



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по телекомуникации
катедра Радиокомуникации и видеотехнологии

маг. инж. Стела Методиева Ветова-Иванова

**ИЗВЛИЧАНЕ НА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО СЪДЪРЖАНИЕ
ЧРЕЗ КОМПЛЕКСНО УЕЙВЛЕТНО ПРЕОБРАЗУВАНЕ
С ДУАЛНИ ДЪРВЕТА**

АВТОРЕФЕРАТ

за получаване на образователна и научна степен „Доктор“

Научна специалност:

„Телевизионна и видеотехника“

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Иво Драганов

Рецензенти:

проф. д.т.н. инж. Румен Кирилов Кунчев

проф. д-р инж. Веска Младенова Георгиева

София, 2018г.

Дисертационният труд е обсъден на заседание на катедрен съвет на катедра “Радиокомуникации и видеотехнологии” при Факултета по телекомуникации на Технически университет - София, състояло се на 29.10.2018 г. от 15:30 ч. в зала 1259 и е насрочено за официална защита пред научно жури в състав: проф. д-р инж. Веска Младенова Георгиева, проф. д.т.н. инж. Румен Кирилов Кунчев, проф. д-р инж. Кирил Иванов Конов, проф. д-р инж. Антони Стефанов Щерев, доц. д-р инж. Иво Руменов Драганов.

Резервни членове: проф. д-р инж. Добри Михайлов Добрев, доц. д-р инж. Лиляна Емилова Дочева.

Дата на защита на дисертацията: 21.02.2019 г. (четвъртък) от 13:00 часа.

Място на защита на дисертацията: ТУ - София, конферентна зала на БИЦ.

Данни за дисертационния труд: брой страници - 176; брой фигури - 110; таблици - 26; литературни източници 193; публикации по темата на дисертационния труд 9.

Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата отговаря на тези в дисертацията.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в секретариата на катедрата по Радиокомуникации и видеотехнологии (каб. 1254) и на Интернет страницата на Технически Университет – София: www.tu-sofia.bg.

Автор: маг. инж. Стела Методиева Ветова-Иванова.

Тема: Извличане на изображения по съдържание чрез комплексно уейвлетно преобразуванес дуални дървета

Тираж: 30 бр.

Проект, оформление и предпечатна подготовка: авторът.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Широко приложение технологията за извличане на изображения по съдържание (англ. Content-Based Image Retrieval) намира в областите криминология, сателитни изображения, медицина, интелектуална собственост, археология.

Сред предложените разработени методи от научния свят за разпознаване и извличане на изображения по съдържание се прилагат редица групи методи. Сред най-използваните от тях са групите на честотните и уейвлетните трансформации. Първата от тях включва трансформация на Фурие (англ. Fourier Transform), а втората – уейвлетна трансформация (англ. Wavelet Transform), X-let семейство трансформации (Ridgelet, Curvelet, Beamlet, Contourlet, Bandlet, Riplet), уейвлетна трансформация на Габор (англ. Gabor Wavelet Transform), комплексна уейвлетна трансформация с дуални дървета (англ. Dual-Tree Complex Wavelet Transform – DT CWT), ротиран комплексен уейвлетен филтър с дуални дървета (англ. Dual Tree Rotated Complex Wavelet Transform - DT-RCWF). С широко приложение през последните години се очертава групата на уейвлетните трансформации. Основната причина е високата им скорост на изпълнение, задълбоченото анализиране на изображенията при различни нива на разлагане, представянето на изображенията чрез пространствени и честотни признаци. Посочените признаци оказват благоприятно влияние за повишаване точността и скоростта на извлечения резултат. Освен това, съвременните разработки в областта на уейвлетните трансформации се насочиха към определянето на посока, което ги прави още по-привлекателни в практическото им приложение. Това превръща тази технология в ефективна и актуална за широк обхват области на обществения живот.

НАУЧНА ОПРЕДЕЛЕНОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Обект на изследването

Обект на изследване на дисертационния труд са методи и алгоритми за извличане на изображения по съдържание чрез комплексно уейвлетно преобразуване с дуални дървета, повишаване тяхната ефективност и производителност.

Предмет на изследването

Предметът на изследването са бързодействието на предложени алгоритъм; неговата производителност в т. ч. необходимия обем памет за съхранение на данни, времето за извличане на признаци и времето за определяне на подобие; ефективността му в т. ч. без и с отчитане на ранг и ефективност според броя на подадените заявки.

Цел на дисертацията

Целта на дисертационния труд е да се предложи подход за извличане на изображения по съдържание, основан на декомпозиция чрез Двумерна Комплексно Уейвлетно Преобразуване с Дуални Дървета, осигуряващ висока точност при понижена изчислителна сложност, на чиято база да се разработят алгоритми за практическото му приложение.

Задачи:

1. Определяне на необходимо ниво на декомпозиране чрез 2D DT CWT за извличане на признаци от цифрови изображения, които да се използват за намиране на сходство по съдържание с висока точност, основано на съдържащата се информация в отделните подленти на спектъра и изчислителната сложност на прилаганите операции.
2. Определяне на изчислителната сложност, необходима за намиране на подобие между изображения, декомпозирани чрез 2D DT CWT, при използване на различни мерки за сравнение, както и на пълната изчислителна сложност за търсене по съдържание в БДИ при различни нива на декомпозиране.
3. Разработване на алгоритми за индексирание на БДИ чрез 2D DT CWT по нива с отчитане на средното количество информация, съдържащо се в признаковите вектори.
4. Разработване на алгоритми на база глобални и локални характеристики, получавани чрез 2D DT CWT, за извличане на изображения по съдържание с прилагане на различни мерки за определяне на подобие.
5. Експериментална проверка на разработените алгоритми от задача 5 по отношение на време за изпълнение и точност на извличаните изображения с и без използването на ранг, както и по отношение на броя на подадените заявки.
6. Сравнение на получената точност на извличане на изображения по съдържание за синтезираните алгоритми със съпоставими по изчислителна сложност алгоритми.

Методи на изследване

За решаване на поставените задачи в дисертационната работа се използват статистически и аналитични методи, сравнителен анализ, компютърна симулация и програмиране.

Апробация на изследването

Основните резултати от проведените изследвания в дисертацията са докладвани и обсъдени в серия от международни конференции – една от публикациите е представена на международна научна конференция на IEEE. Седем от публикациите са докладвани на специализирани международни научни конференции, пет от които са индексирани в ISI (Thomson Reuters), ELSEVIER, SCOPUS, ACM, CiteSeerX и др., и една - в IEEE Xplore, ISI

Thomson's, SCOPUS, ACM и др. Една публикация е публикувана в специализирано научно списание „*Journal Electrotechnics and Electronics*“

Публикуване на резултатите от дисертационните изследвания

Основните резултати са публикувани в общо девет доклада, осем от които от международни конференции и един – в специализирано научно списание.

Структура на дисертацията

В структурно отношение дисертацията се състои от увод, пет глави, приноси на дисертационния труд, списък на публикуваните научни трудове по дисертацията, използвана литература и приложение.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1

АНАЛИТИЧЕН ОБЗОР НА МЕТОДИТЕ И АЛГОРИТМИТЕ ЗА ИЗВЛИЧАНЕ НА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО СЪДЪРЖАНИЕ ОТ БАЗА ДАННИ

Поради свойството ѝ да представя изображения чрез пространствени и честотни характеристики, на базата на разлагане на множество нива при ниска изчислителна цена и висока скорост на изпълнение, Дискретната Уейвлетна Трансформация се използва от голям брой учени при разработването на CBIR алгоритми, като се прилага за извличане на текстура [47, 48]. В представен сравнителен анализ на резултатите, получени на база вектори от признаци, базирани на DCT и DWT [120] е установено, че втората от двете трансформации показва с 18 % по-високи резултати по отношение на точност. Относно броя на релевантно извлечените изображения от общия в тестовата БДИ, признаковите вектори, базирани на първата трансформация демонстрират с 37% по-добър резултат. Недостатък на DWT е чувствителността ѝ на закъснение на сигнала и разпознаването на само на три посоки, което я прави недостатъчно ефективна за разпознаването на изображения. За преодоляването на този недостатък някои автори [49] прилагат Уейвлетна Трансформация на Габор, чрез която те създават признаков вектор, базиран на честотни характеристики и множество посоки.

Заради простотата на Трансформацията на Габор и респективно повишаването скоростта на извличане, в [125] авторите предлагат алгоритъм за извличане на изображения по цветови и текстурни признаци на базата на отличителни точки извлечени чрез нея.

Освен Трансформацията на Габор за повишаване скоростта на извличане авторите прилагат и Трансформация на Хаар.

Поради високата изчислителна сложност, с която се характеризира Трансформацията на Габор, други автори [51, 52] прилагат DT CWT. Освен посоченото преимущество DT CWT се отличава с устойчивост на закъснение на сигнала, разпознаването на дванадест посоки, ограничен излишък и устойчивост на генерирания признаков вектор на ротация.

На базата на технологията и недостатъците на DWT е разработена група от уейвлетни трансформации нар. „X-let“. Тя включва Риджлет, Кървлет, Биймлет, Контурлет, Симлет, Бендлет, Риплет трансформации [53]. С най-голяма лекота на приложение и повишена способност за представяне на информация по параметъра посока се отличава Контурлетната [54, 55, 56, 57].

За извличането на информация, описваща ръбовете на обекти в изображението като се използват преимуществата на уейвлетите някои автори [58] избират Кървлетна Трансформация. От друга страна, за разпознаването на линии други използват Риджлет Трансформация. Нейни недостатъци са отсъствието на устойчив на ротация вектор, както и приложимост само за изображения с размер $M \times M$. За преодоляването на посочените преимущества и недостатъци в [73] авторите предлагат Инвариантен Риджлет-Фурие Дескриптор. Поради качества като премахване на шум и разпознаване на ръб при проектирането на CBIR алгоритми се използва също и Трансформация на Радон [75].

Освен за извличането на примитиви, уейвлетните трансформации се използват за изчисляването на статистически данни като моменти от първи и втори ред на уейвлетните коефициенти [38] на чиято база се генерират признаковите вектори.

