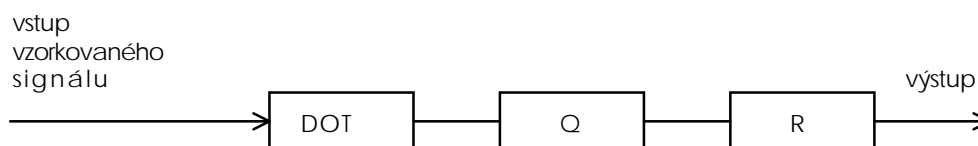


KAPITOLA 9

TRANSFORMAČNÉ KOMPRESNÉ POSTUPY

Číslicovo vzorkovaný signál je diskretnou funkciou času, preto môže byť reprezentovaný (podobne ako v spojitnej oblasti) konečným počtom funkcií. Signál je obvykle vysoko štatisticky závislý proces. Potom vhodnou aproximáciou je možné dekorelovať štatistické závislosti medzi signálovými vzorkami a dosiahnuť zníženie nadbytočnosti informácie signálu.

Algoritmy pre transformačné kompresné postupy môžeme rozdeliť na tri časti [1]: transformácia, kvantizácia a bezstratové (zväčša entropické) kódovanie (alebo všeobecnejšie ako zníženie redundancie a kódovanie) (obr. 9.1).



Legenda: DOT - diskretná ortogonálna transformácia

Q - kvantizátor

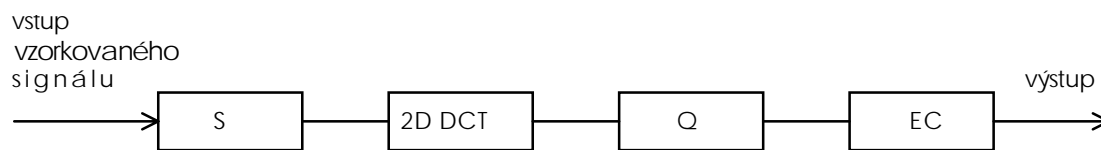
R - zníženie redundancie (zonálna filtrácia, entropické kódovanie a pod.)

Obr. 9.1 Idealizovaný transformačný kódér

V prvej časti je na signál aplikovaná invertovateľná transformácia. V tejto časti sa plne prejavuje snaha o úplnú dekoreláciu štatistických závislostí v časovom priebehu signálu pomocou funkcií niektorej ortogonálnej bázy, a s tým spojenú snahu o čo najkratšiu aproximáciu. Tento algoritmus vedie k používaniu reálnej aritmetiky, čo priamo navádza k zaokrúhľovaniu vyvolanému samozrejme technickou realizáciou. Tento proces vnáša do kódovania prvú chybu. Druhá časť je určená na zníženie počtu použitých čísel, ktorými je vyjadrené príslušné sekvenčné spektrum kódovaného signálu. V tejto časti ide o čo najväčšiu redukciu počtu úrovní pri čo najmenšej kvantizačnej chybe, ktorá sa prejaví pri rekonštrukcii takto kódovaného signálu. Tretí blok využíva vlastnosti čísel získaných aplikáciou transformácie a kvantizátora, teda ich opakovanie s rôznou početnosťou a existenciou množstva núl v takto získanom výsledku. S výhodou sa tu preto používajú kódy s variabilnou dĺžkou znakov, ktorá je priamo závislá od početnosti výskytu jednotlivých čísel získaných po kvantizácii a rôzne typy tzv. zonálnych filtrov.

V súčasnosti je v rámci každej tejto časti vypracovaných množstvo postupov vedúcich k neustálemu zvyšovaniu účinnosti transformačných kompresných postupov. Za východiskový postup môžeme považovať veľmi efektívny postup odporúčaný "Joint Photographic Expert Group" (JPEG) [39], [44], ktorý využíva dvojdimenzionálnu diskretnú kosínusovú transformáciu (2D DCTII) na kódovanie blokov obrazu s rozmerom 8 x 8 bodov, Danov Fuhrmannov a Arunov Kumarov maticový

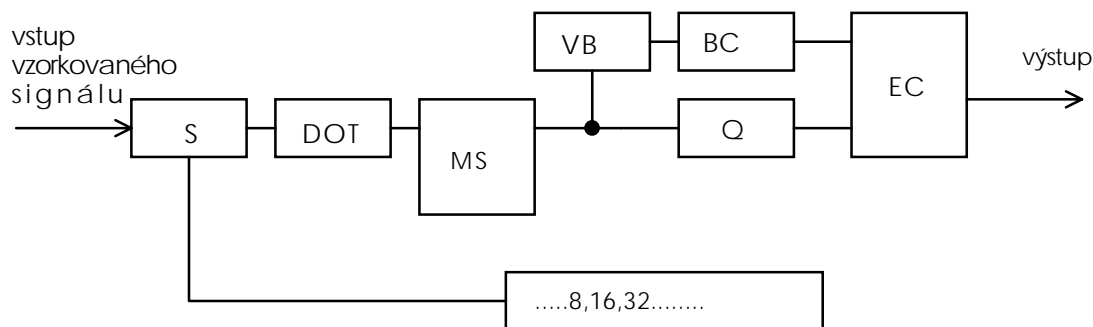
kvantizátor DCT - sekvenčných zložiek a Huffmanov alebo aritmetický kodér kvantovaných koeficientov (obr. 9.2).



