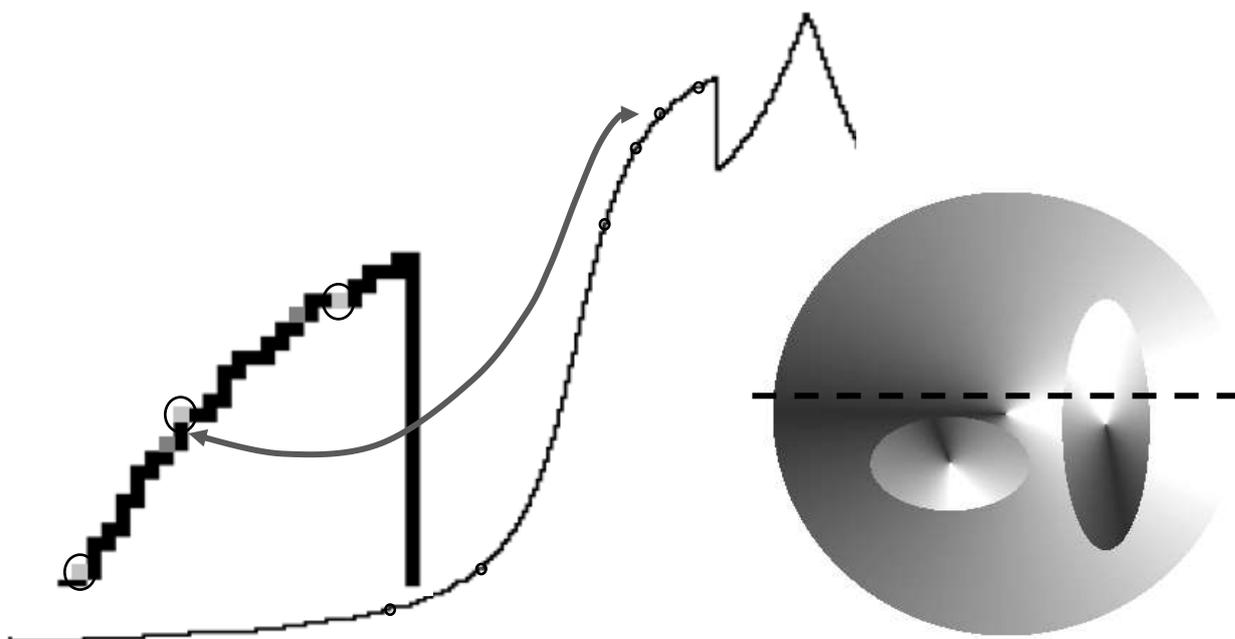


Рисунок 2.11 – Виникнення хибних особливих точок (креків) на кривій яскравості після дискретизації модельного півтонового зображення

Знайдені особливі креки по всіх горизонтальних та вертикальних рядках зображення представлено на рис. 2.12. Вибір інших параметрів дискретизації та квантування не вирішує проблему, оскільки хибні особливі креки можуть з'явитися в інших місцях зображення. Однак не виключається можливість підібрати роздільну здатність дискретного зображення (параметри дискретизації) в інтерактивному режимі так, щоб вказані вище ускладнення не з'явилися взагалі. Водночас у зоровій системі людей та вищих тварин під час зорового акту зображення обробляється при певній кількості роздільних здатностей (п. 1.1.3), причому встановлення контурів (сегментація зображення) у зоровій системі людей трапляється непомітно, без свідомої участі людини, навіть при значній кількості завад.

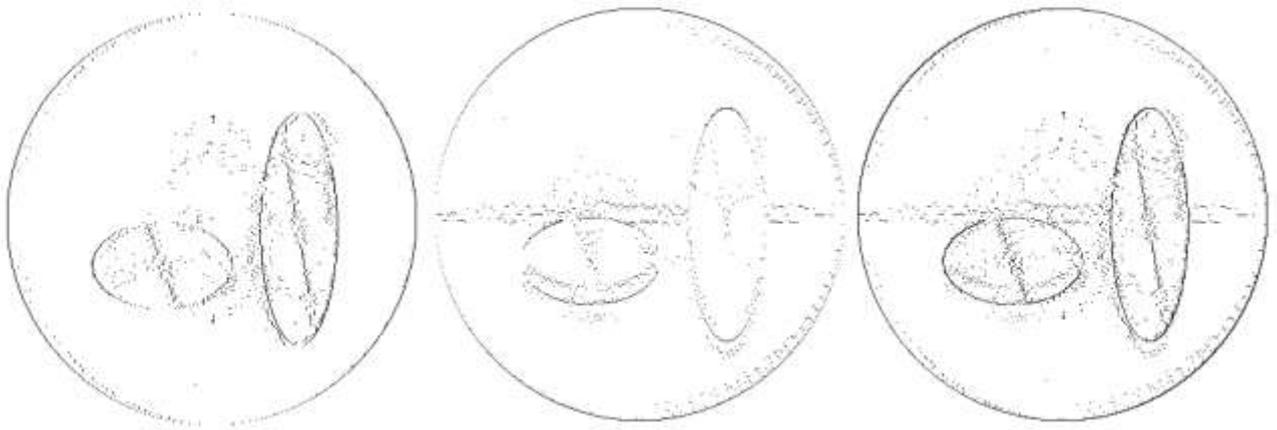


Рисунок 2.12 – Особливі креки на дискретизованому зображенні

Можна очікувати, що новий метод обробки півтонових зображень з використанням змінної роздільної здатності також певною мірою буде незалежним від впливу завад.

2.2.3 Метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності

Як було зазначено в п. 2.2, розгляд зображення вздовж рядків відповідно до цифрової рядкової моделі зображення можна представити як вимірювання значень яскравості в кожному пікселі рядка. Тоді виміряні значення є певною експериментальною кривою, яка може бути спотворена завадами. Припускається, що виміряні значення є відображенням певної невідомої функції $y = f(x)$, $x \in R$, $f(x) \in R$ із областю визначення $[a, b]$. Результати вимірів є скінченною послідовністю пар $\{x_i, y_i\}$; $i = \overline{1, I}$. Інакше кажучи, функція задана у табличному вигляді. Через обмежену розрядність типів даних ЕОМ, за допомогою яких можуть бути подані у цифровому вигляді результати вимірів, значення x_i та y_i належать до множини раціональних чисел: $x_i \in Q$, $y_i \in Q$, $Q \subset R$.

Графіки функцій та контури об'єктів на зображеннях є, мабуть, найпростішими та найдовше уживаними методами когнітивного представлення вимірів, що дозволяють визначити кількісні властивості процесу у багатьох сферах діяльності людини незважаючи на завади та похибки вимірювань. Основною властивістю графіка або контуру є його форма, що відображає функцію, за якою було отримано візуальне представлення кривої. Саме форма графічної кривої характеризує параметри об'єкта чи процесу, відображенням яких є ця крива. Різні представлення можуть відрізнятися за масштабом, кількістю вимірів, іншими афінними перетвореннями. Більш того, вони можуть бути спотворені завадами. Однак основні риси форми все рівно зберігаються. Під час автоматичної (автоматизованої) обробки графічного представлення реалізацій невідомих функцій знадобиться виконувати порівняння їхньої форми з метою встановлення, чи вони описують ті самі або різні процеси або об'єкти. Для забезпечення такої можливості необхідно отримати опис об'єкта в аналітичному вигляді, наприклад за допомогою параметрично заданих сплайнів [47, 48].

Однак опис експериментальних кривих за допомогою сплайнів спирається на припущення, що отримані експериментальні криві відображають процес чи феномен, що визначається невідомими гладкими функціями. Водночас велика кількість практичних задач вимагає обробки експериментальних кривих, які не можуть бути представлені адекватно за допомогою гладких функцій. У таких випадках аналітичний опис експериментальної кривої може бути отриманий через послаблення вимог до апроксимуючої функції – невідома функція повинна бути кусково-гладкою.

Крива, що визначається функцією $y = f(x)$, $x \in [a, b]$, є кусково-гладкою, якщо функція $y = f(x)$ має скінченну кількість розривів неперервності на $[a, b]$, а сегмент $[a, b]$ може бути розділений точками на скінченну кількість N часткових сегментів так, що функція $y = f(x)$ має неперервні похідні одночасно не рівні нулю на кожному сегменті [13].

Феномен виділення окремих сегментів графіку за своєю природою є актом зорового сприйняття. Розриви неперервності кривої або її градієнта візуально

ідентифікуються людиною, а інформація про них використовується для прийняття рішень. Сегментація зображень (виділення контурів об'єктів), ймовірно, має ту саму природу, що й сегментація графіків.

Якщо апроксимуючою функцією обрано сплайн, то така функція задається у вигляді послідовності поліномів:

$$y = f^{(1)}(x) | (t_0 \leq x \leq t_1), f^{(2)}(x) | (t_1 \leq x \leq t_2), \dots, f^{(N-1)}(x) | (t_{N-1} \leq x \leq t_N),$$

$$\text{де } f(x) | (t_n \leq x \leq t_{n+1}) = a_0^{(n)} x^k + a_1^{(n)} x^{k-1} + \dots + a_{k-1}^{(n)} x + a_k^{(n)}.$$

Тобто для визначення кусково-гладкої функції необхідно визначити множину граничних точок $T = \{t_0, t_1, \dots, t_N\}$, в яких відбувається розрив неперервності, та їхню кількість $N + 1$. На інтервалах аргументу між точками t_j для $f(x)$ повинні виконуватися умови неперервності.

В класичному означенні неперервності функції у формі « $\varepsilon - \delta$ » стверджується, що якщо для кожного $\varepsilon > 0$ існує таке $\delta(\varepsilon) > 0$, то для кожного значення змінної x з δ -околу точки c значення функції $f(x)$ належать до ε -околу $f(c)$ (рис. 2.13). Еквівалентне йому означення стверджує, що для неперервної функції нескінченно малим приростам аргументу відповідають нескінченно малі прирости функції.

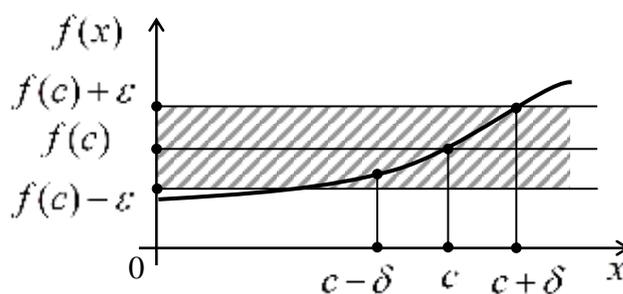


Рисунок 2.13 – Неперервність функції у формі « $\varepsilon - \delta$ »

Безпосередньо з цих означень можна вивести алгоритм встановлення неперервності функції в точці: починаючи з певного значення околу аргументу $|x_1 - c|$ окіл точки c послідовно зменшуючись прямує до 0 ($|x_1 - c| > |x_2 - c|$,

$|x_2 - c| > |x_3 - c|, \dots$). Якщо водночас окіл $f(c)$ зменшуючись ($|f(x_1) - f(c)| > |f(x_2) - f(c)|, |f(x_2) - f(c)| > |f(x_3) - f(c)|, \dots$) також прямує до 0, то $f(x)$ вважається неперервною в точці c . Тобто для аналізу неперервності функції $f(x)$ в точці c використовується змінний окіл точки c [11, 12].

Означення неперервності, що успішно використовуються в математичному аналізі для аналізу неперервності функції, не можуть бути застосовані до аналізу експериментальних кривих. Експериментальні криві є представленням відповідних невідомих функцій, що задані у вигляді впорядкованої послідовності вимірів. У свою чергу, впорядкована послідовність вимірів є множиною точок у певному дискретному просторі.

Як було показано в п. 1.1.3, розміри зон збудження рецептивних полів нейронів сітківки ока в кожний момент часу визначають роздільну здатність зорової системи в ці моменти часу. Під час зорового акту у зоровій системі обробка зображення у полі зору відбувається із різними роздільними здатностями, що послідовно змінюються від мінімальної («грубого», розмитого зображення) до максимальної (чітке зображення). Зменшення розміру зони збудження рецептивного поля нейрона зорової системи під час зорового акту може розглядатися як зменшення околу точки в центрі рецептивного поля. Процес, подібний до алгоритму перевірки умови неперервності функції у точці з математичного аналізу, повторюється в зоровій системі людини і тварин під час кожного зорового акту. Суттєва відмінність виділення границь об'єктів у полі зору при різній роздільній здатності в зоровій системі від аналізу неперервності функції у точці в математичному аналізі полягає у тому, що елементи рецептивного поля є об'єктами дискретного простору. Але на початку зорового акту зона збудження рецептивного поля складається з великої кількості точок (рецепторів) і поки множина рецепторів у зонах збудження рецептивних полів не є порожньою застосування означення неперервності до функції яскравості, що визначена в дискретному просторі рецепторів, не суперечить класичній теорії неперервності функцій [9 – 11, 49].

Описаний у п. 1.1.3 феномен, що спостерігається у зоровій системі людини та вищих тварин, може бути використаний як прототип для нового методу обробки сигналів з використанням концепції змінної роздільної здатності. Задача відшукування розривів неперервності функції за її дискретною реалізацією при змінній роздільній здатності може бути викладена таким чином: на відрізку $[a, b]$ спостерігається реалізація невідомої функції $y = f(x)$, визначеної 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 границі часткових сегментів функції $a = t_0 < t_1 < \dots < t_N = b$ та їх кількість $N + 1$ [13].

Аналітичний розв'язок задачі сегментації розглядається як відшукування точок розриву неперервності невідомої кусково-гладкої функції. Розглядаються розриви неперервності функції, коли ε -окіл значень функції є порожнім, та розриви неперервності градієнта функції. Оскільки спостерігається лише дискретна реалізація цієї функції, для аналізу можна використовувати лише дискретний аналог розриву неперервності, а саме, оцінку положення особливих точок функції за її дискретною реалізацією.

При розгляді із різною роздільною здатністю реалізація функції може сприйматися як неперервна або як така, що містить розрив неперервності. Величина скінченних просторових інтервалів або скінченних проміжків часу, через які відбуваються вимірювання, характеризують роздільну здатність реалізації сигналу або зображення.

Під час розгляду сигналу при різних роздільних здатностях окіл аргументу складається з дискретних елементів простору. Їх кількість визначає роздільну здатність, значення дискретної реалізації з околу аргументу використовуються для знаходження апроксимованого значення в точці, що характеризує даний окіл при даній роздільній здатності. Точки розриву неперервності t_j невідомої кусково-гладкої функції, що встановлюють границі областей визначення її кусків

та повинні бути відшукані під час виконання сегментації дискретної реалізації функції, є математичними точками. Відповідно до п. 2.2 – це нульвимірні об'єкти. Тому розрив неперервності дискретної реалізації функції встановлюється не «у точці», а між двома сусідніми точками дискретної реалізації функції – у мінімальному околі аргументу.

При розгляді значень дискретної реалізації функції окіл значень реалізації функції також не може стати нескінченно малим. Якщо різниця двох сусідніх значень реалізації функції за абсолютною величиною не перевищує певного порога d

$$|y_i - y_{i-1}| \leq d, \quad (2.2)$$

то реалізація невідомої функції в межах цих значень буде сприйматися як неперервна [5].

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 [5, 49]. Збільшення роздільної здатності відповідає зменшенню кількості дискретних елементів сигналу, що утворюють окіл точки і характеризують роздільну здатність. Таким чином, аналіз неперервності невідомої функції в точці можна розглядати як пошук пар сусідніх точок дискретних реалізацій функції, що отримані при різних роздільних здатностях, для яких порушується умова (2.2) в мінімальному околі точки. Оскільки кожна така відповідь отримана при своєму значенні роздільної здатності сигналу, всі відповіді повинні бути перераховані до (максимальної) роздільної здатності вихідного сигналу. В такому вигляді відповіді від всіх роздільних здатностей можуть бути розглянуті сумісно для визначення остаточної відповіді щодо сегментації сигналу [14].

Очікується, що саме такий підхід повинен забезпечити відносну незалежність запропонованого методу від впливу завад.

2.2.4 Визначення інтервалів аргументу, на яких функції можуть бути апроксимовані відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом, що відповідає обраним обмеженням

В математиці точки дискретної реалізації функції розглядаються як послідовність ізольованих точок. Але оскільки вони відображають певну функціональну залежність, тобто є реалізацією певної невідомої функції, то вони не можуть розглядатися як ізольовані. Найпростіший спосіб апроксимувати графічно функціональну залежність, що представлена точками дискретної послідовності – послідовно з'єднати їх відрізками прямих (рис. 2.14).

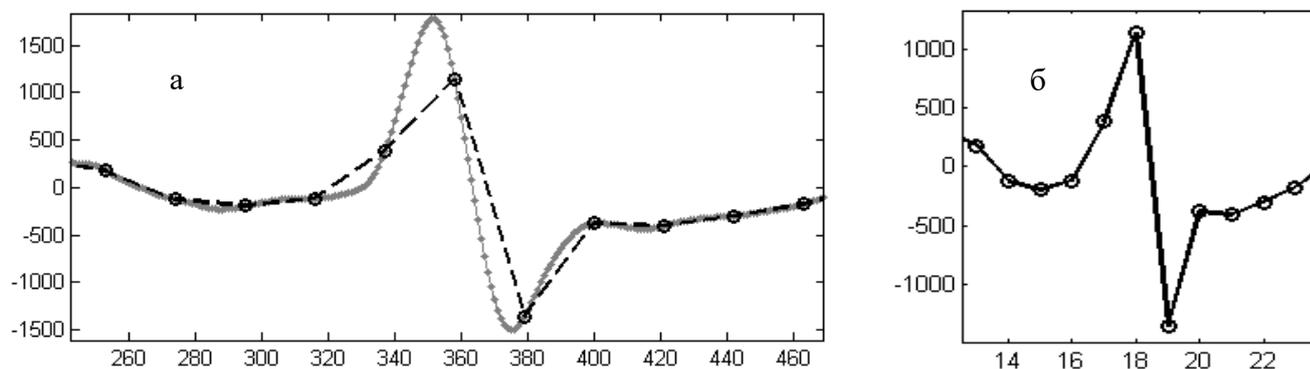


Рисунок 2.14 [5] – Дискретна реалізація функції при максимальній (а) та деякій «грубій» роздільній здатності (б)

Реалізація сигналу або функції при розгляді із різною роздільною здатністю може сприйматися як неперервна або як така, що має розрив [5]. Це залежить від вибору значення порога d , оскільки розрив неперервності для дискретної реалізації функції визначається нерівністю $|y_{i+1} - y_i| > d$.

Підкреслимо, що математичне поняття «розрив неперервності» є абстракцією, яку в реальній дійсності можна спостерігати лише в певному наближенні. Насправді йдеться про розрив неперервності функції в точці, а саме в математичній точці, розмір якої є нескінченно малою величиною. Для функцій, аргументом яких є час, розглядається скінченна зміна значення функції впродовж нескінченно малого проміжку часу.

Водночас окіл точки дискретної реалізації кусково-гладкої функції, де перевіряється розрив неперервності, не може стати нескінченно малим. Мінімальний розмір околу точки в дискретному просторі складає 1 дискретний відлік. Тож кутовий коефіцієнт відрізка прямої, яким поєднано 2 сусідні точки дискретної реалізації неперервної функції, є завжди скінченним. ε -окіл точки простору дійсних чисел у дискретному просторі може бути охарактеризований першою кінцевою різницею в точці. Через те, що відстань між двома сусідніми точками дискретної реалізації функції на осі аргументу складає 1 дискретний відлік, кутовий коефіцієнт відрізка прямої, що поєднує дві сусідні точки дискретної реалізації невідомої кусково-гладкої функції (рис. 2.15), також може бути охарактеризований першою кінцевою різницею.

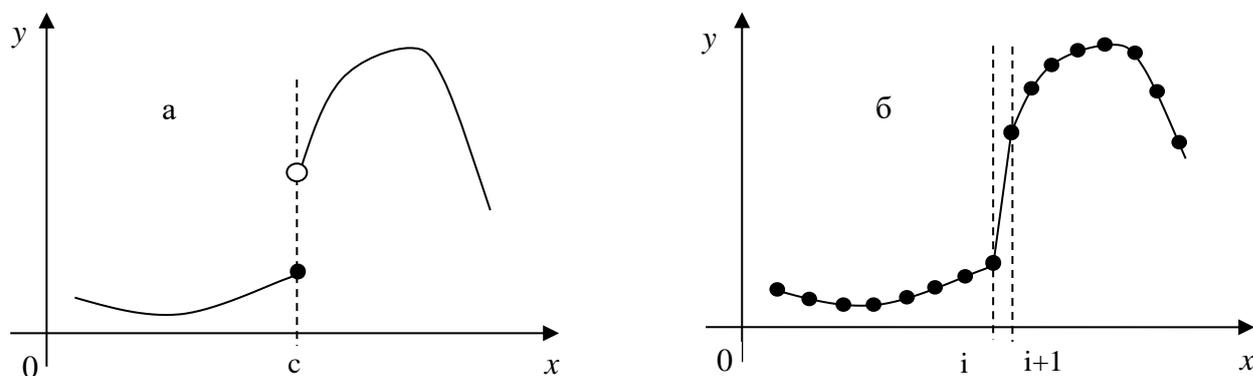


Рисунок 2.15 [5] – Розрив неперервності першого роду для кусково-гладкої функції (а) та відповідна йому різка зміна її дискретної реалізації (б)

Тому виявлення розривів неперервності функції за її реалізацією в дискретному просторі може бути представлено як відшукування серед відрізків прямих, що поєднують сусідні точки дискретної реалізації функції, кутовий коефіцієнт яких перевищує задане порогове значення d , тобто: на відрізку $[a, b]$ спостерігається реалізація невідомої функції $y = f(x)$, що визначена на цьому відрізку [9]. Значення роздільної здатності, з яким треба розглядати реалізацію цієї функції, невідоме. Виходячи з припущення, що наявна реалізація функції є представленням невідомої кусково-гладкої функції, необхідно визначити границі інтервалів $\{(l_j, r_j) \mid j = \overline{1, J}, l_1 \geq a, r_j \leq b\}$, на яких

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

Розглянемо частину графіка функції сумісно при максимальній і деякій «грубій» роздільній здатності m (рис. 2.16). Роздільна здатність m характеризується значенням інтервалу q_m послідовних спостережень сигналу, за яким розраховують значення сигналу $Z^{(m)} = \{z_0^{(m)}, z_1^{(m)}, \dots, z_{N_m}^{(m)}\}$ на цьому інтервалі одним з відомих способів. N_m – кількість дискретних значень сигналу при роздільній здатності m .

