

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

**Ing. Petr Číka**

**DIGITÁLNÍ VODOZNAČENÍ OBRAZU**

Digital Image Watermarking

*ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS*

Obor: Teleinformatika  
Školitel: Doc. Ing. Karel Němec, CSc.  
Oponenti:

Datum obhajoby:

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vodoznačení statických obrazů, diskrétní kosinová transformace, diskrétní vlnková transformace, singulární dekompozice, zabezpečovací kódování, BCH kódy.

## **KEYWORDS**

Static image watermarking, discrete cosine transform, discrete wavelet transform, singular decomposition, error correction codes, BCH codes.

Disertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00

© Číka Petr, 2009  
ISBN 80-214-  
ISSN 1213-4198



# OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	6
2.1 Požadavky na vodoznak _____ <b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
2.2 Princip vodoznačení _____	7
2.2.1 <i>Systémy vodoznačení</i> .....	8
2.2.2 <i>Objektivní hodnocení</i> .....	9
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	9
4 METODIKA SROVNÁNÍ VODOZNAČÍCÍCH METOD .....	10
5 VODOZNAČENÍ VE FREKVENČNÍ OBLASTI .....	11
5.1 Vodoznačení s využitím 2D-DWT transformace _____	11
5.1.1 <i>Testování navržené metody vodoznačení ve 2D-DWT oblasti</i> .....	13
5.2 Vodoznačení s využitím 2D-DCT transformace _____	13
6 METODY VODOZNAČENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ SINGULÁRNÍ DEKOMPOZICI	16
6.1 Metoda vodoznačení s využitím 2D-DWT-SVD _____	16
6.2 Metoda vodoznačení s využitím 2D-DCT-SVD _____	18
7 VYUŽITÍ PROTICHYBOVÉHO KÓDOVÁNÍ PŘI VODOZNAČENÍ.....	21
7.1 Metoda vodoznačení využívající 2D-DWT a protichybové kódování _____	22
7.2 Metoda vodoznačení využívající 2D-DCT a protichybové kódování _____	24
8 POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH TECHNIK .....	27
9 ZÁVĚR.....	36
10 LITERATURA .....	38

# 1 ÚVOD

Obrovský nárůst digitálních technologií v posledním desetiletí umožnil snadný přístup k digitálním informacím téměř komukoli. Digitální data je možné bez sebemenší ztráty kvality kopírovat a dále distribuovat, což vede k nárůstu kriminality v oblasti porušování autorských práv. K šíření nelegálních kopií slouží v dnešní době zejména CD, DVD a Blue-Ray nosiče, ve velké míře také Internet. Díky neoprávněnému kopírování a dalšímu užívání multimediálních dat přichází autoři na celém světě o obrovské sumy peněz a o duševní vlastnictví. U některých dat je však těžko prokazatelné, kdo je jejich autorem. Z tohoto důvodu se do popředí zájmů dostává problematika ochrany autorských práv. V současné době však není jednoduché vyvinout techniku, která by byla pro tento účel použitelná bez komplikací. Mezi dnes nejvíce prosazované patří ochrany CD, DVD či Blue-Ray disků proti kopírování. Tyto techniky však bývají mnohdy nedostačující. Multimediální data jsou po prolomení ochrany kopírována a distribuována například v torrent sítích na Internetu. To již poté nikomu nebrání tato data stáhnout a nelegálně je užívat. U filmových či hudebních produkcí je jasně prokazatelné, kdo je jejich autorem, avšak u soukromých fotografií či jiných obrázků je průkaznost složitější. Proto se jako samozřejmá odezva začaly již v devadesátých letech minulého století vyvíjet techniky vodoznačení, které vkládají určitou značku, ať již viditelnou nebo neviditelnou do obrazu, který je potřeba ochránit.

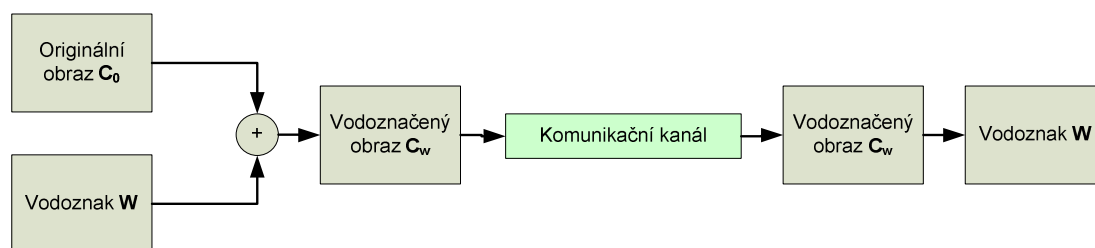
Cílem vodoznačících metod je nezávislost na médiích, do kterých je vodoznak vložen a dále nemožnost odstranění vodoznaku z chráněných dat. Tyto cíle však nebyly doposud v plné míře splněny. Při průzkumu metod pro vodoznačení statických obrazů byly zjištěny stále se vyskytující slabiny, které se projevují v neschopnosti splnění všech tří základních požadavků (odolnost, nevnímatelnost, kapacita) současně v plné míře v rámci jednoho vodoznačícího systému.

Proto, jako samozřejmá odezva, vznikla myšlenka vyvinout na základě předchozích poznatků nové či modifikované metody, které v co největší míře splní požadovaná kritéria vodoznačení.

## 2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Zabezpečení multimediálních dat je v současné době na popředí zájmu. S rostoucí přenosovou šířkou pásma a propustností Internetu je v dnešní době velmi složité zajistit ochranu autorských práv k multimediálním, ale i k jiným dílům, jež jsou zveřejněny na internetových stránkách nebo uloženy v on-line datových úložištích. Největším problémem však zůstávají právě multimediální data v podobě obrazu, audio či video nahrávek. Po celém světě existuje mnoho nelegálních datových úložišť, odkud denně putují skrze Internet tera-byty dat přímo k uživatelům. To zapříčiňuje vysoké ztráty jak duševního, tak i finančního charakteru. Nejen komerční, ale i domácí produkce jsou často zneužívány pro osobní či komerční účely třetích stran. Příkladem je používání fotografií na webových prezentacích. Prezentované fotografie nejsou ve většině případů nijak zabezpečené a jakýkoli uživatel je může stáhnout, editovat, upravit a následně vydávat za vlastní. Tento případ se vyskytuje velmi často. Nepomáhá ani značka Copyright na vytvořených webových stránkách, která uživatele upozorňuje, že veškerý obsah je duševním vlastnictvím majitele webové prezentace. Z těchto důvodů se stále vyvíjí nové techniky pro zabezpečení takto vystavených dat. Digitální multimediální data lze v současné době zabezpečit pomocí metod založených na šifrování, vodoznačení a steganografii.

Vodoznačící techniky umožňují vložit vodoznak do originálních dat. Vodoznaky se využívají zejména pro identifikaci autora, ale také pro prokázání autorství k určitému dílu. Základní princip vodoznačení digitálních obrazů popisuje Obr. 2.1. Do originálního obrazu  $C_0$  je zvolenou technikou vložen vodoznak  $W$ , čímž vznikne vodoznačený obraz  $C_w$ , který je přenášen komunikačním kanálem. Tam na něj může či nemusí být proveden určitý útok. Později může být vodoznak detekován a vyjmut.



Obr. 2.1: Základní systém pro vodoznačení

Na vodoznaky jsou kladeny velké nároky a to celkem v šesti základních oblastech, k nimž spadá odolnost, nevnímání, bezpečnost, složitost, kapacita a spolehlivost.

## 2.1 PRINCIP VODOZNAČENÍ

Technika digitálního vodoznačení je definována jako vložení přídavné informace (vodoznaku) do originálních dat tak, aby jejich modifikace nebyla lidským smyslem postřehnutelná. Základní principy dnes používaných systémů pro vodoznačení jsou přirovnatelné k symetrickým krypto-systémům (používají stejný klíč při vložení i extrakci vodoznaku). Každý vodoznačicí systém je složen ze dvou sub-systémů - tzv. kodéru a dekodéru. Lze jej popsat množinou  $(O, W, K, E_K, D_K, C_\tau)$  kde  $O$  značí množinu všech originálních dat,  $W$  je množina všech vodoznaků a  $K$  definuje množinu všech klíčů. Klíč je nepovinnou součástí vodoznačicího systému, jeho použitím se však zvyšuje bezpečnost vloženého vodoznaku. Funkce pro vložení vodoznaku  $E_K$  je vyjádřena vztahem

$$E_K: O \times W \times K \rightarrow O, \quad 2-1$$

funkce pro extrakci vodoznaku  $D_K$  je vyjádřena vztahem

$$D_K: O \times K \rightarrow W. \quad 2-2$$

Funkce pro porovnání

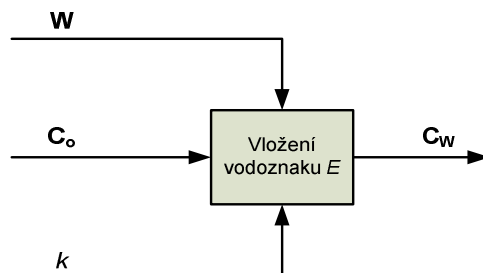
$$C_\tau: W^2 \rightarrow \{0,1\}, \quad 2-3$$

porovnává originální a extrahovaný vodoznak pomocí předem dané rozhodovací úrovně  $\tau$ .

Vstupní parametry procesu vkládání vodoznaku jsou originální obraz  $C_o$ , vodoznak  $W$  a tajný klíč  $k$ . Vodoznačený obraz  $C_w$  a je dán funkcí

$$E_k(C_o, W) = C_w. \quad 2-4$$

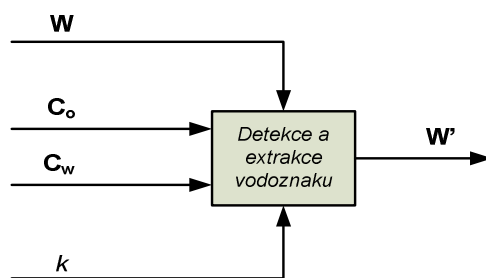
Obecný princip vodoznačících technik je znázorněn na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Obecné schéma systému pro vložení vodoznaku

V závislosti na použité metodě pro vložení vodoznaku je použit tajný nebo veřejný klíč, anebo není klíč použit vůbec. Většina vodoznačících systémů však používá alespoň jeden, mnohdy i kombinaci více klíčů.

Při procesu detekce a následné extrakce vodoznaku se předpokládá, že vodoznačená data  $C_w$  byla modifikována. K extrakci mohou být dále použita originální data  $C_o$  a klíč  $k$ , který byl použit při vkládání. Obecné schéma pro detekci a extrakci vodoznaku je znázorněno na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Obecné schéma systému pro detekci a extrakci vodoznaku

V závislosti na metodě vkládání vodoznaku je při extrakci potřeba tajný/veřejný klíč  $k$ , zdrojová data  $C_o$ , vodoznak  $W$ , nebo jejich kombinace. Extrahovaný vodoznak  $W'$  se obecně liší od originálního vodoznaku  $W$ , a to z důvodu manipulace či modifikace vodoznačených dat  $C_w$ . Pro rozhodování, zda se jedná či nejedná o originální vodoznak, rozhoduje nastavená úroveň  $\tau$  a funkce

$$\begin{aligned} C_\tau(W', W) &= 1, & \text{shodnost} &\geq \tau, \\ C_\tau(W', W) &= 0, & \text{shodnost} &< \tau. \end{aligned}$$

Úroveň  $\tau$  závisí na použitém algoritmu a měla by být schopna vodoznak jasně identifikovat [2], [5].

### 2.1.1 Systémy vodoznačení

Podle vstupů a výstupů při detekci/extrakci vodoznaku existují 3 skupiny vodoznačících systémů.

#### *Soukromé systémy*

Pro vložení vodoznaku  $W$  do originálních dat  $C_o$  používají soukromý klíč  $k$  a při detekci/extrakci vodoznaku vyžadují minimálně originální data  $C_o$ . Soukromé systémy lze rozdělit na dva sub-systémy:

**Systém typu I** detekuje/extrahuje vodoznak v potencionálně poškozených datech pomocí originálních dat

$$D_K(C_w, C_o) = W'. \quad 2-5$$

**Systém typu II** při detekci používá kromě originálních dat i vodoznak. Výsledkem detekce je míra shody extrahovaného vodoznaku  $W'$  s kopií originálního vodoznaku  $W$ . Při použití systému typu II lze odpovědět na následující otázku: „Je v datech  $C_w$  vložen vodoznak  $W$ ? V takovém případě je vodoznakem pouze 1 bit. Při požadavku vyšší odolnosti vodoznaku lze do originálních dat vkládat více informací. Princip detekce/extrakce vodoznaku je popsán rovnicí

$$D_K(C_w, C_o, W) = W' \quad 2-6$$

#### *Polo-soukromé systémy*

Při detekci vodoznaku vyžadují znalost soukromého klíče  $k$  a vloženého vodoznaku  $W$ . Originální data  $C_o$  nejsou při detekci/extrakci potřeba. Tyto systémy lze vyjádřit funkcí

$$D_K = (\mathbf{C}_w, \mathbf{W}) = \mathbf{W}', \quad 2-7$$

Nejčastější využití polo-soukromých systémů je tam, kde přístup k originálním datům není prakticky možný. Polo-soukromé systémy vodoznačení jsou užívány při kontrole kopírování nebo při zabezpečení ochrany autorských práv.

**Veřejné systémy**

U veřejných systémů nejsou k detekci/extrakci vodoznaku potřebná ani originální data  $\mathbf{C}_o$ , ani vodoznak  $\mathbf{W}$ . Veřejné systémy lze vyjádřit vztahem

$$D_k = (\mathbf{C}_w) = \mathbf{W}' \quad 2-8$$

### 2.1.2 Objektivní hodnocení

K technikám pro objektivní měření kvality vodoznačícího systému v obrazových či video datech patří měření:

- odstupu špičkových hodnot signál/šum (PSNR)

$$PSNR = 10 \log \frac{X^2}{\frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (C_o(i, j) - C_w(i, j))^2}. \quad 2-9$$

- normalizované křížové korelace (NCC)

$$NCC = \frac{\sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} W(i, j) W'(i, j)}{\sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} (W(i, j))^2}. \quad 2-10$$

$N_1$  a  $N_2$  představují horizontální a vertikální rozměry originálního obrazu,  $X$  značí nejvyšší možnou hodnotu pixelu (u 8 bitových obrázků je to 255).

## 3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem dizertační práce je prozkoumat současné přístupy k vodoznačení statických obrazů a navrhnout modifikace moderních metod za účelem zvýšení jejich užitných vlastností. K tomu bude zapotřebí stanovit vhodný způsob vzájemného porovnávání výsledků jednotlivých metod a metodiku jejich vyhodnocení.

Pro zvýšení odolnosti vodoznaků v obraze se počítá s vývojem a experimentálním testováním nových vodoznačících metod, do kterých bude implementováno protichybové kódování. Tento krok má za cíl dosáhnout zvýšení odolnosti vodoznaku při zachování kvality vodoznačeného obrazu. Další možnost se otevírá v nalezení vhodné transformační oblasti či modifikaci metod pro výběr koeficientů v oblastech stávajících.

**Vlastní práce si klade za cíl:**

- Analyzovat moderní metody pro vodoznačení statických obrazů.

- Navrhnout způsoby testování a vyhodnocování algoritmů pro posouzení kvality vodoznačících systémů.
- Navrhnout nové metody vodoznačení statických obrazů ve frekvenční oblasti za účelem zvýšení odolnosti vložených vodoznaků proti útokům.
- Využít protichybové blokové kódy a analyzovat jejich možnosti použití na vodoznačící systémy.
- Optimalizovat metody z hlediska výpočetní náročnosti.
- Porovnání nově vytvořených metod.

## 4 METODIKA SROVNÁNÍ VODOZNAČÍCÍCH METOD

Pro porovnání dnes dostupných a nově navržených metod je zapotřebí stanovit základní pravidla, podle kterých budou techniky a jejich výstupy porovnávány. Vzhledem k tomu, že chování metod vodoznačení je pro různě kompozičně uspořádané obrazy rozdílné, bylo vybráno 100 šedotónových obrazů z databáze [45], na kterých jsou navržené metody testovány.

Všechny testované obrazy mají shodné horizontální i vertikální rozměry 512x512 pixelů a jsou osmibitové, z čehož vychází počet odstínů šedi na 256.

Jako vodoznak se ve všech metodách využívá vygenerované logo (viz. Obr. 4.1).

**Číka  
VUT**

Obr. 4.1: Testovací vodoznak **W**

Rozměry vodoznaku **W** jsou upravovány podle použité metody a potřeby. Pro stanovení poškození obrazu po vodoznačení je určována hodnota PSNR, pro porovnání podobnosti extrahovaného vodoznaku **W'** s originálním vodoznakem **W** je použito kritérium NCC. Za korektně extrahovaný vodoznak je považován takový, jehož hodnota  $NCC \geq 0,7$ .