Legenda: S - rozdelenie obrazu na subbloky 8 x 8
 2D DCT - dvojrozmerná diskretná kosínusová transformácia DCT-II
 Q - Danov Fuhrmannov - Arunov Kumarov maticový kvantizátor DCT - sekvenčných zložiek
 EC - entropický kodér - Huffmanov tabuľkový kód

Obr. 9.2 Bloková schéma JPEG - transformačného kodéra

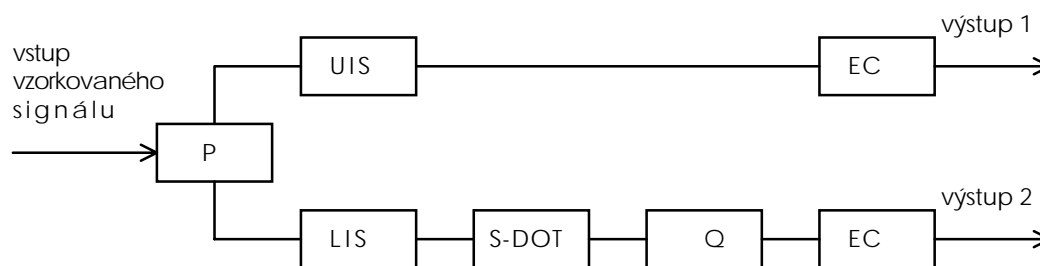
Týmto, v súčasnosti už štandardným, postupom sa dajú dosahovať vysoké kompresné pomery pri ešte dostatočnej "čitateľnosti" obrazu. Zdá sa, že práve tento štandard vyvolal zvýšený záujem o štúdium vlastností transformačného kódovania s cieľom optimalizácie jednotlivých častí tohto štandardného postupu. Tak ako môžeme rozdeliť celý kompresný postup na tri časti, môžeme rozdeliť aj stratégie nových postupov, ktoré vedú k zlepšeniu vlastností štandardu. V časti transformačného kódovania sa dosahujú najvýraznejšie zlepšenia nedostatočnosti DCT (vo všeobecnosti) použitím nových transformácií alebo oživením niektorých starších používaných doteraz na kódovanie alebo aproximáciu iných druhov signálov. Najvýraznejšou prácou tejto skupiny sa zdá byť [1], v ktorej bola DCT-II nahradená adaptívnym výberom z transformácií DCT-I a DCT-IV. Ďalej je zvýšená adaptívnosť tohoto systému zavedením LCT (lokálna kosínusová transformácia), LOT (Lapped ortogonálna transformácia) a použitím Waveletovej paketovej transformácie. Okrem tejto adaptability sa publikovaný systém adaptuje aj veľkosťou transformácie spracovávaného bloku, a to s rozmermi 2 x 2, 4 x 4, 8 x 8, 16 x 16 a 32 x 32 obrazových bodov (obr. 9.3).



Legenda: S - Rozdelenie obrazu na subbloky veľkosti 2 x 2, 4 x 4, 8 x 8, 16 x 16, ...,
 DOT - 2D diskretná ortogonálna transformácia
 MS - pamäť sekvenčných spektier, vypočítaných rôznymi 2D diskretnými ortogonálnymi transformáciami
 VB - výber najlepšej bázy
 BC - kódovanie typu bázy
 Q - kvantovanie sekvenčných spektier
 EC - entropický kodér

Obr. 9.3 Transformačný kodér s adaptívnou veľkosťou transformovaných blokov a s adaptívnym výberom 2D diskretné ortogonálnej transformácie

Do tejto skupiny je možné zaradiť aj jednu z aplikácií odporúčania JPEG na medicínsky obraz [2]. Ide o modifikáciu, ktorej nosná časť sa orientuje na predspracovanie medicínskeho obrazu a jeho rozdelenie na dve časti, ktoré sú zrejme dôsledkom vlastností medicínskeho obrazu. Prvou časťou je horný obrazový súbor, ktorý je reprezentovaný najvyšším horným bitom obrazových vzoriek (UIS) alebo niekoľkými najvyššími bitmi. Druhou je dolný obrazový súbor reprezentovaný zvyšnými dolnými bitmi obrazových vzoriek (LIS). UIS je nositeľom vysokej významovej informácie, preto je výhodné kódovať ho bez degradácie. Na to sa využíva niektorý z bezstratových kódov, často Zivov - Lempelov kódér, prípadne "run - length" kódér v kombinácii s niektorým ďalším kódom s variabilnou dĺžkou slova. LIS je potom možné kódovať so stratou významovej informácie. Preto sa práve na tento súbor aplikuje klasický postup podľa JPEG. Tento postup sa v tlači nazýva "Kombinované transformačné kódovanie" (CTC) a jeho aplikácie sa orientujú na obrazové spracovanie v medicíne (obr.9.4) alebo pri kompresii aerokozmických snímok [77]. CTC by bolo zrejme možné modifikovať podľa [1] alebo niektorej inej modifikácie štruktúry JPEG, využívajúcej nerovnakú veľkosť spracovávaného bloku alebo iný typ diskretnej ortogonálnej transformácie, prípadne rôzne typy kvantizátorov a bezstratových kódov. Rozhodne by bolo zaujímavé sledovať, ako sa menia vlastnosti tohoto transformačného kódéra v závislosti od použitej transformácie tak, ako je to pri modifikáciách štruktúry JPEG bez rozdelenia na množiny UIS a LIS. Túto štruktúru je možné modifikovať aj niektorými modernšími metódami, napríklad nahradiť celú spodnú vetvu niektorou neurónovou sieťou ako si ukážeme v kapitole 13.



Legenda: P - predspracovanie
 UIS - horný obrazový súbor
 LIS - dolný obrazový súbor,
 S - rozdelenie na subbloky
 DOT - diskretná ortogonálna transformácia
 Q - kvantizátor
 EC - entropický kódér

Obr. 9.4 Kombinovaný transformačný kódér

V súčasnosti už nie je podmienkou, aby transformované bloky alebo vektory mali rozmery korešpondujúce s 2^r . Výborné vlastnosti diskretných kosínusových transformácií iných typov (DCT-I, DCT-II, DCT-III, DCT-IV) si vyžiadali tvorbu ich rýchlych algoritmov. V [4] sa uvádza postup pre tvorbu takýchto algoritmov, a čo je najzaujímavejšie, aj pre vektory, ktorých dĺžky nezodpovedajú zaužívanému štandardu $N=2^r$. Dovoľuje to potom robiť prakticky neobmedzenú adaptáciu dĺžky transformovaných vektorov. Pre prax to znamená, že klasický postup adaptácie na veľkosť obmedzujúci sa na veľkosti 2^r sa rozšíril prakticky na neobmedzený výber veľkosti spracovávaných blokov.