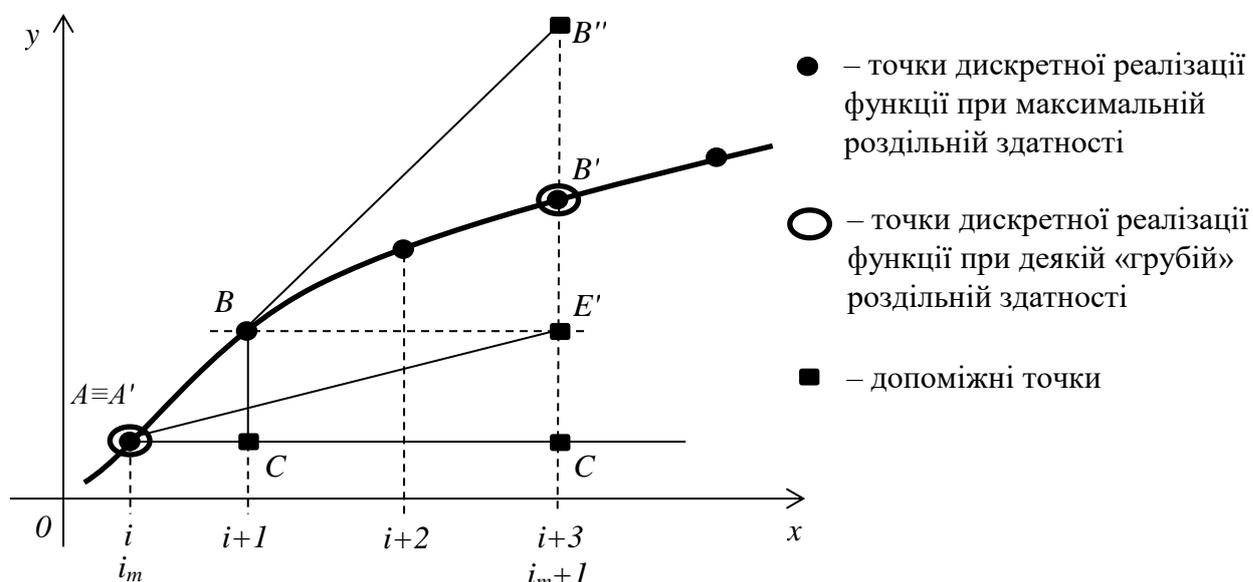


Рисунок 2.16 [5] – Виявлення інтервалів аргументу, в межах яких функція може бути апроксимована відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом більше певного наперед заданого значення.

Точки A і B є сусідніми точками з номерами i та $i+1$ при максимальній роздільній здатності, точки A' і B' є сусідніми точками з номерами i_m та $i_m + 1$ при деякій «грубій» роздільній здатності. Точки A і A' співпадають.

У трикутнику ABC кутовий коефіцієнт φ відрізка AB визначається за формулою $\varphi = BC/AC = BC$, оскільки на дискретній сітці, що відповідає максимальній роздільній здатності, відстань $AC = 1$ (один дискретний відлік).

Розрив неперервності між точками A та B на сітці максимальної роздільної здатності буде зафіксовано за умови виконання нерівності

$$BC > d. \quad (2.3)$$

Виконання цієї нерівності вказує на те, що кутовий коефіцієнт φ відрізка AB більше порога d . Позначимо ψ кутовий коефіцієнт відрізка AE' . Тоді $\psi < \varphi$ оскільки на сітці максимальної роздільної здатності $AC' > AC$, а $BC = E'C'$.

З метою встановлення значення порога, при якому на різних роздільних здатностях будуть знаходитись відрізки прямих з кутовим коефіцієнтом більше заданого значення, розглянемо подібні трикутники ABC і $AB''C'$. Кутові коефіцієнти відрізків AB і AB'' співпадають через рівність кутів при вершині A . Тоді виконується рівність $BC / AC = B''C' / AC'$. На сітці максимальної роздільної здатності $AC = 1$, $AC' = q_m$, тоді $B''C' = BC \cdot q_m$ і з (2.3) витікає $B''C' > d \cdot q_m$. Таким чином, пошук на графіку відрізків прямих з кутовим коефіцієнтом більше заданого значення може бути виконаний методом пошуку розривів неперервності при змінній роздільній здатності із змінюваним значенням порога $d_m \in D$, $d_m = d \cdot q_m$, що є індивідуальним для кожної роздільної здатності. Якщо при деякій грубій роздільній здатності m на інтервалі $[i_m, i_{m+1}]$ для реалізації функції $Z^{(m)} = \{z_0^{(m)}, z_1^{(m)}, \dots, z_{N_m}^{(m)}\}$, де N_m – кількість дискретних значень сигналу при роздільній здатності m , знайдено відрізок прямої з кутовим коефіцієнтом більше порогового значення: $|z_{i+1}^{(m)} - z_i^{(m)}| > d_m \in D$, $d_m = d \cdot q_m$, то при збільшенні роздільної здатності в межах відображення цього інтервалу на сітку відліків максимальної роздільної здатності також буде знайдено щонайменше один відрізок з кутовим коефіцієнтом, який перевищує відповідне для роздільної здатності порогове значення.

Слід зазначити, що при розгляді дискретної реалізації невідомої функції замість похідних використовуються кінцеві різниці. Для пошуку розривів неперервності (рис. 2.15) достатньо розглянути кінцеві різниці першого порядку.

Оскільки вихідну задачу зведено до порівняння відстаней $|z_{i+1}^{(m)} - z_i^{(m)}|$ із пороговим значенням d_m , де m – номер роздільної здатності, то даний результат може бути узагальнений і для задачі відшукування на графіку реалізації невідомої функції інтервалів аргументу, на яких функція може бути апроксимована відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом менше заданого значення. При об'єднанні вказаних вище двох результатів з'являється можливість визначати на графіку дискретної реалізації функції інтервали аргументу, в межах яких кутовий коефіцієнт відрізків прямих, що поєднують сусідні точки, належить до певного інтервалу $d1 < d < d2$.

Для пошуку розривів градієнта функції за її реалізацією необхідно використати кінцеві різниці другого порядку, що є предметом подальшого дослідження.

2.3 Визначення структурних елементів особливих ліній півтонового зображення

Створювані засоби отримання автоматичного / автоматизованого опису зображення відповідно до структурної моделі півтонового зображення повинні використовувати дискретні вихідні дані для знаходження множини особливих ліній зображення, які утворюють контури об'єктів у полі зору. Слід зазначити, що особлива лінія зображення є послідовністю особливих крєків зі спільними граничними точками, водночас як контури об'єктів у полі зору складаються з відрізків прямих і дуг кривих ліній, а отже після відшукування послідовностей особливих крєків із спільними граничними точками на цифрованому зображенні стає можливим застосувати вже існуючі методи для автоматичного виявлення й ідентифікації загальноприйнятих основних елементів зображення, до яких відносяться відрізки прямих та дуги кривих ліній.

Границя, тобто контур, є невід’ємною властивістю кожного об’єкта і являє собою однозв’язну послідовність, що складається з відрізків прямих і дуг кривих ліній. Оскільки зображення розглядається у дискретному вигляді, то під час дискретизації контурів зображень відрізки прямих і дуги кривих ліній, що утворюють контури зображень, перетворюються у відрізки цифрових прямих і дуги цифрових кривих ліній [46, 50].

При розгляді дискретного зображення як двовимірного клітинного комплексу контуром об’єкта є зв’язна замкнута послідовність контурних кривих, граничних між пікселами об’єкта та фону. Характерні ознаки відрізків прямих і дуг кривих ліній у результаті дискретизації значною мірою втрачаються.

На рис. 2.17 наведено приклад недискретизованого контуру об’єкта, що утворений дугою кривої і відрізком прямої, а також його цифровий еквівалент як послідовність кривих. Частини зв’язної послідовності кривих можна об’єднати в L -елементи [46].

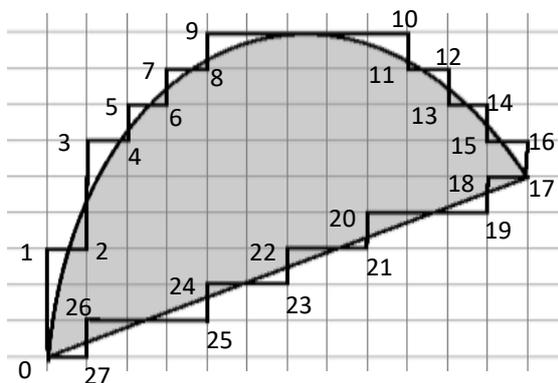


Рисунок 2.17 [50] – Приклад дискретизації контуру об’єкта

L -елемент – це зв’язна послідовність кривих вертикальної (горизонтальної) орієнтації, яка містить не більше одного крива горизонтальної (вертикальної) орієнтації.

Використовуються такі L -елементи, у яких відмінний по орієнтації крива (якщо він є) з’являється лише наприкінці послідовності. Кожний L -елемент характеризується такими параметрами: напрямком g щодо його початкової точки (прийняте $g=0$ – для напрямку вгору; 1 – праворуч; 2 – вниз; 3 – ліворуч); l – кількістю кривих напрямку g ($l=1,2,\dots$); напрямком останнього крива q , щодо

напрямку g попередніх крєкїв ($q = -1$ – спрямований лїворуч, щодо напрямку g останній крєк; $+1$ – праворуч; 0 – збїгається з напрямком g). Для L -елемента $(0 - 2) g = 0, l = 3, q = +1$. Для L -елемента $(27 - 0) g = 3, l = 1, q = 0$.

Суть використання L -елементїв при обробленнї вїзуальної їнформації, зокрема, у процесї структурного аналізу контурїв, полягає в тому, що L -елементи є мїнїмально можливими структурними об'єктами, якї ще зберїгають пїсля дискретизації просторову орієнтацію первинного об'єкта – вїдрїзка прямої або сегмента дуги кривої лїнії. Аналїз просторових властивостей L -елементїв (напрямкїв, довжин) у послїдовностї дозволяє судити про їхню приналежнїсть до одного й того ж вїдрїзка прямої лїнії.

Вїдрїзку прямої лїнії на цифрованому зображеннї вїдповїдає послїдовнїсть L -елементїв з однаковими значеннями параметрїв g, q , що визначають напрямок вїдрїзка цифрової прямої у межах їх значень. Визначити вїдрїзок цифрової прямої в послїдовностї L -елементїв контуру означає вказати координати його початкової й кїнцевої точок. Якщо $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ – цїлочисельнї координати початкової та кїнцевої точок вїдрїзка прямої, то кут нахилу вїдрїзка визначається вїдношенням рїзниць його координат $n = \Delta x = |x_1 - x_2|$ і $m = \Delta y = |y_1 - y_2|$, яке, у загальному випадку, не є цїлим числом. Для визначеностї беруть $n > m$. Вїдрїзок цифрової прямої довїльного кута нахилу може бути задано за допомогою двох типїв L -елементїв однакового напрямку, довжини яких дорївнюють вїдповїдно l та $l+1$, причому $l \leq n/m \leq l+1$. Структура вїдрїзка цифрової прямої визначається порядком чергування L -елементїв, який задається значеннями членїв ланцюгового дроби $[l, k_1, k_2, \dots, k_t]$ або

$$\frac{n}{m} = l + \frac{r}{m} = l + \frac{1}{k_1 + \frac{r_1}{r}} = l + \frac{1}{k_1 + \frac{1}{k_2 + \frac{r_2}{r_1}}} = l + \frac{1}{k_1 + \frac{1}{k_2 + \frac{1}{\dots + \frac{1}{k_t + 1}}}}. \quad (2.4)$$

У формулі (2.4) l (ціла частина від ділення n на m) відповідає послідовності з l крєків одного напрямку підряд у відрізку цифрової прямої. Разом з перпендикулярним крєком, що примикає до цієї послідовності, вони утворюють L -елемент довжини l .

k_1 L -елементів довжини l , що йдуть підряд, і один L -елемент довжини $l+1$, якщо він є в послідовності, утворюють K_1 -елемент, що складається з k_1 L -елементів, інакше кажучи, K_1 -елемент «довжини» k_1 . Аналогічно, k_2 K_1 -елементів довжини k_1 , що йдуть підряд, і один K_1 -елемент довжини k_1+1 , якщо він є в послідовності, утворюють K_2 -елемент довжини k_2 і так далі, до вичерпання членів ланцюгового дроби. Чисельник r визначає кількість L -елементів довжини $l+1$ у даному відрізку цифрової прямої, а також і кількість K_1 -елементів, кожний з яких містить k_1 або k_1+1 L -елементів, один з яких має довжину $l+1$. Чисельник r_1 визначає кількість K_2 -елементів довжини k_1+1 у даному відрізку цифрової прямої, а також і кількість K_1 -елементів, кожний з яких містить k_1 або k_1+1 L -елементів, один з яких має довжину $l+1$, а інші – довжину l . Взагалі чисельник r_{t-1} визначає кількість K_{t-1} -елементів довжини $k_{t-1}+1$ у даному відрізку цифрової прямої, а також і кількість K_t -елементів, кожний з яких містить k_{t-1} або $k_{t-1}+1$ K_{t-1} -елементів, один з яких має довжину $k_{t-1}+1$, а інші – довжину k_{t-1} .

K_t -елемент, що містить у своєму складі серед K_{t-1} -елементів довжини k_{t-1} (L -елементів довжини l) один K_{t-1} -елемент довжини $k_{t-1}+1$ (один L -елемент довжини $l+1$), називається завершеним.

Під відрізком цифрової прямої, який починається у точці з координатами (x_1, y_1) і закінчується у точці з координатами (x_2, y_2) розуміють послідовність L -елементів, що мають однакові напрямки g, q , цілочисельні довжини яких дорівнюють відповідно $l, l+1$, а $l \leq n/m \leq l+1$, де $n = |x_1 - x_2|$ і $m = |y_1 - y_2|$, причому порядок чергування L -елементів різних довжин визначається ланцюговим дробом n/m .

У [50] процес формування образу відрізка цифрової прямої згаданим алгоритмом представлено також і в термінах зростаючих пірамідальних мереж [51] (рис. 2.18) з урахуванням робіт З. Л. Рабіновича [52]. Розглядається окремий випадок зростаючої пірамідальної мережі, при якому піраміди вершин не мають перетинань. Сигнали крєків, що формують L -елементи, використовуються як рецептори. Вершини мережі пов'язані концепторами та зворотними зв'язками. Концептори представлені висхідними прямими стрілками та лініями без стрілок. Зворотні зв'язки представлені спадними стрілками. Розглядається послідовна процедура процесу формування образу – зліва направо. Алгоритм формування образу довільного відрізка прямої, що наведений у [50], дозволяє відновити контури об'єктів дискретизованого зображення з послідовності крєків у послідовність відрізків цифрових прямих.

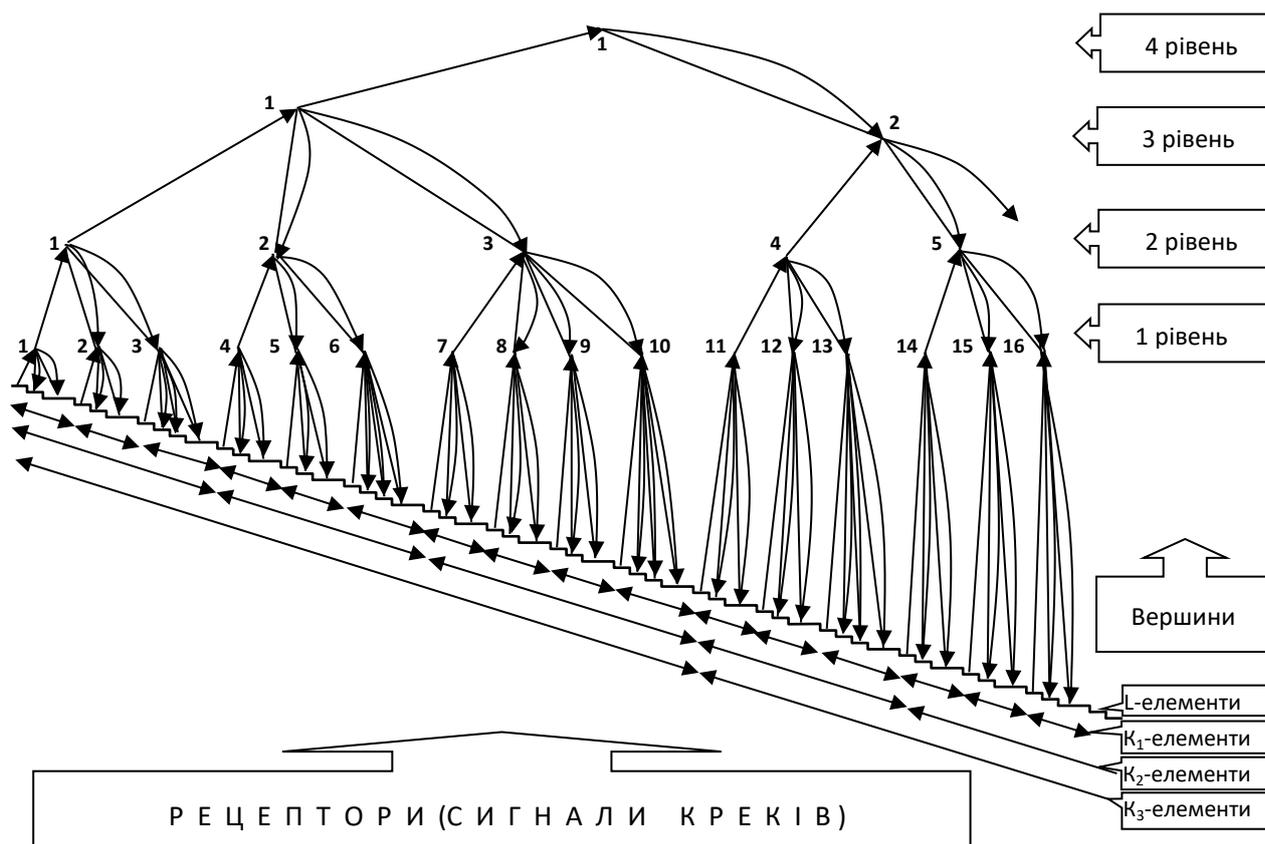


Рисунок 2.18 [50] – Формування образу відрізка цифрової прямої в термінах зростаючої пірамідальної мережі

Однак контури зображення складаються не тільки з відрізків прямих, а також і з дуг кривих ліній. Тому необхідно проаналізувати послідовність відрізків цифрових прямих з метою відновлення дуг цифрових кривих з множини відрізків цифрових прямих. Таким чином, контури об'єктів дискретизованих зображень будуть представлені не тільки як послідовності відрізків цифрових прямих, але і як послідовності відрізків цифрових прямих і/або дуг цифрових кривих.

Щоб встановити, чи утворена послідовність відрізків цифрових прямих контуру в результаті дискретизації дуги деякої довільної кривої, введено означення дуги цифрової кривої виходячи із припущення, що дуги кривих на графічних зображеннях відображають сегменти безперервних функцій з безперервними похідними [50]. Під безперервними кривими лініями [53], які задані рівняннями $x = \varphi(t)$, $y = \psi(t)$, розуміють криві Жордана без кратних точок або прості дуги, тобто такі, що для будь-яких двох різних значень t' і t'' відповідні їм точки на площині $M'[\varphi(t'), \psi(t')]$ і $M''[\varphi(t''), \psi(t'')]$ – різні. Якщо $\varphi(t)$, $\psi(t)$ визначені на відрізку $[a, b]$ і не мають на цьому відрізку розривів, то при зростанні t від a до b точка з координатами (x, y) описує дугу AB (рис. 2.19). Точкам ділення відрізка $[a, b]$

$$a = t_0 < t_1 < \dots < t_{s-1} < t_s = b$$

відповідають точки кривої $A, T_1, \dots, T_{s-1}, B$. Для побудови ламаної лінії, що вписана в дугу AB , послідовно з'єднують відрізками прямих пари точок: A з T_1 , T_1 із T_2 , \dots , T_{s-1} із B . Фігура, що обмежена відрізком ламаної лінії T_n, T_{n+1} і відповідною ланкою T_n, T_{n+1} , є сегментом T_n, T_{n+1} . Відрізок прямої лінії максимальної довжини між T_n, T_{n+1} і T_n, T_{n+1} та перпендикулярний до відрізка T_n, T_{n+1} є висотою h_n сегмента T_n, T_{n+1} . Визначено максимальну довжину окремого сегмента дуги

$$\beta = \max_{n=0,1,\dots,s-1} l(T_n, T_{n+1}).$$

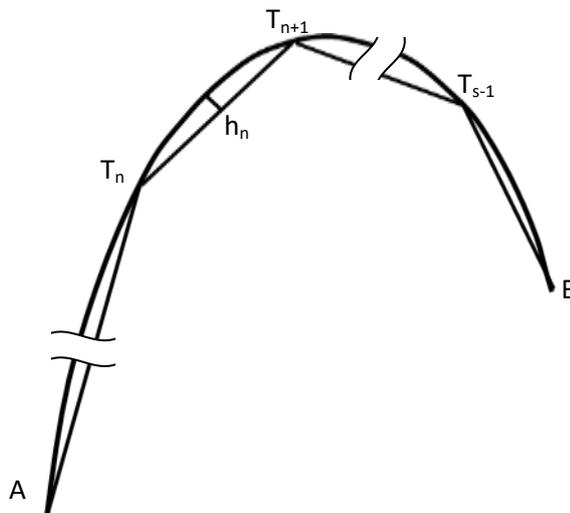


Рисунок 2.19 [50] – Дуга кривої з вписаною ламаною лінією

Якщо β буде прямувати до нуля при відповідному збільшенні s , то до нуля буде прямувати довжина кожної з ланок вписаної ламаної, так само, як і висота кожного сегмента дуги, завдяки безперервності функцій $\varphi(t)$, $\psi(t)$.

При відображенні дуги та вписаної ламаної лінії в дискретний простір дискретності di , відрізки вписаної ламаної будуть відображені відрізками цифрових прямих. Оскільки в дискретному просторі координати набувають цілочисельних значень, кратних di , то починаючи з моменту, коли h_n стане менше $di/2$, менші від половини величини дискретності об'єкти, зокрема, висоти сегментів, не матимуть відображення в цьому просторі – довжини їх стануть рівними нулю. Отже, при $h_n < di/2$ дискретні відображення частин дуги співпадут з відповідними ланками вписаної ламаної – відрізками цифрових прямих. Таким чином, контур, який складається з відрізків прямих і дуг довільних кривих, після дискретизації визначений як послідовність відрізків цифрових прямих. Послідовності відрізків цифрових прямих, які відповідають дугам кривих, можуть розглядатися як ламані лінії, що вписані в ці дуги кривих. Такі вписані ламані лінії є дугами цифрових кривих [50]. Контур може містити як

окремі відрізки прямих, так і послідовності таких відрізків – ламані лінії, які не є дугами цифрових кривих.

Для встановлення приналежності відрізків цифрових прямих, з яких складається ламана лінія, дузі цифрової кривої розглядають пари сусідніх відрізків цифрових прямих у послідовності, яка відповідає дузі кривої. Пара сусідніх відрізків визначає кінцеву різницю другого порядку. Дві пари, які мають спільний відрізок, називають сусідніми парами. Сусідні пари визначають кінцеву різницю третього порядку.

Якщо кінцеві різниці другого порядку не дорівнюють нулю (для цілочисельних значень координат точок кінцеві різниці другого порядку повинні бути більше від 1), то пари сусідніх відрізків цифрових прямих доцільно перевірити на приналежність дузі цифрової кривої. Взагалі, через три точки, що визначають пару відрізків, можна провести багато кривих. Проте довжини висот сегментів дуг кривих, які відповідають відрізкам вписаної ламаної лінії, не повинні перевищувати значення половини дискретності простору. Тобто для того, щоб вважати пари сусідніх відрізків цифрових прямих T_{n-1}, T_n ; T_n, T_{n+1} частиною дуги цифрової кривої, необхідно встановити існування кривої, яка проходить через точки T_{n-1}, T_n, T_{n+1} та для якої виконується система нерівностей:

$$\begin{cases} h_{n-1} < \frac{di}{2} \\ h_n < \frac{di}{2} \end{cases}.$$

Кривину плоскої кривої звичайно ототожнюють із кривиною стичної окружності (кола кривини) [41, с. 519]. У [50] розглядається саме такий, окремий, випадок цієї задачі. Стичною окружністю плоскої кривої в точці T_1 називають граничне положення окружності, що проходить через дві сусідні точки T_2 і T_3 при прямуванні T_2 і T_3 до T_1 . Виходячи з цього, введено визначення дуги цифрової кривої у двовимірному дискретному просторі дискретності di як послідовності

відрізків цифрових прямих, де через кінцеві три точки кожної пари сусідніх відрізків можна провести таку окружність, що висота сегментів цієї окружності для сусідніх відрізків не перевищуватиме $di/2$.

