SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

Ing. Monika Dávideková

Autoreferát dizertačnej práce

KOMPLEMENTÁRNE KÓDY

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Telekomunikácie**
v študijnom odbore 5.2.15. telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, __.__.2016

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Monika Dávideková

Autoreferát dizertačnej práce

KOMPLEMENTÁRNE KÓDY

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

5.2.15 Telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, ... 2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej (2011-2014) a externej (2014-2016) forme doktorandského štúdia

Na Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Monika Dávideková
Ústav telekomunikácií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. Peter Farkaš, DrSc.
Ústav telekomunikácií
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3
812 19 Bratislava

Oponenti: meno:
adresa:
pracovisko:

meno:
adresa:
pracovisko:

Autoreferát bol rozoslaný: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: ..... o .....hod.

Na Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave, v zasadacej miestnosti ÚT FEI STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, B-blok, 6.p., miestnosť B602

.....
prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

1 Úvod 4
2 Súčasný stav a aktuálnosť riešenej problematiky 5
2.1 Stručný prehľad uplatnenia CCC 5
2.2 Stručný prehľad vývoja CCC 5
3 Ciele dizertačnej práce 8
3.1 Metodika práce a metódy skúmania 9
4 Vytvorený automatizovaný systém 10
5 Hľadanie alternatívneho spôsobu tvorby CCC 11
5.1 Predstavenie konštrukčnej metódy 11
5.2 Návrh konštrukčnej metódy pre dvojrozmerné signatúry 16
5.3 Opis navrhnutej konštrukčnej metódy v dvojrozmernom priestore 17
5.3.1 Analýza indexov 18
5.4 Výhody a nevýhody navrhnutej metódy 18
5.5 Zhrnutie návrhu alternatívnej metódy konštrukcie CCC 19
6 Hľadanie novej rovnice tvorby 2D-CCC z α-unitárnej matice 20
6.1 Hľadaná rovnica 20
6.2 Zhrnutie hľadania novej rovnice tvorby 2D-CCC 22
7 Súbežné použitie signatúr s odlišnými rádmi elementov 23
7.1 Vzájomná korelácia kódov s parametrami ($\boldsymbol{N2}, \boldsymbol{N2}, \boldsymbol{N2 \times N2}$) 23
7.2 Vzájomná korelácia kódov pre (N^2, N^2, 2N×2N) 24
7.3 Zhrnutie zistení o súbežnom použití signatúr s rôznymi dĺžkami elementov 24
8 Súbežné použitie signatúr skonštruovaných rôznymi algoritmami 25
8.1 Vzájomná korelácia pre (N^2, N^2, N^2xN^2) a (N^2, N^2, 2N×2N) 25
8.2 Vzájomná korelácia pre (N^2, N^2, N^2xN^2) a (N^2, N^2, N×N) 25
8.3 Vzájomná korelácia pre (N^2, N^2, 2Nx2N) a (N^2, N^2, N×N) 26
8.4 Zhrnutie výsledkov výskumu o súbežnom použití kódov pochádzajúcich z rôznych konštrukčných algoritmov 26
9 Súbežné použitie jedno- a dvojrozmerných signatúr 27
9.1 Vzájomná korelácia pre (N, N, N^2) a (N^2, N^2, N^2×N^2) 27
9.2 Vzájomná korelácia kódov pre (N, N, 2N) a (N^2, N^2, 2N×2N) 27
9.3 Vzájomná korelácia pre (N, N, N) a (N^2, N^2, N×N) 27
9.4 Vzájomná korelácia pre (N,N,N) a (N^2,N^2,N^2×N^2), (N,N,N^2) a (N^2,N^2,N×N) 28
9.5 Zhrnutie súbežného použitia 1D- a 2D-CCC 28
10 Korelačné vlastnosti 2D-QOCCC 29
10.1 Korelačné vlastnosti QOCCC v závislosti od východiskového 1D-CCC 29
10.2 Zhrnutie analýzy korelačných vlastností QOCCC 30
11 Hľadanie nových 2D-QOCCC kódov 31
11.1 Návrh nového typu 2D-QOCCC 31
11.2 Zhrnutie zistení o navrhnutých QOCCC 33
12 Stručný návrh možných uplatnení výsledkov práce 34
13 Záver 35
14 Podrobnejšia špecifikácia prínosu predloženej dizertačnej práce 36
15 Resume 39
Zoznam použitej literatúry 42
Zoznam publikácii autora počas doktorandského štúdia 45