9.1 KVANTIZÁTORY

Kvantizátory sú veľmi dôležitou súčasťou celého kódovacieho procesu, lebo tie vnašajú do procesu chyby, ktoré spôsobujú degradáciu signálu. Sú však dôležité aj pre zvyšovanie účinnosti

kompresie, lebo sú to práve oni, ktoré produkujú číselnú informáciu pre entropické kodéry v závere celého kódovania. Výber kvantizátora je však obmedzený práve požiadavkami stupňa degradácie obrazu. Tieto požiadavky spôsobujú, že kvantizácii je potrebné venovať aspoň taký priestor ako transformačnému postupu, ktorému však z priestorových dôvodov nie je v učebnici venovaná zaslúžená pozornosť. Tieto problémy sú ponechané na riešenie iným autorom. Predsa len treba upozorniť na dôležitosť vektorového kvantovania v súvislosti s problémom zonálnej filtrácie, ktorý sa vyskytuje pri riešení aproximácie signálov obmedzeným počtom funkcií diskretných ortogonálnych báz. Ukážeme si však aspoň jeden postup na prepočet kvantizačných tabuliek (normalizačného poľa) pri zmene ortogonálnej bázy [56].

Budeme vychádzať z teórie optimálnej diagonálnej filtrácie [22]. Predpokladajme, že pre DCT máme nájdené optimálne normalizačné pole. Majme autokorelačnú maticu \mathbf{R} , ktorá opisuje štatistické závislosti v obraze tak, že vyjadruje aj sekvenčnú závislosť videnia ľudského oka (zákon vizuálnej percepcie). Ak vychádzame z optimálnosti DCT - normalizačného poľa, môžeme operáciu kvantovania opísať vzťahom

$$\bar{\mathbf{X}}_q = \mathbf{Q}_{DC} \cdot \bar{\mathbf{X}}, \quad (9.1)$$

kde $\bar{\mathbf{X}}$ je vektor vytvorený z matice transformovaného obrazu veľkosti $N \times N$ zoradením jej stĺpcov pod seba. Má preto dĺžku N^2 , matica \mathbf{Q} s prvkami $q(i,j)$ je normalizačné pole, ktoré je optimálne pre DCT, maticu \mathbf{Q}_{DC} z nej získame nasledovne

$$\mathbf{Q}_{DC} = \begin{pmatrix} \frac{1}{q(0,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{q(1,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{q(2,0)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{q(N-1,N-1)} \end{pmatrix}. \quad (9.2)$$

Ak matica \mathbf{Q}_{DC} predstavuje v priestore bázy DCT optimálny diagonálny kvantizátor, potom platí:

$$\mathbf{Q}_{DC} = \mathbf{U}_{CT} \mathbf{R} \mathbf{U}_{CT}^T, \quad (9.3)$$

$$U_{CT}(n,k) = U_C(\text{mod}[n,N], \text{mod}[k,N]) \cdot U_C\left(\text{floor}\left[\frac{n}{N}\right], \text{floor}\left[\frac{k}{N}\right]\right), \quad (9.4)$$

kde $\text{mod}[n,N]$ je zvyšok po delení $\frac{n}{N}$, $\text{floor}\left[\frac{n}{N}\right]$ je najbližšie menšie číslo po delení $\frac{n}{N}$,

\mathbf{U}_{CT} je matica DCT ako produkt Hadamardovho súčinu dvoch 1D DCT

\mathbf{U}_{CT}^T je transponovaná matica \mathbf{U}_{CT} , \mathbf{U}_C je transformačná matica jednorozmernej DCT.

V prípade zmeny bázy na inú, sa odporúča [22] vypočítať nové normalizačné pole

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_{CT}^T \mathbf{Q}_{DC} \mathbf{U}_{CT}, \quad (9.5)$$

$$\mathbf{Q}_{DB} \rightarrow \mathbf{U}_{TB} \mathbf{R} \mathbf{U}_{TB}^T, \quad (9.6)$$

kde \mathbf{U}_{TB} je transformačná matica zmenenej diskretnéj ortogonálnej transformácie - B ako produkt Hadamardovho súčinu pôvodných báz

\mathbf{Q}_{DB} je diagonálna matica, zložená z prvkov hlavnej diagonály súčinu (9.6)

Opačným postupom k (9.1-2) získame príslušné normalizačné pole. Ako príklad uvádzame normalizačné pole pre 2D DCT II, ktoré je v odporúčaní štandardu JPEG [39], [44], [71].

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

Ak toto normalizačné pole budeme považovať za optimálne, potom z neho vypočítané pole napr. pre DCCT 2 [3] bude [56]:

a pre diskretnú Haarovu transformáciu [56]:

16	10	12	24	18	46	32	46
14	16	15	38	25	62	42	48
13	15	15	31	23	59	43	48
18	35	27	68	51	97	76	72
15	23	21	49	34	77	58	60
42	67	61	96	81	114	101	96
25	43	37	72	55	97	79	80
46	67	63	94	77	98	90	91

16	12	14	14	28	34	34	28
13	15	20	20	37	41	41	37
16	18	26	26	50	53	53	50
16	18	26	26	50	53	53	50
23	32	50	50	79	78	78	79
32	42	61	61	87	85	85	87
32	42	61	61	87	85	85	87
23	32	50	50	79	78	78	79

Je jasné, že normovaním poľa sekvenčných koeficientov ešte neprebehlo kvantovanie. Posledným krokom v kvantizátore je rovnomerné (uniformné) kvantovanie normovaných koeficientov, teda lineárne priradenie zaokrúhľovacích úrovní.