Každý vodoznačený obraz je zasažen předem definovanými útoky. K útočení na jednotlivé obrazy byl použit program Checkmark, který s definovanými obrazy automaticky provede kompresi JPEG a JPEG2000 s variantním nastavením kvality výstupního obrazu, filtraci Gaussovým filtrem, zaostření, filtraci mediánovým filtrem, prahování hodnot pixelů, filtraci Wienerovým filtrem, rotaci, rotaci se změnou měřítka, podvzorkování a opětovné nadvzorkování, úpravu velikosti, změnu měřítka, oříznutí, dithering, útok koláží, odstranění řádků a sloupců.

Při provádění detekce/extrakce vodoznaku je prostorové rozlišení každého obrazu nejprve změněno na rozměry 512x512 pixelů. Po tomto kroku jsou na obraz aplikovány metody pro detekci vodoznaku.

## 5 VODOZNAČENÍ VE FREKVENČNÍ OBLASTI

Pro vložení vodoznaku se frekvenční oblast jeví jako velmi vhodná, neboť umožňuje vložit vodoznak do různých frekvenčních složek obrazu. Pro převod z prostorové do frekvenční oblasti se nejčastěji využívají transformace 2D-DCT a 2D-DWT, můžou být však využity i jiné transformace, jako například 2D-Walsh-Hadamardova transformace (2D-WHT) [30].

2D-DCT patří mezi základní transformace používané ve standardu JPEG. Zde jsou zpracovávány a transformovány bloky o rozměru 8x8 pixelů. Tato velikost byla zvolena jako kompromis mezi kvalitou a výpočetní náročností celého algoritmu. Nevýhodou používání takto malých bloků jsou vznikající blokové artefakty při příliš silné kompresi. Tyto artefakty jsou často potlačovány tzv. deblocking filtry [39].

U 2D-DWT je situace opačná. 2D-DWT je hlavní doménou standardu pro kompresi obrazu JPEG-2000, své uplatnění nachází i ve standardu pro kompresi videa MPEG-4. Celková výpočetní náročnost standardu JPEG-2000 je podstatně vyšší než je tomu u standardu JPEG. Právě z toho důvodu se v komerčních zařízeních JPEG-2000 v současnosti příliš neprosazuje. Jeho nespornou výhodou však je podstatně vyšší kvalita komprimovaného obrazu při stejné velikosti komprimovaného souboru. Zpracování obrazu probíhá v tzv. Tilech, které představují větší plochu obrazu (např. 128x128 nebo 256x256 pixelů). V následujících kapitolách budou podrobně popsány navržené metody využívající k vodoznačení statických obrazů 2D-DCT a 2D-DWT.

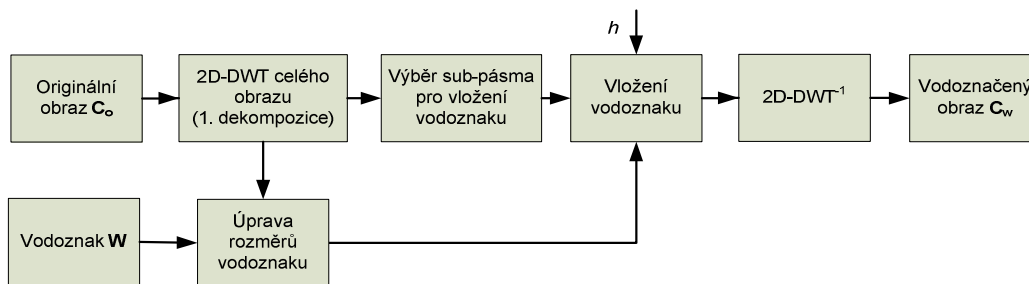
### 5.1 VODOZNAČENÍ S VYUŽITÍM 2D-DWT TRANSFORMACE

Pro vodoznačení obrazu ve frekvenční oblasti při použití 2D diskrétní vlnkové transformace lze využít jak aproximačních, tak i detailních koeficientů, které vzniknou po  $N$ -stupňové dekompozici originálního obrazu  $C_0$ . Maximální velikost vkládaného vodoznaku  $W$  v případě binárního obrazu odpovídá velikosti použitého sub-pásma, do kterého je vodoznak vložen. K 2D-DWT dekompozici lze využít jakékoli vlnky, která v tomto případě, jak bylo otestováno, nemá významný vliv na vložený vodoznak.

#### *Proces vložení vodoznaku*

Navržená metoda vychází z obecně známých principů vlnkové transformace a dříve publikovaných vodoznačících systémů [2], [5], [24], [25]. Vložení vodoznaku nejlépe znázorňuje Obr. 5.1. Originální obraz  $C_0$  je transformován 2D diskrétní vlnkovou transformací z prostorové do frekvenční oblasti. Během vývoje algoritmu bylo otestováno více typů vlnek, avšak všechny vykazovaly obdobné parametry. Pro navržený algoritmus byla proto zvolena elementární Haarova vlnka [49]. Obraz je pyramidově dekomponován tak, že vzniknou čtyři sub-pásma **CA**, **CV**, **CH**, **CD**. Z těchto sub-pásem je vybráno jedno, které je následně použito pro vložení vodoznaku. Je potřeba zdůraznit, že z hlediska odolnosti vloženého vodoznaku  $W$  velmi záleží na výběru sub-pásma. V následujícím kroku je nutné upravit

horizontální i vertikální rozměr vodoznaku tak, aby odpovídaly rozměrům zvoleného sub-pásma pro vložení. Počet pixelů vodoznaku  $\mathbf{W}$  tedy musí být menší nebo roven počtu pixelů zvoleného sub-pásma  $\mathbf{CX}$ .



Obr. 5.1: Vložení vodoznaku s využitím 2D-DWT transformace

Následuje vložení vodoznaku úpravou zvoleného sub-pásma  $\mathbf{CX}$  podle vztahu

$$CX'(m, n) = cx(m, n) + hw(m, n), \quad 5-1$$

kde  $m, n$  jsou pozice prvků v sub-pásmu,  $cx$  jsou koeficienty sub-pásma originálního obrazu,  $h$  značí hloubku vložení vodoznaku a  $w$  jsou koeficienty vkládaného vodoznaku. Po výpočtu vodoznačeného sub-pásma  $\mathbf{CX}'$  je proveden zpětná 2D diskretní vlnková transformace, jejíž vstupy jsou modifikované sub-pásma  $\mathbf{CX}'$  a ostatní tři nezměněná sub-pásma. Tímto krokem je získán vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$ .

V případě potřeby větší bezpečnosti vloženého vodoznaku je možné vodoznak  $\mathbf{W}$  před vložení zašifrovat. V našem případě je tento krok nadbytečný, neboť se jedná o pouhé testování algoritmu. Šifrování nemá žádný vliv na vložení vodoznaku, vodoznačený obraz, ani na extrakci vodoznaku.

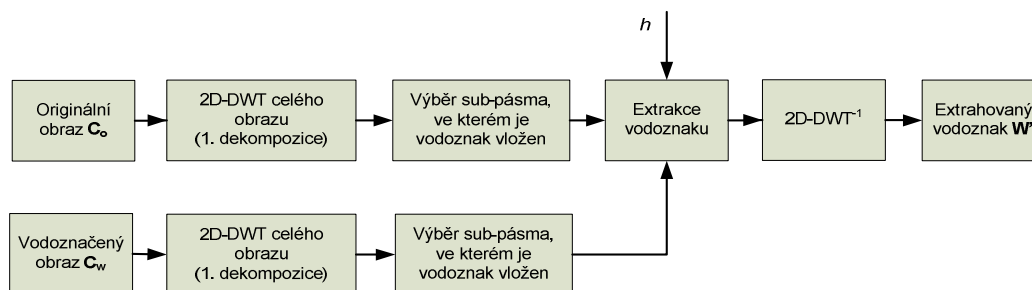
### **Proces extrakce vodoznaku**

Extrakce vodoznaku ze zabezpečeného obrazu  $\mathbf{C}_w$  je inverzním procesem k vložení vodoznaku. Při extrakci je potřeba znát originální obraz  $\mathbf{C}_o$ , vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$  a použitou hloubku vložení vodoznaku  $h$ .

Extrakci vodoznaku nejlépe znázorňuje schéma na Obr. 5.2. Vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$  i originální obraz  $\mathbf{C}_o$  je podroben 2D diskretní vlnkové transformaci, čímž jsou oba obrazy převedeny z prostorové do frekvenční oblasti. Pro dekompozici musí být zvolena stejná vlnka jako při procesu vložení vodoznaku. Tímto krokem jsou získány dvě skupiny se čtyřmi sub-pásmi  $\mathbf{CA}_o, \mathbf{CV}_o, \mathbf{CH}_o, \mathbf{CD}_o$  a  $\mathbf{CA}_w, \mathbf{CV}_w, \mathbf{CH}_w, \mathbf{CD}_w$ . Po získání sub-pásem může proběhnout samotný proces extrakce vodoznaku, který je dán vztahem

$$W'(m, n) = \frac{c_o x_{mn} - c_w x_{mn}}{h}, \quad 5-2$$

kde  $m, n$  jsou pozice prvků v sub-pásmu  $\mathbf{CX}$  a zároveň vodoznaku  $\mathbf{W}$ ,  $c_o x$  jsou koeficienty sub-pásma originálního obrazu  $\mathbf{C}_o$ ,  $c_w x$  jsou koeficienty sub-pásma vodoznačeného obrazu  $\mathbf{C}_w$  a  $h$  značí hloubku vložení vodoznaku.



Obr. 5.2: Extrakce vodoznaku s využitím 2D-DWT transformace

### 5.1.1 Testování navržené metody vodoznačení ve 2D-DWT oblasti

Pro testování metody vodoznačení s využitím 2D-DWT transformace bylo vybráno sub-pásmo aproximačních koeficientů CA po první dekompozici Haarovou vlnkou. Toto sub-pásmo bylo vybráno hlavně z důvodu menšího zasažení rušivých vlivů při kompresích vodoznačných obrazů a s tím spojené nechtěné odstranění vodoznaku. Pro testování odolnosti vloženého vodoznaku byly vybrány hloubky vodoznačení s hodnotami 5, 8, 10 a 13. Z výsledků uvedených v dizertační práci je patrné procentuální zvýšení pravděpodobnosti extrakce vodoznaku z obrazu u vyšších hodnot hloubky vložení a to hlavně po útocích komprese JPEG s nízkou nastaveným kvalitativním parametrem  $q$  a mediánovým filtrem. Jako míra nevnímání vodoznaku byla experimentálně stanovena hloubka vložení  $h = 8$ . Při vyšších hodnotách již docházelo k určitým degradacím částí obrazu.

Při porovnání výsledků s výsledky metody využívající pro vkládání vodoznaku LSB metodu je nárůst kladně extrahovaných vodoznaků po většině provedených útoků zřetelně pozorovatelný.

## 5.2 VODOZNAČENÍ S VYUŽITÍM 2D-DCT TRANSFORMACE

2D diskretní kosinová transformace se používá stejně jako 2D diskretní vlnková transformace k převodu koeficientů obrazu z prostorové oblasti do oblasti frekvenční. Své uplatnění našla v kompresním standardu JPEG [16]. Vzhledem k obrovskému rozšíření digitálních obrazů komprimovaných tímto standardem byly vyvinuty vodoznačící metody, jejichž prioritami je nemožnost odstranění vodoznaku právě zmiňovanou JPEG kompresí. Metoda popsaná v [14] používá při vkládání vodoznaku do originálních dat koeficienty  $(u_1, v_1)$ ,  $(u_2, v_2)$  ve frekvenční oblasti, kde  $u_i$  a  $v_i$  definují pozici bodů v transformovaném bloku frekvenčních koeficientů o rozměru  $8 \times 8$  prvků. Tyto dva koeficienty jsou ve velké řadě případů vybírány z oblasti středních frekvencí a to proto, aby byla zajištěna odolnost daného vodoznaku a zároveň jeho nevnímání [9], [14], [6]. Při vkládání vodoznaku jsou používány takové koeficienty  $u$ ,  $v$ , které jsou kvantovány stejným počtem kvantizačních hladin. Z doporučené kvantizační tabulky pro jasové složky u komprese JPEG [16] plyne, že vhodnými koeficienty jsou například (3,1) a (4,1),

(4,3) a (5,2), (1,4) a (3,3) a další. Proces vložení vodoznaku do barvonosných složek  $U$  a  $V$  je méně efektivní zejména díky podvzorkování využívaného téměř ve všech kompresních standardech [35]. Z toho důvodu se u většiny případů nepoužívá.

Navržená metoda vychází z metod popsanych v [9], [14], [6]. Metodu pro vložení vodoznaku popisuje Obr. 5.3.

### **Proces vložení vodoznaku**

Originální obraz  $C_o$  je v první fázi rozložen na bloky  $B$  o rozměrech 8x8 pixelů přesně tak, jak je tomu u standardu JPEG. Na každý blok  $B$  je aplikována 2D diskretní kosinová transformace podle rovnice

$$F(u, v) = C_u C_v \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 B(x, y) \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16}. \quad 5-3$$

kde  $u, v = 0, 1, 2, \dots, N \times N$ ,

$$C_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ pro } u = 0, \text{ jinak } C_u = 1,$$

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ pro } v = 0, \text{ jinak } C_v = 1.$$

Následuje úprava rozměrů vodoznaku  $W$ . V tomto případě je potřeba zajistit, aby celkový počet pixelů vodoznaku  $W$  byl menší nebo roven celkovému počtu bloků  $B$ . Po úpravě vodoznaku je možné přistoupit k samotnému vložení vodoznaku do originálního obrazu  $C_o$ . Originální obraz je během procesu vodoznačení upravován podle následujících pravidel:

- V případě, že bit vodoznaku vkládaného do bloku  $B$  je roven nule, musí platit nerovnice  $B_i(u_i, v_i) > B_j(u_j, v_j)$ , kde  $B_i$  a  $B_j$  představují dva vybrané koeficienty v transformované matici. Pokud tato podmínka není splněna, jsou tyto koeficienty navzájem prohozeny.
- V případě, že bit vodoznaku vkládaného do bloku  $B$  je roven jedné, musí platit nerovnice  $B_i(u_i, v_i) \leq B_j(u_j, v_j)$ , kde  $B_i$  a  $B_j$  představují dva vybrané koeficienty v transformované matici. Pokud tato podmínka není splněna, jsou tyto koeficienty navzájem prohozeny.

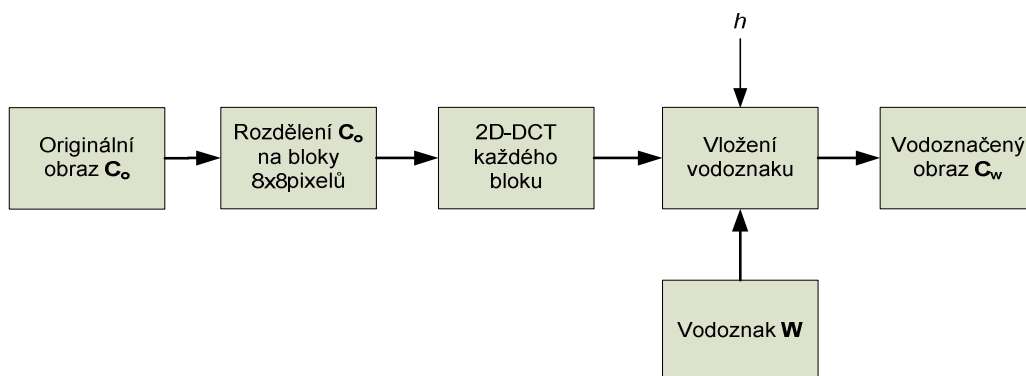
Pro zvýšení odolnosti vloženého byl zaveden koeficient hloubky vložení  $h$ . Pokud neplatí nerovnice

$$|B_i(u_1, v_1) - B_i(u_2, v_2)| > h, \quad 5-4$$

je hodnota  $h/2$  k jednomu z vybraných koeficientů bloku  $B_i$  přičtena a od druhého odečtena tak, aby byla nerovnice 5-4 splněna. V případě, že je podmínka 5-4 splněna, zůstávají koeficienty  $B_i$  nezměněny. Po úpravě všech bloků originálního obrazu  $C_o$  je s každým blokem provedena inverzní 2D diskretní kosinová transformace dle rovnice

$$B(x, y) = \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 C_u C_v F(u, v) \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \cos \frac{(2x+1)u\pi}{16}. \quad 5-5$$

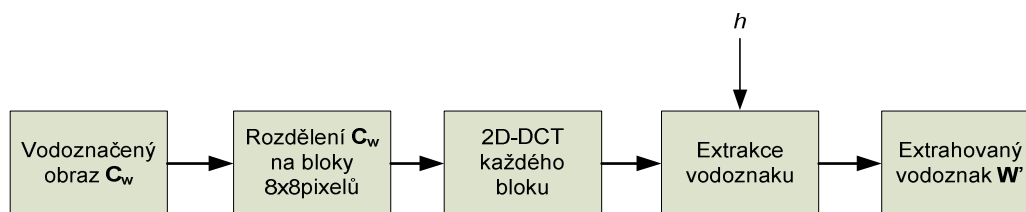
Jednotlivé bloky jsou dále uspořádány do obrazu, čímž je získán vodoznačený obraz  $C_w$ .