1.8.1. Научно-приложни приноси

1. На базата на направено аналитично сравнение на съществуващите методи и алгоритми за извличане на изображения по съдържание от бази данни е направен аналитичен обзор върху публикации по различни признаци. Използваните в тях техники са групирани в класификации (Приложение 1, фиг. 1, фиг. 2, фиг. 3, фиг. 4, фиг. 5, фиг. 6, фиг. 7, фиг. 8), а публикуваните данни са представени таблично (Приложение 1, Таблица 1, Таблица 2, Таблица 3, Таблица 4, Таблица 5, Таблица 6, Таблица 7, Таблица 8, Таблица 9, Таблица 10). Направен е избор на DT CWT за намирането на признаци за извличане.

ГЛАВА 2

ИЗВЛИЧАНЕ НА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО СЪДЪРЖАНИЕ ЧРЕЗ 2D DT SWT С ОТЧИТАНЕ НА КОЛИЧЕСТВОТО ИНФОРМАЦИЯ

2.1. Определение на количеството информация, съдържаща се в подлентата на апроксимиращите коефициенти

Когато се използва двумерно комплексно уейвлетно преобразуване с дуални дървета, уейвлетната функция се състои от реална Ψ_r и имагинерна част Ψ_c :

$$\Psi = \Psi_r + j\Psi_c. \quad (2.1)$$

За едно ниво на декомпозиране реалната част се представя като:

$$\Psi_r = (\bigcup_{i=1}^3 \Psi_{r(i)}) \bigcup (\bigcup_{i=1}^3 \Psi_{r(i+3)}), \quad (2.4)$$

където $i = 1, 2, 3$. Реалните части на уейвлетните коефициенти от шестте подленти от разлагането се представят чрез (2.5):

$$\left| \begin{aligned} \Psi_{r(i)}(x, y) &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_{r(1,i)}(x, y) + \Psi_{r(2,i)}(x, y)) \\ \Psi_{r(i+3)}(x, y) &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_{r(1,i)}(x, y) - \Psi_{r(2,i)}(x, y)) \end{aligned} \right., \quad (2.5)$$

които се разделят по начин, съответстващ на ориентирани яркостни преходи на $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$ и $\pm 75^\circ$ с нарастването на i .

Комплексната част на уейвлетната функция се представя чрез:

$$\Psi_c = (\bigcup_{i=1}^3 \Psi_{c(i)}) \bigcup (\bigcup_{i=1}^3 \Psi_{c(i+3)}) \quad (2.7)$$

за която:

$$\left| \begin{aligned} \Psi_{c(i)}(x, y) &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_{c(3,i)}(x, y) + \Psi_{c(4,i)}(x, y)) \\ \Psi_{c(i+3)}(x, y) &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_{c(3,i)}(x, y) - \Psi_{c(4,i)}(x, y)) \end{aligned} \right., \quad (2.8)$$

като $i = 1, 2, 3$.

Пълната енергия на изображението се представя в следния вид:

$$E = \int_{x=0}^X \int_{y=0}^Y I^2(x, y) dx dy \quad (2.10)$$

При избран мащабиращ фактор $j=2$ и едно ниво на декомпозиране $l=1$, се получава равномерното разделяне от шест подленти. Уейвлетните коефициенти се описват от:

$$d(2, m, n) = 4 \int_{x=0}^X \int_{y=0}^Y I(x, y) \Psi^{(1)}(4x - m, 4y - n) dx dy \quad (2.11)$$

където, $\Psi^{(l)}$ е цялостният вид на уейвлетната функция при l нива на декомпозиране. Шестте уейвлетни подленти с детайлни коефициенти се определят от:

$$d_{(1,k)} \leq d(2, m, n), \quad (2.12)$$

В общия случай границите на областта с апроксимиращи коефициенти от уейвлетния спектър се представя чрез:

$$\left\{ m \in \left(\frac{2^l-1}{2^{l+1}} X, \frac{2^l+1}{2^{l+1}} X \right), n \in \left(\frac{2^l-1}{2^l} Y, Y \right) \right\} \quad (2.16)$$

Тогава енергията, съдържаща се в подлентата на апроксимиращите коефициенти е:

$$E_a^{(l)} = \int_{\frac{2^l-1}{2^{l+1}} X}^{\frac{2^l+1}{2^{l+1}} X} \int_{\frac{2^l-1}{2^l} Y}^Y |d(l, m, n)|^2 dm dn \quad (2.17)$$

Отношението $E_a^{(l)}$ към цялата налична енергия в спектъра може да се разгледа като степен за хомогенност по съдържание на изображението, т.е.:

$$e_l = \frac{E_a^{(l)}}{E} \quad (2.19)$$

Тогава ентропията на енергията за ниво l на апроксимиращите коефициенти е:

$$\chi_l = -e_l \log_2 e_l \quad (2.20)$$

а свързаната с нея информация $S_l \geq S_t, S_{l+1} < S_t$. При търсене на подходящо ниво на декомпозиране с цел получаване на минимална по площ област с апроксимиращи уейвлетни коефициенти под внимание се взима предварително зададеното количество информация S_t , което да се съдържа в нея.

2.2. Определяне на броя нива на декомпозиране чрез 2D DT CWT при зададено количество информация, пренасяна от апроксимиращите коефициенти на дискретно изображение

Като се спази теоремата на Найкуист и се премине към цифрова област, изразът за прилагане на 2D DT CWT има следния дискретен вид:

$$I(p, q) = \sum_{m=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{Q-1} c(m, n) \phi(p-m, q-n) + \sum_{j=0}^{P-1} \sum_{m=0}^{Q-1} \sum_{n=0}^{Q-1} d(j, m, n) 2^j \psi(2^j p-m, 2^j q-n), \quad (2.22)$$

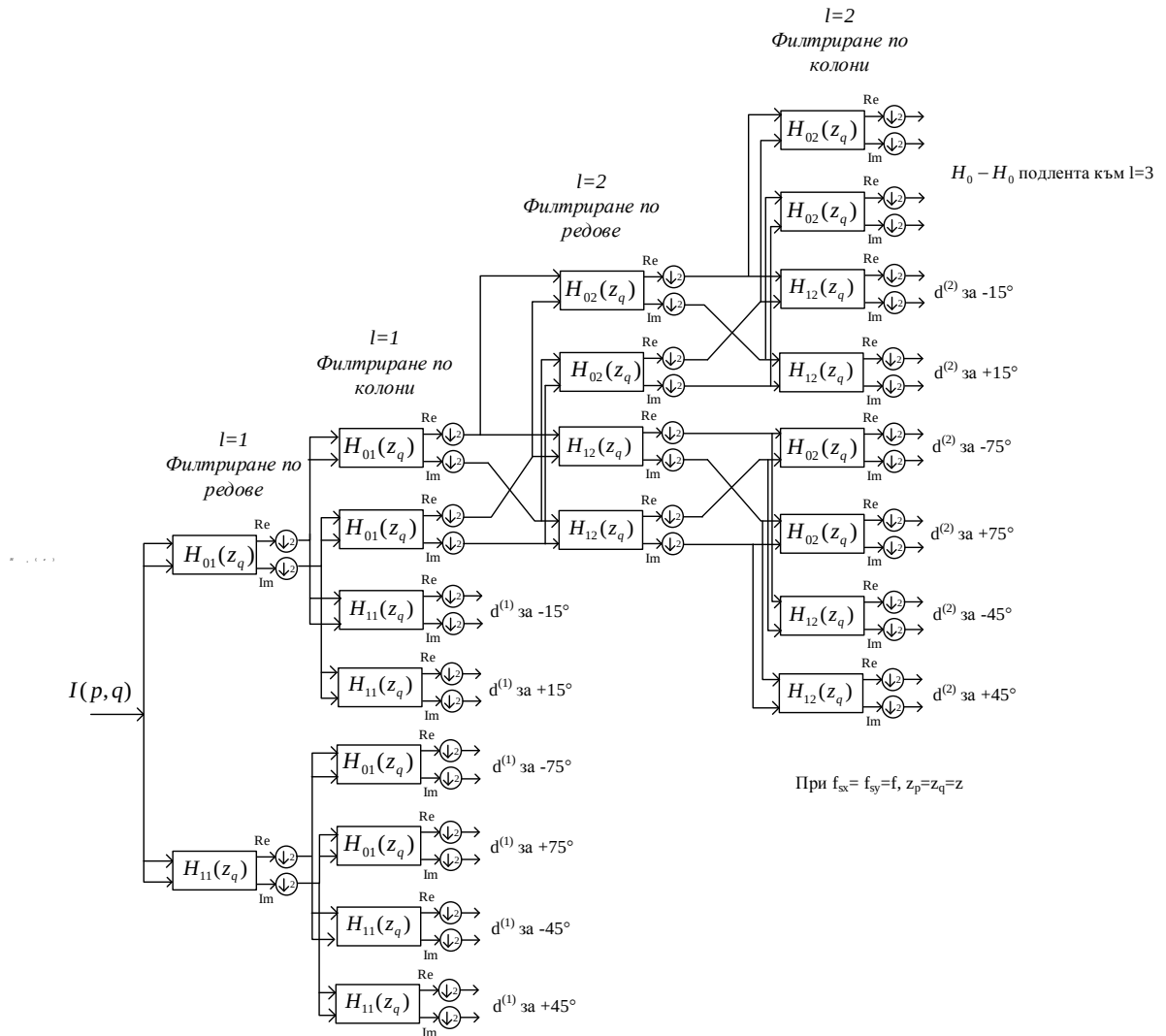
Схема за декомпозиране с две нива чрез 2D DT CWT е представена на фиг. 2.1, базирано на описанието на тази трансформация в общия случай [183], където с $H_{ip}(z)$ са означени предварителните характеристики на комплексните филтри $f_k(p, q)$, като при $i=0$ е налице НЧФ, а при $i=1$ – ВЧФ; $l=1, 2, \dots, n$ е ниво на декомпозиране.