1 Úvod

V dnešnej spoločnosti s každým dňom narastá počet obyvateľov našej planéty. Pre spoločenské stvorenie, akým je človek, hrá kontakt so spoločnosťou dôležitú úlohu. Pri udržiavaní kontaktu sú užitočné informačno-komunikačné prostriedky, na ktorých vývoj a vlastnosti sa kladú čoraz väčšie nároky a pre ich neustále zdokonaľovanie a vylepšovanie je nevyhnutný nepretržitý výskum.

V súčasnosti sa v mobilných systémoch využívajú technológie viaccestného šírenia signálu a rozprestretia spektra (SS - Spread Spectrum) založené na princípe kódového multiplexu (CDMA – Code Division Multiplex Access), kde sa jednotlivé spojenia účastníkov rozlišujú prostredníctvom jedinečných kódových sekvencií priradených jednotlivým účastníkom. V ideálnom prípade sa jednotlivé prenosy navzájom nerušia a je ich možné ľahko identifikovať a oddeliť. Priblíženie k ideálnym podmienkam a ich dosiahnutie skúma teória kódovania zaoberajúca sa korelačnými vlastnosťami kódovacích sekvencií.

Mohutnosť rozšíreného systému CDMA udáva spektrálnu efektivitu (pomer rýchlosti prenosu informácie a šírky príslušného spektra), ktorá závisí od korelačných vlastností kódov použitých na rozprestretie signálu v súčasnej praxi. Celkovú spektrálnu efektivitu [1] možno dosiahnuť len za podmienky ideálnych korelačných vlastností použitých sekvencií na rozprestretie.

Keď aperiodická autokorelácia každej sekvencie nadobúda nulovú hodnotu okrem nulového posuvu a aperiodická vzájomná korelácia medzi ľubovoľným párom sekvencií je nulová pre všetky posuvy, takéto vlastnosti označujeme ideálna aperiodická autokorelácia a ideálna aperiodická vzájomná korelácia. Samostatné sekvencie s takýmito vlastnosťami však neexistujú [2] a preto sa v praxi používajú sekvencie s čo najnižšími možnými hodnotami korelácie akými sú napríklad Goldove sekvencie, M-sekvencie a Kasamiho sekvencie [1]. Neideálne korelačné vlastnosti týchto sekvencií však spôsobujú medzikanálovú interferenciu (ICI – Inter-Channel-Interference), ktorá spôsobuje presluch a vzájomné rušenie komunikujúcich.

Napriek tomu, že dané ideálne korelačné vlastnosti nie je možné dosiahnuť pri samostatných sekvenciách, je možné požadované vlastnosti docieliť súbormi sekvencií [3]. Takéto súbory s ideálnymi korelačnými vlastnosťami v súčasnosti nazývame úplne komplementárne kódy (CCC – Complete Complementary Codes). Predpokladá sa, že využitím CCC pri bezdrôtových komunikačných systémoch bude možné zlepšiť prenosové parametre už existujúcich, ale aj budúcich systémov [4]. Pre ich predpokladaný prínos v rozvoji digitálnych telekomunikačných technológií sa im v súčasnosti vo výskume venuje veľká pozornosť. Z uvedených dôvodov sa záverečná dizertačná práca zaoberá skúmaním teórie komplementárnych kódov s užším zameraním na úplne komplementárne kódy.

2 Súčasný stav a aktuálnosť riešenej problematiky

Táto časť vysvetľuje motiváciu zamerania dizertačnej práce na oblasť CCC kódov vytvorením stručného prehľadu uplatnení a aplikácií CCC kódov s cieľom demonštrovať rozšírenie týchto kódov a ich využitie. Vzhľadom na ich všestranné využitie v rozličných vedných odboroch predstavujú tieto kódy stredobod záujmu výskumníkov. Odpovedá na otázky: Sú tieto kódy niekde využité? Treba sa im vôbec venovať?