9.2 SNÍMANIE

Pole sekvenčných koeficientov je pred samotným kódovaním preorganizované pomocou vopred definovaného postupu snímania do jednorozmernej postupnosti. V odporúčaní JPEG je snímanie DCT - sekvenčných koeficientov tzv. metódou "zig-zag" [39], [44], [71]. Poradie snímania koeficientov do jednorozmernej postupnosti .

0	1	5	6	14	15	27	28
2	4	7	13	16	26	29	42
3	8	12	17	25	30	41	43
9	11	18	24	31	40	44	53
10	19	23	32	39	45	52	54
20	22	33	38	46	51	55	60
21	34	37	47	50	56	59	61
35	36	48	49	57	58	62	63

Výsledkom takéhoto postupu je postupnosť, v ktorej sa koeficienty zodpovedajúce najnižším sekvenciám dostávajú na začiatok postupnosti. Tieto koeficienty sú pre aproximáciu obrazu najrozhodujúcejšie. Menej významné a často nulové koeficienty sa dostávajú na koniec postupnosti. Teda ide o zhruba klesajúcu postupnosť. Táto postupnosť obsahuje rozsiahle postupnosti núl. Výhodné bude ukončiť túto postupnosť značkou - koniec bloku (EOB) za posledným nenulovým prvkom. Nulový

koeficient (DC) sa zvykne prenášať v jednom bloku so všetkými DC koeficientami [39], [44], [71], pričom sa používa predikčné kódovanie. Vnútorne dlhé postupnosti núl sa často kódujú "run - length" kódom.

Existuje aj iný spôsob snímania sekvenčných koeficientov - tzv. "zonálna filtrácia" [34], [39], [40]. Ide o tvorbu jednorozmerných postupností konštantnej dĺžky. Hranicu snímania potom určuje prenosová funkcia filtra. Tento postup nie je veľmi vhodný pre kompresiu transformačným kódovaním, pretože bloky obrazu nemajú obvyčajne rovnako dlhé dôležité spektrum. Takýto spôsob je bežnejší pri kódovaní subpásmovou metódou.

Spomenuli sme si len jeden spôsob snímania koeficientov - "zig-zag" pre formáty typu JPEG. Niekedy sa však používa aj pravouhlé snímanie, ktoré nevystihuje tvar spektra DCT, ale pre iné typy ortogonálnych transformácií môže priniesť lepšie výsledky. Je znázornené v nasledujúcej matici [34]:

0	1	8	9	24	25	48	49
3	2	7	10	23	26	47	50
4	5	6	11	22	27	46	51
15	14	13	12	21	28	45	52
16	17	18	19	20	29	44	53
35	34	33	32	31	30	43	54
36	37	38	39	40	41	42	55
63	62	61	60	59	58	57	56

Je samozrejme možné použiť ľubovoľné snímanie. Najdôležitejšie je však pripraviť postupnosť tak, aby bola potom čo najjednoduchšia a čo najúčinnnejšie bezstratovo kódovateľná. Preto sa zdá byť najlepšie také snímanie, ktoré vytvorí plynule klesajúcu postupnosť s čo najväčším sústredením núl na jej konci [78].

9.3 BEZSTRATOVÉ KÓDOVANIE SEKVENČNÝCH KOEFICIENTOV

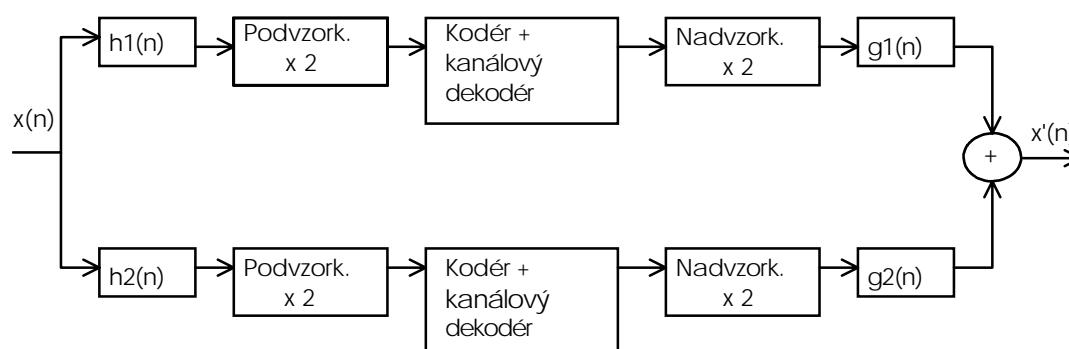
Rovnako dôležitou časťou celého kódovacieho postupu je entropické kódovanie alebo iný postup bezstratového kódovania postupností kvantovaných sekvenčných koeficientov, ktoré je tou časťou procesu, ktorá dáva zdanlivo najväčší efekt. Je však spôsobený práve prispôbením častí kódovacieho postupu vlastnostiam predchádzajúcich, a to za účelom prípravy čo najkratšej aproximácie, ktorá je svojimi vlastnosťami štatisticky čo najvyhovujúcejšia práve bezstratovému kodéru. Týmto kodérom je venovaná veľká publicita pri riešení bezstratovej kompresie, nazývanej tiež kompakcia dát. Pre stratovú kompresiu statického obrazu sú najčastejšie používanými metódami rôzne modifikácie Huffmanovho kódu a jednorozmerných a dvojrozmerných kódov Ziva, Lempela a Welcha [13], [14], [15], [16], [17]. Transformačné kódovanie je "povinné" len vyhovieť predpokladom bezstratového kodéra a nájsť zo skupiny rôznych jeho modifikácií tú, ktorá je pre kompakciu pripravených číselných súborov najúčinnnejšia.