Съгласно дървовидната архитектура от фиг. 2.2, както и условието за инвариантност към трансляция [168], което определя първото ниво от декомпозицията да включва филтри от различен ред (напр. (α, β)) от тези в следващите нива (напр. (γ, δ)), изчислителната сложност на база един пиксел за l нива на пълно декомпозиране е:

$$\left| \begin{array}{l} n_* = 10(\alpha + \beta) + 12(l-1)(\gamma + \beta) \\ n_+ = 20(\alpha + \beta - 2) + 24(l-1)(\gamma + \beta - 2) \\ n_{op} = n_* + n_+ \end{array} \right. \quad (2.35)$$

където n_* са броят на умноженията на дробни стойности, n_+ - на събиранията, а n_{op} – общият брой операции. Извършеното преобразуване на Фурие (2.25) – (2.26) не участва в цялостната трансформация и не влияе върху броя на всяка от изброените операции. Броят операции, необходими за намирането единствено на апроксимиращите коефициенти при l ниво на декомпозиране е:

$$\left| \begin{array}{l} n_* = 3(\alpha + \beta) + 4(l-1)(\gamma + \beta) \\ n_+ = 6(\alpha + \beta - 2) + 8(l-1)(\gamma + \beta - 2) \\ n_{op} = n_* + n_+ \end{array} \right. \quad (2.36)$$



Фиг. 2.1: Обобщена анализираща част при 2D DT CWT за $l=2$

2.3. Определяне на времето за търсене на подобие между две изображения чрез 2D DT CWT при l ниво на декомпозиране и използване на разстояние на Хаусдорф и Евклид

Ако $I_1(p, q)$ и $I_2(p, q)$ са две изображения с еднакви размери $p \in \{0, P-1\}$ и $q \in \{0, Q-1\}$. След l нива на декомпозиране чрез 2D DT CWT уейвлетният спектър съдържа следния брой апроксимиращи коефициенти:

$$\eta^{(l)} = \left\{ \left[\frac{2^l + 1}{2^{l+1}} - \frac{2^l - 1}{2^{l+1}} \right] P \right\} \left[Q - \frac{2^l - 1}{2^l} Q \right] = \frac{P \cdot Q}{2^{2l}} \quad (2.53)$$

Съгласно (2.54) броят на умноженията, необходим за определяне на Евклидово разстояние, е $2\eta^{(l)}$, броят на събиранията - $2\eta^{(l)}$, а броят на коренуванията - $\eta^{(l)}$ като общата изчислителна сложност се определя от:

$$n_{op} = 2\eta^{(l)}(n_* + 1) + 2\eta^{(l)}n_+ + \eta^{(l)}n_{\sqrt{}} \quad (2.55)$$

където $n_{\sqrt{}} = 1$ е операцията коренуване, а $n_* = n_+ = 1$. За определяне на подобие то между същите изображения по съдържание с прилагането на разстояние по Хаусдорф се извършва следния брой операции:

$$\begin{cases} n_* = 4\eta^{(l)2} \\ n_+ = 2\eta^{(l)2} \\ n_{\sqrt{}} = 2\eta^{(l)2} \\ n_{>} = 2\eta^{(l)} + 3 \end{cases} \quad (2.59)$$

2.4. Алгоритми за индексване на базата данни с изображения за извличане по съдържание

Стъпките на протичане определянето на признаковите вектори от изображенията в базата данни са представени на фиг. 2.5. Целта е да се определи до какво ниво на декомпозиране l_{end} ще се достигне при запазване на предварително зададена стойност на енергията, свързана с информацията от изображението.

2.5. Алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по зададено количество информация, съдържаща се в апроксимиращите коефициенти и избор на метрика за определяне на близост

Цялостният алгоритъм е представен на фиг. 2.6. Той включва нормализиране размера на заявката $I(p, q)$ до размера на изображенията от базата данни - $p \in \{0, P-1\}$ и $q \in \{0, Q-1\}$. При зададено време за сравнение с всички изображения t_{req} се определя максимално допустимото ниво на декомпозиране l_{max} чрез 2D DT CWT – в случая се сравняват две разстояния – по Евклид и по Хаусдорф, т.е налице са две възможни нива l_{Emax} и l_{Hmax} .

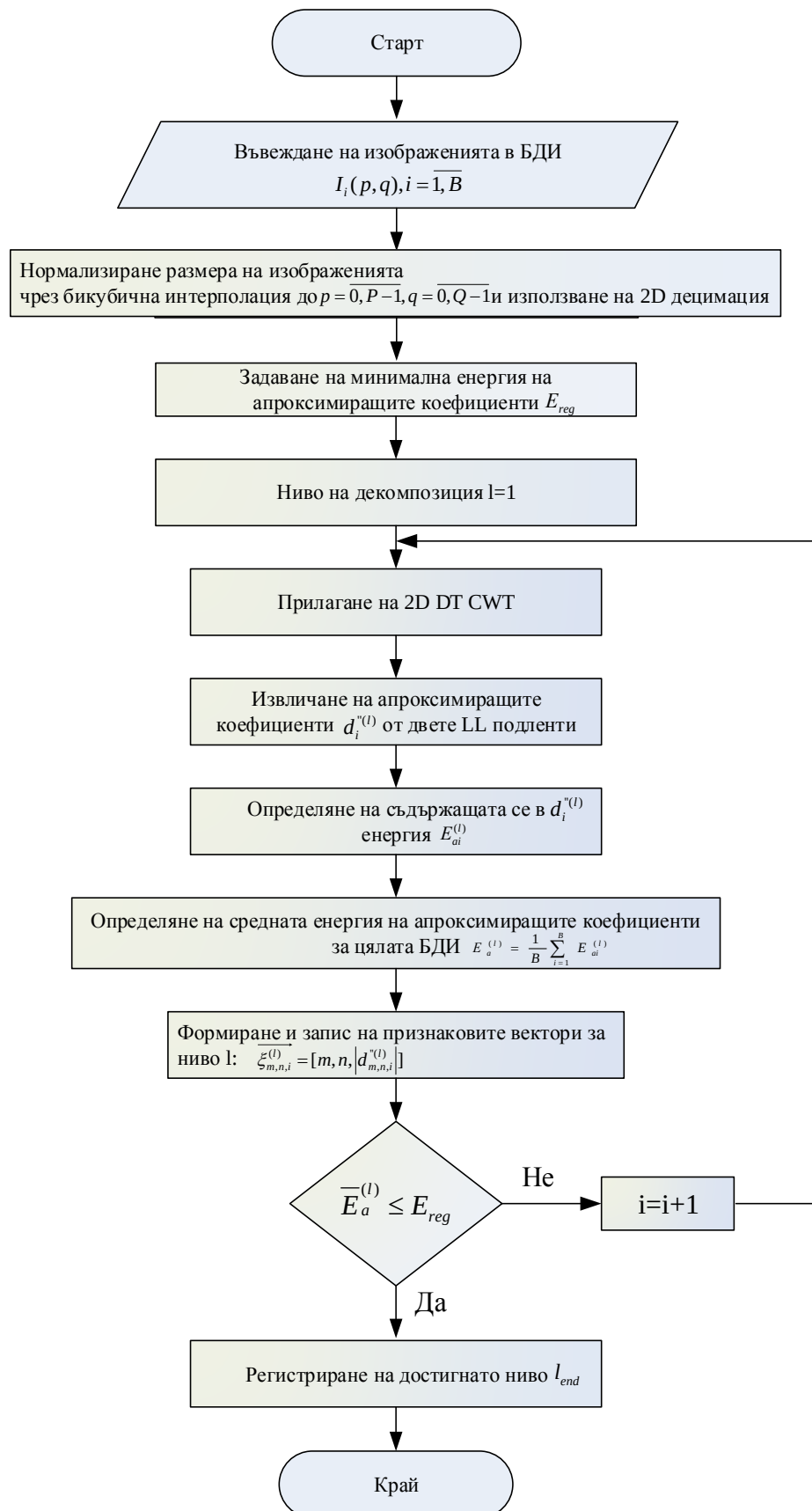
Научни, научно-приложни и приложни приноси към Глава 2

2.10.1. Научни приноси

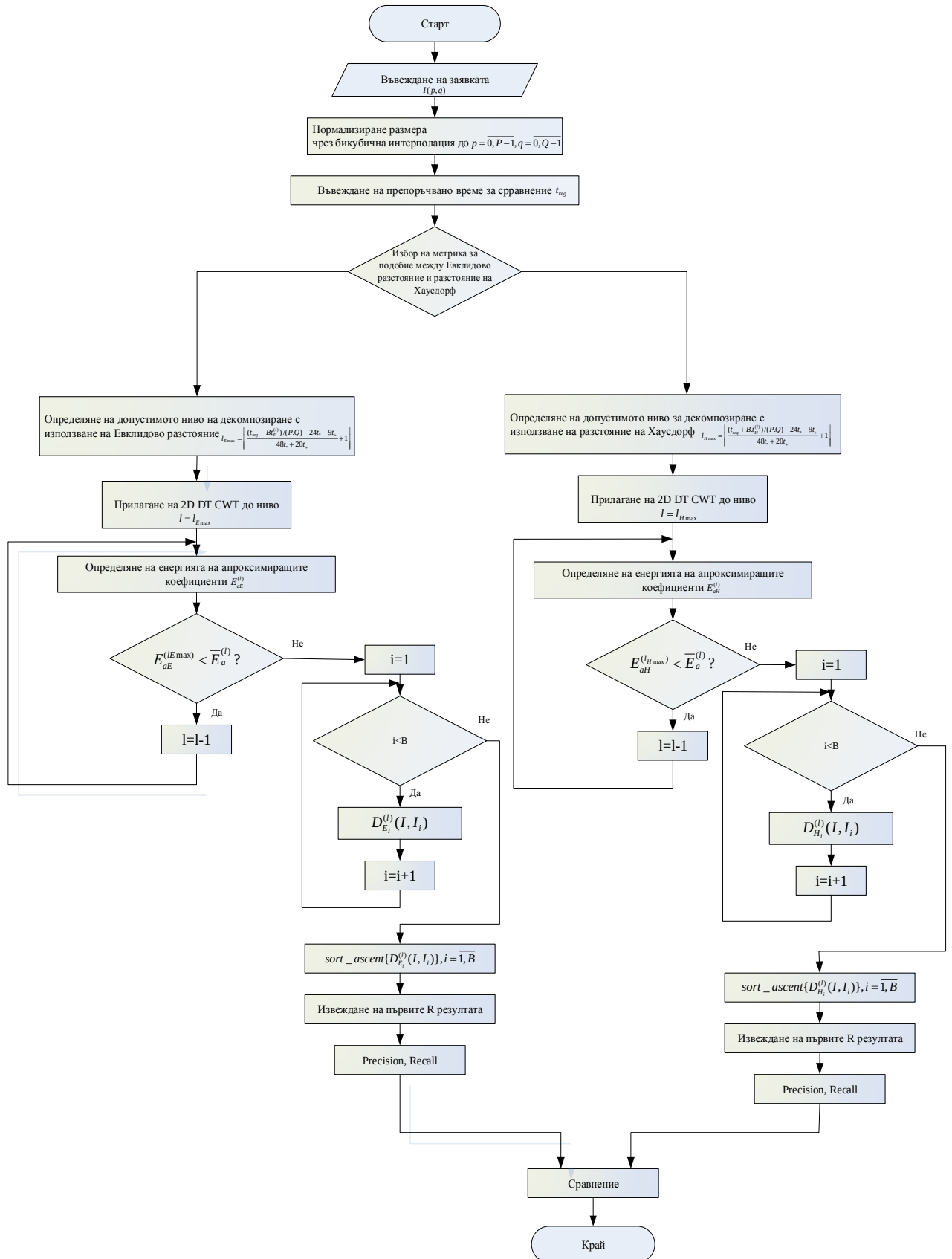
Разработен е подход за адаптивно определяне на нивото на декомпозиране на цифрови изображения при прилагане на 2D DT CWT при зададени време за

изпълнение и количество информация, съдържащо се в признаковите вектори, което осигурява по-висока ефективност при извличане на изображения по съдържание – изведени зависимости (2.13) – (2.21), (2.35) – (2.38), (2.41) – (2.50).