Obr. 5.3: Vložení vodoznaku metodou DCT

### **Proces extrakce vodoznaku**

Extrakce vodoznaku je vyobrazena na Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Extrakce vodoznaku metodou DCT

Jak je patrné, k extrakci je potřebný pouze vodoznačený obraz  $C_w$ , který je v první fázi extrakce rozdělen na bloky  $B$  o stejné velikosti jako u procesu vkládání, tedy na bloky  $B$  o velikosti 8x8 pixelů. Každý blok je transformován do frekvenční oblasti pomocí 2D diskretní kosinové transformace podle

$$F(u, v) = C_u C_v \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 B(x, y) \cos \frac{(2y+1)v\pi}{16} \cos \frac{(2x+1)u\pi}{1}. \quad 5-6$$

Ve fázi, kdy jsou získány všechny transformované bloky  $B$ , je zahájen proces extrakce vodoznaku. Ten probíhá porovnáním koeficientů každého bloku na stejných pozicích, které byly použity při vkládání vodoznaku. V případě splnění nerovnosti

$$B_i(u_i, v_i) > B_j(u_j, v_j) \quad 5-7$$

je extrahovaný bit vodoznaku  $w'_i$  roven nule, jinak je  $w'_i$  roven jedné. Z extrahovaných bitů vodoznaku je sestaven vodoznak  $W'$ .

### **Testování metody vodoznačení s využitím 2D-DCT transformace**

Pro testování navržené metody vodoznačení s využitím 2D-DCT transformace byly na základě předchozích experimentů pro vložení vodoznaku vybrány koeficienty  $B_1$  (1,4) a  $B_2$  (3,3). Vložení vodoznaku  $W$  probíhalo přesně podle

popsaných kroků. Testovaná hloubka vložení byla v rozsahu  $h = \langle 1, \dots, 4 \rangle$ . Při větších hodnotách docházelo k velkému zkreslení a to hlavně na hranách objektů (vyšší frekvence). Při vyšších hodnotách  $h$  je taktéž patrný pokles, který však není tak markantní, jako u metody 2D-DWT. Celkově je však PSNR výrazně nižší.

Z výsledků v tabulce uvedených v dizertační práci je patrné, že navržený vodoznačící systém při použití hloubky vložení  $h = 4$  je z provedených útoků odolný podstatně více útoků než u metody 2D-DCT.

## 6 METODY VODOZNAČENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ SINGULÁRNÍ DEKOMPOZICI

Singulární dekompozice je díky svým vlastnostem velmi silným nástrojem pro vodoznačení statických obrazů. V minulosti byla vyvinuta celá řada vodoznačících technik založených na singulární dekompozici, např. [19], [13]. Vzhledem k dobrým výsledkům vodoznačících metod využívajících této dekompozice byly navrženy nové metoda kombinující singulární dekompozici s 2D diskretní vlnkovou transformací a 2D diskretní kosinovou transformací. Od těchto metod se předpokládá výrazné zlepšení odolnosti vložených vodoznaků vůči velké řadě útoků. Určité srovnání bylo prezentováno v článcích [50], [52], [56]. Základním stavebním kamenem pro obě navržené metody jsou metody popsané v kapitolách 5.1 a 5.2.

### 6.1 METODA VODOZNAČENÍ S VYUŽITÍM 2D-DWT-SVD

Nově navržená metoda byla vyvinuta za účelem zvýšení odolnosti vodoznaku  $\mathbf{W}$  v originálním obrazu  $\mathbf{C}_o$ . Podmínkou také bylo to, že proces vložení vodoznaku nesmí výrazně snížit PSNR vodoznačeného obrazu  $\mathbf{C}_w$ . Základní koncept navržené metody vychází z metody využívající 2D diskretní vlnkovou transformaci popsanou v kapitole 5.1.

#### *Proces vložení vodoznaku*

Postup vložení vodoznaku u navržené metody 2D-DWT-SVD je vyobrazen na Obr. 6.1. Originální obraz  $\mathbf{C}_o$  je v prvním kroku transformován do frekvenční oblasti pomocí 2D diskretní vlnkové transformace. Stejně jako v případě metody popsané v kapitole 5.1 je provedena pouze první dekompozice, díky níž jsou získány čtyři sub-pásma  $\mathbf{CA}$ ,  $\mathbf{CH}$ ,  $\mathbf{CV}$ ,  $\mathbf{CD}$ . Následně je zvolené sub-pásma rozděleno singulární dekompozicí na tři matice využitím rovnice

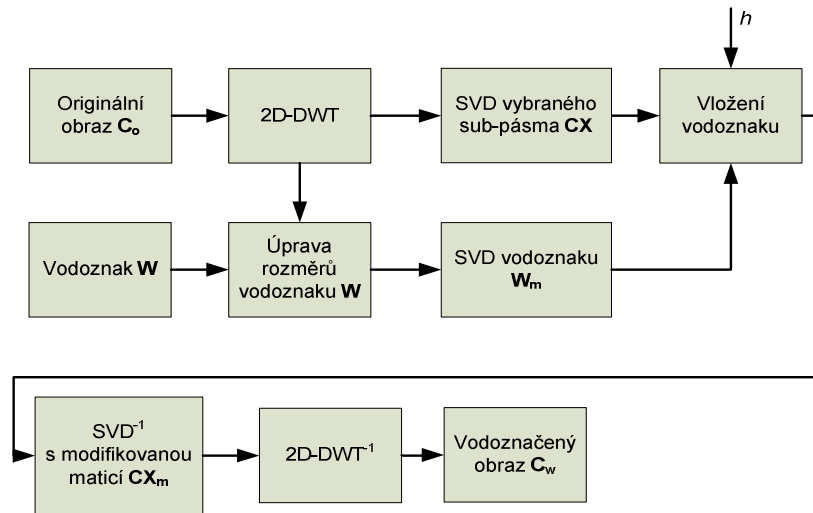
$$\mathbf{CX} = \mathbf{U}_{CX} \mathbf{S}_{CX} \mathbf{V}_{CX}^T. \quad 6-1$$

V dalším kroku jsou upraveny rozměry vodoznaku tak, aby odpovídaly rozměrům zvoleného sub-pásma  $\mathbf{CX}$ . Na takto modifikovaný vodoznak  $\mathbf{W}_m$  je aplikována singulární dekompozice

$$\mathbf{W}_m = \mathbf{U}_W \mathbf{S}_W \mathbf{V}_W^T, \quad 6-2$$

díky které je získána matice singulárních hodnot  $\mathbf{S}_w$  jejíž prvky na hlavní diagonále jsou použity pro vodoznačící proces. Vlastní vodoznačení probíhá úpravou singulárních hodnot matice  $\mathbf{S}_{CX}$  singulárními hodnotami dle vztahu

$s_{CXi}^* = s_{CXi} + hs_{wi}$ ;  $i = 1, \dots, x$ ,  
kde  $i$  značí pořadí singulární hodnoty zvoleného sub-pásma originálního obrazu  $\mathbf{CX}$  i modifikovaného vodoznaku  $\mathbf{W}_m$ ,  $h$  značí hloubku vložení vodoznaku.



Obr. 6.1: Vložení vodoznaku metodou 2D-DWT-SVD

Po získání modifikovaných hodnot je zpětně vypočítáno sub-pásma  $\mathbf{CX}$

$$\mathbf{CX}_m = \mathbf{U}_{CX} \mathbf{S}_{CX}^* \mathbf{V}_{CX}^T \quad 6-4$$

Při výpočtu jsou použity matice levých a pravých singulárních vektorů sub-pásma  $\mathbf{CX}$  a modifikovaná matice singulárních hodnot  $\mathbf{S}_{CX}^*$ . Výsledkem je modifikované sub-pásma  $\mathbf{CX}_m$ , pomocí něhož a ostatních třech nezměněných sub-pásem je zpětnou 2D vlnkovou transformací získán vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$ .

### Proces extrakce vodoznaku

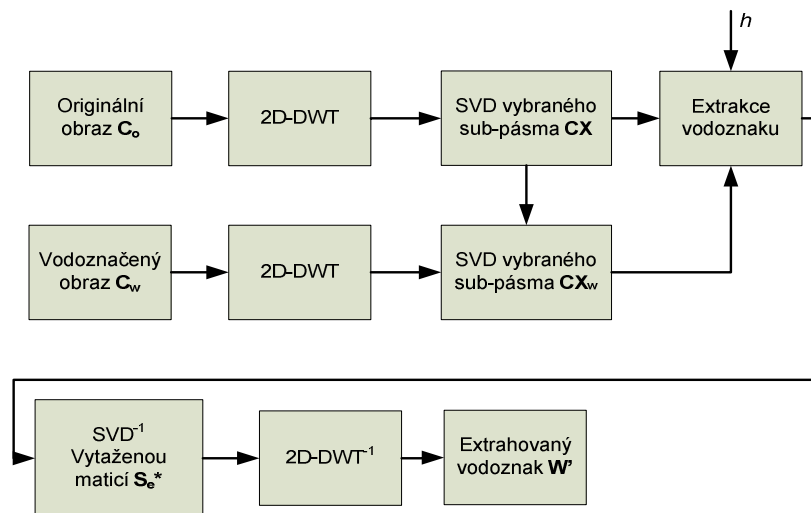
K extrakci vodoznaku je zapotřebí znát originální obraz  $\mathbf{C}_o$ , vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$ , modifikovaný vodoznak  $\mathbf{W}_m$ , použitá hloubka vložení  $h$  a použitá oblast pro vložení vodoznaku  $\mathbf{CX}$ .

Postup pro extrakci vodoznaku u navržené metody 2D-DWT-SVD lze popsat pomocí Obr. 6.2. Originální obraz  $\mathbf{C}_o$  i vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$  jsou nejprve transformovány 2D diskretní vlnkovou transformací do frekvenční oblasti. Tím jsou získány sub-pásma  $\mathbf{CA}$ ,  $\mathbf{CH}$ ,  $\mathbf{CV}$ ,  $\mathbf{CD}$  a  $\mathbf{CA}_w$ ,  $\mathbf{CH}_w$ ,  $\mathbf{CV}_w$ ,  $\mathbf{CD}_w$ . V následující fázi je na vybraná sub-pásma aplikována singulární dekompozice. Pro sub-pásma  $\mathbf{CX}$  originálního obratu  $\mathbf{C}_o$  podle vztahu

$$\mathbf{CX} = \mathbf{U}_{CX} \mathbf{S}_{CX} \mathbf{V}_{CX}^T, \quad 6-5$$

pro sub-pásma vodoznačeného obrazu podle vztahu

$$\mathbf{CX}_w = \mathbf{U}_{CX_w} \mathbf{S}_{CX_w} \mathbf{V}_{CX_w}^T. \quad 6-6$$



Obr. 6.2: Extrakce vodoznaku metodou 2D-DWT-SVD

Po získání matic singulárních hodnot je provedena extrakce singulárních hodnot vodoznaku

$$s_{ei}^* = \frac{(s_{CXWi} - s_{CXi})}{h}, i = 1, \dots, n, \quad 6-7$$

kde  $i$  značí pořadí singulární hodnoty v originálním obrazu  $C_o$  a vodoznačeném obrazu  $C_w$ . Ze získané singulární hodnoty je sestavena matice singulárních hodnot, pomocí níž a matic levých a pravých singulárních hodnot modifikovaného vodoznaku  $W_m$  je vypočítán extrahovaný vodoznak

$$W' = U_w S_e^* V_w^T. \quad 6-8$$

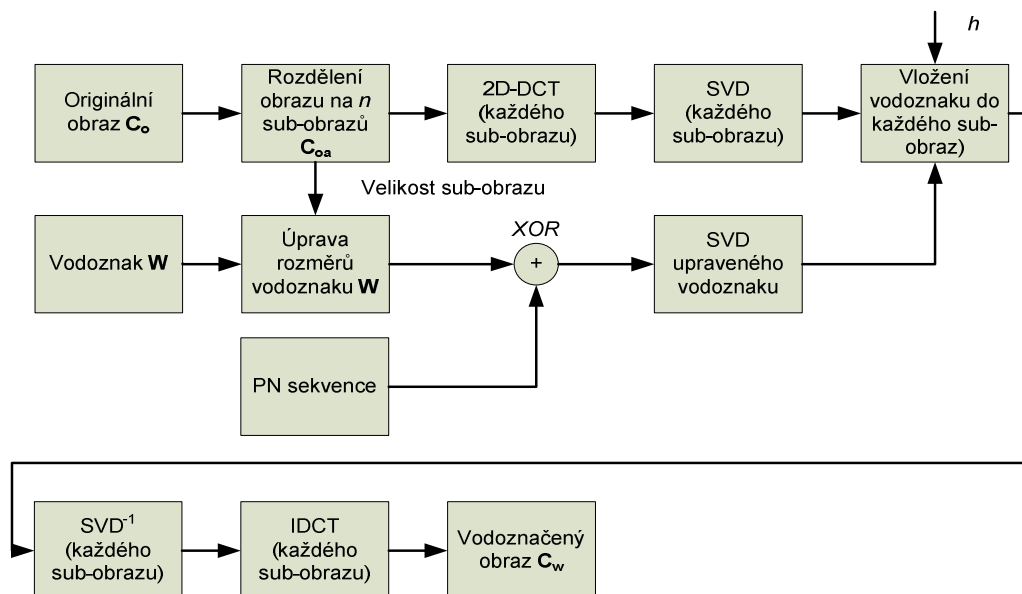
### *Experimentální testování navržené metody*

Při testování navržené metody bylo vycházeno z pravidla, že při kompresích obrazu jsou nejméně znehodnoceny nízkofrekvenční složky obrazu. Vodoznak byl proto vložen do aproximačních koeficientů CA. Testovaná hloubka vložení byla v rozsahu  $h = \langle 1, \dots, 15 \rangle$ . Při větších hodnotách docházelo ke zkreslení vodoznačeného obrazu, které se projevovalo znehodnocením hran objektů. Při vyšších hodnotách  $h$  je stejně jako u předchozích metod taktéž patrný pokles PSNR. Metoda odolala velké většině testovaných útoků. Špatné výsledky má pouze u útoku lineární transformací, ostříhnutím a pokřivením.

## 6.2 METODA VODOZNAČENÍ S VYUŽITÍM 2D-DCT-SVD

Pro separaci frekvenčních složek bylo mimo 2D diskretní vlnkové transformace využito také 2D diskretní kosinové transformace. Tato transformace je použita za účelem získání ucelených výsledků z obou transformací a hlavně pro vyhodnocení, která z transformací je se singulární dekompozicí lépe použitelná. Singulární dekompozice je u této metody použita obdobným způsobem, jako u metody předešlé.

Navržené schéma pro vložení vodoznaku je vyobrazeno na Obr. 6.3.