Це визначення справедливе в тій мірі, наскільки правомірне ототожнення сегмента дуги довільної кривої, яка відповідає парі сусідніх відрізків, з дугою стичної окружності. За допомогою цього визначення запропоновано метод перевірки відповідності зазначеної пари сусідніх відрізків цифрових прямих певній дузі цифрової кривої [50].

Згідно з визначенням дуги цифрової кривої, по точках T_{n-1}, T_n, T_{n+1} відрізків ламаної лінії будується окружність і виконується оцінка величини відхилення кінця кожного такого відрізка від напрямку лінії попереднього відрізка (рис. 2.20).

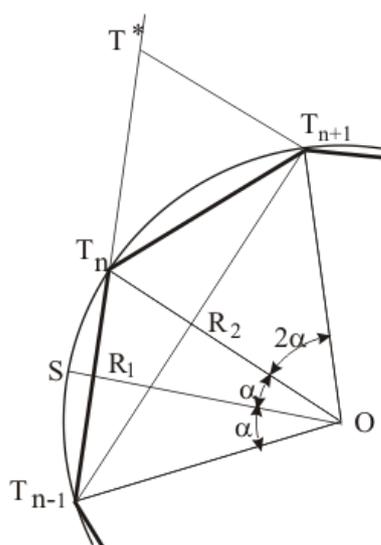


Рисунок 2.20 [50] – Оцінка величини відхилення напрямку сусідніх відрізків дуги цифрової кривої

За величину відхилення обрано довжину відрізка $T_{n+1}T^*$. Визначають спочатку довжину відрізка T_nR_2 – висоти $\Delta(T_{n-1}T_nT_{n+1})$. Максимальна відстань між точками ліній дуги кривої і відповідного відрізка цифрової прямої $SR_1 = di/2$.

Водночас $SR_1 = OT_{n-1} - OT_{n-1} \cdot \cos \alpha = r - r \cos \alpha = r(1 - \cos \alpha)$. Висота $\Delta(T_{n-1}T_nT_{n+1})$:

$$T_nR_2 = OT_n - OT_n \cdot \cos 2\alpha = r - r \cos 2\alpha = 2r(1 - \cos^2 \alpha). \quad \frac{T_nR_2}{SR_1} = 2(1 + \cos \alpha) \quad \text{або}$$

$T_n R_2 = 2(1 + \cos \alpha) \cdot SR_1$. Якщо $SR_1 \approx \frac{di}{2}$ та $\alpha \leq 30^\circ$, то висота $\Delta(T_{n-1}T_nT_{n+1})$
 $T_n R_2 \leq 1,85 \cdot di$. Тоді максимальне відхилення

$$T_{n+1}T^* = 2T_n R_2 \leq 3,7 \cdot di.$$

Це означає, що для того, щоб розглянута пара відрізків могла бути віднесена до дуги цифрової кривої необхідно, щоб величина максимального відхилення $T_{n+1}T^*$ не перевищувала б $3,7 \cdot di$. Мінімальна величина відхилення $T_{n+1}T^* > di$, оскільки при меншому значенні відхилення напрямки відрізків $T_{n-1}T_n$ і T_nT_{n+1} не відрізняються один від одного і пара відрізків різних напрямків перетворюється в один відрізок прямої. Величина відхилення $di < g_n = T_{n+1}T^* < 3,7 \cdot di$ береться за оцінку другої кінцевої різниці на сегменті контуру $T_{n-1}T_nT_{n+1}$ у точці T_n за умови, що даний сегмент є частиною дуги кривої [50].

2.4 Апроксимація неперервних областей півтонового зображення поліноміальними поверхнями третього порядку

Як зазначено у п. 2.1.1, півтонове зображення можна розглядати як просту кусково-гладку поверхню, що складається з певної кількості простих регулярних поверхонь.

Відповідно до цифрової рядкової моделі півтонового зображення (п. 2.2), кожному рядку зображення ставиться у відповідність послідовність значень яскравості, яка є реалізацією невідомої кусково-гладкої функції яскравості $z = f_y(x)$ для горизонтальних рядків або $z = f_x(y)$ для вертикальних рядків. Тоді кожна частина послідовності, що є відображенням гладкого куска цієї функції, може бути апроксимована аналітичною параметрично заданою кривою, у вигляді

поліномів потрібного порядку. Оскільки розглядаються лише прості поверхні, які відповідають функціям яскравості півтонових зображень, достатнім є третій порядок поліномів.

Для апроксимації може бути обраний канонічний сплайн (cardinal spline).

Канонічний сплайн це поліном третього порядку, який можна записати параметричними рівняннями загального вигляду:

$$x(t) = a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + k_x; \quad y(t) = a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + k_y,$$

де параметр t змінюється від 0 до 1.

Коефіцієнти рівнянь можна обчислити за формулами:

$$a_x = T(x_2 - x_0) + T(x_3 - x_1) + 2x_1 - 2x_2,$$

$$a_y = T(y_2 - y_0) + T(y_3 - y_1) + 2y_1 - 2y_2,$$

$$b_x = -2T(x_2 - x_0) - T(x_3 - x_1) - 3x_1 + 3x_2,$$

$$b_y = -2T(y_2 - y_0) - T(y_3 - y_1) - 3y_1 + 3y_2,$$

$$c_x = T(x_2 - x_0),$$

$$c_y = T(y_2 - y_0),$$

$$k_x = x_1,$$

$$k_y = y_1,$$

де T – «натягнення» (при $T = 0$ отримуємо пряму лінію, зі збільшенням T вигин кривої збільшується, при T більше 1 або менше 0 крива може прийняти вигляд петлі);

(x_0, y_0) ; (x_1, y_1) ; (x_3, y_3) ; (x_4, y_4) – координати точок, що управляють формою кривої [54].

Наведені формули використовуються для розрахунку кривої між кінцевими точками з координатами (x_1, y_1) та (x_2, y_2) . Точки з координатами (x_0, y_0) та

(x_3, y_3) також мають вплив на форму кривої між кінцевими точками, допомагаючи в обчисленні дотичних.

Таким чином, кожен рядок півтонового зображення може бути представлений у вигляді вектора $v = \{x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3\}$, компонентами якого є параметри канонічного сплайна.

Рядок n ($m = \overline{0, M}$) півтонового зображення може бути представлений у вигляді ламаної лінії, яка складається з послідовності відрізків. Ці відрізки поєднують точки, що відповідають сусіднім у рядку значенням яскравості $\rho_n(m)$.

Мірою відмінності (відстані) рядка зображення від апроксимуючої кривої [55] обрано значення площі $S(v, \rho_n(m))$ фігури, яка обмежена кривою, що визначається коефіцієнтами v , і ламаною, що утворена значеннями яскравості. Пошук сплайна з коефіцієнтами v_{opt} , який є найкращою апроксимацією вказаного рядка зображення, розглядається як визначення коефіцієнтів сплайна, що мінімізують значення $S(v, \rho_n(m))$:

$$v_{opt} = \arg \min_v S(v, \rho_n(m)).$$

Безпосереднє обчислення $S(v, \rho_n(m))$ неможливе, оскільки цей контур не є однозв'язним – ламана $\rho_n(m)$ та апроксимуюча крива з коефіцієнтами v неодноразово перетинаються. Обчислення координат точок перетину ускладнено через представлення сплайна у параметричному вигляді. Розглядається заміна апроксимуючої кривої ламаною лінією V_t точки перелому якої (x_t, y_t) належать кривій та обчислені для значень $t = 0, \delta, 2\delta, 3\delta, \dots, 1$. Значення δ обрано достатньо малим, щоб забезпечити відображення вихідного сплайна за допомогою ламаної лінії V_t із достатньою для практичних обчислень точністю (рис. 2.21). Оскільки, на відміну від параметричного вигляду завдання сплайна, відрізки ламаної є явно заданими функціями, з'являється можливість обчислити для кожного значення

$\rho_n(m)$ відповідне до пари значень x_i, z_i значення $V_i(m)$. Тоді площа $S(v, \rho_n(m))$ може бути обчислена як

$$S(v, \rho_n(m)) = \sum_{m=0}^M |V_i(m) - \rho_n(m)|.$$

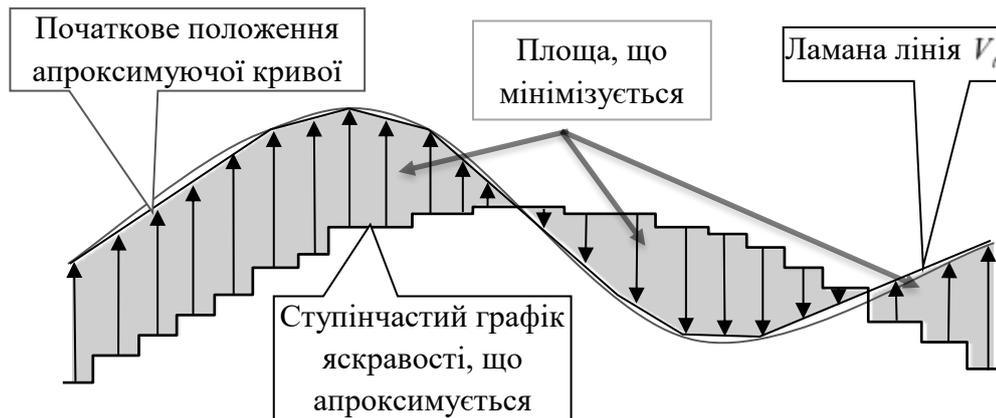


Рисунок 2.21 [55] – Апроксимація рядка зображення

Значення v_{opt} , що відповідає мінімальному значенню $S(v, \rho_n(m))$, може бути отримано із використанням методу градієнтного спуску.

Згідно структурної моделі півтонового зображення (п. 2.1.3), об'єкти інтересу описуються простими кусками поверхні, що обмежені контурами. Алгоритм, за допомогою якого можна отримати аналітичний опис такого куска простої поверхні, розглядається у [55]. Після обчислення за вказаною вище процедурою вектора $v_{opt} = \{x_0(n), z_0(n), x_1(n), z_1(n), x_2(n), z_2(n), x_3(n), z_3(n)\}$, $\forall n \in [n_b, n_e]$, де n_b, n_e – номери початкового та кінцевого рядків одного напрямку в межах куска поверхні, кожна з множин пар коефіцієнтів $\{x_0(n), z_0(n)\}$; $\{x_1(n), z_1(n)\}$; $\{x_2(n), z_2(n)\}$; $\{x_3(n), z_3(n)\}$ апроксимується просторовим канонічним сплайном третього ступеня

$$r_0(t) = \{x_0(t), y_0(t), z_0(t)\},$$

$$r_1(t) = \{x_1(t), y_1(t), z_1(t)\},$$

$$r_2(t) = \{x_2(t), y_2(t), z_2(t)\},$$

$$r_3(t) = \{x_3(t), y_3(t), z_3(t)\}.$$

Кожний з цих просторових сплайнів, у свою чергу, визначається чотирма керуючими точками, тобто кусок простої поверхні, що описує область півтонового зображення в межах замкнутого контуру, визначається шістнадцятьма керуючими точками.

2.5 Висновки до розділу 2

Розглянуто підхід до обробки півтонових зображень з урахуванням існуючих методів та актуальних досягнень в області нейрофізіології зору.

1. Сумісний розгляд моделі півтонового зображення, яка витікає з нейрофізіологічних уявлень про зорове сприйняття, і математичної моделі півтонового зображення дозволив отримати структурну модель півтонового зображення, яка може бути застосована для виділення об'єктів інтересу на зображенні у автоматизованому або автоматичному режимі.

2. Перехід від опису півтонового зображення як кусково-гладкої поверхні у просторі дійсних чисел до цифрованого вигляду здійснюється з використанням поняття двовимірного клітинного комплексу. При цьому межі об'єктів на зображенні описуються зв'язними послідовностями особливих (граничних) кривих.

3. Відповідно до цифрової рядкової моделі зображення, послідовність значень яскравості пікселів вздовж кожного рядка розглядається як дискретна реалізація функції яскравості цього рядка. З іншого боку дискретну реалізацію функції яскравості рядка зображення можна розглядати як експериментальну криву, утворену вимірюванням яскравості вздовж цього рядка. Отже, пошук

граничних крєкїв у рядку стає еквівалентним відшуканню меж сегментів невідомої одновимірної кусково-гладкої функції за її дискретною реалізацією, а межі об'єктів на зображенні у вигляді множини граничних крєкїв можуть бути визначені як суперпозиція відповідей щодо сегментації всіх горизонтальних і вертикальних рядків зображення. Тобто сегментація невідомих кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями та визначення меж об'єктів на зображенні можуть бути виконані одним методом.

4. Вперше запропоновано метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності. При цьому роздільна здатність розглядається як параметр, що не спостерігається.

5. На підставі аналізу нейрофізіологічних досліджень зорової системи сформовано гіпотезу про відносну незалежність запропонованого методу від впливу завад.

6. Визначено додаткові умови, які дозволили використовувати створений метод для аналізу графіків дискретних реалізацій функцій, а саме встановлювати інтервали аргументу, на яких функція може бути апроксимована відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом, який відповідає обраним обмеженням.

7. Встановлення меж об'єктів на зображенні у вигляді зв'язних послідовностей особливих (граничних) крєкїв є передумовою для отримання аналітичного опису зображення із застосуванням існуючих методів опису цифрових контурів півтонового зображення та методів апроксимації неперервних областей півтонового зображення поліноміальними поверхнями третього порядку.

Основні результати розділу опубліковані автором у роботах [5, 9 – 14].

РОЗДІЛ 3

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ І СИГНАЛІВ ПРИ ЗМІННІЙ РОЗДІЛЬНІЙ ЗДАТНОСТІ

3.1 Алгоритм сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності

Для створення інформаційної технології оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності необхідно розробити алгоритми розв'язання задач, що формалізовані у п. п. 2.2.3 та 2.2.4.

Алгоритм сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності призначений для визначення точок розриву неперервності кусково-гладкої функції (сегментації сигналу), наприклад, функції яскравості рядка півтонового зображення $y = f(x)$, яка визначена на інтервалі $[a, b]$, за її дискретною реалізацією при змінній роздільній здатності [5, 9, 13, 15]. Під дискретною реалізацією розуміють, як і раніше (п. 2.2.3), 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 і 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 $w_j = \{y_{q(j-1)+1}, y_{q(j-1)+2}, \dots, y_{q(j-1)+q}\}$, 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 будемо розуміти визначення можливого розриву неперервності функції $y = f(x)$, тобто випадок, коли $|z_j - z_{j+1}| > d$, де d – певний поріг. 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.

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

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_3, \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. 3.1; інакше, якщо $m = M$, перехід до п. 4.

3.1. 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 .

З урахуванням отриманих у п. 2.2.4 результатів, алгоритм структурного аналізу одновимірного сигналу при змінній роздільній здатності 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.

3.2 Задача сегментації кардіосигналу на окремі кардіоцикли

У даному пункті розглядається метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності із додатковими умовами, за допомогою яких можна виділяти на графіку цієї функції інтервали аргументу, де вона може бути апроксимована відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом більше заданого значення (п. 2.2.4) у застосуванні до практичної задачі виділення характерних ознак у кардіосигналі.

Кардіосигнал є майже циклічним сигналом (рис. 3.1). У кожному кардіоциклі виділяють певні характерні точки (P, Q, R, S, T), а для діагностичних потреб розглядають форму кривої на певних інтервалах між ними. Як правило, зубці R є найбільш вираженими на кардіограмі. Задача первинної сегментації кардіосигналу (поділу кардіосигналу на кардіоцикли) полягає у визначенні положення точок R кожного кардіоциклу.

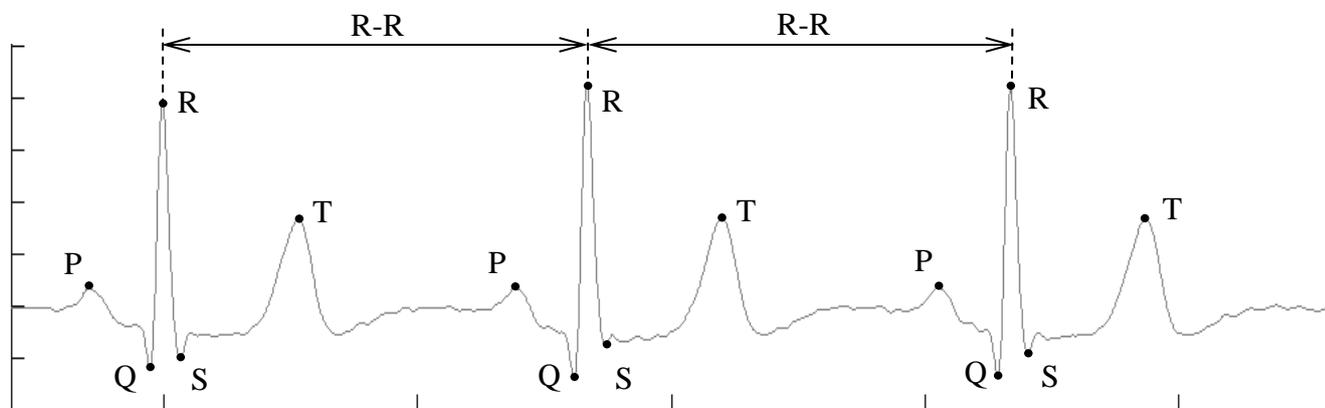


Рисунок 3.1 – Характерні ознаки кардіосигналу

3.2.1 Структурна модель R-зубця у кардіоциклі

Для побудови класифікатора, який здатен знаходити R-зубці у кардіосигналі, введемо такі означення: просторова частота сигналу – швидкість зміни сигналу на певному інтервалі часу. Більшу просторову частоту має та вибірка значень сигналу, в якій абсолютне значення кутового коефіцієнта відрізка прямої, що апроксимує цю вибірку, більше.

Оскільки точка R є точкою локального максимуму, то R-зубець визначається такими характерними ознаками (рис. 3.2): точка локального мінімуму; відрізок прямої від точки локального мінімуму до точки локального максимуму з додатнім кутовим коефіцієнтом; точка локального максимуму; відрізок прямої від точки локального максимуму до точки локального мінімуму з від’ємним кутовим коефіцієнтом; точка локального мінімуму. Слід зауважити, що в межах одного кардіоциклу без аномалій (екстрасистол) просторова частота фронтів R-зубця більше просторових частот інших складових цього кардіоциклу.

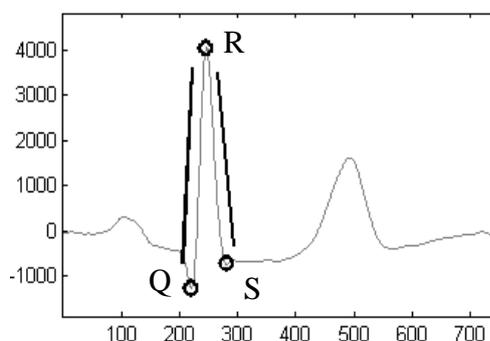


Рисунок 3.2 – Структурне представлення R-зубця

Для спрощення моделі R-зубця можна вважати, що відрізки прямих, якими апроксимовано сигнал від локального мінімуму до точки R та від точки R до наступного локального мінімуму, мають порівняні за абсолютним значенням кутові коефіцієнти. Таке спрощення, без втрати загальності, дозволяє використовувати єдине абсолютне значення порога просторової частоти при якому знайдені відрізки прямих приймаються як такі, що відповідають моделі.

3.2.2 Алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності

Наведені у п. 2.2.4 умови для відшукування на графіку реалізації невідомої функції інтервалів аргументу, на яких вона може бути апроксимована відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом, що відповідає обраним обмеженням, дозволяють реалізувати програмно фільтри просторових частот при змінній роздільній здатності.

В основу алгоритму сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності покладені такі міркування. Оскільки фронти R-зубця в межах одного кардіоциклу без аномалій мають найбільшу просторову частоту, то пошук складових R-зубця можна виконувати як пошук розривів неперервності невідомої кусково-гладкої функції при змінній роздільній здатності і при змінному значенні порога d , який розраховано заздалегідь для кожної роздільної здатності. Даний алгоритм призначений для визначення точок Q, R, S у кожному кардіоциклі кардіосигналу. Розглядається дискретна реалізація функції кардіосигналу $y = f(x)$, яка визначена на інтервалі $[a, b]$, при змінній роздільній здатності. Під дискретною реалізацією 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 і 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 , $j = \overline{1, J}$ по послідовності значень відліків $w_j = \{y_{q(j-1)+1}, y_{q(j-1)+2}, \dots, y_{q(j-1)+q}\}$, 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.

У моделі R-зубця застосовуються поняття інтервалу аргументу, на якому функція може бути лінійно апроксимована, та локального екстремуму. Таким чином, подія набуває додаткової ознаки – «тип події». Випадок, коли $|z_j - z_{j+1}| > d$, де d – певний поріг, буде мати тип «розрив неперервності функції». Подія цього типу 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. Локальний екстремум 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 та 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 у 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.

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 подій

кожного типу. Наведемо їх на прикладі списків подій типу «розрив градієнта функції».

Кожному накладенню сітки n відповідає список $\{i^{(j)}\}_n$ подій типу «розрив градієнта функції» та список інтервалів «точних» відліків $\{l^{(j)}\}_n$, на яких ці події зафіксовано. Елементи списків $\{l^{(j)}\}_n$ та $\{l^{(j)}\}_{n+1}$ 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 $\{l^{(m)}\} = \bigcup_{n=1}^N \{l^{(j)}\}_n$, де m – поточна роздільна здатність. Список $\{l^{(m)}\}$ вважається відповіддю щодо сегментації при роздільній здатності m . Кількість елементів у списку $\{l^{(m)}\}$ дорівнює $K^{(m)}$.

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

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. Установлюють нульові значення лічильників відповідності p_1, p_2, p_v, \dots . Установлюють поточний лічильник $p = p_v$, $v = 1$. Задають ширину кожного 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. 3.1; інакше, якщо $m = M$, перехід до п. 4.

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

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

6. 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.

7. 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.

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

3.3 Обґрунтування обраних проектних рішень

При дослідженні завдань, що пов'язані із науковим пошуком, втілення отриманих результатів у реальні інформаційні технології фактично відбувається паралельно із вивченням предметної області. Тобто в умовах невизначеності необхідно прийняти певні проектні рішення стосовно створюваного програмного забезпечення.

Оскільки створюване програмне забезпечення після впровадження повинно отримувати супровід від розробника та буде зазнавати модифікацій, доцільно було б одразу обрати методологію ітеративно-інкрементного створення програмного забезпечення [56]. В рамках цієї методології версія програмного забезпечення із мінімально-прийнятною функціональністю є результатом першого циклу розробки. При цьому в фазах циклу 1 повинна бути створена модель предметної області та отримані представлення, необхідні для розуміння роботи створюваного програмного забезпечення всіма зацікавленими особами. Але під час вирішення завдань, що пов'язані із науковим пошуком, створюване програмне забезпечення є в той самий час інструментом, який дозволяє автоматизувати дослідження. Тобто всі вимоги до програмного забезпечення перед початком роботи не можуть бути визначені: є ризик отримати бажані наукові результати не з першої спроби (або не отримати взагалі).