2.10.2. Научно-приложни приноси



Фиг. 2.5. Алгоритъм за индексване на БДИ за извличане по съдържание



Фиг. 2.6. Алгоритъм за оценка на точността при извличане на изображения по съдържание от база данни с отчитане на времето за изпълнение и ранга на извежданите изображения

1. Разработен е алгоритъм за индексване на БДИ за търсене по съдържание на база количество съдържаща се енергия в подлентата на апроксимиращите коефициенти – фиг. 2.4, което осигурява по-висока информационна концентрация на еталоните. Разработен е алгоритъм за оценка на точността при извличане на изображения по съдържание с отчитане на времето за изпълнение – фиг. 2.5, характеризиращи се с висока ефективност. Определени са времената за намиране на разстояния по Евклид (2.55) и по Хаусдорф (2.58) – (2.59) между изображенията, представени чрез апроксимиращи 2D DT CWT коефициенти.

ГЛАВА 3

АЛГОРИТМИ ЗА ИЗВЛИЧАНЕ НА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО СЪДЪРЖАНИЕ ЧРЕЗ ГЛОБАЛНИ ПРИЗНАЦИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА РАЗСТОЯНИЯ НА ХАУСДОРФ И ЕВКЛИД И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА ИМ

3.2. Алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по глобални признаци с използването на разстояние на Хаусдорф (АГПХ)

Представеният алгоритъм (АГПХ) е базиран на идеята за глобално извличане на признаци. Поради това признаковите вектори са формирани на базата на цели изображения I_{n-1} . За определянето на подобие е използвано разстояние на Хаусдорф. Формирането на признаковите вектори, както и на признаковия вектор на заявено изображение и определянето на подобие са базирани на алгоритмите от фиг. 2.5 и фиг. 2.6 при използване на глобални признаци.

3.3. Алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по глобални признаци с използването на Евклидово разстояние (АГПЕ)

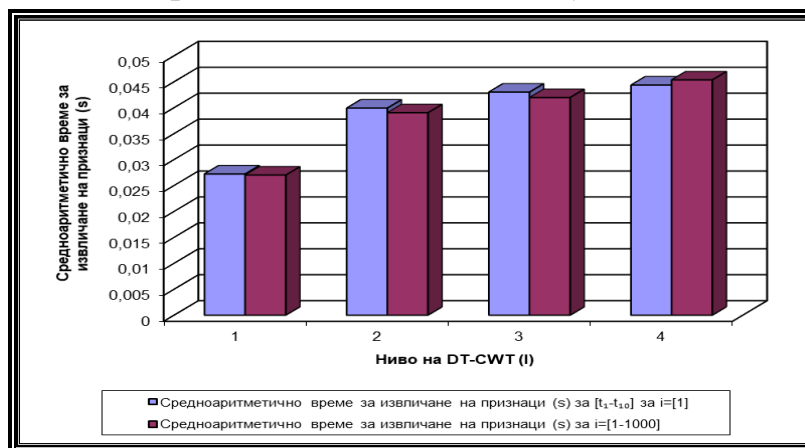
Този алгоритъм (АГПЕ) е базиран на описания в т. 3.2. и също цели извличането на изображения по глобални признакови вектори. Разликата между тях се изразява в използването на Евклидово разстояние за определяне на подобие.

На фиг. 3.3 е представена блок-схема на генерирането на глобален признаков вектор на заявено изображение и определянето на подобие с прилагането на Евклидово разстояние.

3.10. Изследване производителността на АГПХ

3.10.1. Време за извличане на глобални признаци

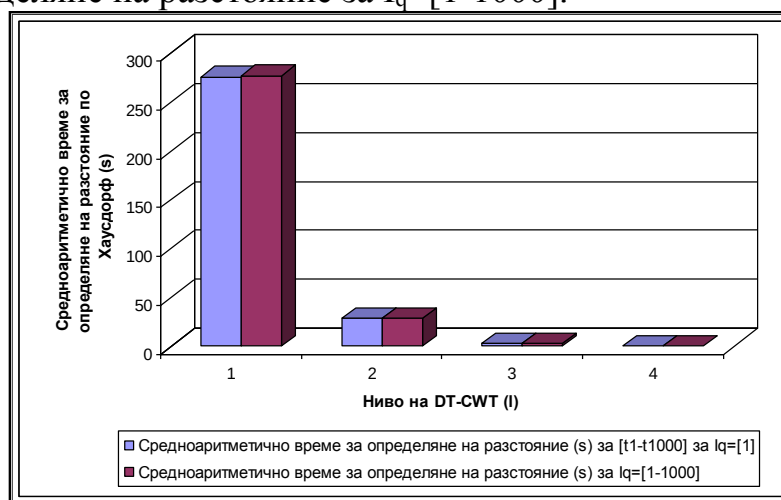
На фигура 3.13 са изобразени изменението на средноаритметичното време за извличане на признаци за $[t_1-t_{10}]$ за $i=[1]$, ($I_{n-1_{AvrExT_i}}$) и средноаритметичното време за извличане на признаци за $i=[1-1000]$, (I_{AvrExT}).



Фиг. 3.13: Стойности на средноаритметичното време за извличане на признаци за всяко ниво на трансформация при глобални признаци

3.10.2. Време за определяне на подобие чрез разстояние на Хаусдорф по глобални признаци

Фиг. 3.16 показва съотношението в резултатите на средноаритметично време за определяне на разстояние за $[t_1-t_{1000}]$ за $I_q=[1]$ и средноаритметично време за определяне на разстояние за $I_q=[1-1000]$.



Фиг. 3.16: Стойности на средноаритметичното време за определяне на разстояние на Хаусдорф за всяко ниво на трансформация при глобални признаци

3.11. Изследване ефективността на АГПХ

3.11.1. Оценка на ефективността на АГПХ без отчитане на ранг

С цел анализ и оценка на АГПХ са проведени експериментални изследвания според избраната в т. 3.6.3.1. методика. Изборът на заявка е съобразен с минимум 10 броя извлечени изображения. В Таблица 3.8 са поместени първите 10 от тях от най-добре представените тестови категории ($\text{Precision} \geq 60\%$).

Таблица 3.8: Експериментални резултати за оценка на ефективността на АГПХ за категории с Precision $\geq 60\%$

Пореден номер	Група на заявката	Брой на релевантно изведените изображения	Брой на нерелевантно изведените изображения	Общ брой на изведените изображения	Precision (%)	Recall (%)
1	Динозаври	10	0	10	100	10
2	Слонове	8	3	11	72.73	8
3	Рози	15	1	16	93.75	15

Сравнителният анализ по тематично подобие и форма между трите категории показва, че с най-високи резултати се характеризират групите „рози” и „динозаври”.

Таблица 3.9 представя получените резултати за тестови категории „аборигени”, „социален живот”, „архитектура”, „автобуси”, „коне”, „природа”, и „храна” за АГПХ.

Таблица 3.9: Експериментални резултати за оценка на ефективността на АГПХ за категории с Precision $< 60\%$

Пореден номер	Група на заявката	Брой на релевантно изведените изображения	Брой на нерелевантно изведените изображения	Общ брой на изведените изображения	Precision (%)	Recall (%)
1	Аборигени	3	7	10	30	3
2	Социален живот	7	8	15	46.67	7
3	Архитектура	3	10	13	23.08	3
4	Автобуси	2	8	10	20	2
5	Коне	5	5	10	50	5
6	Природа	6	6	12	50	6
7	Храна	3	7	10	30	3

3.11.2. Оценка на ефективността на АГПХ с отчитане на ранг

АГПХ с отчитане на ранг се оценява съгласно изчислените средноаритметични стойности, както следва: $t_{AVR\ Im\ Ext}=0,57\ sec.$, $I_{AVR\ RTR}=29,14$ бр., $Precision_{AVR}=47,92\%$, $Recall_{AVR}=12\%$, $ANMRR=0,249$ за всички извършени заявки и $MAP=78,99\%$.

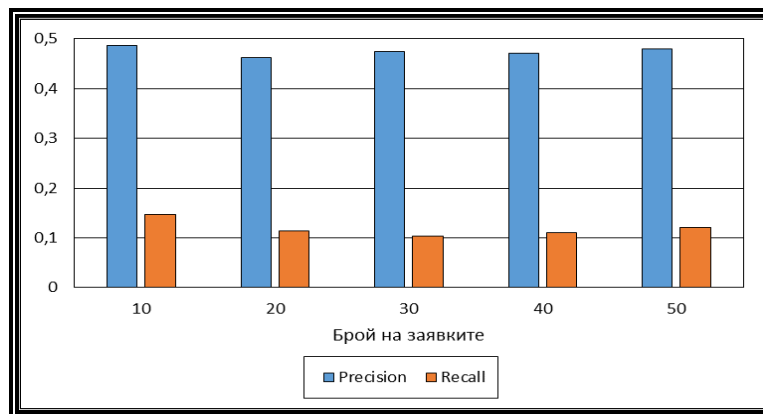
3.11.3. Оценка на ефективността на АГПХ според броя на подадените заявки

Резултатите за АГПХ са представени на фиг. 3.30.

3.12. Изследване ефективността на АГПЕ

3.12.1. Оценка на ефективността на АГПЕ без отчитане на ранг

Проведени са изследвания за определяне ефективността на алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по глобални признаци с използването на Евклидово разстояние (АГПЕ). Изборът на заявка е съобразен с минимум 8 броя извлечени изображения.



Фиг. 3.30: Изменение по критерии Precision и Recall спрямо броя заявки за АГПХ

Получените резултати за категориите, при които Precision $\geq 60\%$ са показани в Таблица 3.10.