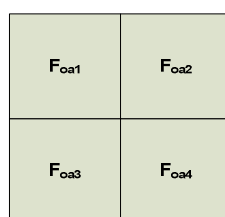
Obr. 6.3: Vložení vodoznaku metodou 2D-DCT-SVD

### Proces vložení vodoznaku

Při procesu vložení vodoznaku bylo odkloněno od metody popsané v kapitole 5.2. Originální obraz  $C_o$  je před samotným procesem vložení vodoznaku rozdělen na nepřekrývající se sub-obrazy  $C_{oa}$ , kde  $a$  nabývá hodnot od 0 do  $x-1$  ( $x$  značí celkový počet nepřekrývajících se bloků v obrazu). Vodoznak  $W$  o rozměrech  $N \times N$  je v dalších krocích vložen do každého sub-obrazu zvlášť. Každý sub-obraz je nejprve převeden do frekvenční oblasti s použitím 2D diskretní kosinové transformace podle vzorce

$$F_{oa}(u, v) = C_u C_v \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C_{oa}(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N}, \quad 6-9$$

Transformovaná matice  $F_{oa}$  je rozdělena na 4 bloky (Obr. 6.4)



Obr. 6.4: Bloky po 2D-DCT

Pro vložení vodoznaku je vybrán blok, který obsahuje nejvíce nízkofrekvenčních složek. Podle pravidel 2D-DCT se tedy jedná o blok  $F_{oa1}$ . Ten je rozložen pomocí singulární dekompozice na 3 matice tak, aby platil vztah

$$F_{oa1} = U_{oa} S_{oa} V_{oa}^T \quad 6-10$$

Následuje úprava velikosti vodoznaku  $\mathbf{W}$  na rozměry bloku  $\mathbf{F}_{oa1}$  z toho důvodu, aby počet singulárních hodnot byl u bloku pro vložení i u vkládaného vodoznaku shodný. Takto upravený vodoznak  $\mathbf{W}$  je za pomoci singulární dekompozice rozložen na 3 matice

$$\mathbf{W} = \mathbf{U}_w \mathbf{S}_w \mathbf{V}_w^T \quad 6-11$$

Následuje modifikace matice singulárních  $\mathbf{S}_{oa}$  hodnot originálního sub-obrazu dle vztahu

$$s_{oai}^* = s_{oai} + h s_{wi}, i = 1, \dots, NxN, \quad 6-12$$

kde  $h$  značí hloubku vložení vodoznaku. Hodnota  $h$  ovlivňuje jak odolnost obrazu proti prováděným útokům, tak i vnímatelnost vodoznaku. Po úpravě singulárních hodnot je zpětně získána modifikovaná část obrazu ve frekvenční oblasti

$$\mathbf{F}_{oa1}^* = \mathbf{U}_{oa} \mathbf{S}_{oa}^* \mathbf{V}_{oa}^T \quad 6-13$$

kteřá je spojena s bloky  $\mathbf{F}_{o2} \dots \mathbf{F}_{o4}$ , čímž je vytvořena matice  $\mathbf{F}_{oa}^*$ , která je pomocí inverzní 2D diskretní kosinové transformace

$$C_{wa}(x, y) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C_u C_v F_{oa}^*(u, v) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N} \quad 6-14$$

převedená zpět do oblasti prostorové. Po provedení výše uvedených kroků pro každý sub-obraz jsou modifikované sub-obrazy seskládány zpět do původního obrazu. Tím je získán vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$ . Vícenásobné vložení vodoznaku by mělo být znatelné hlavně při útocích typu ořezání.

### **Proces extrakce vodoznaku**

Při extrakci vodoznaku (Obr. 6.5) je originální obraz  $\mathbf{C}_o$  i vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$  rozdělen na  $x$  sub-obrazů o stejné velikosti  $NxN$  jako při vkládání vodoznaku. Pro extrakci je dále potřebná PN sekvence, pokud byla použita k zamíchání bitů vodoznaku  $\mathbf{W}$  před jeho vložení do originálních dat  $\mathbf{C}_o$ . V prvním kroku je provedena 2D diskretní kosinová transformace s bloky originálního obrazu  $\mathbf{C}_o$  i s bloky vodoznačeného obrazu  $\mathbf{C}_w$ . Transformace probíhá podle vztahů

$$\mathbf{F}_{oa}(u, v) = C_u C_v \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \mathbf{C}_{oa}(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N}, \quad 6-15$$

$$\mathbf{F}_{wa}(u, v) = C_u C_v \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \mathbf{C}_{wa}(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N}, \quad 6-16$$

Po 2D transformaci je nutné rozdělit transformované oblasti na bloky stejně jako u procesu vložení vodoznaku (Obr. 6.4) a získat matice singulárních hodnot podle vztahu

$$\mathbf{F}_{oa1} = \mathbf{U}_{oa} \mathbf{S}_{oa} \mathbf{V}_{oa}^T \quad 6-17$$

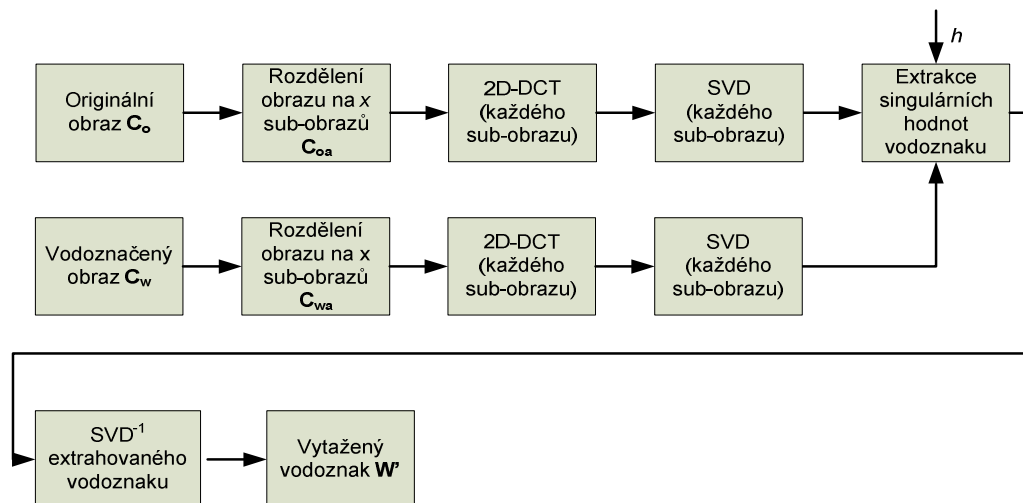
$$\mathbf{F}_{wa1} = \mathbf{U}_{wa} \mathbf{S}_{wa} \mathbf{V}_{wa}^T \quad 6-18$$

Singulární hodnoty originálního i vodoznačeného obrazu jsou použity k extrakci vodoznaku za využití vztahu

$$s_{wai}^* = \frac{(s_{wai} - s_{0ai})}{h}, \text{ kde } i = 1, \dots, N \times N. \quad 6-19$$

Získání extrahovaného vodoznaku následuje pomocí zpětné singulární dekompozice

$$W' = U_{wa} S_{wa}^* V_{wa}^T. \quad 6-20$$



Obr. 6.5: Extrakce vodoznaku metodou 2D-DCT-SVD

### Experimentální testování navržené metody

Navržená metoda byla testována pro čtyři různé velikosti a počty bloků:

- $2^0$  nepřekrývajících se oblastí  $c_{00}$ .
- $2^2$  nepřekrývajících se oblastí  $c_{00}, c_{01}, c_{02}, c_{03}$ .
- $2^4$  nepřekrývajících se oblastí  $c_{00}, c_{01}, \dots, c_{15}$ .
- $2^6$  nepřekrývajících se oblastí  $c_{00}, c_{01}, \dots, c_{63}$ .

Je nutné poznamenat, že s rostoucím počtem bloků se snižuje maximální prostorové rozlišení vodoznaku. Z hlediska PSNR vodoznačeného obrazu vycházely všechny testované možnosti téměř shodně a velmi se podobaly výsledkům metody 2D-DWT-SVD. Více menších bloků se vyplatí při předpokladu, že z obrázku budou ořezány určité kusy, což se v praxi může stát. Velkou nevýhodou menších bloků je omezený počet informace, která může být do obrazu vložena. Proto byl zvolen kompromis – velikost bloku  $256 \times 256$ , kdy je vodoznak vložen do čtyř nepřekrývajících se bloků originálního obrazu  $C_o$ . Výsledky jsou velmi pozitivní, z tabulky uvedené dizertační práci je patrné, že vodoznak ve velké míře odolá většině prováděných útoků. Jediné negativní výsledky byly u útoků lineární transformací a ostříhnutí.

## 7 VYUŽITÍ PROTICHYBOVÉHO KÓDOVÁNÍ PŘI VODOZNAČENÍ

Extrahované vodoznaky mnohdy obsahují velké množství chyb, které snižují jejich čitelnost. Tyto chyby vznikají hlavně po provedení některých ze zmiňovaných útoků na vodoznačený obraz  $C_w$ . Jednou z možností předejití tohoto jevu je použití

technik protichybového kódování při procesu vložení a extrakce vodoznaku. V dostupných člancích a knihách [5], [14], [21] je pouze zmíněno, že by vodoznačící systémy podpořené zabezpečovacími kódy měly vykazovat lepší výsledky. Neexistuje však žádný rozbor, jaký vliv zabezpečovací kódy na vodoznačící systémy skutečně mají.

Protichybové kódy jsou děleny do dvou kategorií a to podle přístupu k vlastní kódované zprávě a samotnému kódování. Jedná se o blokové a stromové kódy [35]. K jedné z největších skupin blokových kódů patří Bosé-Chaudhuri a Hocquenhemovy (BCH) kódy, mezi jejich podtřídu patří Reed-Solomonovy (RS) kódy. BCH kódy pracují pouze s binárními daty, což je pro používaný vodoznak příznivé, neboť je prahován pouze do dvou úrovní. Nově navržené systémy tedy budou testovány s BCH kódy. Cílem je však vytvoření universálního systému, který bude schopen využít pro svoji funkci jakýkoli blokový kód.

## 7.1 METODA VODOZNAČENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ 2D-DWT A PROTICHYBOVÉ KÓDOVÁNÍ

Pro zvýšení odolnosti vodoznačících systémů kvality (tzn. počtu kladně extrahovaných vodoznaků z vodoznačných obrazů po útoku) byla vyvinuta metoda využívající diskretní vlnkovou transformaci společně s aplikovaným protichybovým kódováním. Tato metoda by měla výrazně zvýšit odolnost vloženého vodoznaku předchozích metod. Digitální vodoznak  $W$  je před samotným vložení do originálního obrazu  $C_0$  zabezpečen pomocí zvoleného protichybového kódu. Tento krok má za následek, že některé z chyb vzniklé po útocích na vodoznačený obrázek mohou být díky schopnostem protichybových kódů částečně eliminovány nebo úplně odstraněny. Protichybové kódování má však i své nevýhody, mezi něž patří zvýšená redundance dat určitá výpočetní náročnost. Kvůli zmiňované redundanci musí být vodoznak ještě před samotným kódováním upraven tak, aby ho bylo možné vložit do plánované oblasti.

### *Proces vložení vodoznaku (Obr. 7.1)*

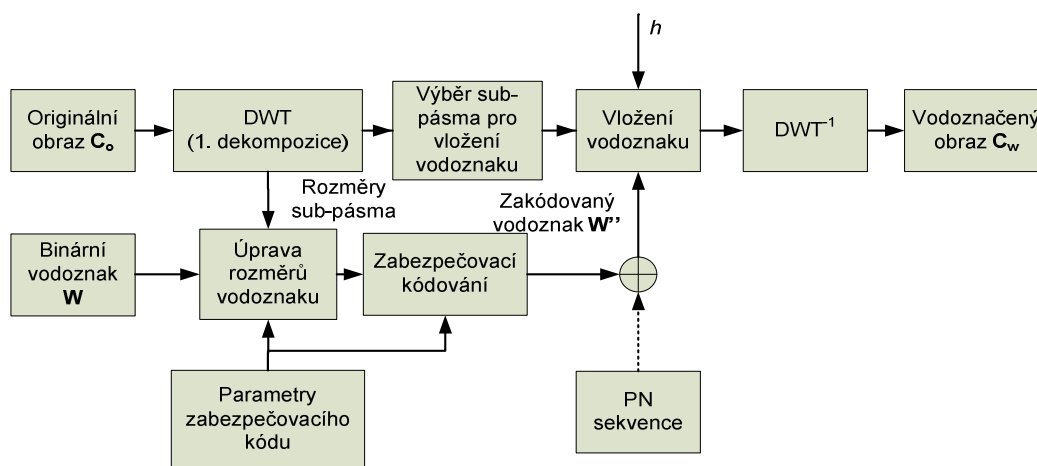
Originální obraz  $C_0$  je v prvním kroku převeden z prostorové do frekvenční oblasti pomocí 2D diskretní vlnkové transformace. Je provedena pouze první dekompozice, čímž se získají 4 sub-pásma  $CA$ ,  $CV$ ,  $CH$ ,  $CD$ . Následuje výběr sub-pásma  $CX$ , do kterého bude vodoznak v dalších krocích vložen. Výběr sub-pásma, stejně jako u metody využívající pouze 2D-DWT velmi ovlivňuje odolnost a viditelnost vloženého vodoznaku. Po výběru sub-pásma jsou stanoveny parametry a typ protichybového kódu, který bude při vodoznačení použit. V případě blokových kódů jsou zvoleny parametry  $n$ ,  $k$  a  $t$ . Jakmile je zvolen daný kód, je možné vypočítat, kolik informačních bitů  $k$  může vodoznak obsahovat. V závislosti na tomto parametru a v závislosti na velikosti zvoleného sub-pásma je upraven rozměr vodoznaku podle rovnice

$$W'_{CX} = \left\lfloor \frac{X_{CX}}{n} \right\rfloor k, \quad 7-1$$

kde  $n$  značí maximální délku kódového slova v bitech,  $k$  značí počet informačních bitů (bitů vodoznaku) a  $X_{cx}$  značí počet prvků zvoleného sub-pásma. Po úpravě velikosti vodoznaku je vodoznak zabezpečen pomocí zvoleného kódu. Zabezpečený vodoznak  $\mathbf{W}''$  může být volitelně sečten operací XOR s pseudonáhodnou PN sekvencí. Po všech zmíněných krocích je vodoznak vložen do zvoleného sub-pásma originálního obrazu  $\mathbf{C}_o$  pomocí vztahu

$$CX(m, n) = cx(m, n) + hw''(m, n), \quad 7-2$$

kde  $m$  a  $n$  jsou horizontální a vertikální rozměry zvoleného sub-pásma  $\mathbf{CX}$  a zároveň zabezpečeného vodoznaku  $\mathbf{W}''$ ,  $cx$  jsou koeficienty sub-pásma originálního obrazu,  $h$  značí hloubku vložení vodoznaku a  $\mathbf{W}''$  jsou koeficienty vkládaného zabezpečeného vodoznaku. Po vložení vodoznaku do zvoleného sub-pásma je provedena zpětná 2D diskretní vlnková transformace, čímž je získán vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$ .



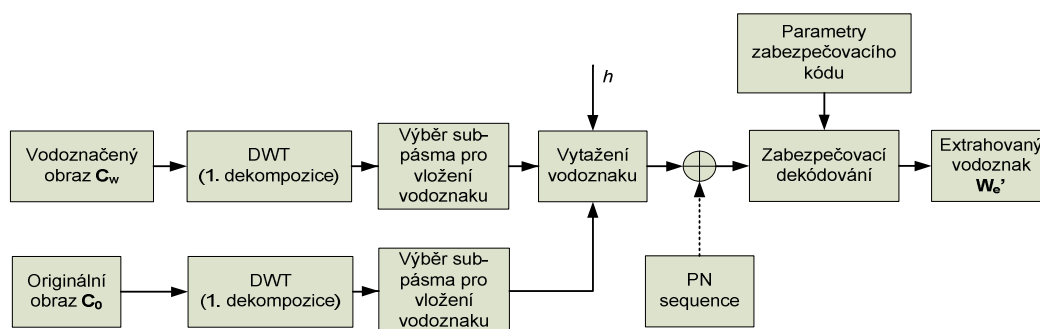
Obr. 7.1: Vložení vodoznaku metodou 2D-DWT se zabezpečovacím kódováním

### Proces extrakce vodoznaku (Obr. 7.2)

K extrakci vodoznaku je zapotřebí znát originální obraz  $\mathbf{C}_o$ , vodoznačený obraz  $\mathbf{C}_w$ , hloubku vložení vodoznaku  $h$ , typ použitého zabezpečovacího kódu a jeho parametry. Extrakce vodoznaku začíná převodem vodoznačeného obrazu  $\mathbf{C}_w$  i originálního obrazu  $\mathbf{C}_o$  z prostorové do frekvenční oblasti pomocí 2D diskretní vlnkové transformace, čímž jsou získány dvě skupiny matic se čtyřmi sub-pásmi  $\mathbf{CA}_o, \mathbf{CV}_o, \mathbf{CH}_o, \mathbf{CD}_o$  a  $\mathbf{CA}_w, \mathbf{CV}_w, \mathbf{CH}_w, \mathbf{CD}_w$ . Extrakce zabezpečeného vodoznaku ze zvoleného sub-pásma poté probíhá pomocí vztahu

$$W_e''(m, n) = \frac{c_o x(m, n) - c_w x(m, n)}{h}, \quad 7-3$$

kde  $X$  a  $Y$  jsou horizontální a vertikální rozměry sub-pásma zvolených koeficientů a zároveň zabezpečeného vodoznaku,  $cx$  jsou koeficienty sub-pásma originálního obrazu,  $h$  značí hloubku vložení vodoznaku a  $w$  jsou koeficienty vodoznaku. Po extrakci zabezpečeného vodoznaku je vodoznak dekódován zvoleným kódem, čímž se získá extrahovaný vodoznak  $\mathbf{W}_e$ .