Для швидкої перевірки нових гіпотез під час дослідження, доцільно використовувати систему (інтегроване середовище) із вбудованими засобами програмування (інтерпретатор деякої мови програмування) та візуалізації результатів, наприклад Matlab, що сприятиме швидкому отриманню діючих прототипів програмного забезпечення. Така система має базовий набір необхідних інструментів, що дозволяє зекономити час на створенні необхідної інфраструктури та зосередитися на самому дослідженні. Проводячи паралель із тришаровою архітектурою програмних систем [57], при виконанні дослідження будуть використовуватися вже реалізовані у інтегрованому середовищі шари

джерела даних та представлення, що дозволить зосередитись на бізнес-логіці застосування. Тобто під час створення прототипу програмного забезпечення необхідно мати на увазі, що створюється підсистема обробки сигналів, а підсистеми введення/виведення та відображення результатів є зовнішніми до неї.

На цьому етапі можна застосувати процедурну парадигму програмування, де структурними елементами є процедури та функції. Такий підхід реалізує типове рішення, що називається «сценарій транзакцій» (Transaction Script). Але при відображенні за допомогою такого підходу предметної області, об'єкти якої мають багато властивостей та складні механізми взаємодії, ускладнюється внутрішня структура застосування, що призводить до росту витрат часу на його модифікацію та налагодження.

З емпіричного графіка залежності вартості реалізації від складності логіки предметної області (рис. 3.3) видно, що почавши розробку програмного забезпечення з реалізації варіанту «сценарій транзакцій» необхідно в певний момент часу зробити перехід до типового рішення «модель предметної області» (Domain Model) для зниження витрат у довгостроковій перспективі [57].

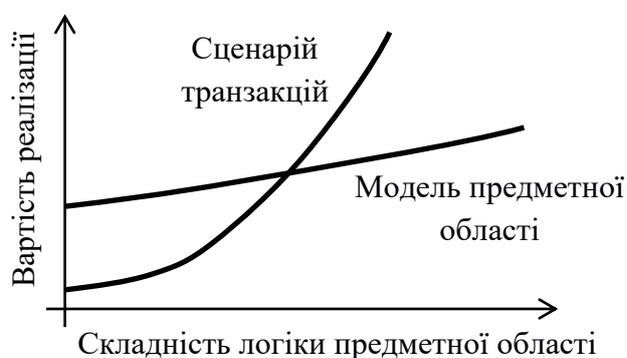


Рисунок 3.3 [57] – Залежність вартості реалізації різних схем організації бізнес-логіки від її складності

Виходячи з постановки завдань у п. п. 2.2.3 та 2.2.4, можна зробити припущення, що логіка досліджуваної предметної області є досить складною: рішення щодо сегментації приймається при розгляді всіх окремих відповідей при всіх роздільних здатностях, з якими розглядалася реалізація невідомої функції. Водночас простежується можливість декомпозиції поставленої задачі на окремі

частини, що мають меншу складність: визначити відповідь щодо сегментації при заданій роздільній здатності. Оскільки осі на наведеному графіку безрозмірні, то неможливо визначити координати точки перетину обох кривих, тобто не зрозуміло, за яких умов слід змінити парадигму програмування під час роботи над програмним забезпеченням.

Оскільки у програмному забезпеченні повинна бути втілена інформаційна технологія, яка, насамперед, є результатом дослідження при розв'язанні задачі наукового пошуку, то для задоволення всіх перелічених вище обмежень природнім буде поставити у відповідність точці перетину кривих на рис. 3.3 момент створення працездатного прототипу програмного забезпечення. Тоді роботи по створенню прототипу доцільно виконувати в рамках однієї з методик методології гнучкої розробки програмного забезпечення. Викладені у маніфесті [58] ключові принципи методології гнучкої розробки добре узгоджуються з роботою над задачами наукового пошуку: наголошується на важливості комунікацій між учасниками та готовності до змін, надається перевага отриманню працюючого продукту, а не створенню вичерпної документації. Надання переваги створенню працюючого продукту не означає, що взагалі не буде створено ніякої документації. Будуть створені лише дійсно необхідні документи у обсязі, що необхідний для розуміння роботи програмного забезпечення.

Якщо поставлену задачу розв'язано, тобто створено алгоритм розв'язку цієї задачі та його працездатність підтверджено прототипом програмного забезпечення, доцільно перейти до об'єктно-орієнтованої парадигми програмування та використавши результати прототипування, за допомогою зворотного проектування [59], створити модель предметної області. В рамках цієї моделі кожний об'єкт реалізує лише функції, притаманні його природі, замість зосередження всієї логіки, що відповідає певній дії користувача, в одній процедурі. Дана модель природнім чином відображає ієрархічні залежності між об'єктами. Програмне забезпечення, що реалізує модель предметної області, повинно бути створено за допомогою мови програмування високого рівня, наприклад, C#.Net, у вигляді динамічних бібліотек класів.

На підставі аналізу графіка з рис. 3.3 можна означити підхід до побудови інформаційної технології, який дозволить задовольнити вимоги стосовно швидкої перевірки нових гіпотез, що виникають під час дослідження, та зменшення вартості реалізації у довгостроковій перспективі:

- окремі прості дії над даними описуються та налагоджуються як сценарії транзакцій;
- створювані компоненти інформаційної технології повинні реалізовувати модель предметної області.

Описаний вище підхід потребує поєднання двох різних методологій створення програмного забезпечення у єдиному робочому процесі. Це можна зробити, наприклад, інкапсулюючи створення працездатного прототипу програмного забезпечення за однією з методик методології гнучкої розробки у додатковому «циклі 0» методології ітеративно-інкрементної розробки програмного забезпечення. Таке рішення є допустимим, оскільки працездатний прототип можна розглядати як випуск продукту, яким завершується кожний цикл у методології ітеративно-інкрементної розробки програмного забезпечення. При цьому завершення «циклу 0» можна розглядати як характеристику точки перетину кривих на рис. 3.3.

Переваги описаного підходу:

- відносно малий час створення діючого прототипу програмного забезпечення;
- під час створення діючого прототипу неодмінно відбувається вивчення предметної області із встановленням необхідних зв'язків між об'єктами;
- діючий прототип може використовуватися для подальших досліджень одночасно із створенням моделі предметної області та реалізації її у вигляді динамічних бібліотек класів;
- оскільки програмне середовище Matlab дозволяє під'єднувати сторонні бібліотеки класів, то подальші дослідження та прототипування нових рішень відбуваються за участю створюваного програмного забезпечення, а створені сценарії транзакцій (процедури та функції в Matlab) можна далі

переносити як методи до відповідних класів моделі предметної області, виконавши лише синтаксичні перетворення коду;

– у разі, якщо задачу розв’язати не вдалося, витрати часу дослідника на створення програмного забезпечення будуть мінімальними.

3.4 Моделі, що описують інформаційну технологію

Структура та поведінка створюваної інформаційної технології оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності можуть бути описані за допомогою сімейства моделей. Тоді архітектура інформаційної технології описуватиметься за допомогою представлень цих моделей, до яких входять лише ті частини моделей, що впливають на архітектуру [56]. Представлення моделі є поглядами на модель під різними кутами, кожен з яких висвітлює певне коло питань [60]. На відміну від [60] у [61] розглядаються три представлення моделі системи: а) використання; б) структури; в) поведінки, оскільки такий набір представлень є ортогональним та відповідає класифікації діаграм мови UML.

Як було зазначено у п. 3.3, перехід до створення інформаційної технології відбувається лише за умови отримання бажаних результатів на етапі дослідження, що підтверджується діючим прототипом програмного забезпечення. Отримана під час створення прототипу інформація використовується як вхідна для побудови моделі інформаційної технології. При цьому можна визначити основні варіанти використання створюваної інформаційної технології, реалізовані алгоритми можуть бути описані за допомогою діаграм діяльності та послідовностей, а її структура може бути описана за допомогою концептуальної моделі (з постановок задач). Концептуальна модель потребує подальшого уточнення, але її наявність дозволяє визначитися з моделлю життєвого циклу програмного забезпечення:

– водоспадна модель життєвого циклу не може бути застосована через невизначеність всіх вимог до програмного забезпечення;

– необхідно скористатися однією з ітераційних моделей життєвого циклу, що дозволить поступово уточнити модель та визначити її архітектурні представлення.

3.4.1 Представлення використання

Функціональні вимоги до інформаційної технології оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності, що створюється, описують за допомогою моделі варіантів використання (ВВ). Модель варіантів використання є сукупністю діаграм варіантів використання, які повинні відображати набори варіантів використання та актантів (actors), а також асоціації між кожною парою «варіант використання – актант», що взаємодіє [56]. Можливі варіанти використання визначаються цілями, що ставлять перед собою користувачі інформаційної технології. Актантами можуть бути як люди, так й інші системи, або зовнішнє обладнання комп'ютера, що взаємодіє з інформаційною технологією (рис. 3.4, 3.5).

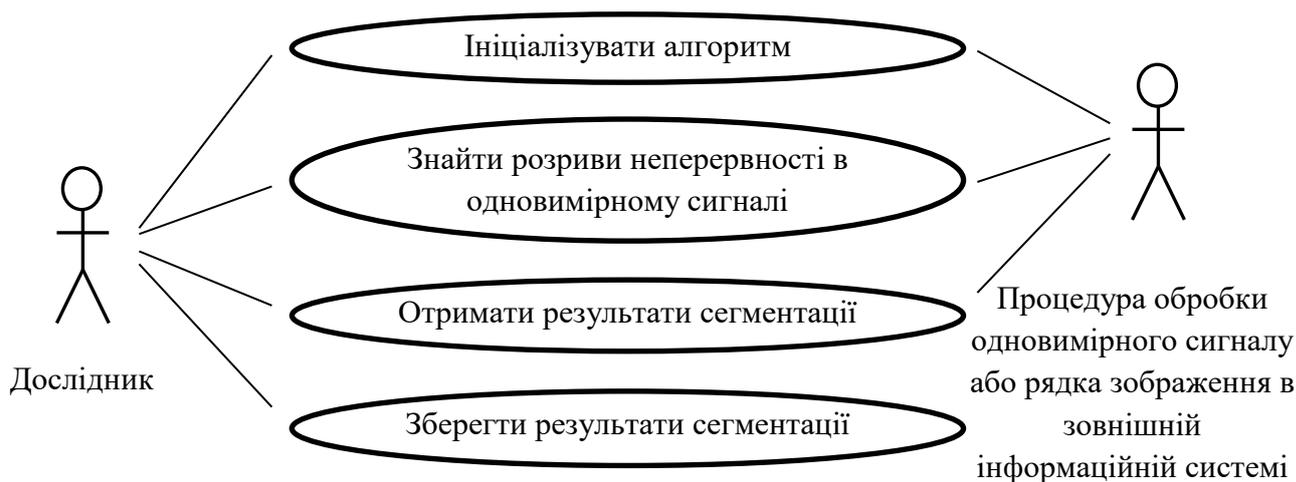


Рисунок 3.4 – Діаграма ВВ «Наближене визначення розривів неперервності функції за її дискретною реалізацією при змінній роздільній здатності»

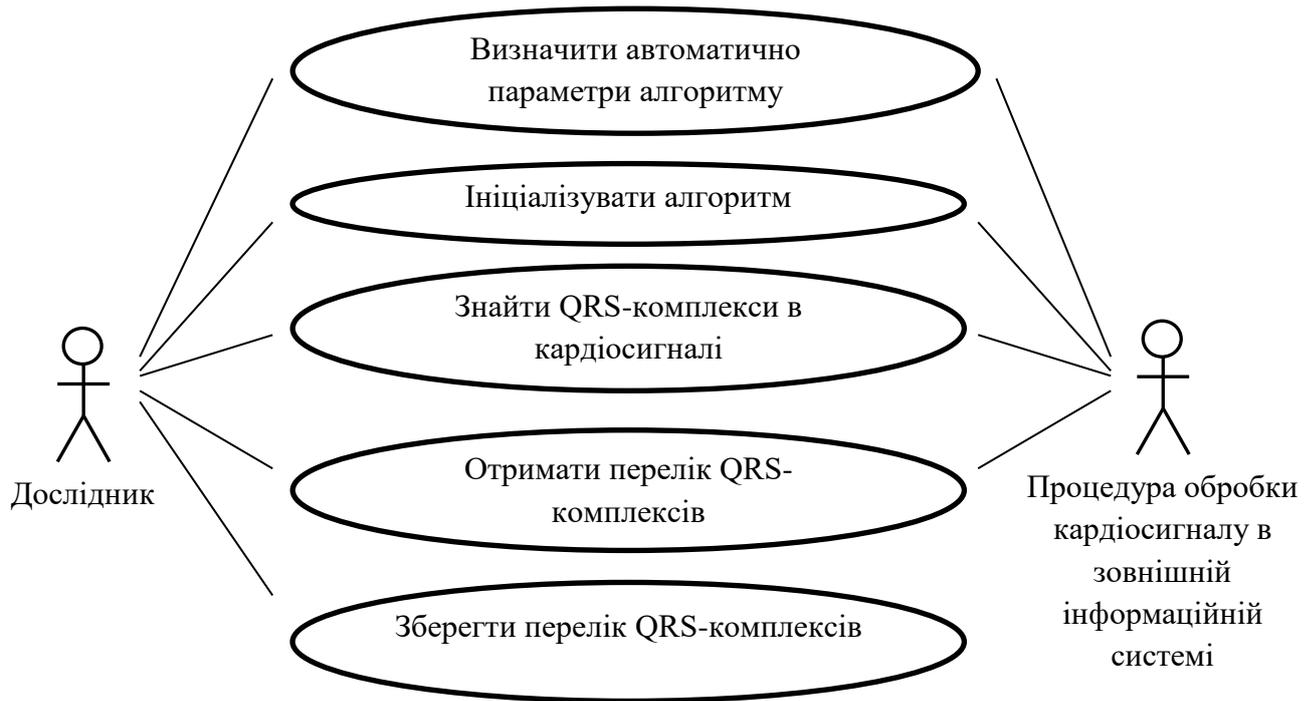


Рисунок 3.5 – Діаграма ВВ «Виділення QRS-комплексів у кардіосигналі при змінній роздільній здатності»

Користувач може виконувати ролі декількох актантів так само, як і поведінка одного актанта може спостерігатися у декількох користувачів. Оскільки варіант використання «Визначення інтервалів аргументу, на яких функції можуть бути апроксимовані відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом, що відповідає обраним обмеженням», відповідно до п. 2.2.4, відрізняється від варіанта використання «Наближене визначення розривів неперервності функції за її дискретною реалізацією при змінній роздільній здатності» лише в частині ініціалізації алгоритму, його не було включено до архітектурного представлення використання.

Варіанти використання «Знайти розриви неперервності в одновимірному сигналі» та «Знайти QRS-комплекси в кардіосигналі» описані у вигляді алгоритмів у п. 3.1 та 3.2.2 відповідно.

З діаграм рис. 3.4, 3.5 видно, що між актантами може бути встановлено відношення узагальнення (рис. 3.6), а також визначені зв'язки між варіантами використання (рис. 3.7). Тобто програмне забезпечення, яке створюється з метою

інтеграції до вже існуючих інформаційних систем, може бути отримане шляхом виключення окремих компонентів із програмного забезпечення, яке призначене для автоматизації досліджень. Для забезпечення цієї можливості шар бізнес-логіки у тришаровій моделі програмного забезпечення повинен мати модульну структуру.



Рисунок 3.6 – Відношення між актантами

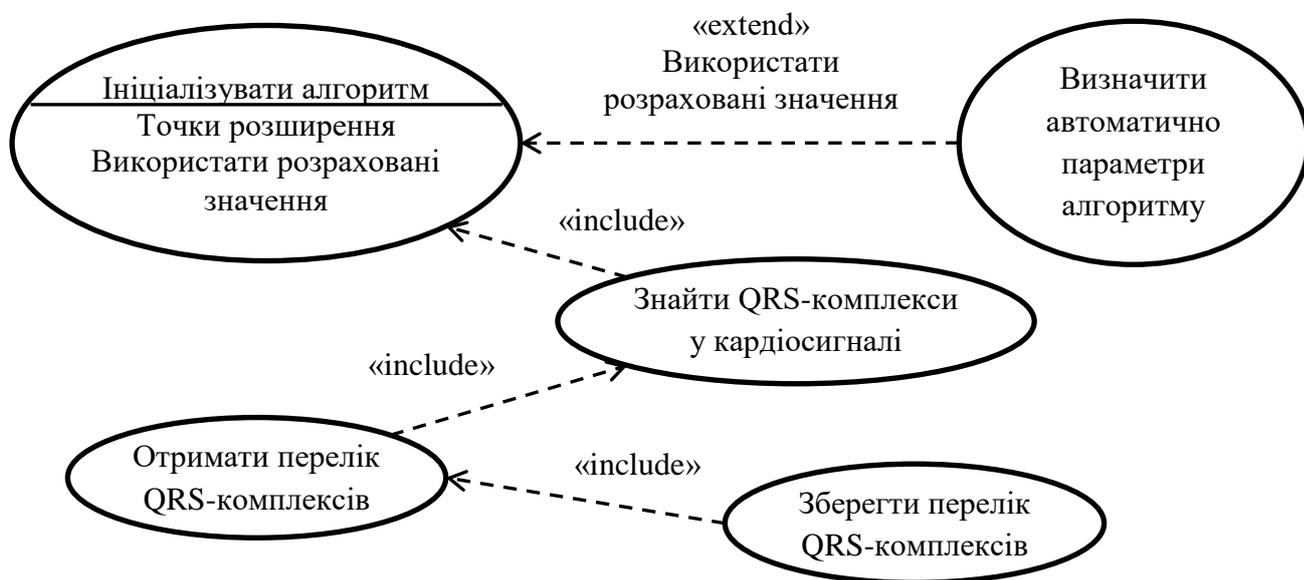


Рисунок 3.7 – Організація варіантів використання

3.4.2 Представлення структури

Поділ на модулі шару бізнес-логіки розглянемо на прикладі застосування для знаходження QRS-комплексів у кардіосигналі. Це застосування складається з трьох частин, відношення між якими показані на рис. 3.8.

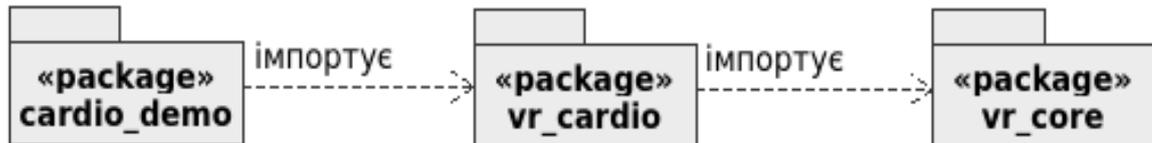


Рисунок 3.8 – Діаграма пакетів застосування для знаходження QRS-комплексів у кардіосигналі

До пакету `vr_core` було зібрано класи, що узагальнюють обробку сигналу при змінній роздільній здатності. Класи пакету `vr_cardio` успадковують властивості та функціональність від класів з пакету `vr_core` та реалізують функціональність, що специфічна для пошуку R-зубців у кардіосигналі (рис. 3.9). Пакет `cardio_demo` створено для демонстрації можливостей розробленого алгоритму сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності із підтримкою тришарової архітектури програмного забезпечення.

Між класом `CSignalWndCardio`, що представляє частину сигналу у поточному положенні ковзного вікна, та `CResCardio`, що представляє сигнал у поточному ковзному вікні при певній роздільній здатності визначено відношення агрегації: поточне ковзне вікно може містити представлення сигналу при більше ніж одній роздільній здатності. Клас `CSegmentCardio` представляє весь кардіосигнал, який буде переглядатися по частинах, у ковзному вікні, під час оброблення. Оскільки зразок сигналу у ковзному вікні є частиною конкретного кардіосигналу та параметри алгоритму сегментації застосовуються до цього ж кардіосигналу і не можуть існувати окремо, між класом `CSegmentCardio` та класами `CSignalWndCardio`, `CAlgParams` встановлено відношення композиції.

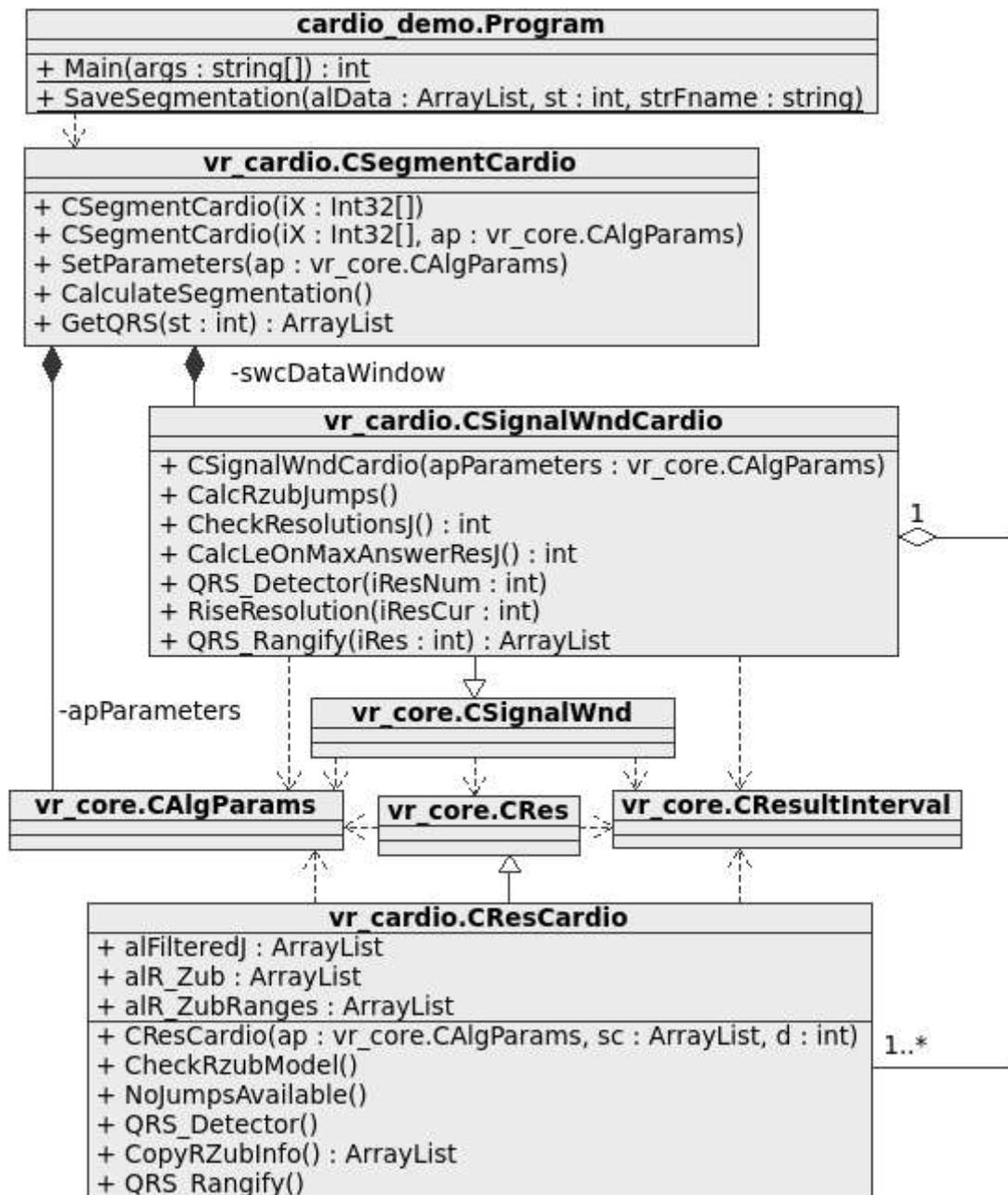


Рисунок 3.9 – Діаграма класів застосування для знаходження QRS-комплексів у кардіосигналі

3.4.3 Представлення поведінки

Взаємодії між об'єктами класів застосування відображає діаграма послідовностей (рис. 3.10). Клас Program з модуля cardio_demo містить статичні

методи, що відповідають за зчитування даних та збереження результатів. В рамках застосування для знаходження QRS-комплексів у кардіосигналі цей клас реалізує шар джерела даних. Зчитаний кардіосигнал, представлений за допомогою об'єкта класу CSegmentCardio, переглядається за допомогою ковзного вікна, яке є об'єктом класу CSignalWndCardio.