Таблица 3.10: Експериментални резултати за оценка на ефективността на АГПЕ за категории с Precision $\geq 60\%$

Пореден номер	Група на заявката	Брой на релевантно изведените изображения	Брой на нерелевантно изведените изображения	Общ брой на изведените изображения	Precision (%)	Recall (%)
1	Динозаври	8	0	8	100	8
2	Рози	8	0	8	100	8
3	Коне	7	3	10	70	7

Алгоритъмът се отличава със способността да генерира най-добри резултати при разпознаването на изображения с близък интензитет и еднороден фон.

В Таблица 3.11 са представени получените резултати за категориите „аборигени“, „социален живот“, „архитектура“, „автобуси“, „слонове“, „природа“, и „храна“ за АГПЕ.

Таблица 3.11: Експериментални резултати за оценка на ефективността на АГПЕ за категории с Precision $< 60\%$

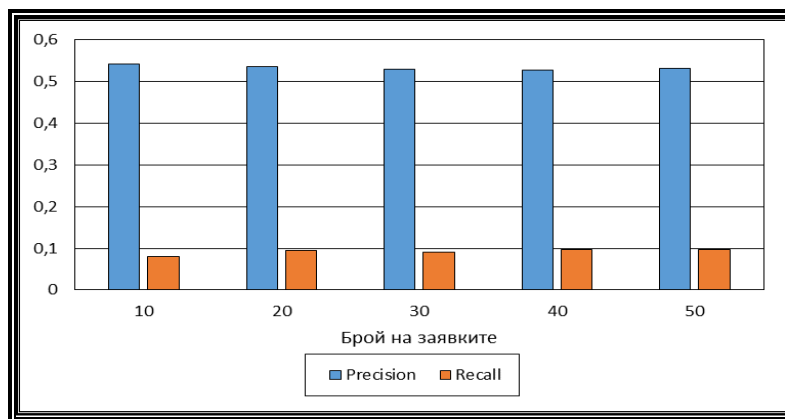
Пореден номер	Група на заявката	Брой на релевантно изведените изображения	Брой на нерелевантно изведените изображения	Общ брой на изведените изображения	Precision (%)	Recall (%)
1	Аборигени	2	6	8	25	8
2	Социален	5	5	10	50	5
3	Архитектура	4	4	8	50	4
4	Автобуси	3	5	8	37.5	3
5	Слонове	3	5	8	37.5	3
6	Природа	3	5	8	37.5	3
7	Храна	1	7	8	12.5	1

3.12.2. Оценка на ефективността на АГПЕ с отчитане на ранг

Изчислени са средноаритметични стойности за седем параметъра, както следва: $t_{AVR\ Im\ Ext}=0,34$ сек., $I_{AVR\ RTR}=17,36$ бр., $Precision_{AVR}=53,27\%$, $Recall_{AVR}=9,68\%$, $ANMRR=0,207$ за всички извършени заявки и $MAP=81,67\%$.

3.12.3. Оценка на ефективността на АГПЕ според броя на подадените заявки

Получените резултати са илюстрирани графично на фиг. 3.44.



Фиг. 3.44: Изменение по критерии Precision и Recall спрямо броя заявки за АГХЕ

3.14. Научно-приложни и приложни приноси към Глава 3

3.14.1. Научно-приложни приноси

1. Определени са времената за намиране на всички признакови вектори в БДИ (3.18), както и времето за намиране на сходство с тях при двата вида метрики (3.20) – (3.22).
2. Синтезирани са алгоритми за извличане на изображения по съдържание чрез глобални 2D DT CWT признаци (фиг. 3.1 – фиг. 3.3), които позволяват адаптивен избор на нивото на декомпозиране по зададено време за изпълнение. Сравнено е теоретично и експериментално определеното време на работата им ((3.25), (3.26), таблица 3.5, таблица 3.7, фиг. 3.12 – фиг. 3.13, таблица 3.6, фиг. 3.14 – фиг. 3.16) и е оценена точността на извличане (таблица 3.8, фиг. 3.17, таблица 3.9, фиг. 3.21, фиг. 3.29, фиг. 3.30).

3.14.2. Приложни приноси

1. Определени са спектрите на трите тестови изображения чрез 2D DT CWT до пето ниво на декомпозиране, определени са апроксимиращите им коефициенти за всяко от тях заедно с мащабиращите им функции, възстановените им приближения и са сравнени качествено и количествено – фиг. 3.5 – фиг. 3.8, таблица 3.3. Определени са разстоянията по Евклид и Хаусдорф между двойки цифрови изображения от едни и същи тематични групи за

пет нива на декомпозиране чрез 2D DT CWT (таблица 3.4). Определени са разликите в разстоянията за подобие за двата случая (фиг. 3.9). Определена е относителната част на енергията на апроксимиращите коефициенти по нива на декомпозиране за примерна база данни (фиг. 3.10).

2. Изпълнена е програмна реализация на алгоритмите, представени на фиг. 3.1 – фиг. 3.3. Определени са прогнозните времена за изпълнение на операциите събиране, умножение, коренуване и сравнение на база използваната тестова БДИ (т. 3.10.1.). Приложена е методика за оценка на точността на извличане на цифрови изображения по съдържание от БДИ на база синтезираните алгоритми чрез параметрите: Precision, Recall, ANMRR и MAP (т. 3.6.3.1.– т. 3.6.3.3.).
3. Изследвана е експериментално производителността на алгоритъма за извличане на изображения по съдържание чрез глобални характеристики и прилагане на Евклидово разстояние и разстояние на Хаусдорф. Определена е точността на извличане без (таблица 3.10, фиг. 3.31, таблица 3.11, фиг. 3.35) и с отчитане на ранг (фиг. 3.43). Оценена е ефективността според броя на подадените заявки (фиг. 3.44).

3.15. Публикации към Глава 3

Получените резултати и техните анализи от проведените научни изследвания към Глава 3 са публикувани в доклади [A3] и [A6].

ГЛАВА 4

АЛГОРИТМИ ЗА ИЗВЛИЧАНЕ НА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО СЪДЪРЖАНИЕ ЧРЕЗ ЛОКАЛНИ ПРИЗНАЦИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА РАЗСТОЯНИЯ ПО ХАУСДОРФ И ЕВКЛИД И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА ИМ

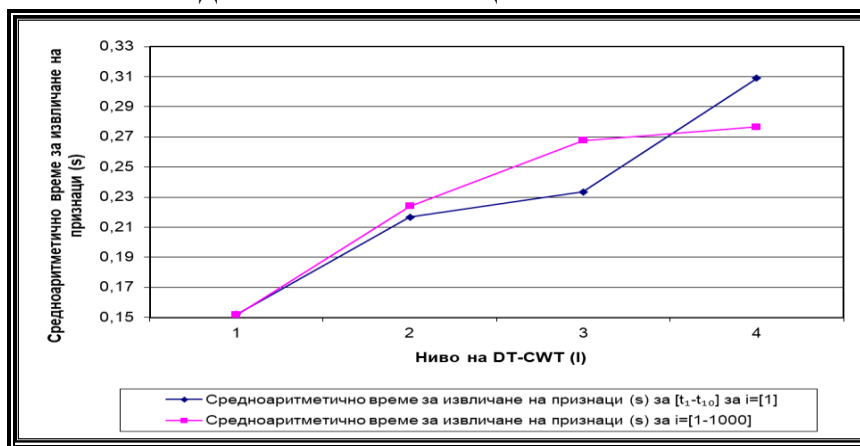
4.1. Алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по локални признаци с използването на разстояние на Хаусдорф (АЛПХ)

Разработеният алгоритъм (АЛПХ) е в съответствие с описания в Глава 2 процес (фиг. 2.5 и 2.6).

4.4. Изследване производителността на алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по локални признаци с използването на разстояние на Хаусдорф (АЛПХ)

4.4.1 Време за извличане на локални признаци

На фиг. 4.6 графично е представено времето за извличане на признаци (EXT) на АЛПХ на база данните от Таблица 4.2.



Фиг. 4.6: Изменение на средноаритметичното време за извличане на признаци в зависимост от нивото на трансформация при локални признаци

4.4.2. Време за определяне на подобие чрез разстояние на Хаусдорф по локални признаци

Получените резултати са подредени в Таблица 4.3.

4.5. Оценка на ефективността на алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по локални признаци с използването на разстояние на Хаусдорф (АЛПХ)

4.5.1. Оценка на ефективността на АЛПХ без отчитане на ранг

Целта на проведените изследвания е оценка и анализ ефективността на проектираните CBIR подход и алгоритъм. От получените резултати са избрани и представени онези категории, при които алгоритъмът демонстрира най-добро представяне ($\text{Precision} \geq 60\%$) – „динозаври”, „слонове”, „рози”, „коне”, „природа”. Изборът на заявка е съобразен с генерирането на минимум 10 броя изображения. Получените резултати са представени в Таблица 4.5. При категории „аборигени”, „социален живот”, „архитектура”, „автобуси” и „храна” предложеният алгоритъм (АЛПХ) демонстрира резултати, при които $\text{Precision} < 60\%$. Таблица 4.6 представя получените резултати.