9.4 SUBPÁSMOVÉ KÓDOVANIE

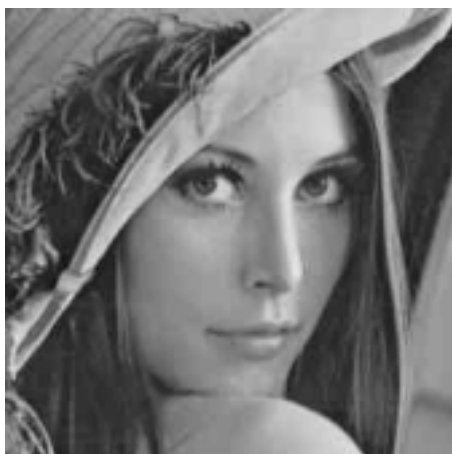
V subpásmovom kódovaní sa obraz filtruje, aby sme získali množinu obrazov, z ktorých každý obsahuje obmedzený rozsah 2-D frekvencií (sekvencií) [40], [71]. Tieto obrazy nazveme subpásmové obrazy. Pretože takéto obrazy majú v porovnaní s pôvodným obrazom obmedzenú šírku pásma, môžu byť podvzorkované. Tento proces filtrácie a podvzorkovania sa nazýva analýza. Subpásmové obrazy sa ďalej kódujú jedným alebo viacerými kodérmi. Každý obraz môže mať iný kompresný pomer,

dokonca môže byť použitá iná kódovacia technika na každé podpásmo, čím sa dajú využiť výhody jednotlivých podpásiem a chyby kompresie budú rozdelené po celom podpásme opticky optimálnym spôsobom. Pri rekonštrukcii sa dekódované pod pásma nadvzorkujú pomocou vhodných filtrov a zrekonštruované sa spoja do výsledného obrazu. Toto je stupeň syntézy. Vidíme, že etapa vytvorenia podpásiem neprináša so sebou žiadnu kompresiu (pretože na reprezentáciu podpásmových obrazov treba také isté množstvo vzoriek ako na pôvodný obraz). Dôvodom pre takéto riešenie je, že pod pásma sa dajú kódovať efektívnejšie ako pôvodný obraz. Na obrázku 9.5 je blokový diagram pre základné 1-D, 2-pásmové kódovanie s podvzorkovaním s faktorom 2. V tomto diagrame sú v procese analýzy a syntézy použité dva filtre, dolnopriepustný a hornopriepustný.

Kľúčové elementy v subpásmových systémoch sú banky filtrov pre analýzu a syntézu a kódovacie postupy použité na pod pásma.



Obr. 9.5 Bloková schéma 1D dvojpásmového subband kodéra



a



b

Obr. 9.6 a, b



c



d

Obr. 9.6 Rekonštruované obrazy, kódované transformačným kódovaním po blokoch 8 x 8: výrez obrazu Lena 2D DTC 0,6 bit/bod (a), 2D HT 0,6 bit/bod (b), 2D DTC 0,3 bit/bod (c), 2D HT 0,3 bit/bo (d)



a



b

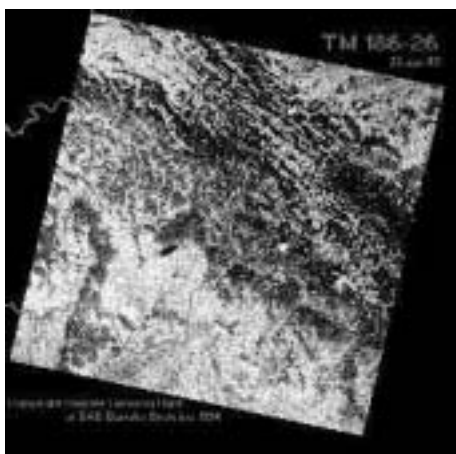


c

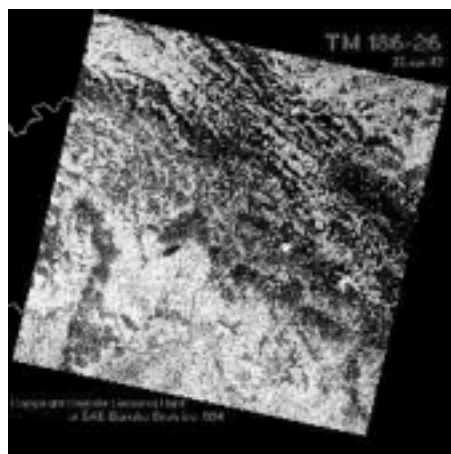


d

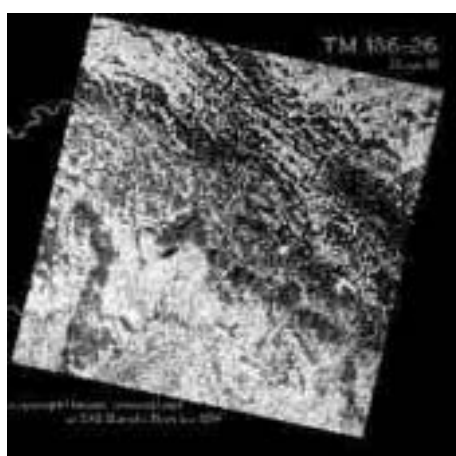
Obr. 9.7. Rekonštruované obrazy, kódované transformačným kódovaním po blokoch 8 x 8: pečeň 2D DTC 0,6 bit/bod (a), 2D HT 0,6 bit/bod (b), 2D DTC 0,3 bit/bod (c), 2D HT 0,3 bit/bo (d)