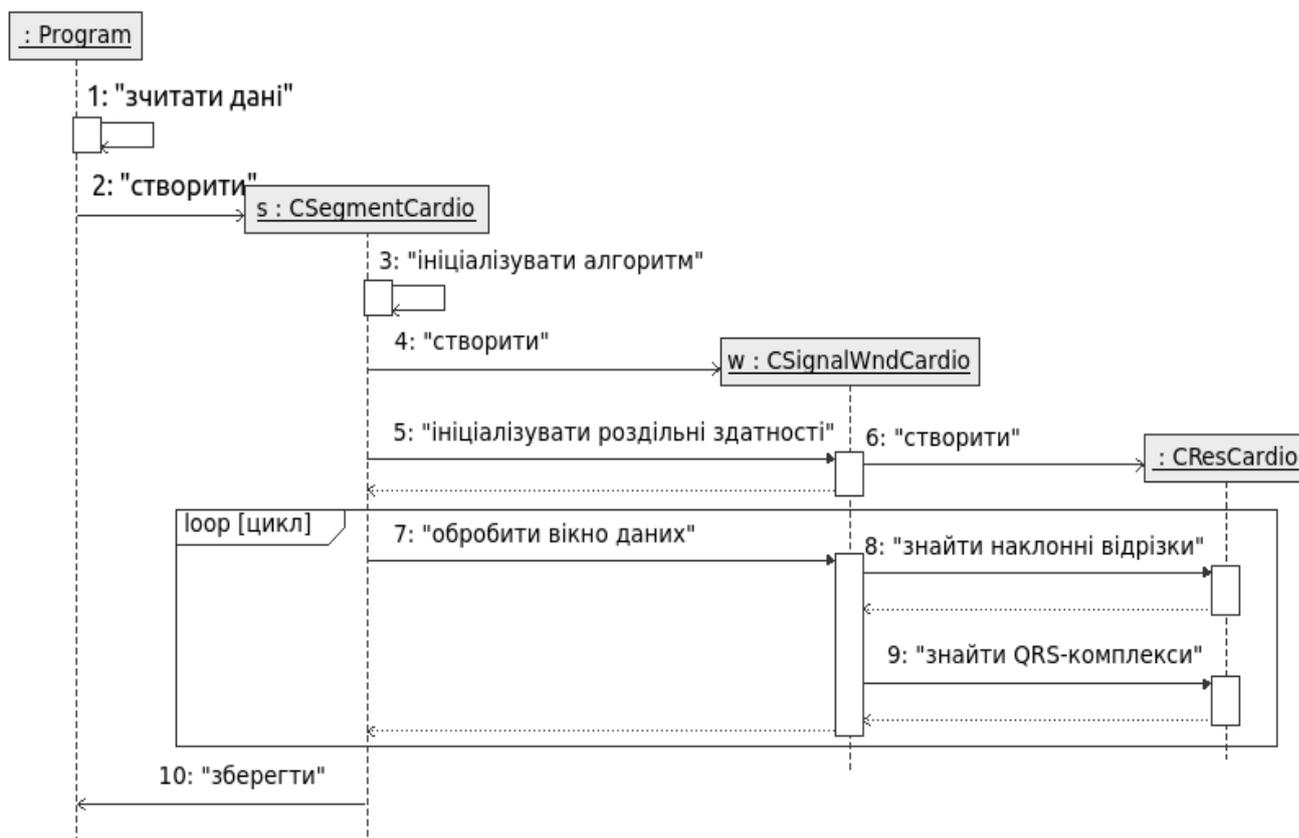


Рисунок 3.10 – Діаграма послідовностей застосування для знаходження QRS-комплексів у кардіосигналі

З урахуванням значень параметрів алгоритму створюється опис всіх можливих роздільних здатностей (об'єкти класу CResCardio), з якими буде переглянуто поточний фрагмент кардіосигналу, після чого до об'єкта ковзного вікна послідовно завантажуються порції даних кардіосигналу, до яких будуть застосовані основні кроки алгоритму з п. 3.2.2 (рис. 3.11). Клас CSegmentCardio містить метод для отримання результатів обробки, які можуть бути передані до шару джерела даних з метою подальшого збереження, або до функцій з шару

представлення для подальшого відображення (у застосуванні з прикладу, класи, що відповідають шару представлення, відсутні).

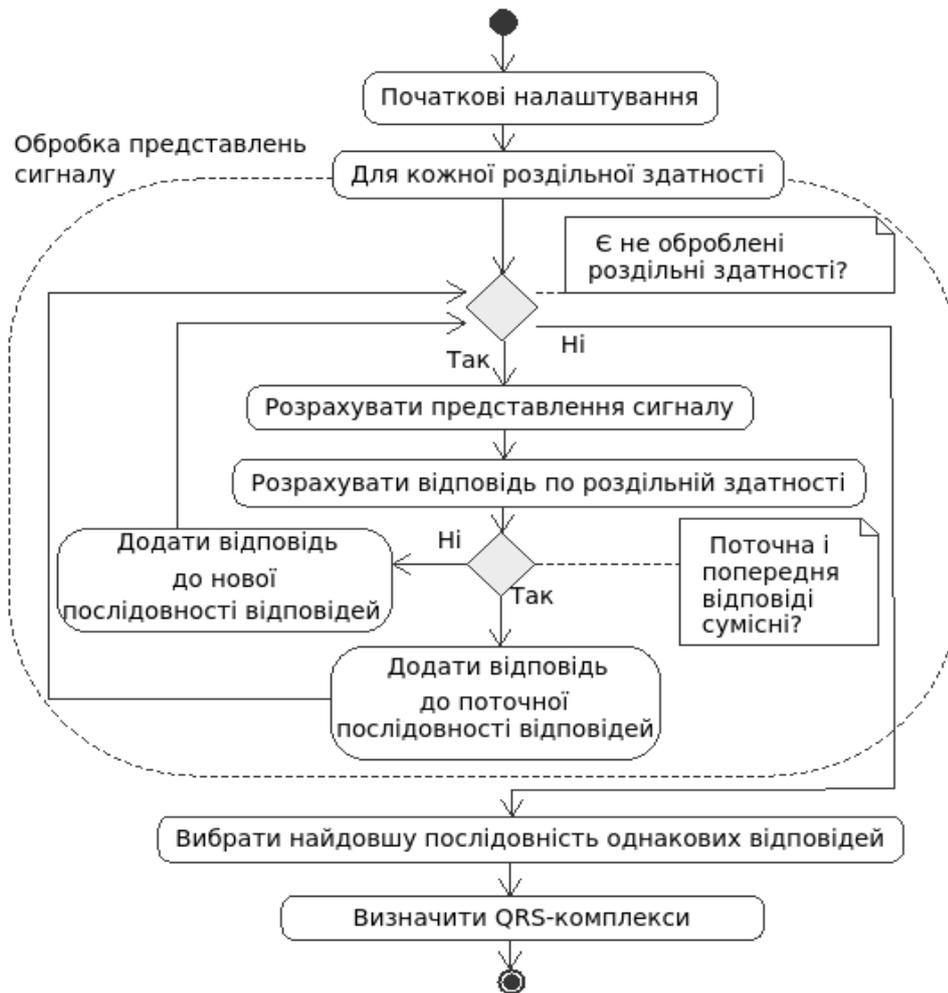


Рисунок 3.11 – Діаграма діяльності «Алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності»

Операції перетворення представлення сигналу при кожній роздільній здатності зі списку і відшукування відповіді по роздільній здатності (рис. 3.11) не залежать від номера ітерації, а отже можуть бути не тільки винесені з циклу по роздільних здатностях, а й виконані паралельно. Це зауваження стосується як алгоритму із п. 3.2.2, так і базового алгоритму (п. 3.1). Розпаралелювання здійснюється, наприклад, за допомогою можливостей по векторизації алгоритмів у середовищі Matlab. Призначений для обробки масив даних представляють у матричній або векторній формі. Тоді циклічна послідовна обробка цих даних замінюється операціями над векторами і матрицями, що можуть бути виконані паралельно. З урахуванням цього, на рис. 3.12 наведено діаграму діяльності, що

відображає процес паралельного обрахування відповідей щодо сегментації при кожній роздільній здатності.

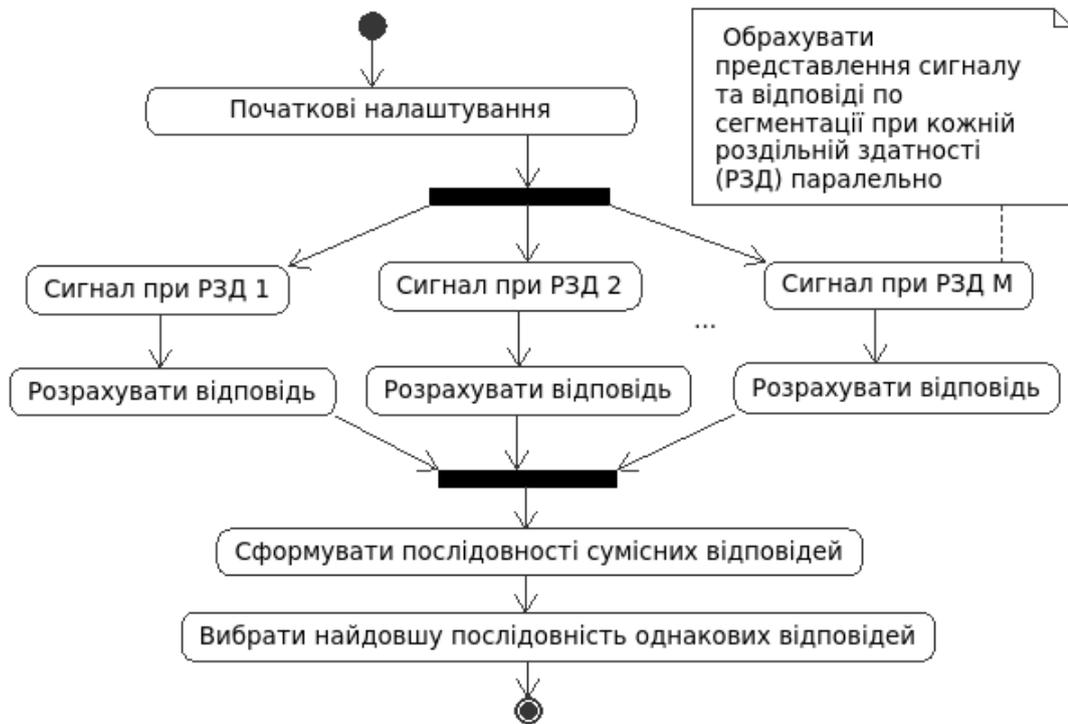


Рисунок 3.12 – Окремі операції алгоритмів сегментації при змінній роздільній здатності можуть виконуватися паралельно

3.5 Склад створеної інформаційної технології

З метою полегшення інтеграції складових частин запропонованої інформаційної технології оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності у існуючі інформаційні системи та спрощення процесу прототипування нових засобів обробки сигналів із використанням поняття змінної роздільної здатності, до складу програмного забезпечення увійшли як компоненти, реалізовані мовою C#.Net у вигляді динамічних бібліотек класів, так і компоненти у вигляді пакету функцій, що призначені для виконання у середовищі Matlab:

- `vr_core.dll`: бібліотека базових типів та абстрактних класів для обробки одновимірного сигналу при змінній роздільній здатності, які реалізують запропоновані метод (п. 2.2.3) та алгоритм (п. 3.1);
- `vr_cardio.dll`: бібліотека класів для визначення QRS-комплексів у кардіосигналі при змінній роздільній здатності, які реалізують запропоновані метод із додатковими умовами (п. 2.2.4) та алгоритм (п. 3.2.2);
- `cardio-demo.exe`: консольне застосування, призначене для демонстрації можливості легкої інтеграції створеного програмного забезпечення до існуючої інформаційної системи, яку організовано за модульним принципом. Вимоги до програмного середовища: операційна система не нижче Microsoft Windows XP, Microsoft .Net Framework 3.5;
- `dll_matlab_demo`: пакет функцій Matlab, які реалізують обробку одновимірного сигналу за допомогою описаних у п. п. 3.1 та 3.2.2 алгоритмів методом сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності (п. п. 2.2.3 та 2.2.4). Визначення меж об'єктів на півтоновому зображенні виконується функцією, яка застосовує алгоритм сегментації кусково-гладкої функції при змінній роздільній здатності до кожного горизонтального і вертикального рядка зображення. До складу пакету увійшли функції, що дозволяють здійснювати покрокову візуалізацію проміжних результатів. Гнучкість у налаштуванні потрібної функціональності програмного забезпечення при проведенні експериментальних досліджень досягається за допомогою вбудованих можливостей середовища Matlab 2010b по під'єднанню зовнішніх динамічних бібліотек.

3.6 Висновки до розділу 3

1. Вперше запропоновано алгоритми, що використовують поняття змінної роздільної здатності для розв'язання задач наближеного визначення розривів

неперервності функції за її дискретною реалізацією та визначення інтервалів аргументу, на яких функція може бути апроксимована відрізком прямої з кутовим коефіцієнтом, що відповідає обраним обмеженням.

2. Розглянуто практичну задачу сегментації кардіосигналу на R-R інтервали. Для її розв'язання запропоновано модифікацію алгоритму структурного аналізу одновимірного сигналу при змінній роздільній здатності.

3. Розроблено інформаційну технологію оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності до складу якої увійшли програмні реалізації запропонованих алгоритмів.

4. Проведено розробку програмного забезпечення із застосуванням комбінованого підходу, що дозволило скоротити витрати часу на дослідження та створення інформаційної технології. Прототип програмного забезпечення створювався за методологією гнучкої розробки програмного забезпечення. Даний етап створення інформаційної технології було інкапсульовано у додатковому «циклі 0» методології ітеративно-інкрементної розробки програмного забезпечення. У «циклі 0» розробка велася у процедурній парадигмі програмування з використанням інтегрованого середовища Matlab. Створеними у «циклі 0» документами є описи алгоритмів розв'язання поставлених задач та опис внутрішньої структури програмного забезпечення. Застосування операції зворотного проектування до прототипу програмного забезпечення дозволило перейти до об'єктно-орієнтованої парадигми програмування, створити модель предметної області та отримати для неї представлення структури. Представлення варіантів використання та поведінки моделі предметної області були отримані безпосередньо зі створених під час роботи в «циклі 0» документів.

Основні результати розділу опубліковані автором у роботах [5, 9, 13, 15].

РОЗДІЛ 4

ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ І СИГНАЛІВ ПРИ ЗМІННІЙ РОЗДІЛЬНІЙ ЗДАТНОСТІ

4.1 Експерименти з модельними сигналами та півтоновими зображеннями

Для підтвердження працездатності запропонованого методу сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності для задач оброблення зображень і сигналів було виконано серію експериментів щодо сегментації одновимірних сигналів та визначенню меж об'єктів на півтонових зображеннях. Експерименти було виконано із застосуванням запропонованої інформаційної технології оброблення зображень і сигналів при змінній роздільній здатності.

Зображення для модельних експериментів були підготовлені у графічному пакеті Corel Draw X6. Реальні півтонові зображення були взяті з BSDS300 – бази даних зображень університету Берклі, Каліфорнія для перевірки та оцінки алгоритмів сегментації [62]. В експериментах із зображеннями та сигналами, що спотворені завадами, до зображення додавався адитивний білий шум.

Одновимірні сигнали були отримані як дискретні реалізації функцій яскравості рядків зображень. Пошук розривів неперервності та розривів градієнта у вигляді локальних екстремумів виконувався із застосуванням алгоритму (п. 3.1), який реалізує метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності (п. 2.2.3).

Для встановлення меж об'єктів на півтонових зображеннях за методом Канні використовувалася функція «edge» з пакету Matlab 2010b у версії з чотирма аргументами. Через аргументи передавалися такі параметри: № 1 – матриця $V(M \times N)$ значень яскравостей кожного пікселя вихідного півтонового зображення; № 2 – ключове слово «'canny'», яке вказує, що необхідно застосувати саме метод Канні; № 3 – порожній масив (задається двома квадратними дужками:

«[]») для використання автоматично розрахованих порогів, по яких визначають «сильні» та «слабкі» межі об'єктів; № 4 – значення параметра σ (середньоквадратичне відхилення нормального закону розподілу ймовірності, яке впливає на розміри апертури фільтра Гауса та значення вагових коефіцієнтів у його матриці). Функція «edge» повертає матрицю $G(M \times N)$, причому $g(m,n) = false$ якщо піксель $v(m,n)$ зображення V не належить межі об'єкта і $g(m,n) = true$ у іншому випадку, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$. Перед відображенням результатів, значення елементів матриці $G(M \times N)$ було інвертовано та перетворено до числового типу даних, щоб позначити «0» пікселі чорного кольору, а «1» – пікселі білого кольору.

Для визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях запропонованим методом кожне вихідне зображення $V(M \times N)$ розглядалося відповідно до рядкової моделі зображення (п. 2.2). Послідовність значень яскравості пікселів вздовж його горизонтального або вертикального рядка розглядалася як дискретна реалізація функції яскравості цього рядка, тобто функції однієї змінної – $\rho_m(x)$ або $\rho_n(y)$ відповідно. Таким чином, особливим кривим рядка зображення ставилися у відповідність точки розриву неперервності функції однієї змінної. До кожного рядка зображення застосовувався алгоритм сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності (п. 3.1). У матриці $G(M \times N)$ накопичувався результат визначення меж об'єктів на зображенні за такими правилами: $g(m,n) = 1$ якщо піксель $v(m,n)$ зображення V не належить до межі об'єкта і $g(m,n) = 0$ – у іншому випадку, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$.

З метою забезпечення можливості порівняння отриманих кожним методом результатів, при застосуванні запропонованого метода здійснювався пошук лише розривів неперервності функції яскравості рядка зображення.

4.1.1 Сегментація модельних сигналів

Роботу запропонованого алгоритму сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності було розглянуто на прикладах сегментації окремих рядків ідеального модельного зображення (рис. 4.1) та того самого зображення із адитивним білим шумом (рис. 4.4) [9 – 12].

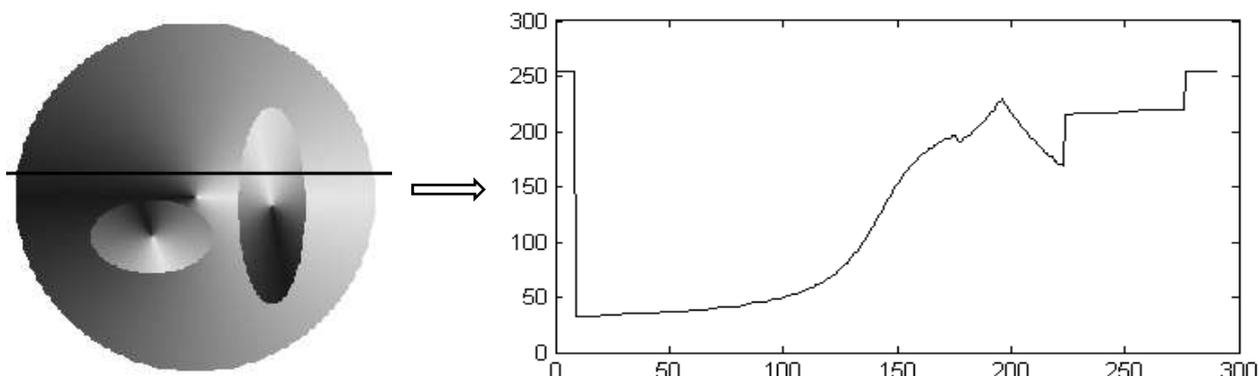


Рисунок 4.1 – Дискретна реалізація функції яскравості певного рядка модельного зображення

На кожному графіку (рис. 4.2, 4.5) по осі абсцис відкладені номери дискретних відліків. По осі ординат на графіках рис. 4.2 а – б, 4.5 а – б відкладені виміряні значення сигналу (яскравості) на кожному відліку, а на графіках рис. 4.2 а.1 – б.1, 4.5 а.1 – б.1 – номери роздільних здатностей у послідовності роздільних здатностей, при яких виконувалася сегментація. Кожна горизонтальна лінія на рис. 4.2 а.1 – б.1, 4.5 а.1 – б.1 відповідає інтервалам дискретних відліків сигналу, у межах яких, можливо, є розрив неперервності функції (рис. 4.2 а.1, 4.5 а.1), або розрив неперервності її градієнта (рис. 4.2 б.1, 4.5 б.1) при кожній роздільній здатності. На рис. 4.2 а.1, 4.5 а.1 горизонтальними лініями чорного кольору позначені інтервали аргументу з різкими змінами значення функції – стрибками – від більшого до меншого значення, сірими пунктирними лініями – інтервали аргументу зі стрибками від меншого до більшого значення. На рис. 4.2 б.1, 4.5 б.1 горизонтальними лініями чорного кольору позначені інтервали аргументу, де може знаходитися локальний мінімум функції, а сірими

пунктирними лініями – інтервали аргументу, де можуть знаходитися її локальні максимуми. Підмножина роздільних здатностей, за якою формується рішення, позначена на відповідних графіках товстими вертикальними лініями чорного кольору. Інформація про наявність локальних екстремумів, що була отримана при низьких роздільних здатностях (рис. 4.5 б), дозволила виключити з розгляду частини сигналу, на яких локальні екстремуми були знайдені при більших роздільних здатностях через вплив завад.