Obr. 7.2: Extrakce vodoznaku metodou 2D-DWT se zabezpečovacím kódováním

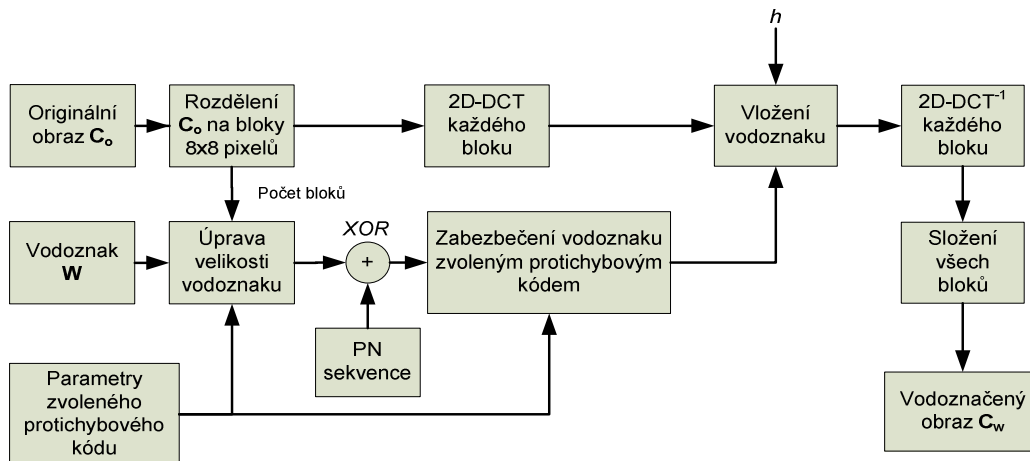
### Testování navržené metody

Navržená metoda byla testována pro protichybové kódy BCH, konkrétně pro BCH (15, 5, 3) a BCH (31,11,5). Hodnota PSNR zůstává téměř stejná pro obrazy vodoznačené metodou 2D-DWT a metodami 2D-DWT-BCH (x,x,x). Procento vytažených vodoznaků z poškozených obrazů však rapidně vzrostlo. Tímto procesem tedy byl splněn jeden z cílů práce, jenž je nalézt vodoznačící metodu zvyšující odolnost vodoznaků ve vodoznačících obrazech. Výhodou této metody je tedy zvýšení odolnosti vložených vodoznaků, nevýhodou je vyšší výpočetní náročnost na proces vložení i proces extrakce vodoznaku a snížení množství informace, kterou je možné do originálního obrazu  $C_o$  vložit.

## 7.2 METODA VODOZNAČENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ 2D-DCT A PROTICHYBOVÉ KÓDOVÁNÍ

Stejně jako pro metodu využívající 2D diskretní vlnkovou transformaci byla navržena modifikace metody pro 2D diskretní kosinovou transformaci, která zvyšuje odolnost vodoznaku. Vývoj této metody probíhal obdobně jako u metody 2D-DCT.

Hlavním cílem modifikace metody založené na 2D diskretní kosinové transformaci bylo, jak už bylo řečeno, zvýšení odolnosti vodoznaku  $W$  ve vodoznačném obrazech  $C_w$ . Toho jsme se pokusili, stejně jako u metody 2D-DWT (kapitola 7.1), dosáhnout za pomoci zabezpečovacích kódů. Bity vodoznaku  $W$  mohou být před vložení do originálního obrazu  $C_o$  nejprve zamíchány pomocí pseudonáhodné PN sekvence. Tímto krokem se zabezpečí, že v případě úspěšné extrakce vodoznaku útočník získá pouze náhodný signál. V dalším kroku je celá vstupní posloupnost zakódována pomocí zabezpečovacího kódu za účelem zvýšení kvality extrahovaného vodoznaku a s tím spojené odolnosti vodoznaku v obrazech.



Obr. 7.3: Vkládání vodoznaku metodou 2D-DCT se zabezpečovacím kódováním

K extrakci vodoznaku (Obr. 7.4) je zapotřebí znát parametry BCH kódu a pseudonáhodnou posloupnost, která byla použita při zamíchání bitů originálního vodoznaku  $W$ .

### Proces vložení vodoznaku

Originální obraz  $C_o$  je v prvním kroku rozložen na bloky  $C_{oa}$  o velikosti  $N \times N$  pixelů, kde  $a$  značí pořadí vyčítaného bloku a nabývá hodnot 1 až  $n$  ( $n$  je celkový počet bloků). Vyčítání bloků probíhá rastrově. Každý blok  $C_{oa}$  je transformován z prostorové do frekvenční oblasti pomocí 2D diskrétní kosinové transformace

$$F_{oa}(u, v) = C_u C_v \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C_{oa}(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N}. \quad 7-4$$

kde  $u, v = 0, 1, 2, \dots, N \times N$ . Tím je získáno  $n$  matic  $F$  se stejnými rozměry ( $8 \times 8$  prvků).

Následuje úprava rozměrů binárního vodoznaku. Jako vstupní hodnoty pro určení velikosti vodoznaku je počet bloků originálního obrazu  $C_o$  a parametry zvoleného kódu. Maximální počet bitů zabezpečeného vodoznaku nesmí přesáhnout počet bloků obrazu. Po úpravě může být vodoznak sečten exkluzivním součtem s pseudonáhodnou PN sekvencí.

Po změně vodoznaku  $W$  následuje jeho vložení do originálního obrazu  $C_o$ . To probíhá následujícím způsobem porovnáním vždy dvou koeficientů  $(u_1, v_1)$ ,  $(u_2, v_2)$  bloku  $F_{oa}$ :

- Pokud  $(u_1, v_1) > (u_2, v_2)$ , potom daný blok představuje hodnotu „1“, v ostatních případech představuje hodnotu „0“.
- V případě, že aktuálně vkládaný bit vodoznaku je shodný s hodnotou daného bloku, koeficienty na pozicích  $(u_1, v_1)$ ,  $(u_2, v_2)$  zůstávají nezměněny, v opačném případě jsou mezi sebou prohozeny.

V následujícím kroku je provedena kontrola odolnosti vodoznaku. V případě, že  $(u_1, v_1) > (u_2, v_2)$  a není splněna podmínka

$$|(u_1, v_1) - (u_2, v_2)| > h, \quad 7-5$$

je hodnota koeficientu  $(u_1, v_1)$  zvýšena o  $h/2$  a hodnota koeficientu  $(u_2, v_2)$  snížena o velikost  $h/2$ .

V případě, že  $a \leq b$  a není splněna podmínka

$$|(u_1, v_1) - (u_2, v_2)| > h, \quad 7-6$$

je hodnota koeficientu  $(u_1, v_1)$  snížena o  $h/2$  a hodnota koeficientu  $(u_2, v_2)$  zvýšena o velikost  $h/2$ . Po úpravě všech bloků se provede inverzní 2D diskretní kosinová transformace

$$C_{wa}(x, y) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C_u C_v F_{ow}(u, v) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N}, \quad 7-7$$

Z jednotlivých vodoznačených bloků je v závěrečné fázi sestaven vodoznačený obraz.

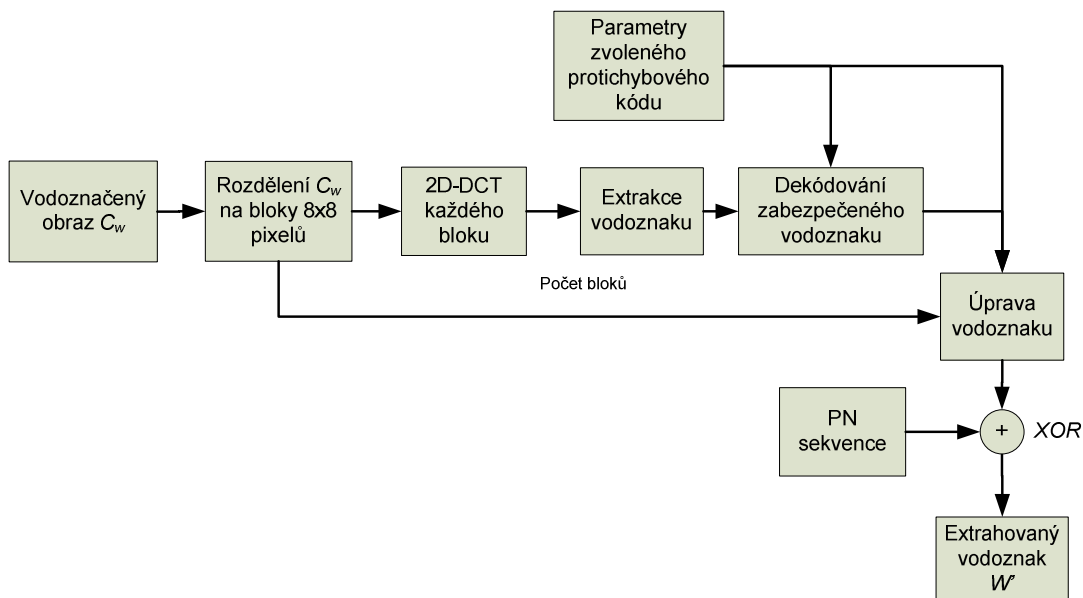
### ***Proces extrakce vodoznaku***

K extrakci vodoznaku je nutné znát vodoznačený obraz  $C_w$ , použitý zabezpečovací kód včetně jeho parametrů a PN sekvence, pokud byla při procesu vložení použita.

Rozložení vodoznačeného obrazu  $C_w$  na bloky  $C_{wa}$  o velikosti  $8 \times 8$  pixelů, kde  $a$  značí pořadí vyčítaného bloku a nabývá hodnot 1 až  $n$  ( $n$  je celkový počet bloků). Bloky jsou vyčítány postupně po řádcích a nejprve jsou transformovány z prostorové do frekvenční oblasti pomocí 2D diskretní kosinové transformace. Tím je získáno  $n$  matic  $F$  se stejnými rozměry ( $8 \times 8$  prvků).

$$F_{wa}(u, v) = C_u C_v \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} C_{wa}(x, y) \cos \frac{(2x+1)u\pi}{2N} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{2N}, \quad 7-8$$

Vlastní extrakce vodoznaku je provedena porovnáním koeficientů na pozicích  $(u_1, v_1)$ ,  $(u_2, v_2)$ . Pokud  $(u_1, v_1) > (u_2, v_2)$ , extrahovaný bit je 1, v ostatních případech je extrahovaný bit roven 0. Extrahovaný vodoznak je v dalším kroku dekódován vybraným kódem a výsledná posloupnost je upravena tak, aby extrahovaný vodoznak  $W'$  měl stejný počet bitů jako originální vodoznak  $W$ .



Obr. 7.4: Extrakce vodoznaku metodou DCT-BCH

### ***Testování navržené metody***

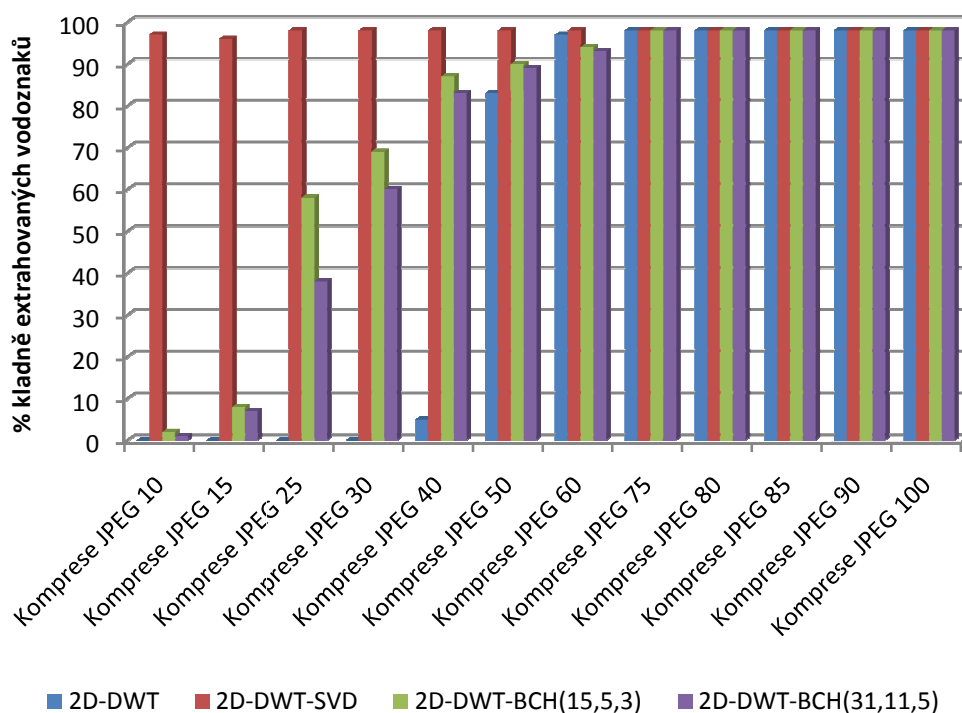
Navržená metoda byla testována stejně jako u metody 2D-DWT-BCH pro protichybové kódy BCH, konkrétně pro BCH (15, 5, 3) a BCH (31,11,5). Hodnota PSNR zůstává téměř stejná pro obrazy vodoznačené metodou 2D-DCT a metodami 2D-DCT-BCH. U této metody však nedochází k žádnému výraznému zlepšení při extrakci vodoznaku ze zabezpečených obrazů. Původní teorie, že zabezpečující kódování vždy zvyšuje odolnost vodoznaku je tedy milné [5]. Důkazem je navržený systém, jehož výsledky jsou přehledně zdokumentovány v tabulkách dizertační práce.

## **8 POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH TECHNIK**

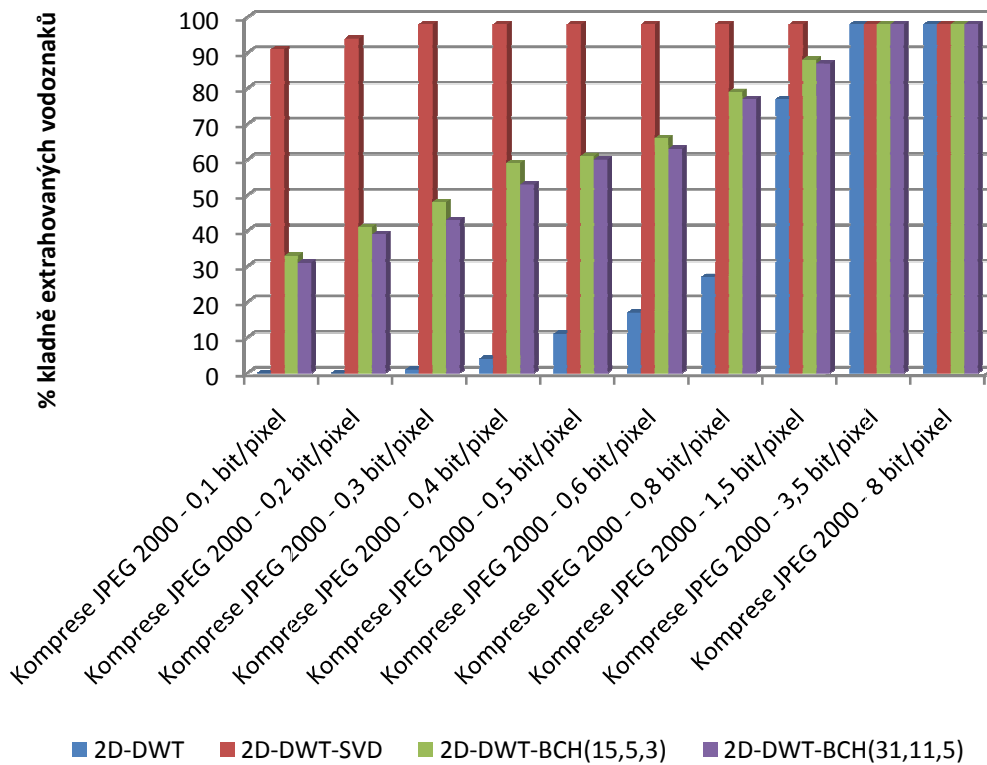
Porovnání navržených technik probíhalo ve dvou rovinách. První rovina byla v porovnání PSNR vodoznačených obrazů s obrazy originálními, druhá rovina byla v porovnání úspěšnosti extrahovaných vodoznaků. U každé z navržených metod je uveden graf závislosti PSNR vodoznačeného obrazu na hloubce vložení a tabulky s procenty úspěšně extrahovaných vodoznaků po provedených útocích. Za úspěšně extrahovaný vodoznak je považován takový, jehož NCC vůči originálnímu vodoznaku je větší nebo rovna 0,7. U metod využívajících 2D-DWT transformaci byla stanovena hraniční hloubka vložení na hodnotu 8. Při vyšších hodnotách již docházelo k narušení struktury obrazu. U metod využívajících 2D-DCT transformaci byla hraniční hloubka vložení experimentálně stanovena na hodnotu 4.