Таблица 4.3: Време за определяне на подобие чрез разстояние на Хаусдорф при локални признаци

Време за определяне на подобие чрез разстояние на Хаусдорф						Време за определяне на подобие чрез Евклидово разстояние
Ниво (l)	Време за определяне на разстояние (s) за t_1 за $I_q=[1]$	Време за определяне на разстояние (s) за $[t_1-t_{1000}]$ за $I_q=[1]$	Средноаритметично време за определяне на разстояние (s) за $[t_1-t_{1000}]$ за $I_q=[1]$	Средноаритметично време за определяне на разстояние (s) за $I_q=[1-1000]$	Прогнозно време за определяне на разстояние $t_{ELP}^{(l)}, s$	Прогнозно време за определяне на разстояние $t_{ELP}^{(l)}, s$
1	0.085725	41994.45	41.99445	41.66182	26,17245	0,038306
2	0.004936	3657.405	3.657405	3.614438	1,635778	0,009576
3	0.001209	234.0225	0.234023	0.274165	0,102236	0,002394
4	0.000253	118.365242	0.118365242	0.10163034	0,06389760	0,000599

Таблица 4.5: Експериментални резултати за оценка на ефективността на предложения CBIR подход и алгоритъм (АЛПХ) за категории с Precision $\geq 60\%$

№	Тематична категория на заявката	Брой на релевантно изведените изображения	Брой на нерелевантно изведените изображения	Общ брой на изведените изображения	Precision (%)	Recall (%)
1	Динозаври	10	0	10	100	10
2	Слонове	8	2	10	80	8
3	Рози	10	0	10	100	10
4	Коне	7	3	10	70	7
5	Природа	6	4	10	60	6

Таблица 4.6: Експериментални резултати за оценка на ефективността на предложения CBIR подход и алгоритъм (АЛПХ) за категории с Precision $< 60\%$

№	Тематична категория на заявката	Брой на релевантно изведените изображения	Брой на нерелевантно изведените изображения	Общ брой на изведените изображения	Precision (%)	Recall (%)
1	Аборигени	2	9	11	18.2	2
2	Социален живот	5	5	10	50	5
3	Архитектура	3	7	10	30	3
4	Автобуси	2	10	12	16.7	2
5	Храна	4	6	10	40	4

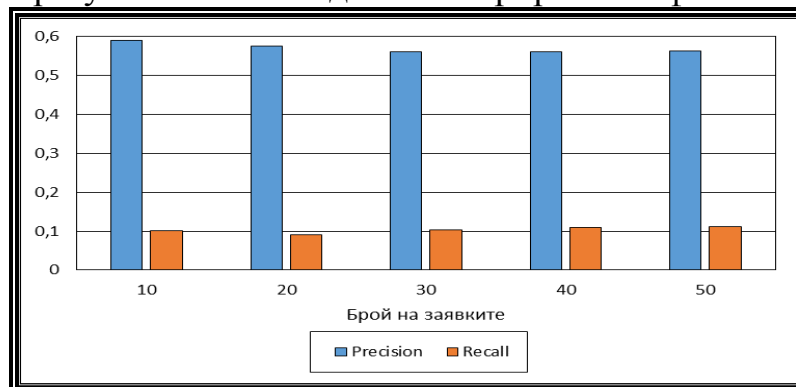
4.5.2. Оценка на ефективността на АЛПХ с отчитане на ранг

Тя се базира на изчисляването на $t_{AVR\ Im\ Ext}$, $I_{AVR\ RTR}$, мерките $Precision_{AVR}$, $Recall_{AVR}$, ANMRR, Accuracy и MAP. Получените резултати са съответно:

$t_{AVR\ Im\ Ext}=0,47\text{sec.}$, $I_{AVR\ RTR}=22,24$ бр., $Precision_{AVR}=56.26\%$, $Recall_{AVR}=11,08\%$, $ANMRR=0.210$ за всички извършени заявки и $MAP=82,60\%$.

4.5.3. Оценка на ефективността на АЛПХ според броя на подадените заявки

Получените резултати са нагледно илюстрирани на фиг. 4.24.



Фиг. 4.24: Изменение по критерии Precision и Recall спрямо броя заявки за АЛПХ

Графиката представя изменението на резултатите по критерий Precision. Те бележат своя максимум в категорията от десет заявки, след което се наблюдава тенденция към намаляване. Алгоритъмът проявява устойчивост като генерира близки по Precision стойности за групите от тридесет, четирдесет и петдесет заявки. По отношение на Recall, фигурата показва, че АЛПХ извлича най-малък брой релевантни изображения от общият им брой в тестовата база данни във втората изследвана група заявки.

4.6. Оценка на ефективността на алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по локални признаци с използването на Евклидово разстояние (АЛПЕ)

4.6.1. Оценка на ефективността на АЛПЕ без отчитане на ранг

Проведени са експериментални изследвания за определяне ефективността на алгоритъм за извличане на изображения по локални признаци с използването на Евклидово разстояние (АЛПЕ). От получените резултати са избрани и представени онези категории, при които алгоритъмът демонстрира най-добро представяне ($Precision \geq 60\%$) – „динозаври”, „рози”, „коне”, „природа”. Изборът на заявка е съобразен с генерирането на минимум 10 броя изображения. Получените резултати са представени в Таблица 4.7.

Таблица 4.7: Експериментални резултати за оценка ефективността на АЛПЕ за категории с Precision $\geq 60\%$

№	Тематична категория на заявката	Брой на релевантно изведените изображения	Брой на нерелевантно изведените изображения	Общ брой на изведените изображения	Precision (%)	Recall (%)
1	Динозаври	10	0	10	100	10
2	Рози	10	0	10	100	10
3	Коне	7	3	10	70	7
4	Природа	6	4	10	60	6

В Таблица 4.8 са представени резултатите, получени за категории „аборигени”, „социален живот”, „архитектура”, „автобуси”, „слонове” и „храна” за посочения алгоритъм, за които Precision $< 60\%$.

Таблица 4.8: Експериментални резултати за оценка на ефективността на АЛПЕ за категории с Precision $< 60\%$

Пореден номер	Група на заявката	Брой на релевантно изведените изображения	Брой на нерелевантно изведените изображения	Общ брой на изведените изображения	Precision (%)	Recall (%)
1	Аборигени	3	7	10	30	3
2	Социален живот	7	7	14	50	7
3	Архитектура	3	7	10	30	3
4	Автобуси	2	8	10	20	2
5	Слонове	11	11	22	50	11
6	Храна	2	8	10	20	2

4.6.2. Оценка на ефективността на АЛПЕ с отчитане на ранг

Определени са: $t_{AVR\ Im\ Ext}=0,42\ sec.$, $I_{AVR\ RTR}=21,76\ бр.$, $Precision_{AVR}=55,38\%$, $Recall_{AVR}=10,84\%$, $ANMRR=0,231$ за всички извършени заявки и $MAP=81,28\%$.

4.6.3. Оценка на ефективността на АЛПЕ според броя на подадените заявки

Получените резултати са нагледно представени на фиг. 4.38.

4.8.1. Научно-приложни приноси

1. Синтезирани са алгоритми за извличане на изображения чрез локални 2D DT CWT признаци (фиг. 4.1 – фиг. 4.3), които позволяват адаптивен избор на нивото на декомпозиране по зададено време за изпълнение. Сравнено е теоретично и експериментално определеното време на работата им ((4.1), (4.2), таблица 4.2 – таблица 4.4, фиг. 4.4 - фиг. 4.10). Оценена е точността на извличане (таблица 4.5 – таблица 4.8, фиг. 4.11, фиг. 4.17, фиг. 4.23 - фиг. 4.25, фиг. 4.30, фиг. 4.37, фиг. 4.38).

4.8.2. Приложни приноси

1. Изпълнена е програмна реализация на алгоритмите, представени на фиг. 4.1 – фиг. 4.3. Определени са прогнозните времена за изпълнение на операциите събиране, умножение, коренуване и

сравнение на база използваната тестова БДИ (т. 4.4.2).

4.9. Публикации към Глава 4

Резултатите от проведените изследвания към Глава 4 и направените анализи са публикувани в доклади [A1], [A2] и [A5].

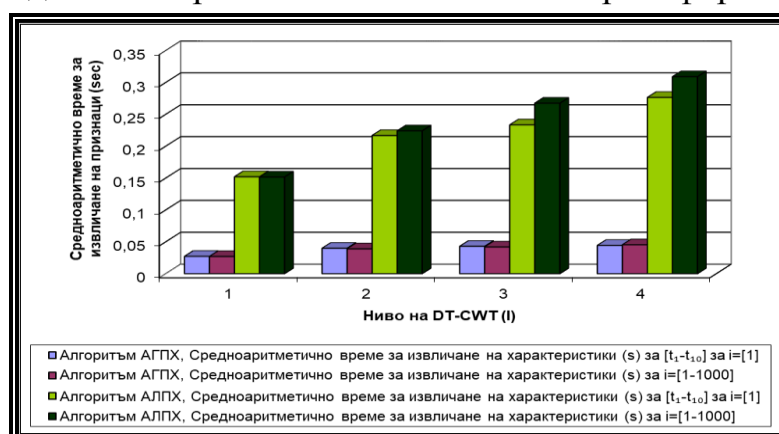
ГЛАВА 5

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ МЕЖДУ РАЗРАБОТЕНИТЕ И СЪЩЕСТВУВАЩИ АЛГОРИТМИ ПО СЪДЪРЖАНИЕ

5.1. Сравнителен анализ на резултатите от проведените изследвания по критерии производителност и ефективност

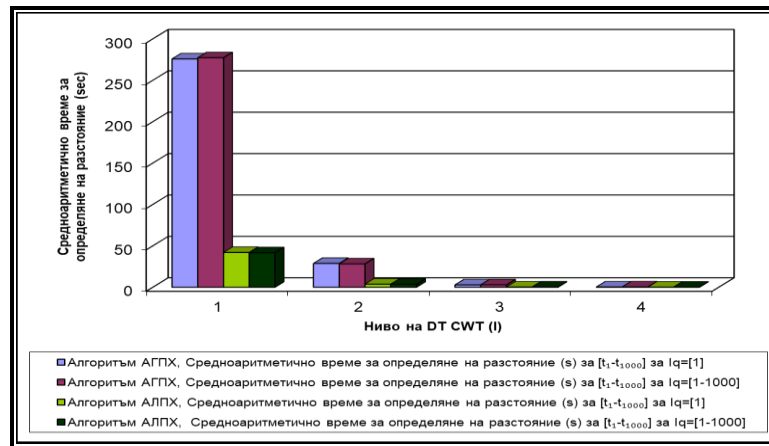
5.1.1. Сравнителен анализ по критерий производителност

На фиг. 5.2 графично е изобразено съотношението между стойностите на средно- аритметичното време за извличане на признаци за $[t_1-t_{10}]$ за $i=[1]$ ($I_{n-1AvrExt_i}$) и за средно- аритметичното време за извличане на признаци за $i=[1-1000]$ (I_{AvrExt}) за двата алгоритъма за всяко ниво на трансформация.