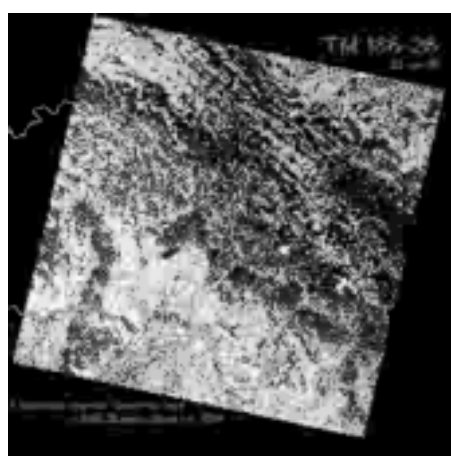
a



b



c



d

Obr. 9.8 Rekonštruované obrazy, kódované transformačným kódovaním po blokoch 8 x 8 2D DTC: aerokozmická snímka JPEG 1,5 bit/bod (a), CTC 1,5 bit/bod (b), JPEG 0,7 bit/bod (c), CTC 0,7 bit/bod (d)



a



b

Obr. 9.9 a, b



c



d



e

Obr. 9.9 Rekonštruované obrazy kódované transformačným kódovaním po blokoch 8 x 8 2D DTC: Nataša 256 x 256 originál 8 bit/bod (a), UIS 1 bit/bod (b), LIS 7 bit/bod (c), JPEG 0,8 bit/bod (d), CTC 0,8 bit/bod (e)

9.5 KÓDOVNIE WAVELETOVÝMI TRANSFORMÁCIAMI

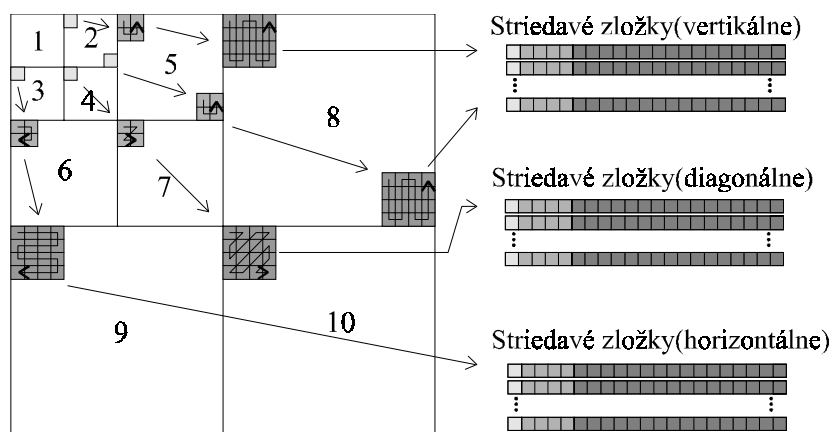
Väčšina v súčasnosti najúspešnejších waveletových kompresných postupov pre kompresiu obrazu má klasickú zreteľnú štruktúru zdrojového kódéra (časť 1.5) transformácia-kvantizácia-kódovanie. Niektoré z týchto kompresných postupov dosahujú jedny z najlepších výsledkov pri stratovej aj bezstratovej kompresii vôbe výrazne ovplyvnili vývoj aplikácií kompresie a prenosu obrazu, napr. EZW [177], SPIHT [178].

Ako prvú treba v kompresnom postupe vykonať 2D WT. Nutné a postačujúce podmienky na existenciu rôznych druhov WT sú uvedené v časti 2.11. Avšak na efektívnu reprezentáciu obrazu sú dôležité aj ďalšie vlastnosti WT, z ktorých sa niektoré dajú lepšie vyjadriť ako vlastnosti básových funkcií a iné ako vlastnosti filtrov v príslušnej FB. Najdôležitejšie vlastnosti sú zhrnuté v časti 9.5.1. Pri kompresii sa najviac používajú separovateľné DWT so spôsobom rozkladu na subpásma podľa obr. 2.27.

Vo vzniknutej štruktúre subpásiem existujú vnútro pásomové aj medzipásomové závislosti (nie lineárne, tie sa odstránili transformáciou). Kvantizátory, prípadne celé kompresné postupy môžu kategorizovať podľa toho, na ktorý druh závislosti sa zamerajú.

Používané spôsoby kvantizácie, prípadne alokácie bitov sú uvedené v časti 9.5.2.

Po kvantizácii sú koeficienty kódované väčšinou rôznymi variantami entropických a Run-length kódov. Novšie metódy používajú pritom aj rôzne metódy modelovania kontextu a metódy tzv. podmieňovania (prínosné napr. pozdĺž hrán v obraze) [179].



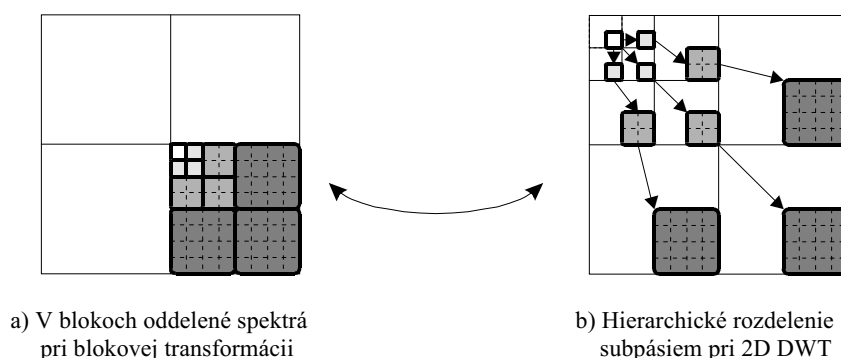
Obr. 9.10 Preusporiadanie waveletových koeficientov pri "baseline" waveletovom kódéri

V klasickej realizácii waveletového transformačného postupu (tzv. "baseline algoritmus") [180] sa využívajú vnútro pásomové aj medzipásomové závislosti, pričom postup používa nezávislú kvantizáciu subpásiem. Po separovateľnej 2D DWT sú koeficienty kvantované a preusporiadané podľa obr. 9.10. Na získané sekvencie sa aplikuje Run-Length kódér použitím EOB stratégie s následným entropickým kódérom.