Ďalšia časť popisuje tieto kódy ako aj vznik a vývoj teórie CCC kódov, čím odpovedá na otázku: Prečo sú tieto kódy zaujímavé?

2.1 Stručný prehľad uplatnenia CCC

Rozsiahly nepretržitý výskum komplementárnych a úplne komplementárnych kódov sa zaslúžil o široké uplatnenie teoretických poznatkov v rôznych vedných odboroch, čo demonštruje význam týchto kódov a zároveň odôvodňuje výber témy dizertačnej práce. Uplatnenie a aplikáciu týchto kódov možno nájsť v nasledujúcich odboroch (viac zdrojov je možné nájsť v dizertačnej práci):

- fyzika - Isingov model špirály [5],
- kombinatorika a matematika - ortogonálny model [6], Hadamardové matice [7],

telekomunikačné digitálne systémy, kde možno nájsť najširšie využitie:

- model povrchovej akustickej vlny [8],
- LORAN C navigačný systém [9],
- radary [10],
- meranie a analýza charakteristík kanála a optických trás (OTDR) [11],
- spracovanie obrazov (imaging), systém vodotlače (watermarking), steganografia, identifikácia podľa odtlačkov prstov (fingerprinting), video [12],
- eHealth [13],
- skrývanie údajov pre evakuáciu [14] a prevenciu katastrof-[15],
- spracovanie signálu [16],
- synchronizácia [17],

v moderných komunikačných bezdrôtových architektúrach:

- sieťové rozprestreté kódovanie (network spread coding) [18],
- sieť pre komunikačné technológie jedného nositeľa, sieť telesného povrchu (body area network) [19],
- rozprestretie spektra (SSS – Spread Spectrum Systems) [20],
- systémy s ortogonálnym frekvenčne deleným multiplexom (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex) [21],
- systémy CDMA [22],

a iné. Vzhľadom na rozsiahle uplatnenie poznatkov z teórie o CCC, možno predpokladať neustály výskum a nepretržité štúdie v tejto oblasti.

2.2 Stručný prehľad vývoja CCC

Počiatky teórie komplementárnych kódov je možné sledovať až do 40.r. 20.stor., keď sa objavil pojem „komplementárne sekvencie“ v práci M.J.E. Golaya [23]-[24]. Odvtedy výskumníci skúmali páry binárnych sekvencií [25] s jedinečnými korelačnými vlastnosťami ideálnej aperiodickej autokorelácie. Skúmaniu týchto komplementárnych kódov sa venovalo veľa pozornosti v prácach ďalších výskumníkov [26]-[28] a doplnila sa teória CS na komplementárnu sadu, tj. sadu sekvencií s výslednou ideálnou

aperiodickou autokoreláciou. Neskôr sa teória rozšírila o viacfázové komplementárne sekvencie (rozšírenie teórie do komplexnej oblasti) [29], [9] a o úplnú komplementaritu, inými slovami, o vlastnosti ideálnej vzájomnej korelácie [2]-[3]. V roku 1988 bol navrhnutý prvý algoritmus konštrukcie CCC kódov [3] a ich použitie bolo navrhnuté a analyzované pre CDMA [30]-[31] . Následne bolo postupne objavených niekoľko metód generovania CCC s rovnakou a postupne aj kratšou dĺžkou sekvencií [32]-[34],[7], a v roku 2011 bola publikovaná konštrukcia s doteraz najkratšou dĺžkou sekvencií v súbore [2]. Skracovanie dĺžky sekvencie pozitívne vplýva na spektrálnu efektivitu prenosu [4]. Tieto vymenované konštrukcie predstavujú míľniky vo vývoji teórie CCC a sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.
Rozvoj CCC sa zaslúžil aj o:

- návrhy ďalších konštrukčných metód [35],
- analýza Reed-Muellerových kódov [36],
- periodické CCC [37],
- rozšírenie teórie CCC o viacrozmerné sekvencie [38],
- vznik Quasi Orthogonal CCC (QOCCC) [39],
- vznik kódov Zero Cross-Correlation Zone (ZCZ) [40],
- návrhy architektúr a štúdií efektivity [41],

a mnohé ďalšie. Viac zdrojov je možné nájsť v dizertačnej práci. Metódy konštrukcie, ktoré sa zaslúžili o skrátenie dĺžky sekvencie, sú predstavené v nasledujúcej tabuľke a sú považované za míľniky vo vývoji CCC.
V uvedenom autoreferáte je pod pojmom ***signatúra*** chápaný súbor sekvencií priradený jednému používateľovi na umožnenie prenosu pri zachovaní celkových ideálnych korelačných vlastností. ***Element*** označuje jednu sekvenciu príslušnej signatúry, ktorú je nevyhnutné prenášať samostatným kanálom. V jednorozmernej (1D) oblasti predstavuje element vektor a v dvojrozmernej oblasti (2D) predstavuje element maticu a rád matice označuje *rád elementu* v 2D. Element pozostáva z ***prvkov***, z komplexných čísel s amplitúdou o veľkosti jedna. V práci používaná notácia CCC kódov je *(počet signatúr, počet elementov jednej signatúry, dĺžka elementu)*.

Tab. 1 Prehľad parametrov jednotlivých CCC kódov spracovaných v tejto práci

Zdroj	Maximálny počet signatúr	Počet elementov v jednej signatúre	Najkratšia dĺžka elementu
1988 [3]	$M \leq N$	N	$L \geq N^2$
2004 [32]	$M \leq N$	N	$L \geq MN$
2004 [33]	$M \leq N$	N	$L \geq MN/P$
2005 [34]	$M \leq N$	N	$L \geq 2N$
2011[2]	$M \leq N$	N	$L \geq N$
2003 [42]	$M_{2D} \leq N_{1D}^2$	$N_{2D} = N_{1D}^2$	$L_{2D} = L_{1D} \times L_{1D} = N_{1D}^2 \times N_{1D}^2$
2011 [43]	$M_{2D} \leq N_{1D}^2$	$N_{2D} = N_{1D}^2$	$L_{2D} = L_{1D} \times L_{1D} = N_{1D} \times N_{1D}$

kde $L, M, N, P \in \mathbb{Z}^+$ sú ľubovoľné mocniny so základom 2 také, že $N \geq M, P$ a P je spoločný deliteľ M a N, indexy $_{1D}$ a $_{2D}$ opisujú závislosť medzi parametrami 2D- a 1D-CCC, kde parametre 2D-CCC priamo závisia od parametrov pôvodných 1D-CCC použitých ako vstup algoritmu generovania 2D-CCC. M predstavuje počet signatúr, ktorý je možné skonštruovať. N predstavuje počet elementov jednej signatúry a L predstavuje dĺžku (dimenziu, rád) elementu. Práca je zameraná na najnižšie rozmery elementov a najvyššie počty signatúr vzhľadom o snahu najvyššej efektivity využitia spektra [4].
α-unitárnou maticou [2] nazývame maticu spĺňajúcu nasledujúcu podmienku:

$$\mathbf{U}_R \mathbf{U}_R^H = \mathbf{U}_R^H \mathbf{U}_R = \propto \mathbf{I}_R \qquad (1)$$

pre nejaké $\propto > 0$, kde $\mathbf{I}_R$ označuje $R \times R$ jednotkovú maticu, $R > 0$ označuje rád matice. $\mathbf{U}_R$ je unitárna matica ak $\propto = 1$.

Cieľom vypracovanej dizertačnej práce je prispieť k pokračujúcemu výskumu v oblasti CCC. Napriek neutíchajúcemu výskumu v oblasti CCC kódov je stále možné nájsť neprebádané aspekty a objaviť nové kódy alebo konštrukčné metódy, či spozorovať doteraz nezachytené vlastnosti týchto kódov, ktoré by umožnili nové možnosti aplikácie týchto kódov, či uľahčili ich implementáciu.