Grafy (Obr. 8.1 - Obr. 8.7) představují výsledky extrakce vodoznaků z vodoznačených obrazů s použitou hloubkou vložení  $h = 8$  u metod pracujících v oblasti po 2D-DWT transformaci. Z výsledků je patrné zvýšení kladně extrahovaných vodoznaků při použití zabezpečovacího kódování mimo útoky

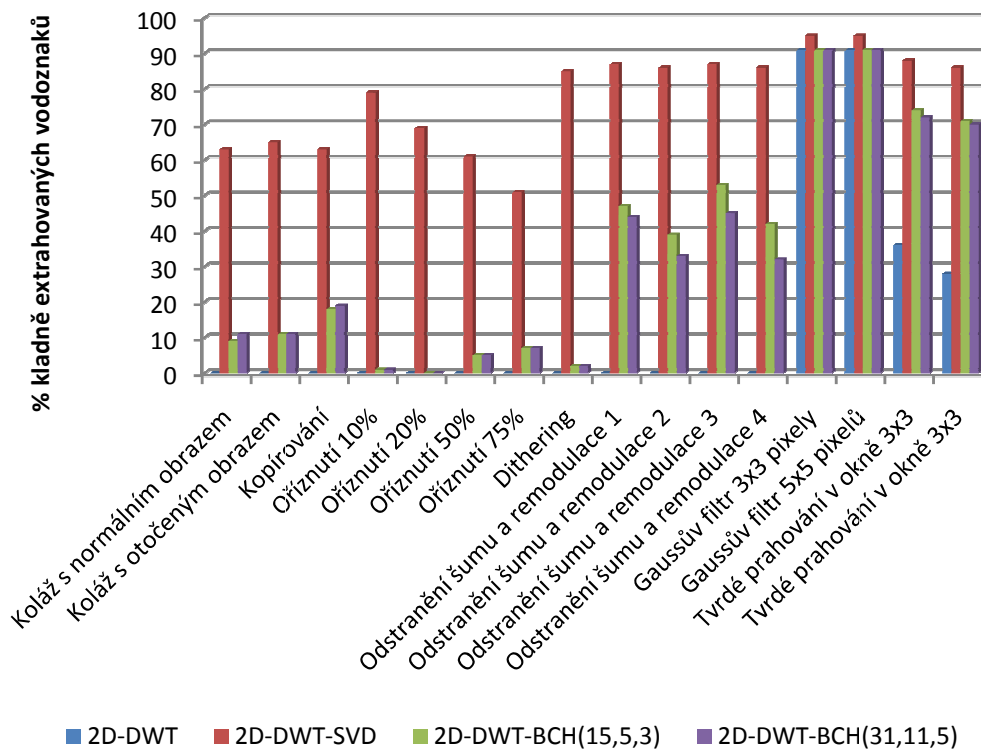
ditheringem, oříznutím, lineární transformací, rotací, ostříhnutím a pokřivením. V ostatních případech dochází ke zlepšení vlastností navržených vodoznačících systémů a tím také procentuálního zvýšení počtu extrahovaných korektně vodoznaků. U navržené metody využívající pro vložení vodoznaku singulární hodnoty CA pásma po 2D-DWT je patrné obrovské zvýšení odolnosti vůči široké škále provedených útoků. Vodoznak vložený do obrazu touto navrženou technikou odolá všem prováděným útokům kromě lineární transformace, ostříhnutí a pokřivení. PSNR u metod 2D-DWT a 2D-DWT-BCH se při hloubce vložení  $h = 8$  pohybuje v okolí 38 dB. Metoda s velmi dobrými výsledky extrakce vodoznaku i kvality vodoznačícího obrazu využívala mimo 2D-DWT také singulární dekompozici.



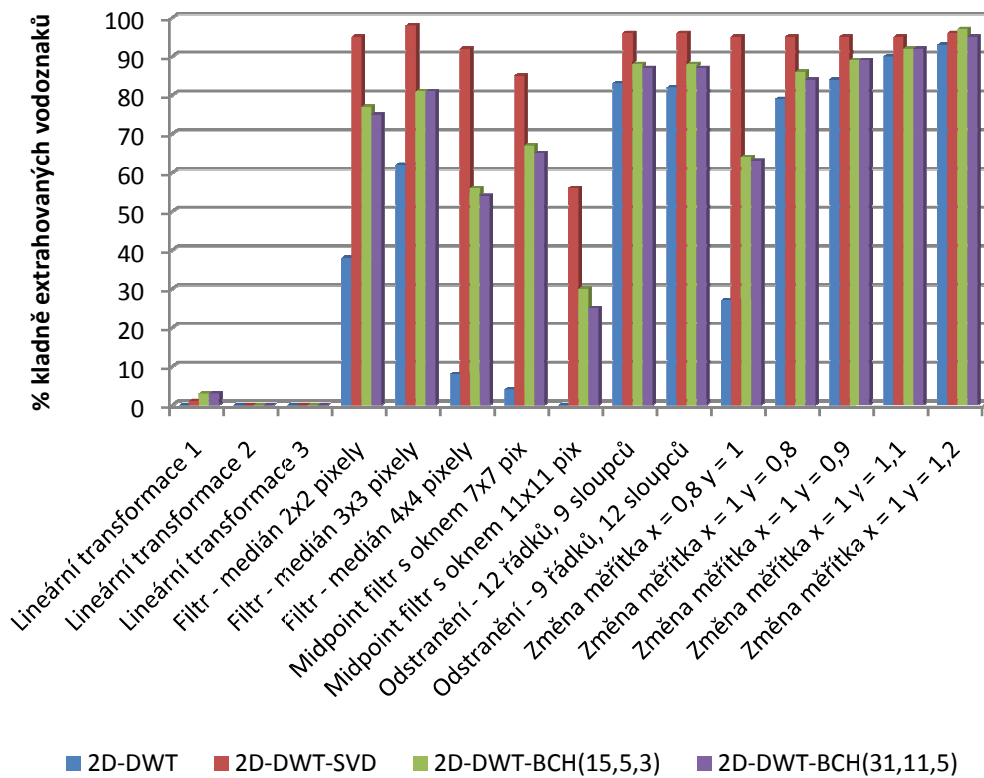
Obr. 8.1: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na kompresi JPEG u metod využívajících 2D-DWT transformaci



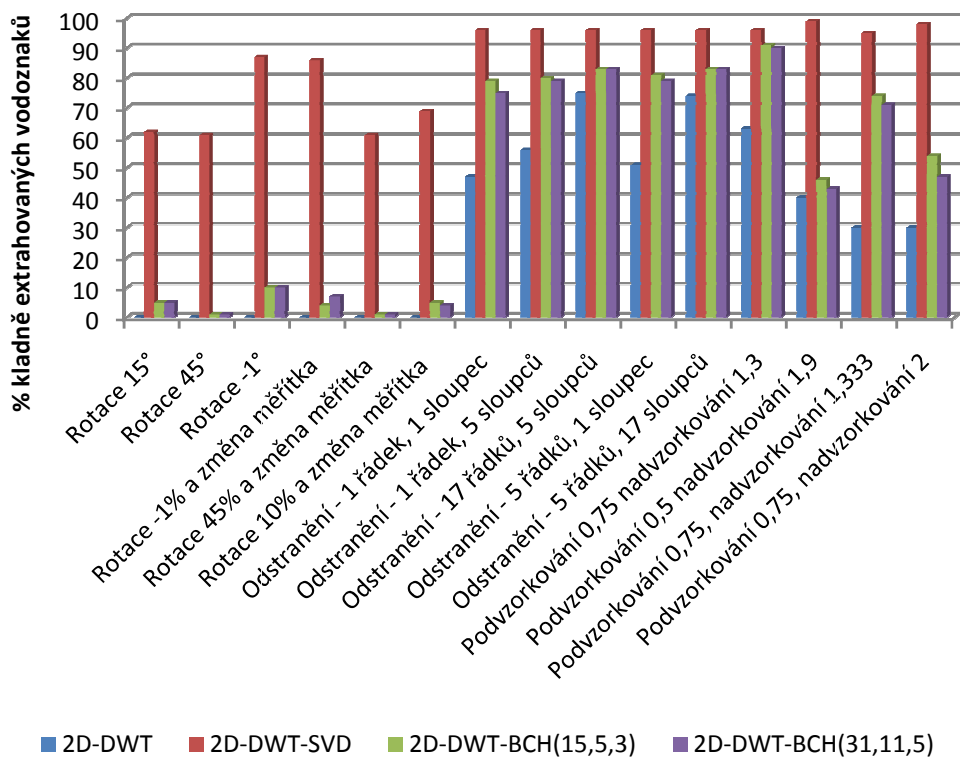
Obr. 8.2: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na kompresi JPEG 2000 u metod využívajících 2D-DWT transformaci



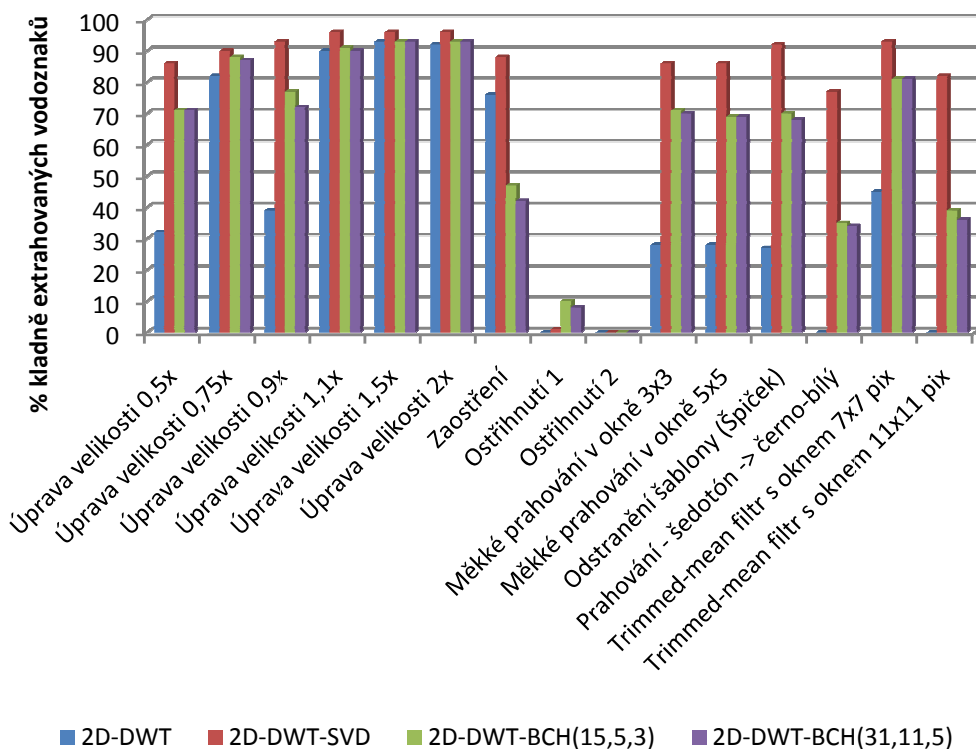
Obr. 8.3: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 1. sérii útoků u metod využívajících 2D-DWT transformaci



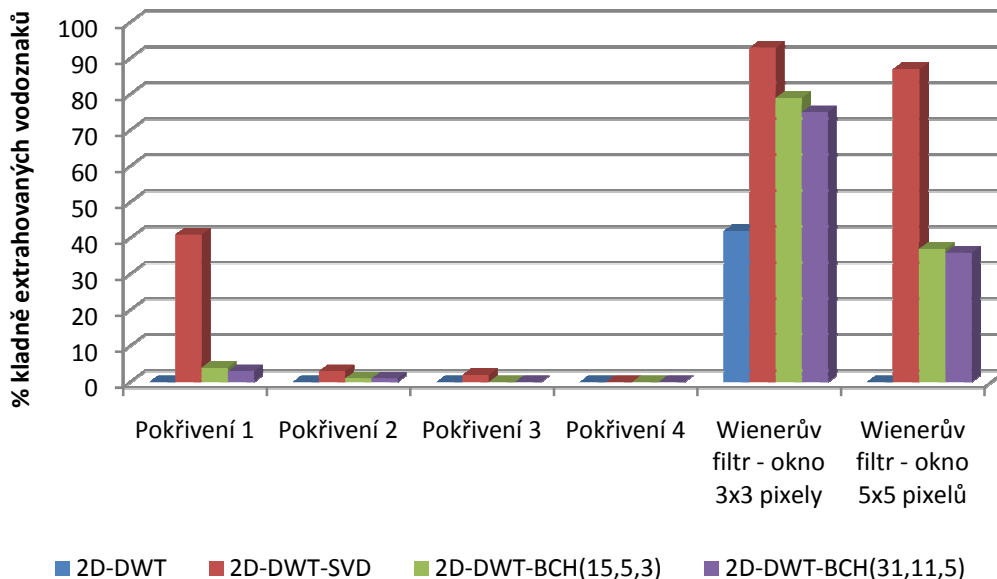
Obr. 8.4: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 2. sérii útoků u metod využívajících 2D-DWT transformaci



Obr. 8.5: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 3. sérii útoků u metod využívajících 2D-DWT transformaci



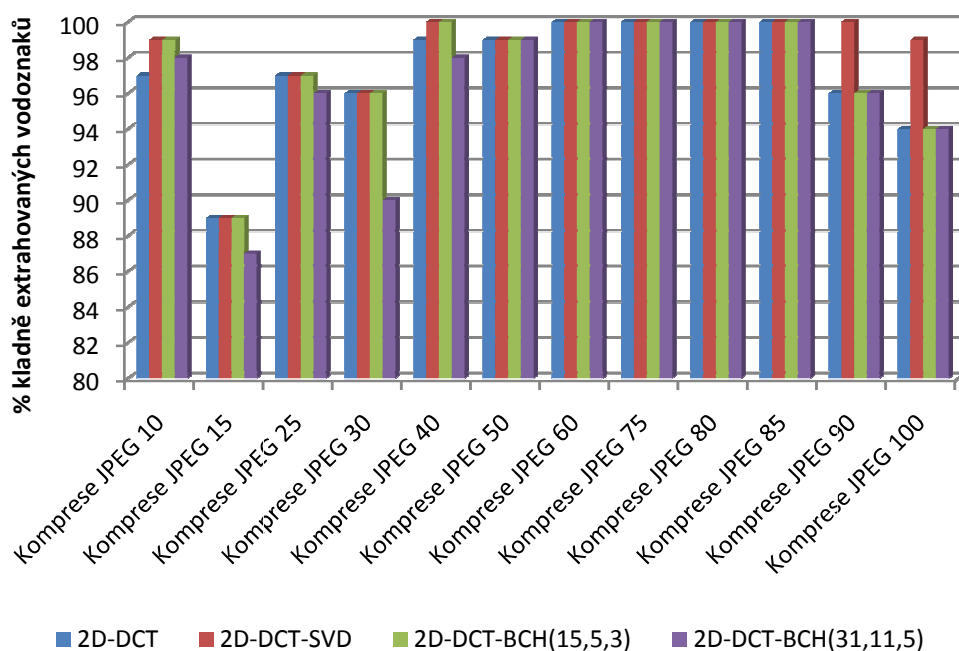
Obr. 8.6: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 4. sérii útoků u metod využívajících 2D-DWT transformaci



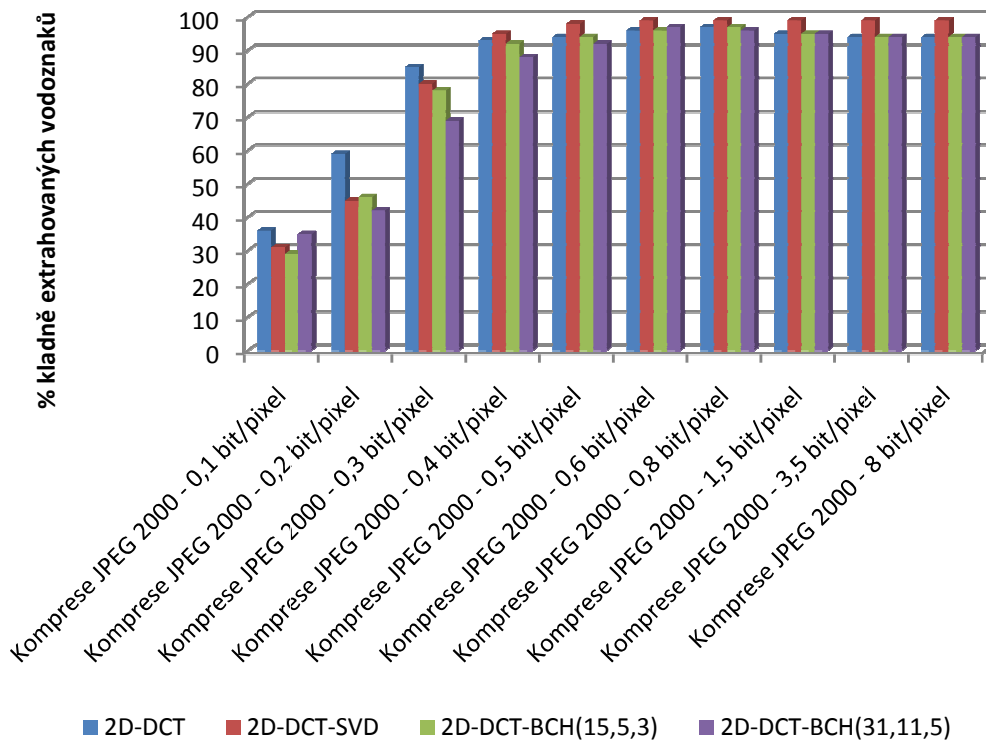
Obr. 8.7: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 5. sérii útoků u metod využívajících 2D-DWT transformaci