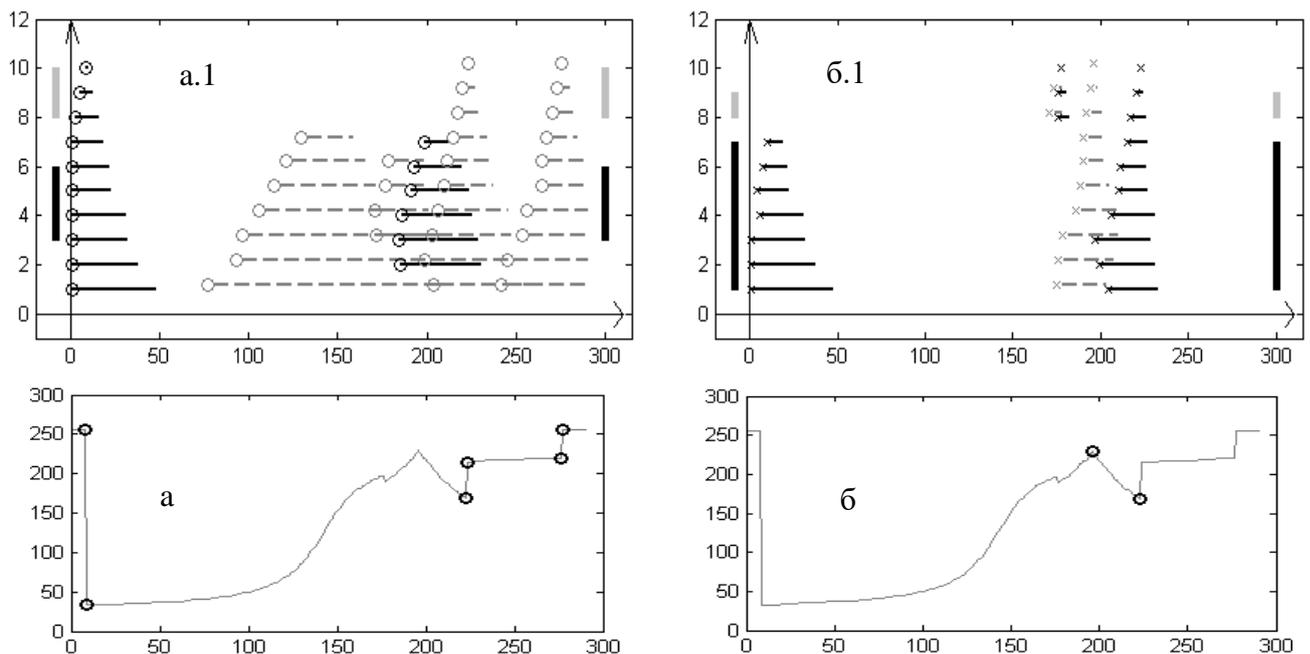


Рисунок 4.2 – Сегментація функції за її дискретною реалізацією алгоритмом, що використовує змінну роздільну здатність: а) знаходження розривів неперервності функції; б) знаходження локальних екстремумів

На рис. 4.3, 4.6 наведено результати сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями запропонованим алгоритмом, що використовує змінну роздільну здатність. Ці експерименти підтверджують, 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.

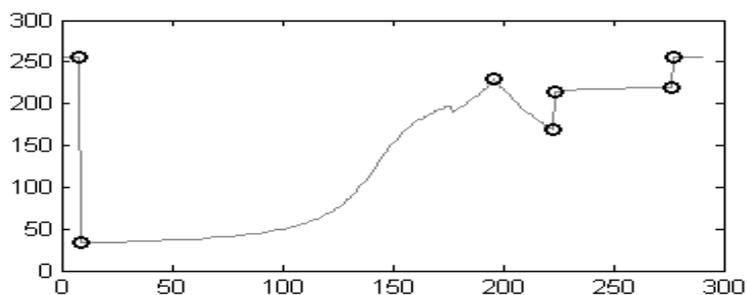


Рисунок 4.3 – Результат сегментації функції яскравості рядка модельного зображення за її дискретною реалізацією

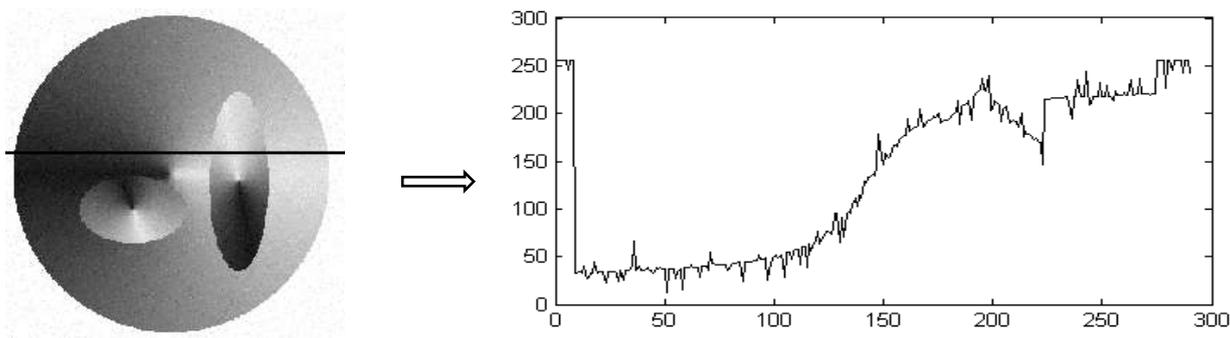


Рисунок 4.4 – Дискретна реалізація функції яскравості певного рядка модельного зображення, що спотворене завадами

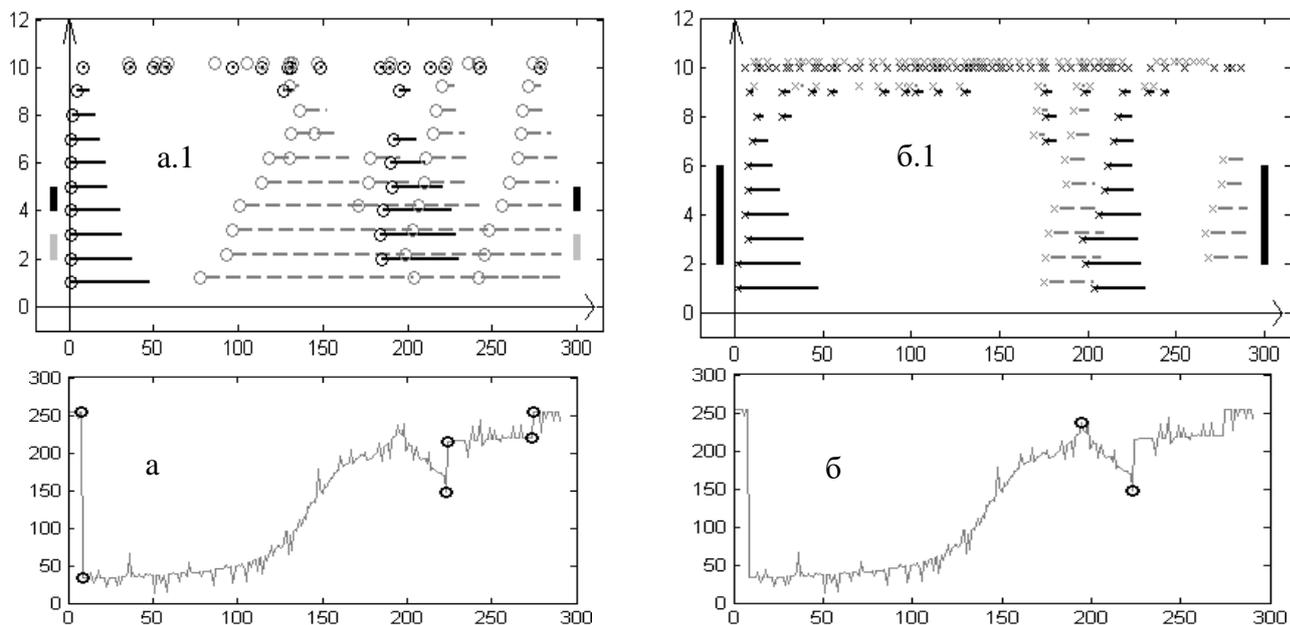


Рисунок 4.5 – Сегментація функції за її дискретною реалізацією (в умовах завад) алгоритмом, що використовує змінну роздільну здатність: а) знаходження розривів неперервності функції; б) знаходження локальних екстремумів

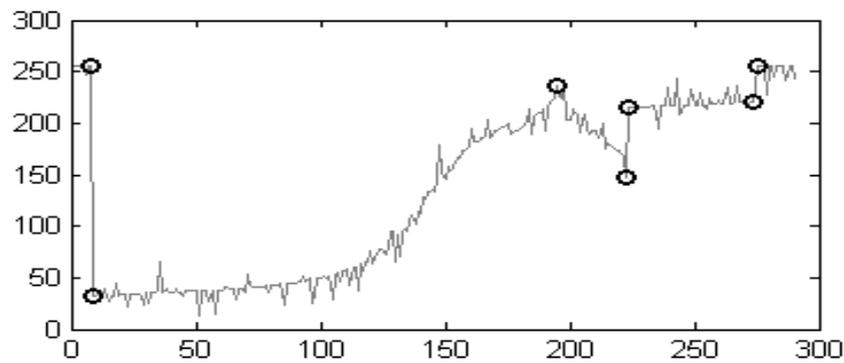


Рисунок 4.6 – Результат сегментації функції яскравості рядка модельного зображення в умовах завад за її дискретною реалізацією

4.1.2 Визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях

З метою порівняння результатів визначення меж об'єктів на зображенні із застосуванням запропонованого методу та прототипу (п. 1.2.2) було виконано експерименти із модельними та реальними півтоновими зображеннями.

У представленні півтонового зображення як декартова клітинного комплексу (п. 2.2) межі об'єктів утворюються послідовностями особливих кривих. Згідно з рядковою моделлю зображення, кожен рядок, горизонтальний і вертикальний, розглядався як дискретна реалізація функції яскравості рядка, для якої виконувався пошук розривів неперервності при змінній роздільній здатності. Знайдені розриви неперервності кусково-гладких функцій яскравості кожного рядка ставилися у відповідність особливим кривим у цих рядках.

У методі Канні значення порогів T_1 і T_2 , $T_1 < T_2$ для визначення меж об'єктів на розмитому зображенні розраховувалися автоматично при кожному значенні σ . Якщо при $\sigma = 1$ результат визначення меж об'єктів, на думку оператора, був незадовільний, значення σ поступово збільшувалося ще кілька разів.

Зображення (рис. 4.7) було успішно сегментовано обома методами. У методі Канні результат було отримано одразу при $\sigma = 1$ і автоматично розрахованих порогах T_1 і T_2 .

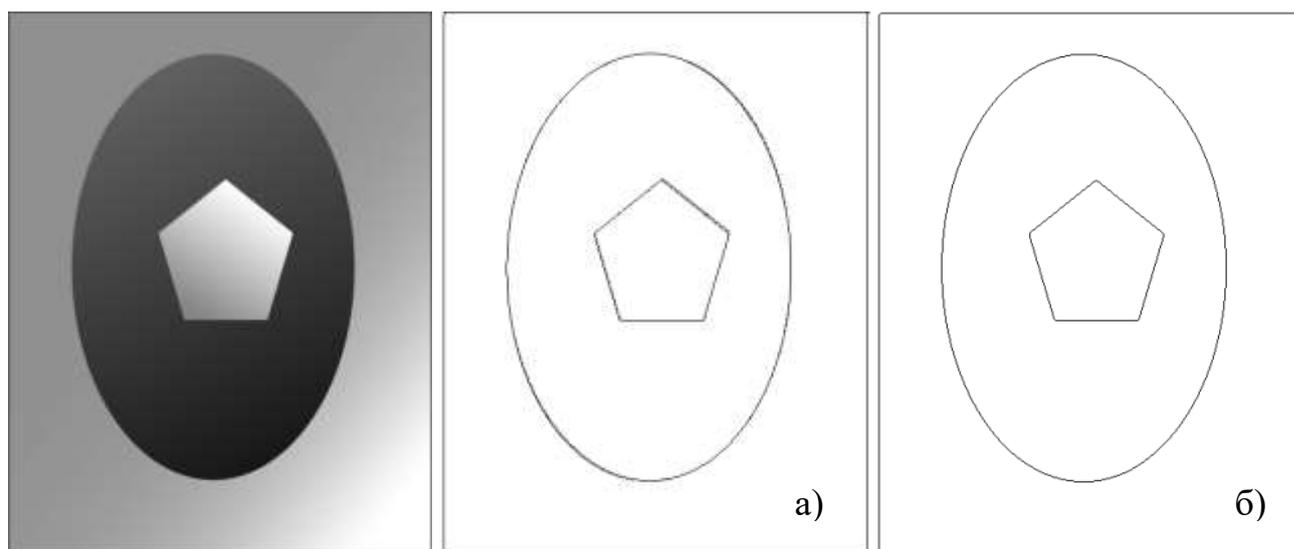


Рисунок 4.7 – Визначення меж об'єктів: а) запропонованим методом;
б) методом Канні

У наступному експерименті (рис. 4.8) запропонований алгоритм успішно впорався із визначенням меж об'єкта на півтоновому зображенні. Водночас отримати задовільну відповідь при застосуванні метода Канні не вдалося.

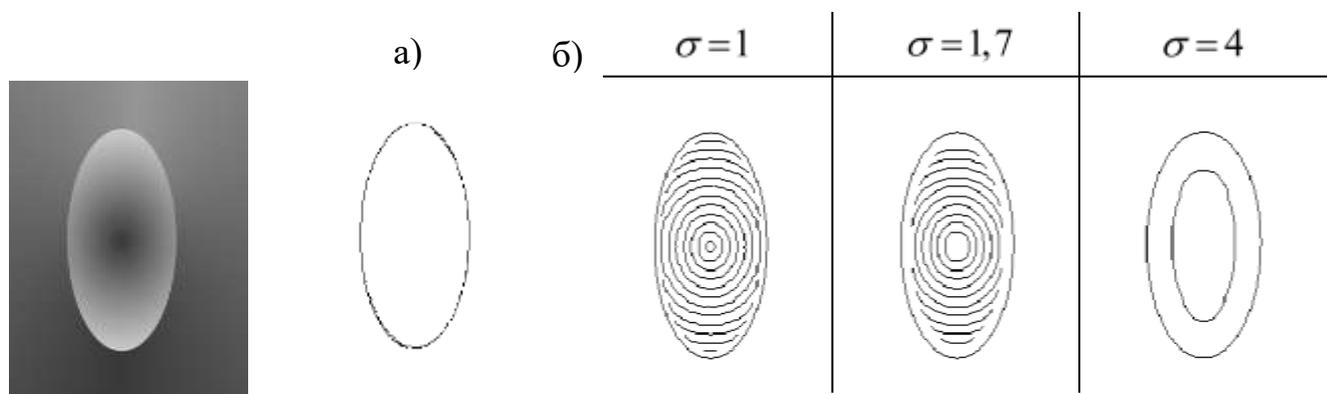


Рисунок 4.8 – Визначення межі об'єкта: а) запропонованим методом;
б) методом Канні для різних значень σ

Зображення, що використовувалися в експериментах у п. 4.1.1 по сегментації функцій яскравості окремих рядків зображень за їх дискретними реалізаціями, були оброблені обома методами (рис. 4.9, 4.10). Ці зображення були створені спеціальним чином так, щоб у певних місцях на них яскравість ззовні та всередині об'єктів співпадала – тобто утворювалися розриви у контурах.

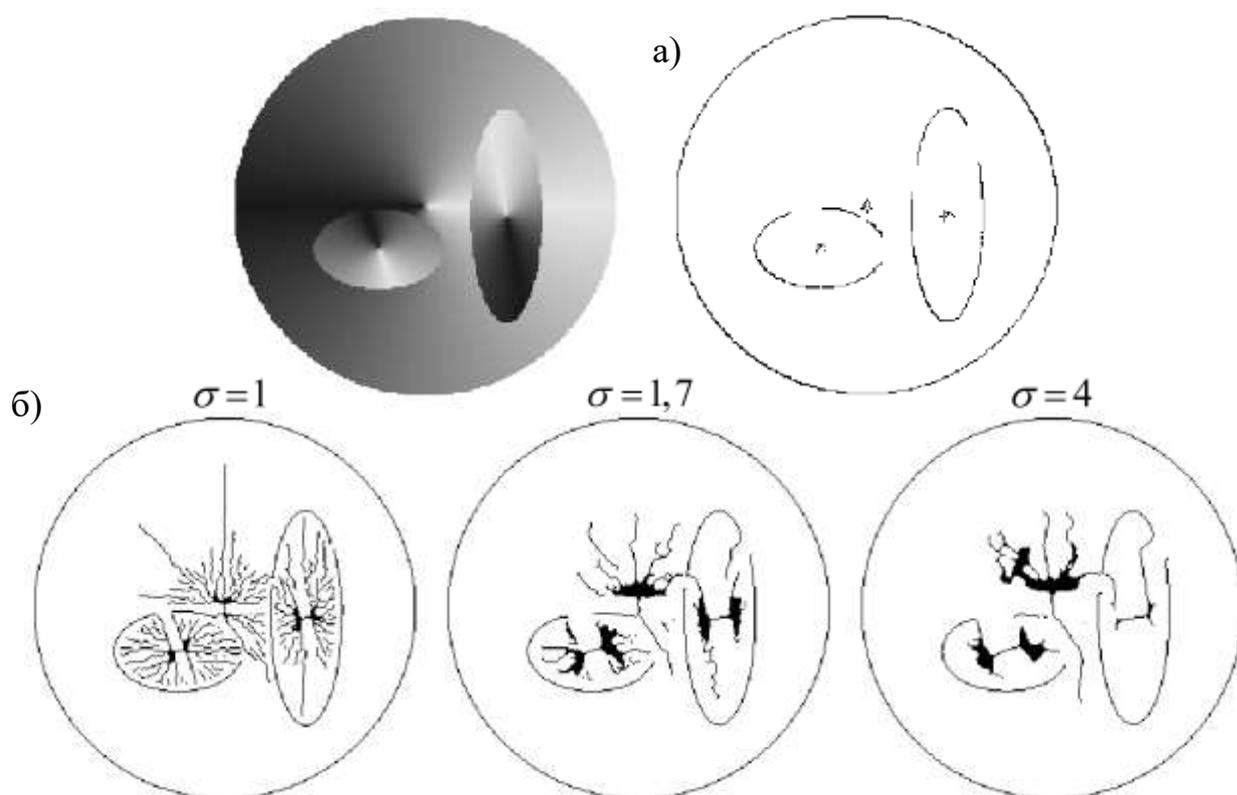


Рисунок 4.9 – Визначення меж об'єктів на зображенні: а) запропонованим методом; б) методом Канні для різних значень σ

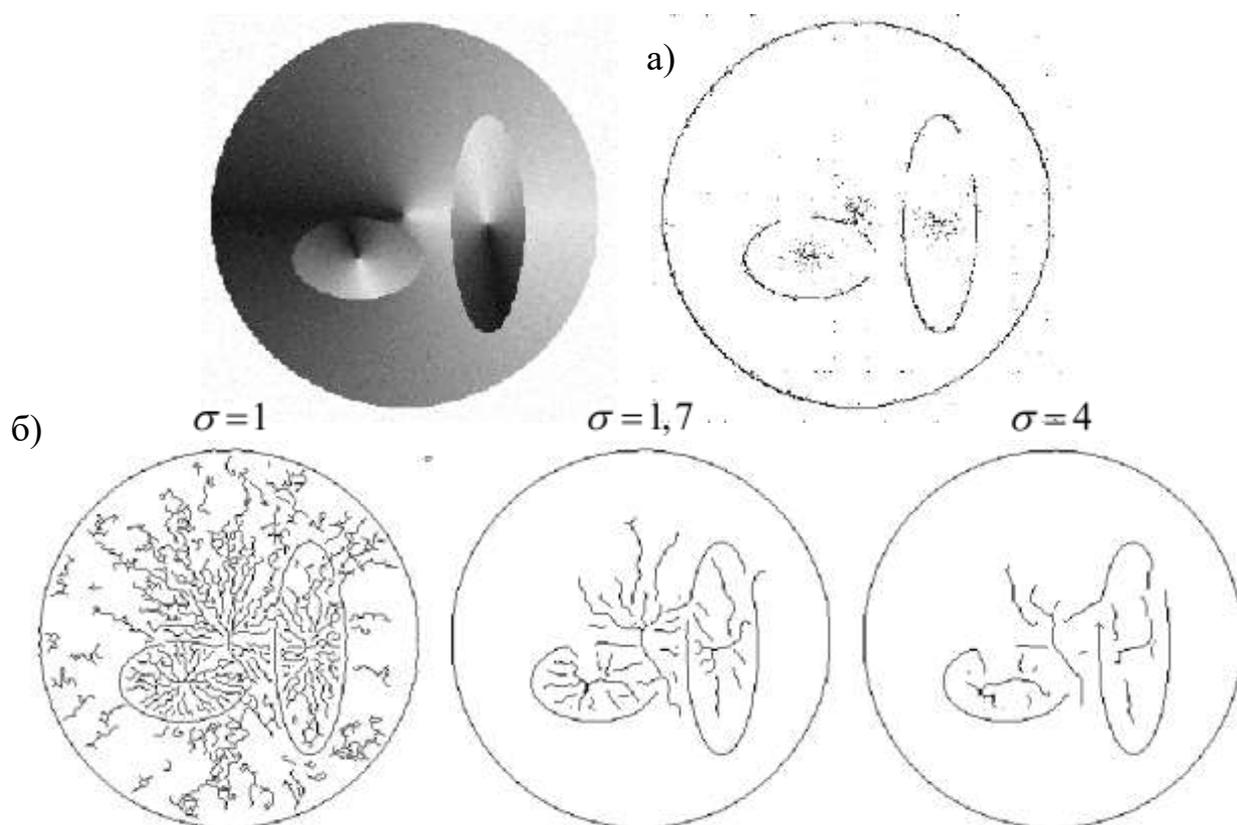


Рисунок 4.10 – Визначення меж об'єктів на зображенні із додаванням білого шуму: а) запропонованим методом; б) методом Канні для різних значень σ

Реальні півтонові зображення були взяті з BSDS300 – розміченої бази даних півтонових зображень, що використовується для перевірки ефективності алгоритмів сегментації зображень [62]. BSDS300 також містить приклади результатів сегментації для кожного алгоритму, який брав участь у тестуванні. Зображення на рис. 4.11 – 4.13 подані у порядку зростання складності згідно з рейтингом BSDS300. Результати сегментації кожного зображення при заданому порозі алгоритмом зі змінною роздільною здатністю представлені на рис. 4.11 а – 4.13 а. Для порівняння, на рис. 4.11 б – 4.13 б наведено перший найкращий результат визначення меж об’єкта на кожному зображенні алгоритмами, які приймали участь у тестуванні університету Берклі. Результати визначення меж об’єктів на зображеннях методом Канні при різних значеннях σ представлені на рис. 4.11 в – 4.13 в.