Ako zo súčasného stavu teórie CCC vychádza, hľadanie alternatívnych konštrukčných metód je stále v centre pozornosti výskumníkov a špecialistov v tejto oblasti a preto sa aj táto dizertačná práca zameriava na hľadanie takejto metódy (cieľ 1).

Pri tvorbe 2D-CCC je doteraz nevyhnutné najprv vygenerovať podkladový 1D-CCC a až následne je možné skonštruovať 2D-CCC. Dizertačná práca sa zameriava na hľadanie konštrukčnej rovnice priamo z α-unitárnej matice, bez potreby vygenerovania podkladového 1D-CCC (cieľ 2), čo doteraz nie je preskúmané a takáto konštrukčná rovnica doposiaľ nie je známa. Z tohto dôvodu sa dizertačná práca zameriava na návrh takejto rovnice.

V prípade 1D-CCC už bolo zachytené, že je možné použiť súbežne signatúry s rozdielnymi dĺžkami [2], nebolo však definované, aké sú pri takomto použití obmedzenia a nebolo doteraz skúmané, či takáto možnosť existuje aj v 2D priestore (cieľ 3). Výskum tejto dizertačnej práce hľadá odpovede na tieto otvorené otázky.

Doteraz neboli zachytené žiadne výskumy zaoberajúce sa kompatibilitou CCC kódov skonštruovaných podľa rozličných generujúcich metód (cieľ 4) a preto sa výskum dizertačnej práce zameriava na zistenie, či je takéto použitie CCC kódov možné. Zároveň sa v dizertačnej práci skúma aj súčasné použitie 1D a 2D CCC (cieľ 5), ktoré doposiaľ ešte nebolo skúmané.

Výskumom kvázi ortogonálnych CCC (QOCCC – Quasi Orthogonal CCC) sa zaoberá len niekoľko vybraných publikácií, ktoré vyzdvihujú prednosť týchto kódov. Tieto kódy umožňujú vygenerovať vyšší počet signatúr v porovnaní s CCC a umožniť tak prenos viacerých účastníkov súčasne, zároveň zachovávajú počet kanálov potrebných na prenos v porovnaní s východzími 1D CCC. Z tohto dôvodu sa dizertačná práca zaoberá skúmaním doteraz známych QOCCC kódov a analýzou ich korelačných vlastností (cieľ 6). Zároveň táto dizertačná práca hľadá nové riešenia (cieľ 7).

3 Ciele dizertačnej práce

Záverečná dizertačná práca sa zaoberá skúmaním týchto kódov a hľadaním odpovedí na viaceré otázky, ktoré doteraz neboli skúmaním konečne preskúmané a ani zdokumentované, ako bolo možné z predchádzajúcich kapitol posúdiť.

Na základe zozbieraných poznatkov v uvedenej problematike boli sformulované nasledovné ciele dizertačnej práce:

1. Hľadanie alternatívneho spôsobu tvorby CCC s najkratšou dĺžkou sekvencie a jej porovnanie s doterajšou konštrukčnou metódou [2] (kapitola 5).
2. Hľadanie novej rovnice tvorby 2D-CCC priamo z α-unitárnej matice (kapitola 6).
3. Návrh a analýza súbežného použitia signatúr s odlišnými rádmi elementov v dvojrozmernom priestore (kapitola 7).
4. Návrh a analýza súbežného použitia CCC signatúr skonštruovaných podľa rôznych generujúcich konštrukcií (kapitola 8).
5. Návrh a analýza súbežného použitia 1D- a 2D-CCC signatúr (kapitola 9).
6. Porovnanie korelačných vlastností QOCCC v závislosti od zmeny východiskového 1D-CCC (kapitola 10) a ich porovnanie
7. Hľadanie nového spôsobu konštrukcie QOCCC (kapitola 11).

Pre dosiahnutie týchto cieľov bolo najprv nutné:

A. Vytvorenie stručného prehľadu doterajších navrhovaných uplatnení CCC (kapitola 2.1).
B. Vytvorenie stručného prehľadu vývoja a míľnikov teórie CCC (kapitola 2.2).
C. Skoncipovanie a realizácia automatizovaného systému na generovanie CCC vybraných konštrukčných metód (kapitola 4).