V posledných rokoch sa pri kódovaní obrazu začal využívať princíp kódovania obrazu s postupným prenosom informácie ("progresívne kódovanie"). V súčasnosti najúspešnejšie waveletové kódéry CREW [185] a ECECOW [179] tento princíp obsahujú. Oba používajú spôsob kvantizácie stromami núl vyvinutý v algoritme EZW (časť 9.5.2). CREW umožňuje okrem stratovej aj bezstratovú kompresiu použitím celočíselnej WT.

Pri progresívnom kódovaní obrazu pomocou blokových transformácií (najmä DCTII) sa môže využiť analogický princíp ako pri algoritme EZW. T.j. namiesto 2D DWT v algoritmoch typu EZW sa urobí bloková transformácia, pričom spektrálne koeficienty v blokoch sa preusporiadajú tak, aby

výsledná reprezentácia mala charakter čo najbližší očakávaným subpásmam 2D DWT (obr. 9.11) [181]



Obr. 9.11 Preusporiadanie koeficientov pri použití BT vo waveletovom progresívnom kóderi

Okrem uvedených postupov tvoriacich "hlavný prúd" vývoja waveletových kóderov existujú viaceré neštandardné postupy. Jedným z nich sú napríklad waveletové-fraktálové kóдеры [182], ktoré na fraktálové kódovanie využívajú waveletovú reprezentáciu signálu.

Ako príklad sú na Obr. 9.12 zobrazené kompresné výsledky získané pomocou štandardu JPEG a waveletového progresívneho kódera SPIHT (vylepšený algoritmus EZW), kde boli ako transformácie použité rôzne DWT a DCT. Vidíme, že najlepšie výsledky sa dosiahli použitím CDF 9/7 biortogonálnych waveletov. Na základe porovnania aproximačných vlastností (Obr. 2.28) by sme mohli predpokladať lepší výsledok pri wavelete D20. Pri tomto však vzniká v dôsledku veľkej dĺžky impulzovej charakteristiky filtrov a v dôsledku kvantizácie výrazný efekt "zvonenia" (časť 9.5.1).

9.5.1 Požiadavky na vlastnosti waveletov pri kódovaní obrazu

Vlastnosti waveletovej transformácie sú tesne zviazané s vlastnosťami filtrov vo FB, ktorá WT implementuje. Pri transformačnom kódovaní patria medzi najdôležitejšie vlastnosti transformácie de-korelácia a kompakcia energie. Navyše pri stratovom kódovaní treba brať do úvahy aj aproximačné vlastnosti WT a vplyv tvaru ich básových funkcií na tvorbu nežiadúcich vizuálnych efektov. Básové funkcie WT bývajú najčastejšie charakterizované vlastnosťami [180]:

1. *ohraničenosť v čase* - vypovedá o tom, že básová funkcia má nenulové funkčné hodnoty len na istom uzavretom intervale. Potom hovoríme, že na danom intervale má kompaktnú podporu. Táto vlastnosť je dôležitá z hľadiska schopnosti bázy reprezentovať iba lokálne zmeny v signále na rôznych úrovniach rozlíšenia.

2. *aproximačné vlastnosti*. Nech prenosová funkcia DP filtra vo FB má v bode $z = 1$ K -násobnú nulu. Takýto filter nazývame K -regulárny. Potom môžeme všetky polynómy stupňa $\leq K$ vyjadriť pri ľubovoľnom rozlíšení lineárnou kombináciou posunutí príslušnej funkcie mierky. Zároveň odpovedajúci wavelet má K nulových momentov, t.j. polynómy stupňa $\leq K - 1$ nereprezentuje v diferenčných priestoroch. Keďže polynómy sú často dobrým modelom pre obraz, je schopnosť ich aproximácie dôležitým kritériom.

3. *regularita* - vyjadruje mieru "hladkosti" básových funkcií, resp. básových vektorov, pričom úzko súvisí s aproximačnými vlastnosťami waveletov resp. s K -regularitou filtrov v bankách filtrov.

Požiadavky na filtre sú pre DWT v princípe totožné s požiadavkami kladenými na filtre pri subpásmovom kódovaní obrazu, predovšetkým [95]:

1. *lineárna fázová charakteristika* - degradácia obrazu pozdĺž hrán je menej rušivá (v opačnom prípade vzniká veľké fázové skreslenie po kvantizácii)

2. *minimalizácia efektu "zvonenia"* - dobré oddelenie subpásiem alebo vysoká regularita požadujú dlhé filtre. Ich nevýhodou je, že šíria kódovacie chyby, čo na hranách v obraze spôsobuje tzv. "efekt zvonenia" (dôsledok striedania znamienok v impulzových charakteristikách filtrov).

3. *minimalizácia posunu subpásiem* - pre kódovacie metódy využívajúce medzipásmové závislosti je výhodné zabezpečiť aby koeficienty v jednotlivých subpásmach prislúchajúce jednej oblasti v pôvodnom obraze neboli navzájom poposúvané

V dôsledku rekurzívneho výpočtu DWT sa stáva podstatnou vlastnosťou regularita. Istá regularita je potrebná, avšak ďalšie jej zvyšovanie kompresiu podstatne nezlepšuje. t.j. pri kódovaní obrazu potrebujeme relatívne krátke a "hladké" filtre. Záleží pri tom na tvare waveletu použitého pri syntéze, ktorý určuje viditeľnosť kódovacích chýb [183].