Grafy (Obr. 8.8 - Obr. 8.14) představují výsledky po extrakci vodoznaků z vodoznačených obrazů s použitou hloubkou vložení  $h = 4$  u metod pracujících

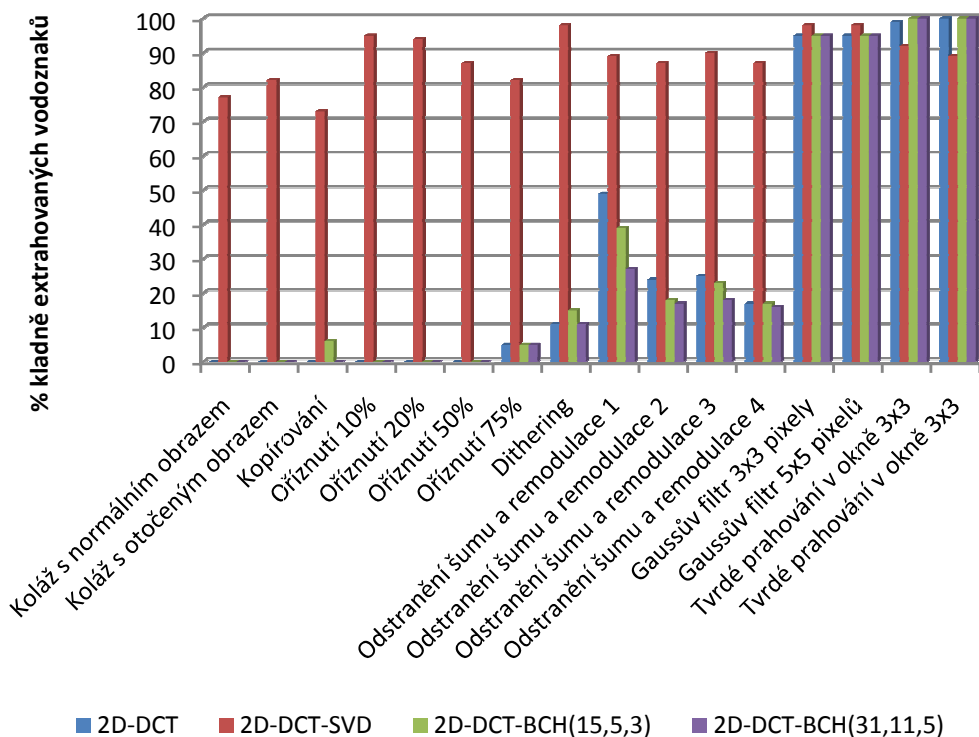
v oblasti po 2D-DCT transformaci. U navržených metod v 2D-DCT oblasti se nejvíce osvědčila právě singulární dekompozice spojená s vícenásobným vložením vodoznaku. U této metody bylo ustoupeno od tradičního dělení obrazu na bloky o velikosti 8x8 pixelů a velikost bloků pro 2D-DCT byla mnohonásobně zvětšena. Testované velikosti bloků byly 32x32, 64x64, 128x128 a 256x256 pixelů, přičemž poslední z nich vykazoval nejlepší výsledky. Z grafů (Obr. 8.8- Obr. 8.14) je patrné, že vodoznaky vložené do originálního obrazu metodou využívající 2D-DCT-SVD s bloky 256x256 odolaly téměř všem použitým útokům. Negativní výsledky byly pouze u útoků lineární transformací a ostříhnutím. Zabezpečovací kódování použité u metody 2D-DCT nemělo téměř žádný vliv na zvýšení odolnosti vodoznaku. Tímto testem se rozporuje teorie, že zabezpečovací kódování má vždy kladný vliv na extrakci vodoznaků z vodoznačeného obrazu [5]. Zde bylo experimentálně dokázáno, že to není vždy pravda.



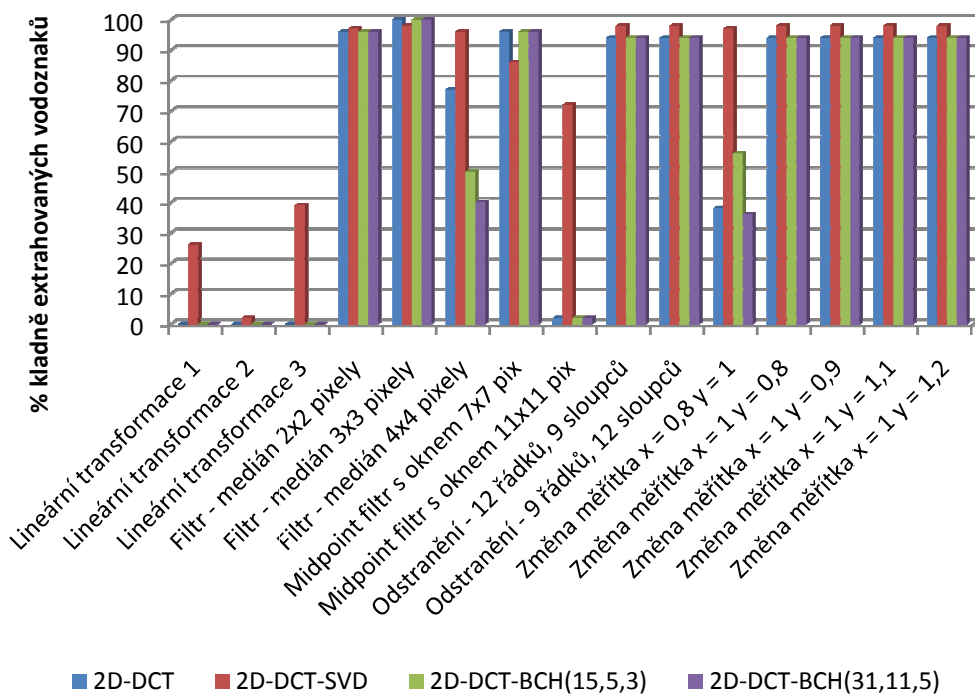
Obr. 8.8: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na kompresi JPEG u metod využívajících 2D-DCT transformaci



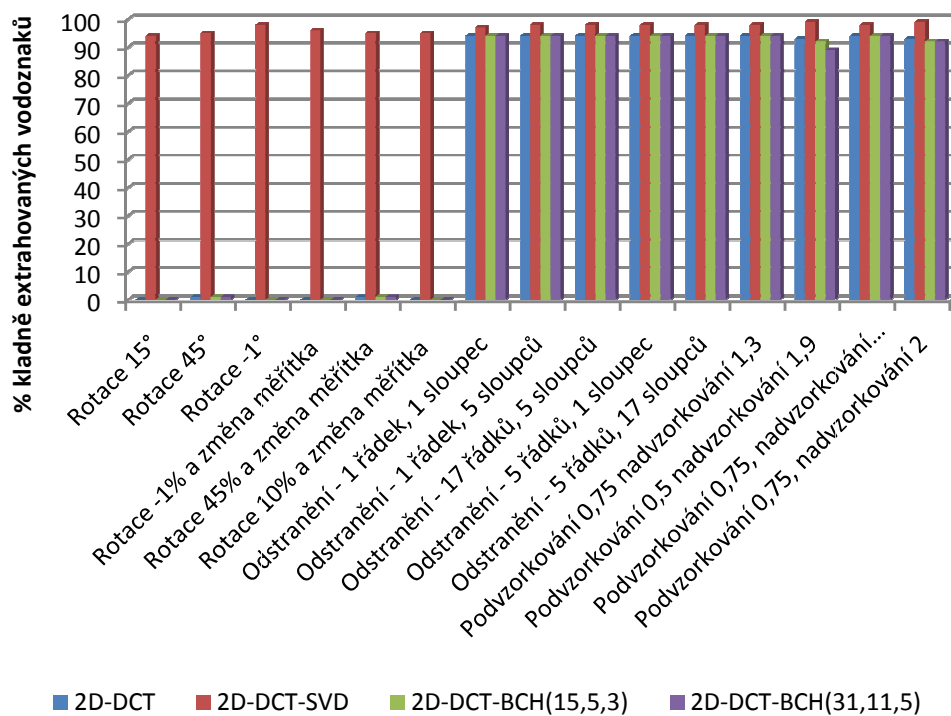
Obr. 8.9: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na kompresi JPEG u metod využívajících 2D-DCT transformaci



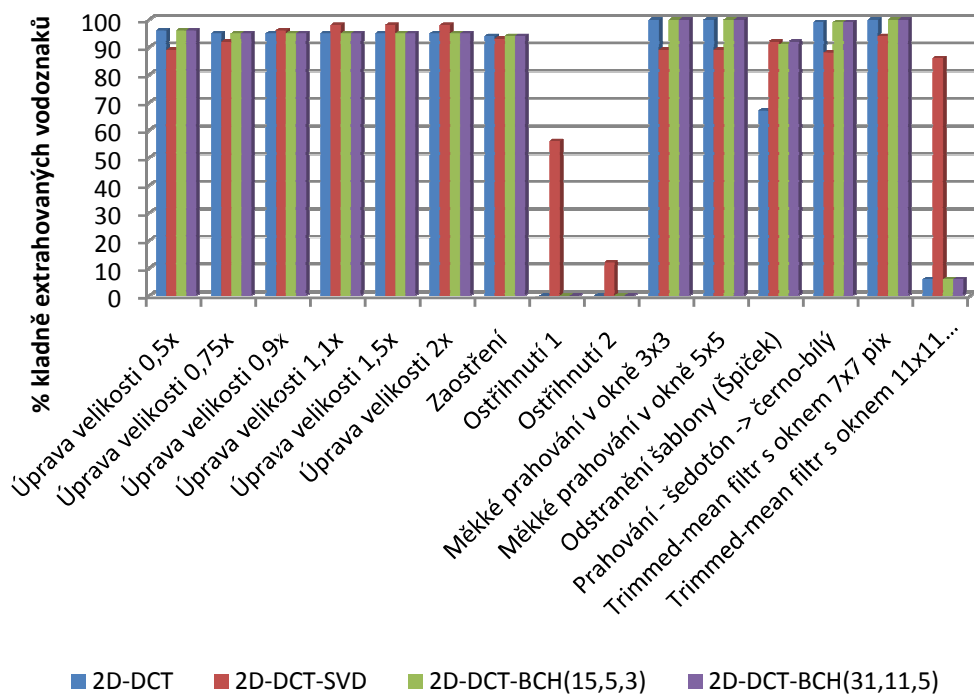
Obr. 8.10: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 1. sérii útoků u metod využívajících 2D-DCT transformaci



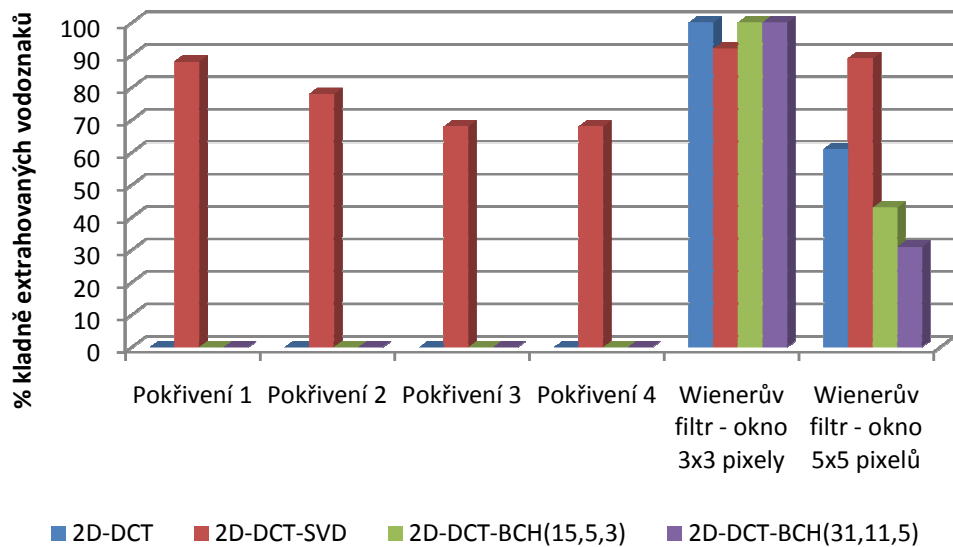
Obr. 8.11: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 2. sérii útoků u metod využívajících 2D-DCT transformaci



Obr. 8.12: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 3. sérii útoků u metod využívajících 2D-DCT transformaci



Obr. 8.13: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 4. sérii útoků u metod využívajících 2D-DCT transformaci



Obr. 8.14: Závislost počtu kladně extrahovaných vodoznaků na 5. sérii útoků u metod využívajících 2D-DCT transformaci

## 9 ZÁVĚR

Stěžejním tématem této práce je ochrana autorských práv digitálních statických obrazů technikami digitálního vodoznačení. V úvodu práce byl detailně popsán současný stav na poli digitálního vodoznačení statických obrazů a techniky pro jejich srovnání. Ze současného stavu problematiky a z požadavků na vodoznačící systémy byly vytyčeny cíle dizertační práce, mezi něž patřila podrobná analýza současných moderních a návrh nových metod s cílem zlepšení výsledných parametrů systémů.

Pro srovnání navržených metod byla zvolena databáze obsahující 100 rozdílných obrazů ve stupni šedi. Na každý obraz po vodoznačení bylo provedeno celkem 89 útoků pomocí programu Checkmark. Extrahované vodoznaky byly porovnány s originálním pomocí normalizované křížové korelace. Za úspěšně extrahované vodoznaky byly označeny ty, jejichž hodnota normalizované křížové korelace byla větší nebo rovna hodnotě 0,7. Dále byla u každé metody stanovena průměrná hodnota PSNR, kterou vodoznačené obrazy dosahovaly.

První analyzovaná metoda, LSB metoda v jasové složce, vkládá vodoznak do nejméně významných bitů obrazu. Z testování této metody byly získány relevantní výsledky pro pozdější porovnání. Jelikož vodoznaky vložené touto metodou neodolaly JPEG ani JPEG 2000 kompresi, je tato metoda pro ochranu autorských práv nepoužitelná. Její uplatnění je možné při použití pro prokázání originality díla.

Z poznatků z předchozí metody byla navržena modifikovaná metoda vodoznačení LSB v modelu RGB, která zajišťuje vložení vodoznaku do barevných složek RGB modelu. Bity vodoznaku byly vkládány vícenásobně do prvků zvolených bloků obrazu. Při extrakci se potom využívala pravděpodobnostní funkce. Výsledky byly velmi uspokojivé a byly publikovány v [55], v této práci však nejsou uvedeny, neboť se jedná o vodoznačení v barevném modelu, které není možné porovnat s ostatními vodoznačícími systémy pracujícími s obrazy ve stupni šedé.

Následuje analýza metod pracujících ve frekvenční oblasti. Používané oblasti byly získány pomocí 2D diskretní kosinové transformace a 2D diskretní vlnkové transformace. U metody využívající 2D-DCT byly jednotlivé bity vodoznaku vloženy do bloků o velikosti 8x8 prvků, u metody využívající 2D-DWT byly bity vodoznaku vloženy do aproximačních koeficientů. Vodoznak vložený metodou založenou na 2D-DCT dosahoval při extrakci z poškozených obrazů vyšší úspěšnosti než u metody 2D-DWT.

Na základě poznatků z předešlých metod byly vyvinuty nové metody, které pro zvýšení efektivity využívají singulární dekompozici a protichybové kódování.

Metoda využívající 2D-DWT se singulární dekompozicí využívá pro vložení singulární hodnoty vodoznaku a singulární hodnoty aproximačních koeficientů originálního obrazu transformovaného 2D-DWT transformací. Výhody, kvůli kterým byla singulární dekompozice použita, jsou popsány v kapitole dizertační práci. Nově vyvinutá metoda vykazovala velmi dobré výsledky při extrakci vodoznaku při podobném PSNR vodoznačeného obrazu jako u metody 2D-DWT.

Z testovaných útoků na vodoznačený obraz extrahovaný vodoznak neodolal pouze útokům lineární transformací, ostříhnutím a pokřivením.