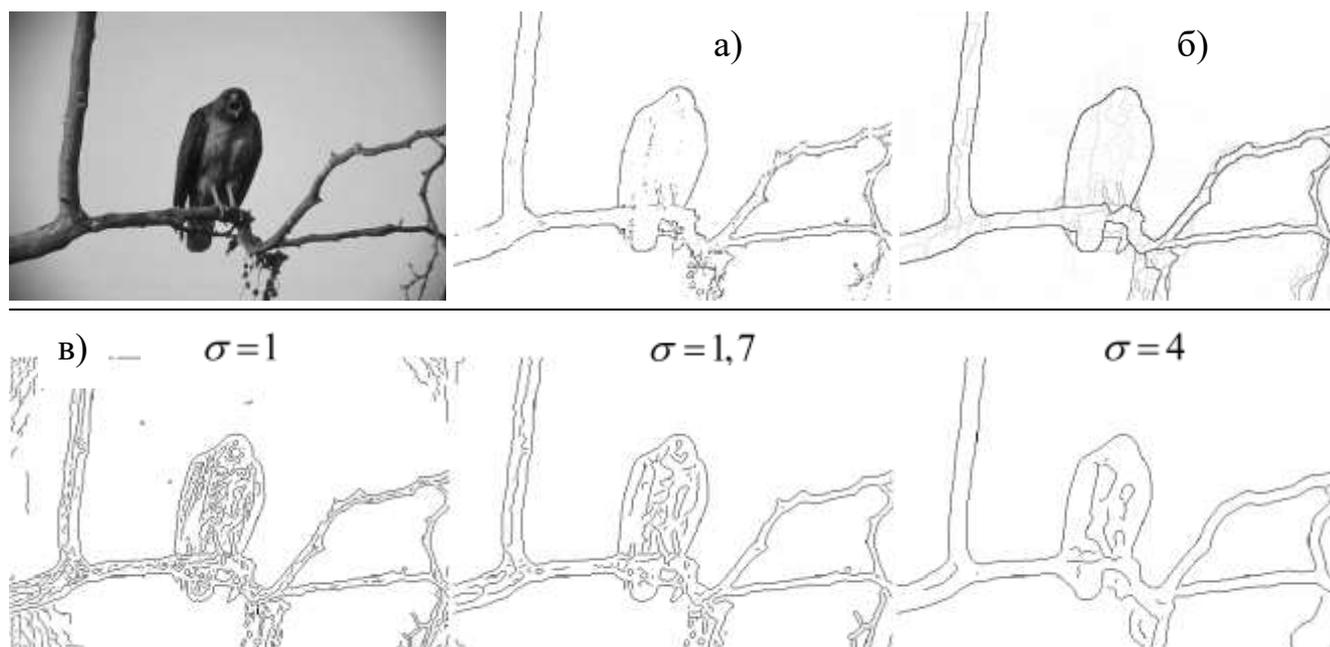


Рисунок 4.11 – Знайдені межі об’єктів: а) запропонованим методом; б) алгоритмом із порівняння BSDS300; в) методом Канні для різних значень σ

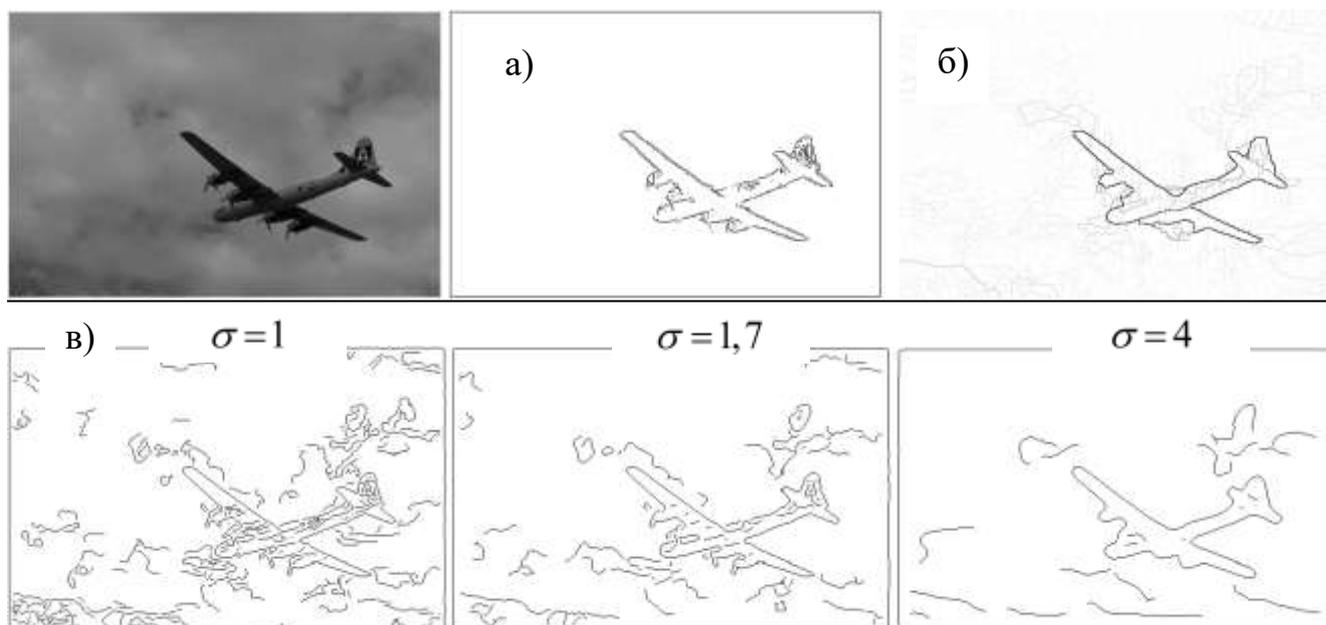


Рисунок 4.12 – Знайдені межі об'єктів: а) запропонованим методом;
 б) алгоритмом із порівняння BSDS300; в) методом Канні для різних значень σ

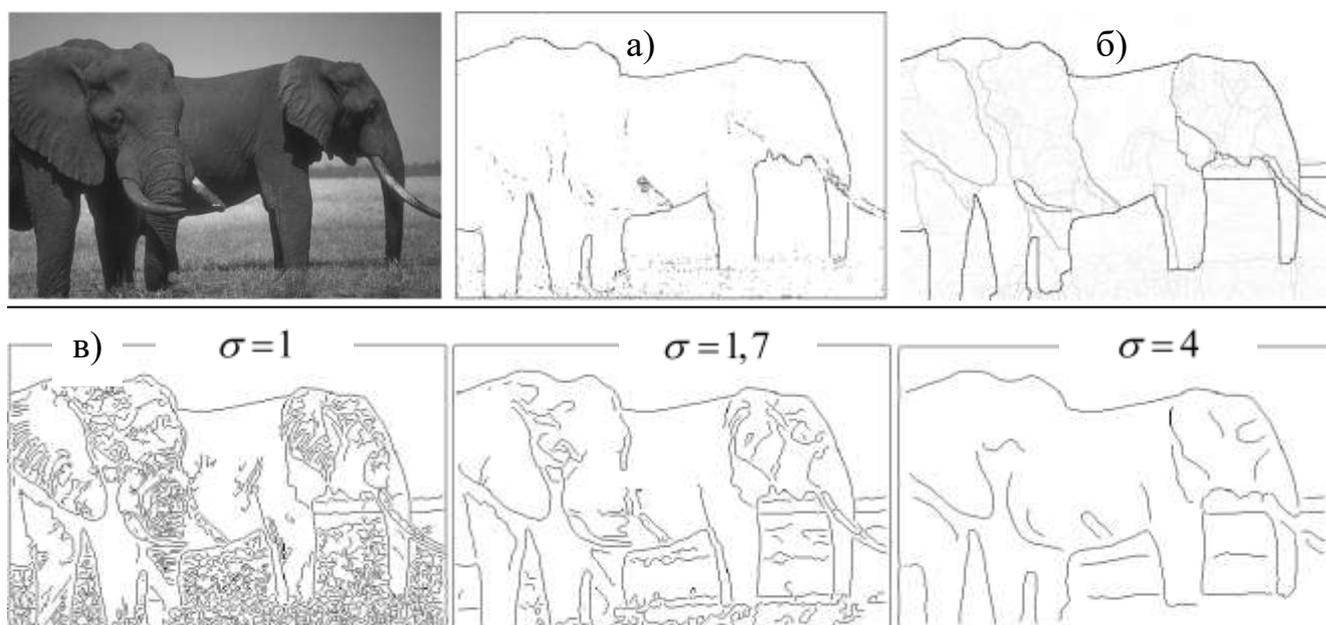


Рисунок 4.13 – Знайдені межі об'єктів: а) запропонованим методом;
 б) алгоритмом із порівняння BSDS300; в) методом Канні для різних значень σ

Аналіз рисунків рис. 4.11 в – 4.13 в свідчить про те, що метод Канні враховує не суттєві деталі при визначенні меж об'єктів на зображеннях, але не виключається можливість у інтерактивному режимі підібрати таке значення параметра σ , при якому результат стане задовільним з точки зору оператора.

При застосуванні рядкової моделі зображення для визначення 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.

4.2 Експеримент щодо структурного аналізу сигналу

Розглядається метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності із додатковими умовами, що дозволяють виділяти на графіку дискретної реалізації інтервали відліків, в межах яких дискретна реалізація може бути апроксимована відрізками прямих з кутовим коефіцієнтом більше заданого значення (див. п. 2.2.4) у застосуванні до практичної задачі виділення характерних ознак у кардіосигналі.

Зазвичай кардіосигнал надходить до оператора у спотвореному завадами вигляді. Завади можуть бути високочастотними, з частотою електромережі, до якої під'єднано кардіографічне обладнання, та з дуже низькою частотою (одиниці герц), що зумовлюють дрейф ізолінії нульового рівня.

Вважається, що для коректного знаходження бажаних ознак у кардіосигналі вказані вище завади необхідно усунути або суттєво зменшити під час попередньої обробки сигналу без значного спотворення його форми, а отже необхідно мати певну апіорну інформацію про характер завад [63]. Водночас у експериментах із модельними сигналами (п. 4.1.1) було показано, що для успішного пошуку розривів неперервності функції та її градієнта запропонованим методом апіорна інформація про характер завад не потрібна.

В експерименті щодо структурного аналізу кардіосигналу об'єктом інтересу було обрано R-зубці, тобто виконувалася сегментація кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності із знаходженням точок Q, R та S.

Знайдені точки наносилися на вихідний сигнал у вигляді схематичної розмітки – відповідні точки Q, R та R, S поєднувалися відрізками прямих ліній. Відшукання Q-S інтервалів у кардіосигналі має практичне значення, оскільки ці результати можуть бути використані як вихідні дані при ідентифікації особи за параметрами її кардіосигналу [63, 64].

4.2.1 Знаходження об'єктів інтересу в сигналах при відсутності завад

Для перевірки працездатності створеного алгоритму сегментації кардіосигналу при змінній роздільній здатності вихідні дані були надані віртуальною організацією «Медгрід» (далі – ВО «Медгрід») [1]. Умови відсутності завад були створені шляхом попередньої обробки вихідних кардіограм програмою-еталоном «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 [65]. 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. Файли із результатами попередньої обробки використовувалися як вхідні дані для алгоритму сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності.

Розглядалося перше відведення кардіограм тривалістю 30 секунд, з частотою дискретизації сигналу 1 кГц, після попередньої обробки [5]. Кардіограми пацієнтів знімалися у різний час доби протягом двотижневого періоду. Загалом було взято 647 кардіограм. Час (вісь абсцис) та амплітуда (вісь ординат) розглядалися в умовних одиницях та представлені на графіках кількостями дискретних відліків для відповідної одиниці виміру, без масштабного перетворення.

На рис. 4.14 – 4.16 представлено фрагменти кардіосигналів по 5 секунд з результатами пошуку точок Q, R, S за допомогою запропонованого алгоритму. Рис. 4.14 – сигнал візуально сприймається як не спотворений завадами, відсутні артефакти у вигляді екстрасистол, ізолінію нульового рівня добре видно на графіку. Рис. 4.15 – 4.16: після попередньої обробки залишилися незначні спотворення форми сигналу, на графіках присутні екстрасистоли.

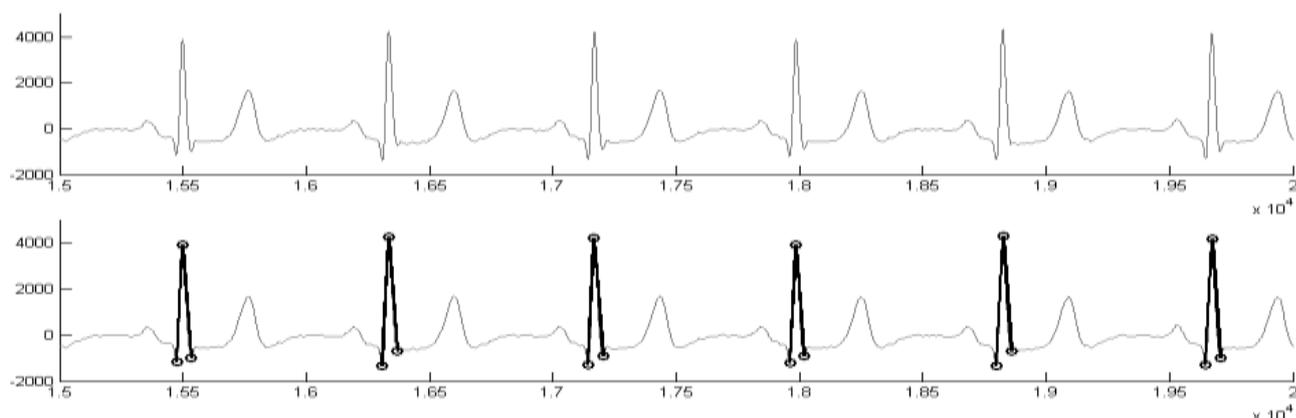


Рисунок 4.14 – Фрагмент сегментованого кардіосигналу з 15 по 20 секунду

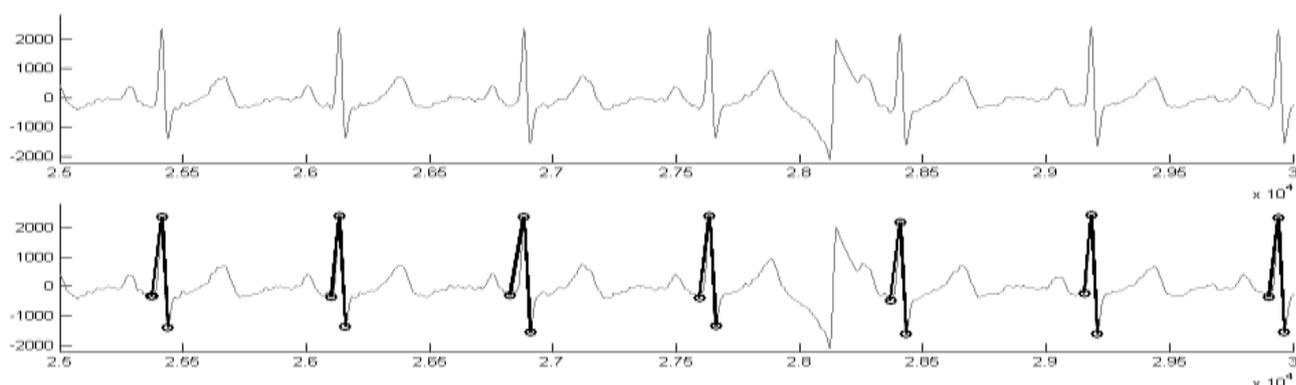


Рисунок 4.15 – Фрагмент сегментованого кардіосигналу з 25 по 30 секунду

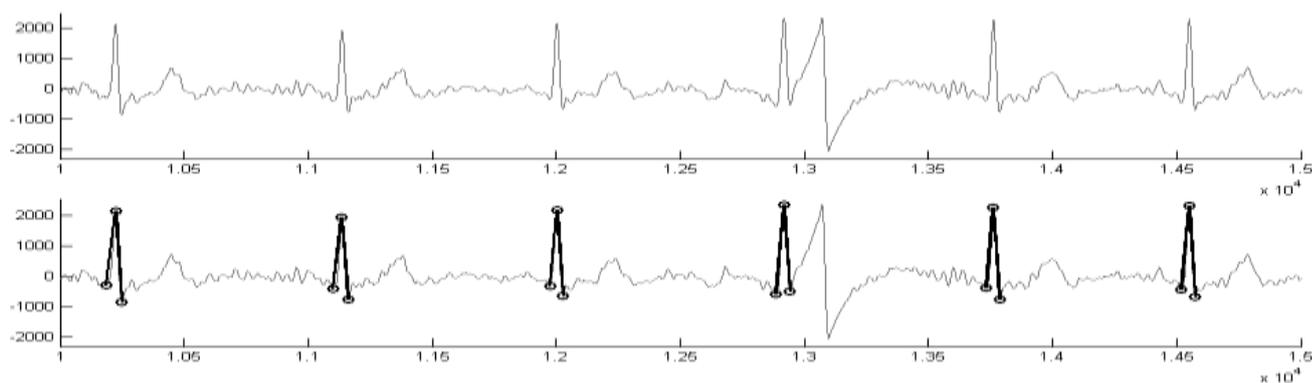


Рисунок 4.16 – Фрагмент сегментованого кардіосигналу з 10 по 15 секунду

З рис. 4.15 – 4.16 видно, що попередня обробка кардіосигналу, яка заснована на певних припущеннях про характер завад, не може забезпечити їх повного усунення. Крім того, під час зняття кардіограми можуть бути зафіксовані артефакти, пов'язані з особливостями роботи серця, які взагалі не можуть бути усунуті за допомогою попередньої обробки.

Застосування структурної моделі R-зубця та алгоритму сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності дозволило успішно сегментувати всі 647 розглянутих в експерименті кардіограм.

4.2.2 Знаходження об'єктів інтересу в сигналах за умови наявності завад

Наявність завад у сигналі ускладнює його зорове сприйняття, але людина все одно здатна виокремити елементи його форми. Оскільки попередня обробка кардіосигналу, що базується на певних припущеннях про характер завад, не здатна повністю виокремити складову завади з кардіосигналу, актуальною є перевірка роботи створеного алгоритму сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності в умовах, коли вхідний сигнал взагалі не зазнає ніякої попередньої обробки [9, 11, 12].

Дану перевірку було виконано під час експерименту зі ста тридцятьма пацієнтами. Від кожного пацієнта були отримані 3 кардіограми: у стані спокою, під час психічного навантаження (розв'язання тестових завдань в умовах обмежень на час виконання) та під час відпочинку після психічного навантаження – загалом 390 кардіограм. Частота дискретизації сигналу складала 500 Гц. Вхідні дані були також надані ВО «Медгрід» [1].

Кожна кардіограма була оброблена незалежно програмою-еталоном «Оракул» та програмою, що реалізує алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності. Розглядалися результати обробки першого відведення кожної кардіограми.

У 24 випадках від програми-еталону було отримано відмову від обробки. На рис. 4.17 представлено фрагмент однієї із цих кардіограм із нанесеною розміткою після її обробки за допомогою програми, що реалізує алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності.

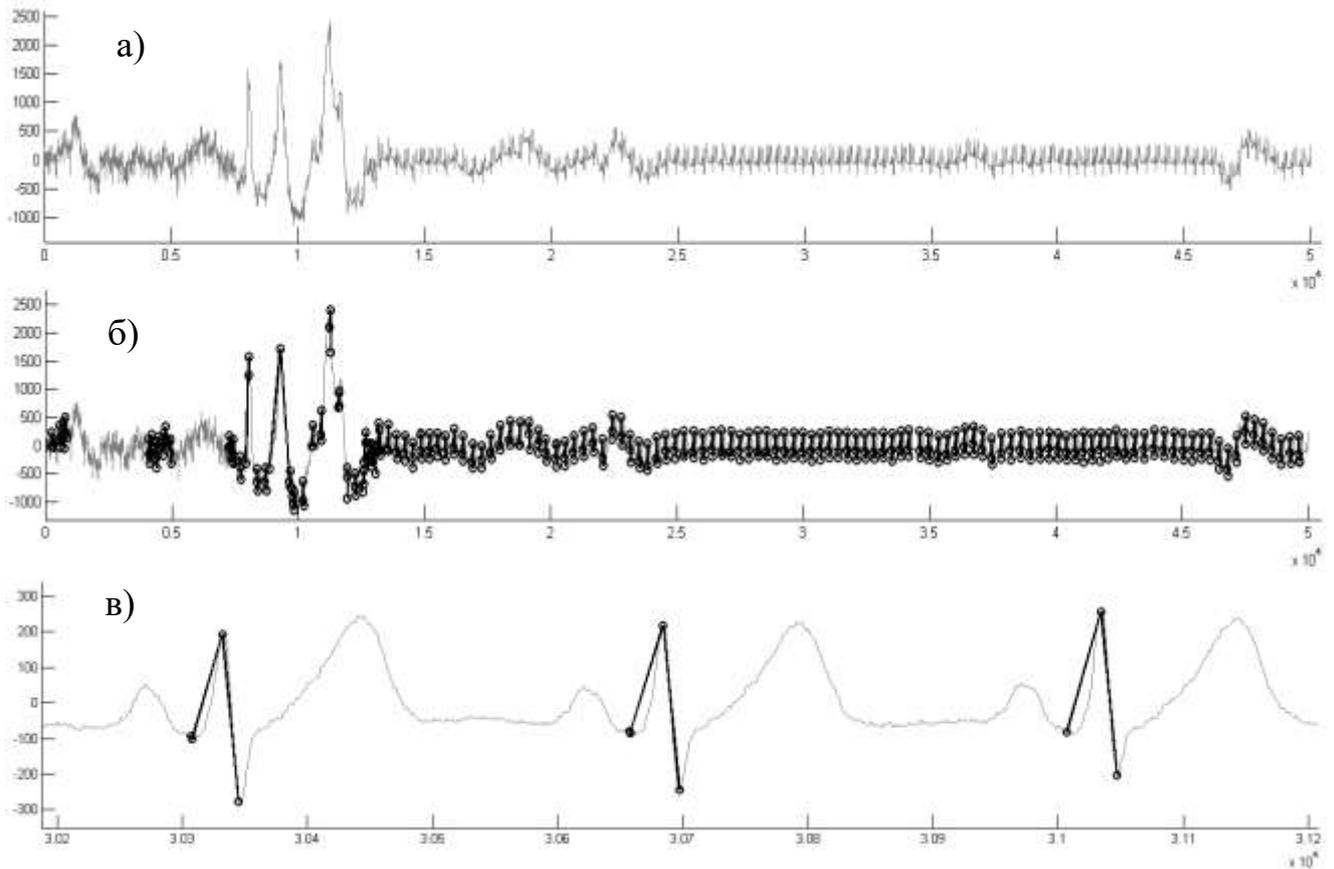


Рисунок 4.17 – Сегментація кардіосигналу запропонованим алгоритмом без попередньої обробки: а) фрагмент першого відведення кардіограми тривалістю 100 секунд; б) той самий фрагмент із нанесеною розміткою; в) фрагмент цієї ж кардіограми тривалістю 2 секунди із нанесеною розміткою

Загальна тривалість кардіограми, фрагмент якої представлено на рис. 4.17 а, складає 735 секунд. Оскільки під час зняття цієї кардіограми пацієнт не знаходився у стані спокою, то сигнал було значно спотворено, але лише в певні, короткі, проміжки часу. Решта даних у кардіосигналі, за винятком цих інтервалів, підлягає сегментації. На рис. 4.17 б видно частини сигналу, які не були сегментовані або сегментовані із помилками. Тим не менш, цей сигнал містить

достатньо інформації про виділені R-зубці (рис. 4.17 в) та R-R інтервали для подальшого оброблення.

Для двох із 24 кардіограм, за якими від програми-еталону було отримано відмову від оброблення, не вдалося отримати відповідь щодо сегментації також і за допомогою створеного алгоритму через слабкість сигналу та/або високий рівень завад (рис. 4.18).