Фиг. 5.2: Съотношение между стойностите на средноаритметичното време за извличане на признаци за АГПХ и АЛПХ за всяко ниво на трансформация

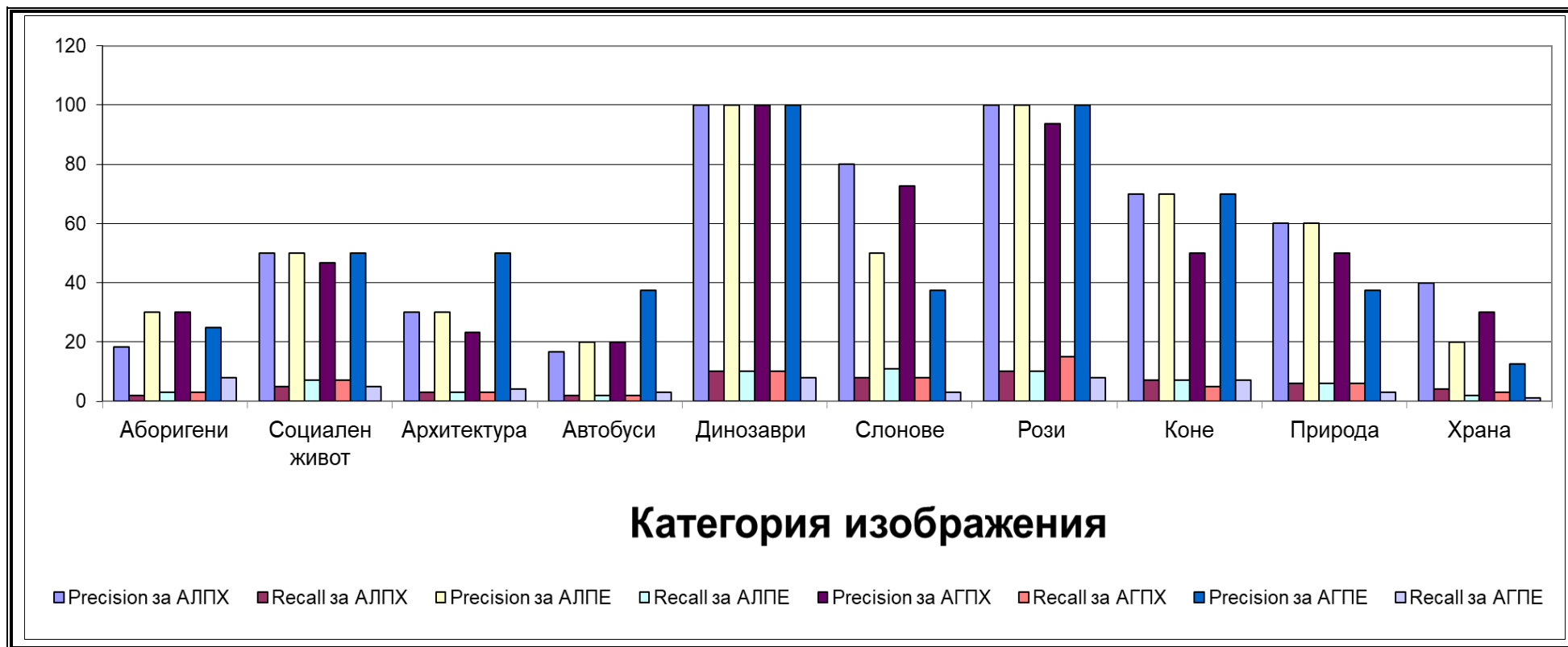
Конкретните стойности на средноаритметичното време за определяне на разстояние за $[t_1-t_{1000}]$ за $I_q=1$ и средноаритметичното време за определяне на разстояние за $I_q=[1-1000]$ при всяко от нивата на DT CWT са показани на фиг. 5.4.



Фиг. 5.4: Стойности на средноаритметичното време за определяне на разстояние на Хаусдорф за всяко ниво на трансформация при АГПХ и АЛПХ

5.1.2. Сравнителен анализ по критерий ефективност без отчитане на ранг

На фиг. 5.5 е показано съотношението в резултатите на метриките Precision и Recall за десетте категории по четирите разглеждани алгоритъма. Обобщената оценка на сравнителния анализ проведен в т. 4.5.1. показва, че разработеният алгоритъм за извличане на изображения по съдържание по ло-



Фиг. 5.5: Съотношение в резултатите на метриките Precision и Recall за десетте категории по АЛПХ, АЛПЕ, АГПХ, АГПЕ

кални признаци с използването на разстояние на Хаусдорф (АЛПХ) дава възможност за извличане с отчитане на съдържание по форма и текстура. По-слабо изразено влияние, върху точността на извличане е наблюдава при използването на Евклидово разстояние.

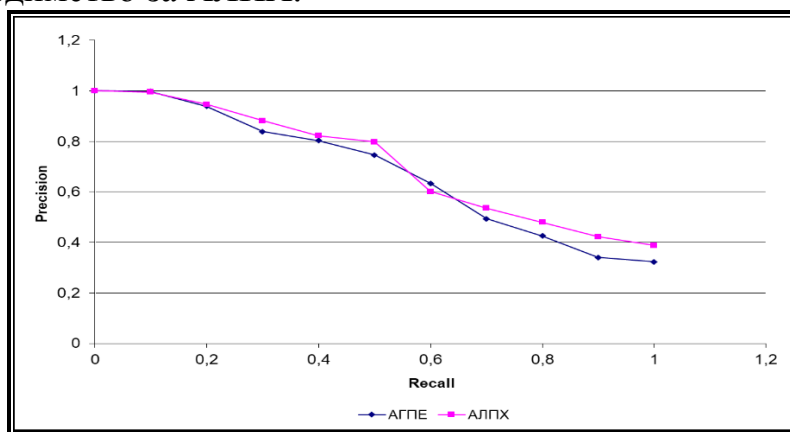
Анализирайки способностите на четирите алгоритъма се установява, че най-добър за разпознаване на изображения е предложеният в дисертационния труд (АЛПХ). Близки възможности демонстрират алгоритъмът с локални признаци, използващ Евклидово разстояние (АЛПЕ) и този с глобални признаци, прилагащ разстояние на Хаусдорф (АГПХ) с предимство за първия. Най-слаб резултат демонстрира алгоритъмът с глобални признаци, с приложено Евклидово разстояние (АГПЕ).

Алгоритмите, базирани на разделяне на подизображения в препроцесорната обработка и използващи локални признаци осигуряват възможност за извличането на по-детайлна и пространствена информация. Това позволява разпознаването на изображения по текстура и детайли. В зависимост от избраната метрика за определяне на разстояние, резултатът е по-добър при прилагане на разстояние на Хаусдорф в сравнение с Евклидово разстояние.

5.1.1. Сравнителен анализ по критерий ефективност

с отчитане на ранг

Ефективността на АЛПХ и АГПЕ е представена графично на фиг. 5.8 чрез Precision x Recall крива. Забелязва се голяма близост в ефективността им с известно предимство за АЛПХ.

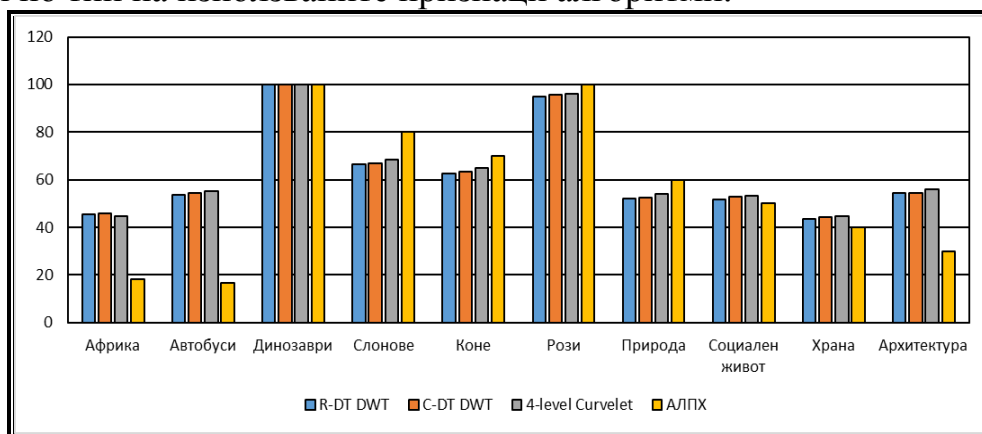


Фиг. 5.8: Precision x Recall криви за АЛПХ и АГПЕ

5.1. Сравнителен анализ на АЛПХ с други СВІR алгоритми базирани на тестова база данни на Уонг

На фиг. 5.12 е представено съотношение в резултатите за Precision за десетте категории, получени за алгоритмите R-DT DWT, C-DT DWT, 4-level Curvelet и АЛПХ. За пет от категориите на тестовата БДИ, „Динозаври“, „Слонове“, „Коне“, „Рози“ и „Природа“, АЛПХ демонстрира по-висока или равна средна стойност за параметъра Precision. За категориите „Социален

живот“ и „Храна“ той показва по-ниска, но съпоставима стойност от съответните 3,25% и 4,5% спрямо 4-level Curvelet алгоритъма. За категории „Архитектура“, „Африка“ и „Автобуси“ разликите в точността нарастват в полза на сравняваните алгоритми. Представеният анализ показва, че предложеният алгоритъм АЛПХ не отстъпва като ниво на точност със сходни по тип на използваните признаци алгоритми.



5.4. Научно-приложни приноси към Глава 5

5.4.1. Научно-приложни приноси

1. Извършен е сравнителен анализ по отношение времената на извличане (таблица 5.1, таблица 5.2, фиг. 5.1 – фиг. 5.4) и точността (таблица 5.3 – таблица 5.4, фиг. 5.5 – фиг. 5.10) за четирите синтезирани алгоритъма. Направено е сравнение между АЛПХ и алгоритми, базирани на: метод на локалната хистограма, метод на средния сегмент, метод, базиран на цветовия момент, R-DT DWT, C-DT DWT и 4-level Curvelet (таблица 5.6, таблица 5.5, фиг. 5.11, фиг. 5.12) по отношение на точността на извличане, което показва високата ефективност на предложения подход.

5.4.2. Приложни приноси

1. Сравнение на точност на извличане на изображения по съдържание за синтезираните алгоритми със съпоставими по изчислителна сложност алгоритми.

5.5 Публикации към Глава 5

Направеният сравнителен анализ към Глава 5 е публикуван в доклади [A4], [A7], [A8] и [A9].

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научни приноси

1. Разработен е подход за адаптивно определяне на нивото на декомпозиране на цифрови изображения при прилагане на 2D DT CWT при зададени време за изпълнение и количество информация, съдържащо се в признаковите вектори, което осигурява по-висока ефективност при извличане на изображения по съдържание – изведени зависимости (2.13) – (2.21), (2.35) – (2.38), (2.41) – (2.50).