Druhá navržená metoda využívala singulární dekompozici společně s 2D-DCT transformací. Zde bylo ustoupeno od principu vložení vodoznaku do bloků o velikosti  $8 \times 8$  prvků. 2D-DCT transformace byla prováděna na blocích o větších rozměrech. Po experimentálním testování byly vybrány bloky o velikosti  $256 \times 256$  prvků, díky kterým vodoznačící schéma vykazovalo dobré výsledky z hlediska kvality vodoznačeného obrazu i z hlediska počtu kladně extrahovaných vodoznaků. Pro vložení vodoznaku se pracuje se singulárními hodnotami daného bloku a se singulárními hodnotami vodoznaku. V této metodě navíc dochází k vícenásobnému vložení vodoznaku, což mělo velmi pozitivní účinky na odolnost vodoznaku vůči oříznutí. Z testovaných útoků vodoznak neodolal pouze útokům lineární transformací a ostříhnutím.

Poslední část práce se věnuje protichybovým kódům a jejich využití ve vodoznačících systémech. Vzhledem k tomu, že se jedná o rozsáhlou problematiku, byl vybrán pouze jeden zástupce blokových kódů, BCH kód. Jeho výhoda spočívá ve velké variabilitě nastavení. Pro možnost ověření vlivu protichybových kódů se vycházelo z dříve pospaných vodoznačících schémat využívajících 2D-DCT a 2D-DWT. Obě schémata byla modifikována tak, aby se stala universálními pro jakýkoli protichybový kód. V případě této práce byl v navrženém schématu použit BCH kód a to ve dvou variantách –  $(15,5,3)$  a  $(31,11,5)$ . U metody využívající 2D-DWT je patrné zvýšení efektivity navrženého schématu oproti původnímu. V některých případech je viditelné rapidní procentuální zvýšení extrakce vodoznaku. U metody využívající 2D-DCT transformaci již tyto výsledky nejsou takové, jaké byly při výzkumu této metody očekávány. Protichybové kódování se v tomto případě neprokázalo jako pozitivní, neboť úspěšnost extrakce vodoznaku byla stejná, v mnohých případech i horší než u běžného systému.

Všechny testované i nově navržené metody byly porovnány v poslední kapitole této práce. Díky tomu je možno říci, že předsevzaté cíle dizertační práce byly splněny v plném rozsahu. V příloze práce jsou uvedeny přehledné grafy srovnávající úspěšnost extrakce navržených metod. Hlavními přínosy této práce jsou zejména návrhy, realizace a otestování nových metod digitálního vodoznačení statických obrazů ve frekvenční oblasti. Tyto metody byly testovány z hlediska odolnosti vodoznaků a kvality vodoznačených obrazů. Veškeré metody byly během realizace optimalizovány z hlediska výpočetní náročnosti a kvality výsledných vodoznačených obrazů. Práce přispěla svým přístupem k vytvoření nových postupů pro ochranu autorských práv digitálních obrazů. Pro další vývoj by bylo vhodné detailněji prověřit protichybové kódování, ve kterém je patrný jistý potenciál. Blokové kódy však podle všech testů nebudou zcela vyhovující. Jako zajímavé se jeví použití turbo kódů, které by mohly zajistit další zvýšení počtu kladně extrahovaných vodoznaků.

## 10 LITERATURA

### Seznam použité literatury

- [1] ADÁMEK, J. *Kódování a teorie informace*. 1991. PRAHA: ČVUT. ISBN 80-01-00661-1
- [2] ARNOLD, M., SCHMUCKER, S., WOLTHUSEN, D. *Techniques and Applications of Digital Watermarking and Content Protection*. Norwood : Artech House, inc., 2003. 274 s. ISBN 1-58053-111-3
- [3] BARNI, M., BARTOLINI, F. *Watermarking Systems Engineering Enabling Digital Assets Security and Other Applications*. USA : Marcel Dekker Inc, 2004. 403 s. ISBN 0-8247-4806-9
- [4] BENDER, W. Techniques for Data Hiding. *IBM Systems Journal*. 1996, vol. 35, no. 3 & 4, s 313–336.
- [5] COX, I., MILLER, M., BLOOM, J. *Digital Watermarking*. San Francisco : Academic Press, 2002. 542 s. ISBN 1-55860-714-5
- [6] ČANDÍK, M. *Bezpečnost informačních systémů, steganografie a digitalna vodotlač*. Ostrava: s.n., 2005. 177s. ISBN 80-239-5662-X
- [7] COX, I. J. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia. *Technical Report 95-10, NEC Research Institute*. 1995
- [8] CRAVER, S., MEMON, N., YEO, B. L., YEUNG, M. M. Can Invisible Watermarks Solve Rightful Ownerships?. *IBM Technical Report RC 20509*. 1996
- [9] DARMSTAEDTER, V., DELAIGLE, J., QUISQUATER, J., BENOIT, M. Low-cost spatial watermarking. *Computer&Graphics*. 1998, vol. 33, no. 4, s. 417-424, ISSN 0097-8493
- [10] HERRIGEL, A., KUTTER, M. VOLOSHYNOVSKIY, S. *The Watermark Copy Attack*. 2000. Dostupné z WWW: <<http://citeseer.ist.psu.edu/>>
- [11] HORNAK, J. *Encyclopedia of Imaging Science & Technology 2*. New York : Wiley - Interscience, 2002. 1600 s. ISBN 978-047133763
- [12] CHANDRA, D.V.S. Digital Image Watermarking Using Singular Value Decomposition. *Proceedings of 45th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*. 2002, s. 264-267
- [13] CHANG, CH.CH., TSAI, P., LIN, CH.CH. SVD - based digital image watermarking scheme. *Pattern Recognition Letters*. 2005. vol. 26, s. 1577-1586
- [14] KATZENBEISSER, S., PETITCOLAS, F. *Information hiding techniques for steganography and digital watermarking*. Norwood: Artech House, 2000. ISBN 1-58053-035-4
- [15] KOCH, E., ZHAO, J. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling. *Proceedings of 1995 IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, Řecko : IEEE Press, 1995, s. 452–455.
- [16] ISO/OEC IS 10918-1 – JPEG standard. Dostupný z WWW: <<http://www.jpeg.org/jpeg/index.html>>
- [17] ITU-R Rec. BT. 500, *Methodology for the subjective assessment of quality of television pictures*, 2002, Ženeva
- [18] LIN, S. D., CHEN, C. F. A Robust DCT-Based Watermarking for Copyright protection, *IEEE Trans. Consumer Electronics 46 (2000)*, s. 10-11
- [19] LIU, J., Niu, X., Kong, W. Image Watermarking based on Singular Value Decomposition. *Proceedings of the 2006 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP'06)*. 2006, s. 457-460.
- [20] LIU, R. TAN, T. An SVD-Based Watermarking Scheme for Protecting Rightful Ownership. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2000, vol. 4, no. 1, s. 121-128. ISSN 1520-9210

- [21] LU, CH. *Multimedia Security: Steganography and Digital Watermarking Techniques for Protection of Intellectual Property*. London : Information Science Publishing, 2005. ISBN 1-59140-192-5
- [22] MACQ, B., QUISQUATER, J. Cryptology for digital tv broadcasting. *Proceeding of the IEEE*. 1995, vol. 83, s. 944-957, ISSN 0018-9219
- [23] MANNOS, J. L., SAKRISON, D. J. The Effects of a Visual Criterion on the Encoding of Images. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1974, vol. IT-20, no. 4, s. 525–536.
- [24] MEERWALD, P. *Digital Image Watermarking in the Wavelet Transform Domain*. MSc thesis in University of Salzburg. 2001
- [25] MEHUL, R., PRITI, R. Discrete Wavelet Transform Based Multiple Watermarking Scheme. *Proceedings of IEEE Region 10 Technical Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific*. 2003, Bangalore - India
- [26] NĚMEC, K. *Datová komunikace*. Skriptum. 2000. Brno: VUTIUM. ISBN 80-214-1652-1
- [27] PROAKIS, J. G. MANOLAKIS, D. M. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications (3<sup>rd</sup> Edition)*. London : Pentice Hall. 1995. 1016 s, ISBN 978-0133737622
- [28] RIDZOŇ, R. LEVICKÝ, D., KLENOVIČOV, Z. Attacks on watermarks and adjusting PSNR for watermarks application. *17<sup>th</sup> International Conference Radioelektronika 2007*. 2007
- [29] SAINZA, J. *Locator decoding for BCH codes*. [online] 2009, Dostupné z WWW: <<http://www.juansi.com/wiskunde/thesis.pdf>>
- [30] SAYOOD, K. *Introduction to Data Compression*. San Francisco : Elsevier, 2005. 704 s. ISBN 978-0126208627
- [31] SYMENS, P. *Digital Video Compression*. New York: McGraw-Hill, 2004. ISBN 0-07-142487-3
- [32] SEITZ, CH. *Digital Watermarking for Digital Media*. London : Information Science Publishing. 2005. ISBN 1-59140-518-1
- [33] SHANON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*. 1948, vol. 27, no. 3, s. 379–423, s. 623–656.
- [34] SHIH, F.Y. *Digital Watermarking and Steganography: Fundamentals and Techniques*. New Jersey : CRC Press, 2007. 180 s. ISBN 978-1-4200-4757-8
- [35] STRUTZ, T. *Bilddaten-kompression*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn, 2000. ISBN 3-528-03922-1
- [36] TAUMAN, D., MARCELLIN, M. *JPEG2000 Image compression fundamentals, standards and practice*. New York : McGraw-Hill, 2004. ISBN 0-07-142487-3
- [37] TSCHIRNER, P. *Visual System-based Image Contrast Enhancement*. Germany : Shaker Verlag GmbH. 2005. 149 s. ISBN 978-3832241483
- [38] VERMA, B., JAIN, S., AGARWAL, D., PHADIKAR, A. A New Color Image Watermarking Scheme. *INFOCOMP Journal of Computer Science*. 2006. Dostupný z WWW: <<http://www.dcc.ufla.br/infocomp/artigos/v5.3/art05.pdf>>
- [39] VÍT, V. *Televizní technika - přenosové barevné soustavy*. Praha : BEN, 2000. 720 s. ISBN 80-86056-04-X
- [40] VLČEK, K. *Kompresa a kódová zabezpečení v multimediálních komunikacích*. 2004. PRAHA: BEN. ISBN 80-7300-134-9
- [41] WONG, P., MEMON, N. Secret and public key image watermarking schemes for image authentication and ownership verification. *IEEE Transactions on image processing*. 2001, vol. 10, no. 10
- [42] YHENG, D., LIU, Y., ZHAO, J., SADDIK, A. A survey of RST invariant image watermarking algorithms. *ACM Computing Surveys*. 2007, Volume 39, No. 2

- [43] ZHOU, B., CHEN, J. A Geometric Distortion Resilient Image Watermarking Algorithm Based on SVD. *Chinese Journal of Image and Graphics*. 2004, Vol. 9, s. 506-512
- [44] ZHOU, Z., TANG, B., LIU, X. A Block-SVD Based Image Watermarking Method. *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006, s. 10347-10351. ISBN 1-4244-0332-4
- [45] -, *The USC-SIPI Image Database*. [cit. 2008-12-02]. Dostupný z WWW: <http://sipi.usc.edu/database/>
- [46] -, www stránky o programu Checkmark. [cit. 2009-02-02]. Dostupný z WWW: <http://watermarking.unige.ch/Checkmark/>
- [47] -, www stránky o programu Stirmark. [cit. 2009-02-02]. Dostupný z WWW: <http://www.petitcolas.net/fabien/watermarking/stirmark/>
- [48] -, www stránky o programu Optimark. [cit. 2009-02-02]. Dostupný z WWW: <http://poseidon.csd.auth.gr/optimark/>

### Seznam vlastních prací

- [49] BODEČEK, K.; ČÍKA, P.; VRBA, K. Teaching of the wavelet-based image and video compression. In *Petnajsta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca..* Portorož: 2006. s. 225-228.
- [50] ČÍKA, P. Comparison of DCT-SVD Based and DWT-SVD Based Digital Image Watermarking Method. In *CSIT'2008*. 2008. s. 18-20. ISBN: 978-966-2191-02-8
- [51] ČÍKA, P. Protichybové zabezpečení BCH kódem. *ELEKTROREVUE*, 2006, roč. 2006, č. 15, s. 1-10. ISSN: ISSN 1213-1539.
- [52] ČÍKA, P. The Improvement of the Method for Digital Image Watermarking in Frequency Domain using BCH Codes. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2007 vol. 7, no. 3. p. 151 – 154 ISSN 1738-7906
- [53] ČÍKA, P. The New Watermarking Scheme with Error-correction Codes. In *2007 IWSSIP & EC-SIPMCS*. Maribor: 2007. s. 245-248. ISBN: 978-961-248-029-5.
- [54] ČÍKA, P. Watermarking Scheme Based on Discrete Wavelet Transform and Error-Correction Codes. In *2009 IWSSIP*. Chalkida: 2009.
- [55] ČÍKA, P. Watermarking scheme for color images. In *Personal Wireless Communications*. Prague: 2007. s. 1-8. ISBN: 978-0-387-74158-1
- [56] ČÍKA, P.; KOHOUTEK, M.; KOVÁŘ, P. Improved Digital Image Watermarking Method Based on DWT and SVD. In *31st International Conference on TELECOMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING TSP 2008*. 1. Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2008. s. 120-123. ISBN: 978-963-06-5487-6
- [57] ČÍKA, P., KŘIVÁNEK, V., KOTON, J. Samoopravné Reed-Solomonovy kódy. *Access Server*, 2006, roč. 2006, č. 10, s. 1-6. ISSN: 1214-9675.
- [58] ČÍKA, P.; NOVOTNÝ, V.; DIRBÁK, I. Image reception and control of IP-cam via digital video broadcasting. In *2007 IWSSIP & EC-SIPMCS*. Maribor: 2007. s. 321-323. ISBN: 978-961-248-029-5.
- [59] KOHOUTEK, M.; ČÍKA, P.; ŘÍHA, K. Subpixel Edge Detection with Optimized Fresnel Edge Fitting Method and Double Calibration Method. In *31st International Conference on TELECOMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING TSP 2008*. 1. Budapest: Budapest University of Technology and Economics, 2008. s. 86-89. ISBN: 978-963-06-5487-6.

# Petr Číka

## Curriculum Vitae

### Osobní data:

Adresa: Branka 60, 624 00 Brno  
Telefon: +420 775 911 886  
E-mail: cika@feec.vutbr.cz  
Datum narození: 25.3.1982  
Národnost: Česká  
Stav: svobodný

### Vzdělání:

2005 – 2009 Doktorské studium – VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Teleinformatika. Téma disertační práce: Digitální vodoznačení obrazu.  
2000 – 2005 Magisterské studium – VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, obor: Elektronika a sdělovací technika. Téma diplomové práce: Kodek BCH kódu.

### Další vzdělání:

2009 RADVISION IVP – týdenní školení ve společnosti RADVISION, Tel Aviv, Izrael. Náplň školení: Vývoj videokonferenčních systémů na platformě RADVISION IVP.  
2008 Asterisk PBX – administrace a konfigurace, PC-DIR Real, s.r.o., Brno. Náplň školení – třídní školení na správu a provoz VoIP ústředěn Asterisk.

### Ostatní:

Člen organizace IEEE (Institut of Electrical and Electronics Engineers) v letech 2007 a 2008.

### Vybrané publikace:

ČÍKA, P. New Watermarking Scheme for Colour Image. Springer. *Mobile and Wireless Communication Networks*, 2007, roč. 2007, č. 9, s. 497-504. ISSN: 1571-5736.

ČÍKA, P. The new Watermarking Scheme with Error-correction Codes. In *2007 IWSSIP & EC-SIPMCS*. Maribor: 2007. s. 245-248. ISBN: 978-961-248-029-5.

ČÍKA, P. Comparison of DCT-SVD Based and DWT-SVD Based Digital Image Watermarking Method. In *CSIT'2008*. 2008. s. 18-20. ISBN: 978-966-2191-02-8.

### Produkty

NOVOTNÝ, V.; KOHOUTEK, M.; STEJSKAL, V.; ČÍKA, P.; BODEČEK, K.: PeopleMetr; *TV-meter-MHP*. UTKO, FEKT Vysoké učení technické v Brně, Purkyňova 118, Brno. (prototyp)

## **ABSTRACT**

Digital image watermarking has developed for the purpose of protecting intellectual property rights to multimedia data. The focus of this thesis is searching for an alternative solution of digital image watermarking methods. A detailed analysis of watermarking methods particularly in the frequency domain, and the modification of these methods are the main aim of this work. Improved performance in watermark extraction is one of the main goals.

First, the common static image watermarking methods, possible attacks on the watermarked data and techniques for objective measurement of watermarked image quality are shortly introduced. Techniques which use the space domain for watermarking are described in the next part of this work. It is about techniques which insert the watermark into the least significant bits of an image both in the RGB domain and in the YUV domain. The main part of the thesis depicts modified and newly developed static image watermarking methods in the frequency domain. These methods use various transforms and error-correction codes, by means of which the watermark robustness increases. All the methods developed are tested in MATLAB. Results together with tables and graphs are one part of work. The end of the thesis is devoted to a comparison of all the developed methods and their evaluation.