V biortogonálnych systémoch, keď nie je možné dosiahnuť regularitu pri analýze aj syntéze, je lepšie použiť regulárnu syntézu čím zabránime vzniku tzv. "šachovnicového" efektu.

9.5.2 Kvantizácia a alokácia bitov

Pri waveletových kompresných postupoch sa používajú dva základné prístupy kvantizácie [95]: a) nezávislá kvantizácia subpásiem b) kvantizácia pozdĺž subpásiem.

Pri nezávislej kvantizácii predpokladáme, že pásma sú navzájom dekkorelované. Potom je vhodné subpásma vzhľadom na vlastnosti ľudského vizuálneho systému váhovať, t.j. voliť viac kvantizačných úrovní pre nízke a stredné pásma na úkor pásiem vyšších [180]. Prípadne môžeme najvyššie subpásma kvôli ich zanedbateľnej energii úplne zanedbať. Najpoužívanější typy kvantizátorov sú:

1. *skalárne kvantizátory* s "mŕtvou zónou" (v zóne mapujú originálne hodnoty na nulu) a prípadne s optimalizovanou alokáciou bitov (napr. Loydove kvantizátory) [20][95],

2. *vektorové kvantizátory* [184].

Algoritmy alokácie bitov pomáhajú kvantizátory navrhovať tak, aby mal výstup pri danej bitovej náročnosti minimalizované isté vlastnosti, napr. skreslenie. Tieto algoritmy bývajú špecifické pre danú kompresnú metódu, ktorá kvantizáciu používa.

Pri kvantizácii pozdĺž pásiem sa predpokladá, že subpásma nie sú nezávislé. Pritom je podstatné, či banka filtrov vytvára posun subpásiem. Kvantizátory potom môžu využiť medzipásmové závislosti. Používa sa predovšetkým:

1. *vektorová kvantizácia* medzi subpásmami namiesto vnútri subpásiem,

2. *kvantizácia "stromami núl"*, tzv. "zerotree" (ZT) kvantizátory - využívajú hierarchické závislosti medzi subpásmami na oddelenie nedôležitých resp. nulových hierarchických stromových štruktúr.

Väčšina súčasných najefektívnejších waveletových kóderov používa ZT kvantizátory (časť 9.5.3), prípadne skalárne kvantizátory s optimálnou alokáciou bitov.

9.5.3 Stromy núl wavetových koeficientov a progresívne kódovanie obrazu

Kvantizácia stromami núl (zerotrees - ZT) [177] predstavuje veľmi účinný spôsob využitia medzipásmových závislostí v hierarchickom spektre 2D DWT. Efektivita pritom nevyplýva z toho, že by ostali nejaké významné lineárne závislosti medzi koeficientami v rôznych subpásmach vo waveletovom spektre (wavelety skutočne odstraňujú lineárne závislosti veľmi účinne) ale z toho, že sa vyskytujú výrazné závislosti v magnitúdach koeficientov.

Efektívnu implementáciu založenú na koncepte ZT kvantizácie vytvoril J. Shapiro v r. 1992. Ide o algoritmus EZW (Embedded zerotree wavelet) Jeho výstupom je tzv. vnorený (embedded) kód, t.j. prúd bitov, ktorý odlišuje obraz od obrazu nulového, pričom bity v prúde sú zoradené podľa dôležitosti zostupne. Prúd bitov reprezentuje obraz pri čoraz vyššej bitovej náročnosti, pričom pridávaním ďalších bitov sa aproximácia obrazu postupne zlepšuje. Pri dosiahnutí požadovanej bitovej náročnosti

sa kódovací proces jednoducho ukončí. Vnorený kód predstavuje v zmysle MSE najlepšiu aproximáciu spektrálnych koeficientov obrazu pri danom počte bitov, t.j. najprv prenáša koeficienty s väčšou magnitúdou. Zodpovedá tým konceptu *progresívnych kódov*, resp. konceptu progresívneho prenosu informácií, pri ktorom sa požaduje prednostný prenos informácie, ktorá nám najviac redukuje chybu pri rekonštrukcii.

Hierarchické závislosti medzi subpásmami v spektre DWT sú znázornené na obr.9.5.1. resp. obr. 9.5.2b. Koeficienty, ktoré zodpovedajú jednému priestorovému miestu formujú exponenciálne sa zväčšujúce stromové štruktúry s hierarchickou závislosťou. Existujú tri rovnocenné orientácie stromu (horizontálny, vertikálny a diagonálny). Algoritmus EZW je založený na predpoklade, že ak je koeficient pri koreni nejakého stromu nevýznačný (vzhľadom na danú prahovú hodnotu), je pravdepodobné, že aj všetci jeho potomkovia v strome budú nevýznační. Zároveň je algoritmicky zohľadnená väčšia dôležitosť veľkých koeficientov oproti menším, bez ohľadu na dôležitosť subpásma v ktorom sa vyskytujú.



a) JPEG (quality 4, optimize, baseline)
0.139 bit/bod, MSE: 212.2



b) DCTII, bloky 8x8, SPIHT,
0.139 bit/bod, MSE: 203.38



c) DCTII, bloky 16x16, SPIHT
0.139 bit/bod, MSE: 134.64



d) DWT Daubechies 20, SPIHT
0.139 bit/bod, MSE: 137.92

Obr. 9.12 a, b, c, d



e) DWT CDF 9/7, SPIHT
0.139 bit/bod, MSE: 107.3



f) DWT CDF 9/7, SPIHT
0.053 bit/bod, MSE: 241.3

Obr. 9.12 Porovnanie kompresných výsledkov štandardu JPEG a progresívneho kódovania algoritmom SPIHT použitím DWT a DCT (výrez obrazu Lena, veľkosť 256 x 256)