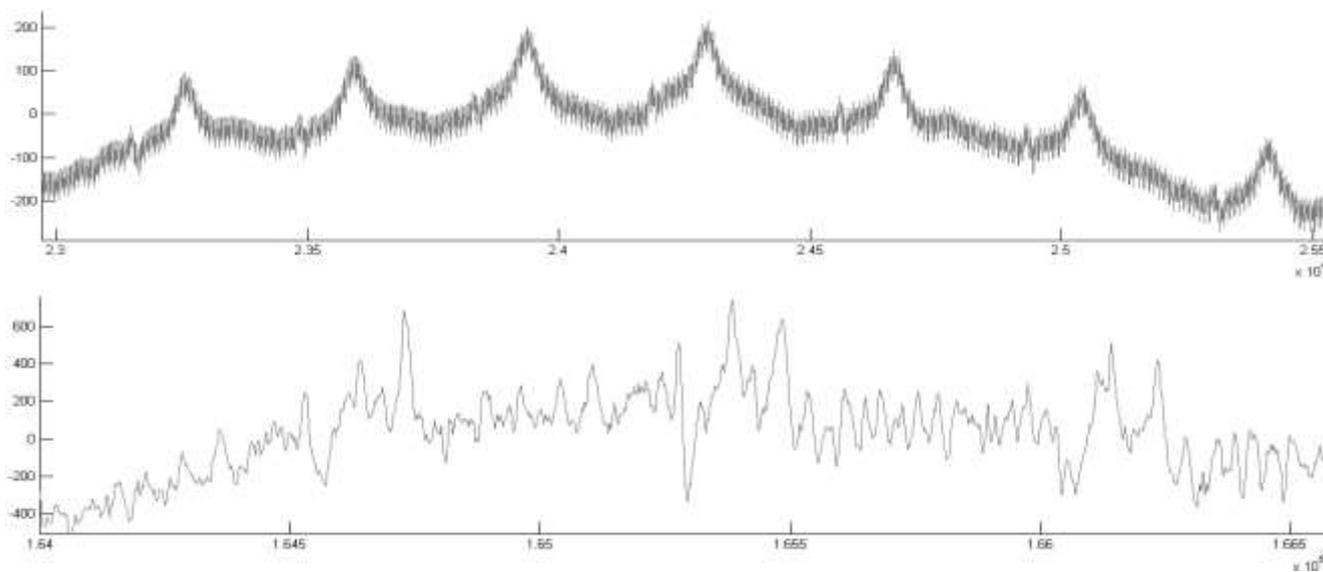


Рисунок 4.18 – Приклади першого відведення кардіограм тривалістю 5 секунд, по яких від обох програм було отримано відмову від сегментації

Таким чином, програмою-еталоном, що знаходиться у 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 запропонованому 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. Дане порівняння не є абсолютно коректним, оскільки програми мають різне призначення, але є можливим, оскільки вони використовувалися в рамках одного і того ж завдання НАН України, для розв'язання однієї і тієї ж задачі: визначення інтервалів Q-S кожного кардіоциклу в першому відведенні кардіограми.

4.2.3 Виділення об'єктів інтересу в сигналах у режимі реального часу

У описаних вище експериментах по сегментації кардіосигналу на R-R інтервали більшість параметрів алгоритму встановлювалися «по замовченню», а поріг для визначення розриву неперервності підбирався вручну. Оскільки оброблялися вже записані кардіосигнали, то ширина ковзного вікна, в межах якого вибиралася кожна наступна порція даних для обробки, не оцінювалася, а встановлювалася відповідно до часового масштабу сигналу так, щоб поточний фрагмент для обробки містив дані сигналу тривалістю близько 1 с. Очевидно, що такий спосіб налаштування не підходить для практичного застосування: значення порога, що дозволить виділяти R-зубці, залежить у першу чергу від поточного стану пацієнта, а також і від багатьох інших факторів. Ширина ковзного вікна повинна бути такою, щоб повністю вмещувати об'єкт інтересу (R-зубець) та дозволяти надійно його розпізнати із мінімальною затримкою між виникненням наступного R-зубця та сигналізацією про це користувачеві.

Використання загальновідомої апріорної інформації про сигнал, що обробляється, дозволяє автоматизувати процес налаштування параметрів алгоритму. Одразу відомо, що обробленню підлягає кардіосигнал, а, отже, відомі його структурні елементи та порядок їх виникнення. Також відомо, що кардіосигнал за своєю природою є майже циклічним. Природним є припущення, що тривалості двох сусідніх кардіоциклів відрізняються не суттєво (тривалість двох сусідніх кардіоциклів не може раптом значно змінитися). Виходячи з цього, структурну модель R-зубця з п. 3.2.1 можна доповнити ще двома параметрами: тривалістю R-зубця у вигляді відстані Q-S та відстанню між двома сусідніми R-зубцями. Таким чином, було визначено такі вимоги до процедури автоматичного налаштування параметрів алгоритму: при надходженні сигналу від кардіодатчика необхідно зберегти вибірку, що відповідає першим N секундам, за якою виконати обрахування параметрів алгоритму, використовуючи доповнену структурну модель R-зубця. Всі розрахунки повинні тривати не більше 0,67

секунди (інтервал часу між двома сусідніми R-зубцями для здорового пацієнта у стані спокою при частоті серцевих скорочень 90 разів за хвилину).

Для розв'язання цієї задачі було адаптовано описаний у п. 3.2.2 алгоритм сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності. При частоті дискретизації сигналу 250 Гц автоматичне налаштування параметрів алгоритму за вибіркою з 1500 відліків тривало в середньому 0,09 секунди. При частоті дискретизації сигналу 1000 Гц автоматичне налаштування параметрів алгоритму за вибіркою з 6000 відліків тривало в середньому 0,58 секунди. Результати сегментації кардіосигналу алгоритмом зі змінною роздільною здатністю при відсутності попередньої обробки сигналу та при автоматичному налаштуванні параметрів алгоритму показано на рис. 4.19.

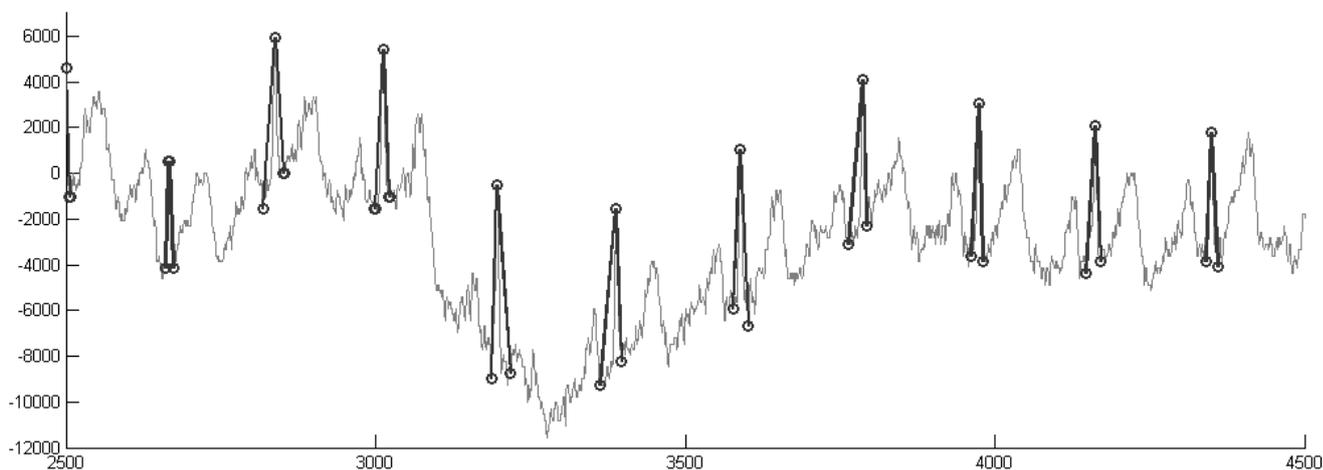


Рисунок 4.19 – Результати сегментації спотвореного завадами кардіосигналу без використання жодної апріорної інформації про характер завад та при автоматичному визначенні параметрів алгоритму

4.3 Висновки до розділу 4

Експериментальні дослідження було проведено за допомогою програмних засобів, що входять до складу створеної інформаційної технології.

1. Експериментально перевірено та підтверджено адекватність математичної моделі явища зміни розмірів зон збудження рецептивних полів нейронів зорової системи.

2. 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.

3. Експериментально підтверджено, що метод сегментації кусково-гладких функцій за їх дискретними реалізаціями при змінній роздільній здатності дозволяє приймати задовільні стійкі рішення щодо сегментації спотворених завадами сигналів без жодної апіорної інформації про характер завад. Даний метод також може бути застосований для визначення меж об'єктів на півтонових зображеннях при використанні рядкової моделі зображення.

4. Експериментально підтверджено можливість структурного аналізу сигналу при змінній роздільній здатності без виконання його попередньої обробки. Перевірку виконано на прикладі розв'язання задачі сегментації кардіосигналу на R-R інтервали. При обробленні 390 спотворених завадами кардіограм показник кількості оброблених кардіограм програмою «Оракул», що перебуває у промисловій експлуатації, вдалося поліпшити на 5,69 % при застосуванні запропонованого алгоритму сегментації кардіосигналу на R-R інтервали при змінній роздільній здатності і довести цей показник до 99,49 % від їх загальної кількості.

5. Експериментально підтверджено можливість виконання сегментації кардіосигналу в режимі реального часу при автоматичному визначенні параметрів алгоритму.

Основні результати розділу опубліковані автором у роботах [5, 9 – 12].

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 апіорна інформація про характер завад не використовувалася. Практичну цінність отриманих результатів підтверджено актами впровадження від ВО «Медгрід» та ТОВ «Кардіолайз».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вишневський В. В. Еволюція технологічного задуму проекту «Медгрід». *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. 77 – 80.
2. Файнзильберг Л. С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. Киев: Наукова думка. 2008. 333 с.
3. Старостенко В. И., Шарыпанов В. М., Шарыпанов А. В., Савченко А. С., Легостаева О. В., Макаренко И. Б., Куприенко П. Я. Интерактивный программный комплекс Isohypse для построения геолого-геофизических моделей и его практическое использование. *Геофизический журнал*. 2016. Т. 38. №1. С. 30 – 42.
4. Костенко В. В., Лавренюк І. В., Пономарьов В. М. Дослідження можливостей ефективного використання методів розпізнавання для обробки фотозображень автомобільних номерних знаків. *Вісник АМСУ. Технічні науки*. 2014. № 1 (51). С. 48 – 56.
5. Шарыпанов А. В. Об определении точек разрыва непрерывности на искаженных помехами графиках функций. *Математичні машини і системи*. 2018. № 2. С. 157 – 164.
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. *Information content & processing*. 2014. Vol. 1, N 3. P. 287 – 299.
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. *Education and Science and their Role in Social and Industrial Progress of Society: Conference (Kyiv, June 12 – 15, 2014)*. Kyiv, 2014. P. 51 – 52.
8. 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.

9. 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.

10. 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: ПІММС НАНУ, 2017. С. 121 – 124.

11. 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.

12. 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. Жукин, 25 – 29 червня 2018 р.)*. Чернігів: ЧДТУ, 2018. С. 273 – 276.

13. 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.

14. 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.

15. 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.
16. Шарипанов А. В., Калмиков В. Г. Змінна роздільна здатність у зоровому сприйнятті та обробленні зображень. *Математичні машини і системи*. 2018. № 3. С. 60 – 75.
17. Подвигин Н. Ф. Динамические свойства нейронных структур зрительной системы. Л.: Наука, 1979. 158 с.
18. Ерошевский Т. И. и др. Глазные болезни: учебное пособие. М.: «Лидер М». 2008. 316 с.
19. Hubel H. D. Eye, brain and vision. New York: Scientific American Library, Distributed by W. H. Freeman. 1988. 240 p.
20. Ruksenas O., Bulatov A., Heggelund P. Dynamics of Spatial Resolution of Single Units in the Lateral Geniculate Nucleus of Cat During Brief Visual Stimulation. *J Neurophysiol*. 2007. N 97. P. 1445 – 1456.
21. Barlow H. B. Summation and inhibition in the frog's retina. *J. Physiol*. 1953. Vol. 119. P. 69 – 88.
22. Глезер В. Д. Механизмы опознания зрительных образов. Л.: Наука. 1966. 204 с.
23. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М.: Радио и связь, 1986. 400 с.
24. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
25. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.
26. Шлезингер М., Главач В. Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию. Київ: Наукова думка, 2004. 535 с.

27. Forster B., Van De Ville D., Berent J., Sage D., Unser M.. Complex Wavelets for Extended Depth-of-Field: A New Method for the Fusion of Multichannel Microscopy Images. *Microsc. Res. Tech.* 2004. Vol. 65, N 1–2. P. 33 – 42.

28. Grigorescu C., Petkov N., Westenberg M.A. Contour Detection Based on Nonclassical Receptive Field Inhibition. *IEEE Transactions On Image Processing.* 2003. Vol. 12, N 7. P. 729 – 739.

29. Ярмілко А. В. Використання методів візуалізації у діагностиці та управлінні електронно-променевим мікрообробленням оптичних матеріалів. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету.* Чернігів, 2013. № 2 (65). С. 156 – 161.

30. Canny J. F. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 1986. Vol. PAMI-8, N 6. P. 679 – 698.

31. Pedersoli M., Vedaldi A., Gonz`alez J. A Coarse-to-fine approach for fast deformable object detection. *CVPR.* 2011. June. P. 1353 – 1360.

32. Moreels P., Perona P. Probabilistic Coarse-To-Fine Object Recognition. *Technical report.* Pasadena: California Institute of Technology, 2005. 49 p.

33. Li X., Hu W., Hu W. A Coarse-to-Fine Strategy for Vehicle Motion Trajectory Clustering. *ICPR'06: proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition.* 2006. Vol. 1. P. 591 – 594.

34. Lee J.-D., Kuo C.-H. A Multi-Stage Classifier for Face Recognition Undertaken by Coarse-to-fine Strategy, State of the Art in Face Recognition. *Tech.* 2009. URL: http://www.intechopen.com/books/state_of_the_art_in_face_recognition/a_multistage_classifier_for_face_recognition_undertaken_by_coarse-to-fine_strategy.

35. Тищенко М. А. Тривимірна реконструкція людського обличчя в задачах ідентифікації особи: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.23. Київ: Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем, 2012. 120 с.

36. Raphael C. Coarse-to-Fine Dynamic Programming. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 2001. Vol. 23. P. 1379 – 1390.

37. Lucena O. B. Dynamic Programming, Tree-width and Computation on Graphical Models. *PhD thesis: division of Applied Mathematics*. Providence: Brown University, 2002. 85 p.

38. Maunsell J. H. R., Van Essen D. C. Functional properties of neurons in middle temporal visual area of the macaque monkey. I. Selectivity for stimulus direction, speed and orientation. *J. Neurophysiol.* 1983. Vol. 49. P. 1127 – 1147.

39. Battiti R., Amaldi E., Koch C. Computing Optical Flow Across Multiple Scales: An Adaptive Coarse-to-Fine Strategy. *International Journal of Computer Vision.* 1991. Vol. 6, N 2. P. 133 – 145.

40. Wang H. T., Mathur B., Koch C. A Multiscale Adaptive Network Model of Motion Computation in Primates. *Advances in Neural Information Processing Systems.* 1990. Vol. 3. P. 349 – 355.

41. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / 2-е изд. М.: Наука, 1974. 822 с.

42. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++ / пер. с англ. под ред. И. Романовского и Ф. Андреева. 2-е изд. Rational, Санта-Клара, Калифорния. СПб.: Невский диалект, 1998. 458 с.

43. Калмыков В., Вишнеvский В., Власова Т. Структурная модель полутонового изображения и ее использование в задаче сегментации изображения. *International Book Series "Information, Science And Computing", Book 5 "Intelligent Technologies and Applications"*. Sofia, 2008. С. 153 – 160.

44. Martínez J. M. ISO/IEC 15938 – Multimedia Content Description Interface. MPEG-7 Overview. *International Organization for Standardization*. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 Coding of moving pictures and audio. 2004. URL: https://mpeg.chiariglione.org/sites/default/files/files/standards/docs/w6828_mp7_Overview_v10.zip.

45. Kovalevsky V. A. Geometry of Locally Finite Spaces. Berlin: Dr. Baerbel Kovalevski, 2008. 322 p.

46. Калмыков В. Г. Структурный метод распознавания отрезков цифровых прямых в контурах бинарных изображений. *Искусственный интеллект.* 2002. № 4. С. 450 – 457.

47. Vishnevskiy V., Kalmykov V., Romanenko T. Approximation of experimental data by Bezier curves. *Information theories & applications*. 2008. Vol. 15, N 3. P. 235 – 239.

48. Romanenko T., Vishnevskiy V., Kalmykov V. Analytical Representation of Graphs by Means of Parametrically Defined Splines. *ICAICTSEE – 2013: proceedings of the international conference on applications of information and communication technology and statistics in economy and education (UNVE, Sofia, Bulgaria, December 6 – 7, 2013)*. Sofia, 2013. P. 536 – 542.

49. Kalmykov V., Vishnevskiy V., Masol D. Approximation of the Experimental Curves by Piecewise Smooth Functions. *ICAICTSEE – 2015: proceedings of the 5th International Conf. on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (Sofia, Bulgaria, November 13 – 14, 2015)*. Sofia, 2015. P. 322 – 330.

50. Калмыков В. Г. Структурный анализ контуров как последовательностей отрезков цифровых прямых и дуг цифровых кривых. *Knowledge – Dialogue Solution (KDS 2006): proceedings of XII-th International Conference (Varna, Bulgaria, June 20 – 25, 2006)*. Sofia: FOI-Commerce, 2006. P. 39 – 46.

51. Гладун В. П. Планирование решений. Киев: Наукова думка, 1987. 167 с.

52. Рабинович З. Л. О естественных механизмах мышления и интеллектуальных ЭВМ. *Кибернетика и системный анализ*. 2003. №5. С. 82 – 88.

53. Макаров И. П. Дополнительные главы математического анализа. М.: Просвещение, 1968. 308 с.

54. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.

55. Власова Т. М., Вишневский В. В., Калмыков В. Г., Романенко Т. Н. Кодирование объекта полутонового изображения с использованием канонических сплайнов. *Управляющие системы и машины*. 2012. №1. С. 21 – 25.

56. Якобсон А., Буч Г., Рамбо Дж. Унифицированный процесс разработки программного обеспечения. СПб.: Питер, 2002. 496 с.

57. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений / пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 544 с.

58. Beck K., Beedle M., van Bennekum A. et al. Agile-манифест разработки программного обеспечения / Cockburn A., Cunningham W., Fowler M., Grenning J., Highsmith J., Hunt A., Jeffries R., Kern J., Marick B., Martin R. C., Mellor S.,

Schwaber K., Sutherland J., Thomas D. The Lodge at Snowbird, Utah. 2001. URL: <http://agilemanifesto.org/iso/uk/manifesto.html>.

59. Буч Г., Рамбо Дж., Якобсон И. Язык UML. Руководство пользователя / 2-е изд., пер. с англ. Н. М. Мухина: ДМК Пресс, 2006. 496 с.

60. Kruchten P. Architectural Blueprints – The “4+1” View Model of Software Architecture. *IEEE Software*. 1995. N 12 (6). P. 42 – 50.

61. Иванов Д., Новиков Ф. Моделирование на UML. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 200 с.

62. Martin D., Fowlkes C., Tal D., Malik J. A Database of Human Segmented Natural Images and its Application to Evaluating Segmentation Algorithms and Measuring Ecological Statistics. *Proc. 8th Int’l Conf. Computer Vision*. July 2001. Vol. 2. P. 416 – 423. URL: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/grouping/papers/mftm-iccv01.pdf>.

63. Palaniappan R., Krishnun S. M. Identifying Individuals Using Ecg Beats. *International Conference on Signal Processing & Communications (SPCOM) 2004*. Singapore: Biomedical Engineering Research Centre, Nanyang Technological University, 2004. P. 569 – 572.

64. Вишнеvский В. В., Романенко Т. Н., Кизуб Л. А. Биометрическая идентификация человека по его кардиограмме. *Математичні машини і системи*. 2018. № 2. С. 88 – 95.

65. Чайковский И. А. Анализ электрокардиограммы в одном, шести и двенадцати отведениях с точки зрения информационной ценности: электрокардиографический каскад. *Клиническая Информатика и Телемедицина*. 2012. №2. С. 102 – 106.

ДОДАТОК А**Акти впровадження**



ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
МАТЕМАТИЧНИХ МАШИН
І СИСТЕМ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МАШИН
И СИСТЕМ

03187, м. Київ
проспект Академіка Глушкова, 42
Телефон: 526 24 97, факс 526 64 57

ІПММС

03187, г. Киев
проспект Академіка Глушкова, 42
Телефон: 526 24 97, факс 526 64 57

27.09.2018 148/ _____
На № _____ від _____

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження Шарипанова А.В.
“Структурний метод обробки зображень і сигналів при змінній роздільній
здатності” на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології

Цей Акт підтверджує, що результати дисертаційного дослідження Шарипанова А.В. “Структурний метод обробки зображень і сигналів при змінній роздільній здатності” були використані співробітниками відділу обробки та відображення візуальної інформації Інституту проблем математичних машин і систем НАН України при розробці проекту «Розвиток сервісів ВО «Медгрід» для підтримки мобільних діагностичних платформ та персоналізованої діагностики на базі електрокардіографії та спірометрії», шифр «Медгрід-3».

Впроваджено прототип інформаційної технології у вигляді динамічної бібліотеки, що використовується при сегментації кардіосигналу на окремі кардіоцикли. для подальшої їх числової обробки на віртуальній машині, яка запускається як сервіс на локальних ресурсах грід-кластеру ВО «Медгрід».

Порівняно з відомими та раніше використаними методами суттєво більша кількість кардіосигналів, що спотворені завадами, є такою, що успішно сегментується на кардіоцикли. При цьому, метод, що запропоновано, не використовує попередньої фільтрації та додаткової апріорної інформації відносно завад.

Заступник директора
ІПММС НАН України
д.ф-м.н., проф.



 В.П. Клименко

Науковий керівник проекту «Медгрід-3»,
менеджер ВО «MedGrid»,
пр.н.с. ІПММС НАН України
к.т.н., с.н.с.

 В.В. Вишневський

Cardiolyse Oy
development@cardiolyse.me
cardiolyse.com

GE Health Innovation Village,
2 Kuortaneenkatu, 05110,
Helsinki, Finland



АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження Шарипанова А. В. "Структурний метод обробки зображень і сигналів при змінній роздільній здатності" на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології

Цим Актом підтверджую факт впровадження результатів дисертаційної роботи "Структурний метод обробки зображень і сигналів при змінній роздільній здатності" співробітника Інституту проблем математичних машин і систем НАН України Шарипанова Антона Веньяновича, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 - інформаційні технології, в частині автоматичного оброблення зображень та сигналів.

Запропонований Шарипановим А.В. новий структурний метод та алгоритми обробки зображень і сигналів при змінній роздільній здатності дозволяє вирішити актуальну задачу сегментації довільних зображень та сигналів при наявності завад, без урахування апріорної інформації відносно завад, без попередньої фільтрації зображень та сигналів.

На цей час розроблена Шарипановим А.В. на основі запропонованого методу та алгоритму динамічна бібліотека використовується у ТОВ "Кардіолайз" при сегментації кардіосигналу одноканальної електрокардіограми на окремі кардіоцикли.

Оскільки алгоритм Шарипанова А.В., у порівнянні з відомими нам методами, не використовує додаткової інформації про завади та потребує не великої обчислювальної складності, ми плануємо в майбутньому його використати для побудови мобільних застосувань реального часу для управління процесом дихання людини. Отже, на наш погляд цей метод та його програмна реалізація мають добрі додаткові перспективи застосування.

Директор ТОВ "Кардіолайз"

09.10.2018



Ганна Старинська

ДОДАТОК Б**Список публікацій здобувача 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: ПММС 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. Жукин, 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.