Научно – приложни приноси

1. На базата на направено аналитично сравнение на съществуващите методи и алгоритми за извличане на изображения по съдържание от бази данни е направен аналитичен обзор върху публикации по различни признаци. Използваните в тях техники са групирани в класификации (Приложение 1, фиг. 1, фиг. 2, фиг. 3, фиг. 4, фиг. 5, фиг. 6, фиг. 7, фиг. 8), а публикуваните данни са представени таблично (Приложение 1, Таблица 1, Таблица 2, Таблица 3, Таблица 4, Таблица 5, Таблица 6, Таблица 7, Таблица 8, Таблица 9, Таблица 10). Направен е избор на DT CWT за намирането на признаци за извличане.
2. Разработен е алгоритъм за индексирание на БДИ за търсене по съдържание на база количество съдържаща се енергия в подлентата на апроксимиращите коефициенти – фиг. 2.4, което осигурява по-висока информационна концентрация на еталоните. Разработен е алгоритъм за оценка на точността при извличане на изображения по съдържание с отчитане на времето за изпълнение – фиг. 2.5, характеризиращи се с висока ефективност. Определени са времената за намиране на разстояния по Евклид (2.55) и по Хаусдорф (2.58) – (2.59) между изображенията, представени чрез апроксимиращи 2D DT CWT коефициенти. Определени са времената за намиране на всички признакови вектори в БДИ (3.18), както и времето за намиране на сходство с тях при двата вида метрики (3.20) – (3.22).
3. Синтезирани са алгоритми за извличане на изображения по съдържание чрез глобални 2D DT CWT признаци (фиг. 3.1 – фиг. 3.3), които позволяват адаптивен избор на нивото на декомпозиране по зададено време за изпълнение. Сравнено е теоретично и експериментално определеното време на работата им ((3.25), (3.26), таблица 3.5, таблица 3.7, фиг. 3.12 – фиг. 3.13, таблица 3.6, фиг. 3.14 – фиг. 3.16) и е оценена точността на извличане (таблица 3.8, фиг. 3.17, таблица 3.9, фиг. 3.21, фиг. 3.29, фиг. 3.30).
4. Синтезирани са алгоритми за извличане на изображения чрез локални 2D DT CWT признаци (фиг. 4.1 – фиг. 4.3), които позволяват адаптивен избор

на нивото на декомпозиране по зададено време за изпълнение. Сравнено е теоретично и експериментално определеното време на работата им ((4.1), (4.2), таблица 4.2 – таблица 4.4, фиг. 4.4 - фиг. 4.10). Оценена е точността на извличане (таблица 4.5 – таблица 4.8, фиг. 4.11, фиг. 4.17, фиг. 4.23 - фиг. 4.25, фиг. 4.30, фиг. 4.37, фиг. 4.38).

5. Извършен е сравнителен анализ по отношение времената на извличане (таблица 5.1, таблица 5.2, фиг. 5.1 – фиг. 5.4) и точността (таблица 5.3 – таблица 5.4, фиг. 5.5 – фиг. 5.10) за четирите синтезирани алгоритъма. Направено е сравнение между АЛПХ и алгоритми, базирани на: метод на локалната хистограма, метод на средния сегмент, метод, базиран на цветовия момент, R-DT DWT, C-DT DWT и 4-level Curvelet (таблица 5.6, таблица 5.5, фиг. 5.11, фиг. 5.12) по отношение на точността на извличане, което показва високата ефективност на предложения подход.

Приложни приноси

1. Определени са спектрите на трите тестови изображения чрез 2D DT CWT до пето ниво на декомпозиране, определени са апроксимиращите им коефициенти за всяко от тях заедно с мащабиращите им функции, възстановените им приближения и са сравнени качествено и количествено – фиг. 3.5 – фиг. 3.8, таблица 3.3. Определени са разстоянията по Евклид и Хаусдорф между двойки цифрови изображения от едни и същи тематични групи за пет нива на декомпозиране чрез 2D DT CWT (таблица 3.4). Определени са разликите в разстоянията за подобие за двата случая (фиг. 3.9). Определена е относителната част на енергията на апроксимиращите коефициенти по нива на декомпозиране за примерна база данни (фиг. 3.10).
2. Изпълнена е програмна реализация на алгоритмите, представени на фиг. 3.1 – фиг. 3.3. Определени са прогнозните времена за изпълнение на операциите събиране, умножение, коренуване и сравнение на база използваната тестова БДИ (т. 3.10.1.). Приложена е методика за оценка на точността на извличане на цифрови изображения по съдържание от БДИ на база синтезираните алгоритми чрез параметрите: Precision, Recall, ANMRR и MAP (т. 3.6.3.1.– т. 3.6.3.3.).
3. Изследвана е експериментално производителността на алгоритъма за извличане на изображения по съдържание чрез глобални характеристики и прилагане на Евклидово разстояние и разстояние на Хаусдорф. Определена е точността на извличане без (таблица 3.10, фиг. 3.31, таблица 3.11, фиг. 3.35) и с отчитане на ранг (фиг. 3.43). Оценена е ефективността според броя на подадените заявки (фиг. 3.44).
4. Изпълнена е програмна реализация на алгоритмите, представени на фиг. 4.1 – фиг. 4.3. Определени са прогнозните времена за изпълнение на операциите събиране, умножение, коренуване и сравнение на база използваната тестова БДИ (т. 4.4.2).

5. Сравнение на точност на извличане на изображения по съдържание за синтезираните алгоритми със съпоставими по изчислителна сложност алгоритми.

СПИСЪК НА ПУБЛИКУВАНИТЕ НАУЧНИ ТРУДОВЕ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

- A1. Vetova, S., I. Ivanov, "Image Features Extraction Using The Dual-Tree Complex Wavelet Transform," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Mathematical, Computational and Statistical Sciences (MCSS '14)*, Gdansk, Poland, May, 2014, pp. 277-282, ISSN: 2227-4588, ISBN: 978-960-474-380-3.
- A2. Vetova, S., I. Ivanov, "Content-Based Image Retrieval Using The Dual-Tree Complex Wavelet Transform," in *Proceedings of the 2014 International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry (MCSI 2014)*, Varna, Bulgaria, September, 2014, pp. 165-170, Product Number E5397, ISBN 978-1-4799-4744-7, BMS Number CFP1470Y-CDR, IEEE Computer Society Order Number E5397, ISBN-13: 978-1-4799-4324-1, BMS Part # CFP1470Y-CDR, 978-1-4799-4324-1/14 © 2014 IEEE, DOI 10.1109/MCSI.2014.51.
- A3. Vetova, S., I. Ivanov, "The Dual-Tree Complex Wavelet Transform Search Algorithm For Content-Based Image Retrieval," in *Proceedings of the 13th International Conference on Applications of Computer Engineering (ACE '14)*, Lisbon, Portugal, October-November, 2014, pp. 72-78, ISSN: 1790-5109, ISBN: 978-960-474-393-3.
- A4. Vetova, S., "Comparative Analysis Between Two Search Algorithms Using DT CWT For Content-Based Image Retrieval," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Circuits, Systems, Communications, Computers and Applications (CSCCA '14)*, Florence, Italy, November, 2014, pp. 113-120, ISSN: 1790-5117, ISBN: 978-960-474-399-5.
- A5. Vetova, S., I. Ivanov, "Content-Based Image Retrieval Algorithm Based on the Dual-Tree Complex Wavelet Transform: Efficiency Analysis," in *Proceedings of the 5th European Conference of Computer Science (ECCS '14)*, Geneva, Switzerland, December, 2014, pp. 71-77, ISSN: 1790-5109, ISBN: 978-1-61804-264-4.
- A6. Vetova, S., I. Ivanov, "Efficiency Analysis On The Dual-Tree Complex Wavelet Transform Search Algorithm For Content-Based Image Retrieval," in *Proceedings of the 6th International Conference on Circuits, Systems, Control, Signals (CSCS '15)*, Tenerife, Canary Islands, Spain, January, 2015, pp. 54-60, ISBN: 978-1-61804-279-8.
- A7. Vetova, S., I. Ivanov, "Efficiency Comparative Analysis Between Two Search Algorithms Using DT CWT For Content-Based Image Retrieval," in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2015)*, Seville, Spain, March, 2015, pp. 1664-1669, IEEE Catalog Number: CFP15CIT-USB, ISBN: 978-1-4799-7799-4, 978-1-4799-7799-4/15 ©2015 IEEE.
- A8. Vetova, S., I. Draganov, I. Ivanov, V. Mladenov "CBIR Efficiency Enhancement using Local Features Algorithm with Hausdorff Distance," in *Proceedings of the 2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science*, E-ISSN:2415-1521, volume 5, Bern, Switzerland, November, 2017, pp. 116-123.
- A9. Vetova, S., I. Draganov, I. Ivanov, "CBIR with Dual Tree Complex Wavelet Transform using Maximally Flat All-pass Filter", *Journal Electrotechnics and Electronics*, 2018 (in print), приложена служебна бележка.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Faculty of Telecommunications

Department of Radio Communications and Video Technology

STELLA METODIEVA VETOVA-IVANOVA, M.Sc,

CONTENT BASED IMAGE RETRIEVAL USING DUAL TREE COMPLEX WAVELET TRANSFORM

ABSTRACT of Ph.D. THESIS

Based upon an accomplished scientific review, the necessity of creating own content-based image retrieval (CBIR) method implemented through an algorithm was found. For this purpose, to satisfy the task for feature extraction a wavelet transform selection was carried out and the Dual-Tree Complex Wavelet Transform (DT-CWT) was chosen. It decomposes images into coefficients up to the 4th level with high speed. Having been designed on the base of The Complex Wavelet Transform (CWT), it overcomes the aliasing effect. Besides, DT-CWT is remarkable for its 6 directions for the real part and 6 directions for the imaginary part which form this transform.

After the accomplishment of some research experiments, the precision of the retrieved result is concluded to be higher using spatial data. That is why, the method proposes image division up to 64 (8 x 8) subimages on each of which DT-CWT is applied. The forth transform level was chosen after a preliminary experiments. The obtained coefficients are stored in a database (DB) designed for this purpose.

To realize the task for similarity measurement, another review was accomplished where the most used measures were analysed. For the proposed method Hausdorff distance was chosen. It is a metric which guarantees high computation precision.

The designed method is applied in a CBIR algorithm. Test experiments for efficiency and effectiveness with/ without rank were carried out. For the objective assessment of the method and the algorithm a comparative analysis with three similar methods and algorithms was accomplished too. The first one differs from the proposed one in Euclidean distance measure usage. The others use global features and Euclidean distance or Hausdorff distance. The final results prove the advantage of the proposed method in terms of efficiency and effectiveness.