Stručný prieskum možného uplatnenia výsledkov výskumu je uvedený v kapitole 12.

Členenie dizertačnej práce:

Členenie samotnej dizertačnej práce odzrkadľuje vytýčené ciele a ich poradie:

Už v úvode analytickej časti práce je stručne opísaný prehľad uplatnenia CCC ako aj stručný prehľad vývoja teórie CCC, ktoré tvoria podklady pre vytvorenie prehľadu o súčasnom stave problematiky. V rámci štvrtej časti je aj veľmi stručne opísaný vytvorený automatizovaný systém na tvorbu CCC, ktorý tvoril nástroj pre ďalší výskum.

Piata kapitola sa zameriava na hľadanie alternatívneho spôsobu tvorby CCC s najkratšou dĺžkou sekvencie. Dáva odpoveď na otázku, či je možné aj iným spôsobom vytvoriť dané kódy. Je v nej opísaný takýto postup ako aj jeho porovnanie s doterajšou konštrukčnou metódou [2] (cieľ 1).

V šiestej kapitole je uvedená nová rovnica na tvorbu 2D-CCC (cieľ 2), ktorá umožňuje konštrukciu 2D-CCC priamo z α-unitárnej matice. Doterajšie konštrukčné metódy ako nevyhnutný vstup potrebujú predgenerovaný podkladový 1D-CCC, z ktorého sa 2D-CCC generuje.

Siedma časť je venovaná skúmaniu súbežného použitia signatúr s odlišnými rádmi 2D-CCC elementov (cieľ 3) vzhľadom na to, že bolo zistené, že je možné kombinovať signatúry s rozličnými dĺžkami elementov v 1D [2]. Nie je však presne definované, aké obmedzenia takéto použitie prináša a doteraz nebolo zistené, či je takéto súbežné použitie signatúr s rozličnými rádmi elementov aj v 2D možné. Z toho dôvodu sa dizertačná práca zameriava na skúmanie tejto oblasti.

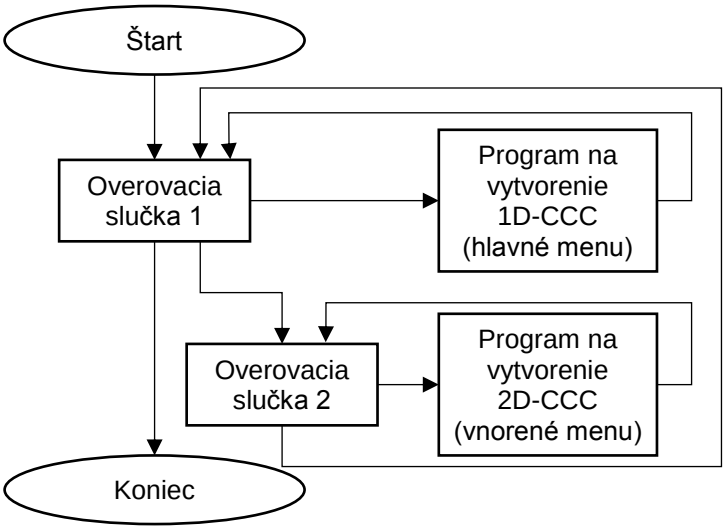
V ôsmej kapitole je skúmaná doteraz neprebádaná oblasť: súbežné použitie signatúr pochádzajúcich z rôznych konštrukcií (cieľ 4), kde sa analyzuje, či je takéto súbežné fungovanie signatúr z rôznych generujúcich algoritmov a rôznych parametrov vôbec možná. V deviatej časti sa zároveň skúma aj to, či je možné súčasne použiť 1D-CCC a 2D-CCC (cieľ 5), nakoľko táto problematika doteraz tiež nebola preskúmaná.
Desiata časť skúma korelačné vlastnosti QOCCC a identifikuje zmeny korelačných vlastností v závislosti od zmeny rozmerov východiskového 1D CCC (cieľ 6).
Jedenásta časť uvádza nové možnosti tvorby 2D QOCCC (cieľ 7) a porovnáva nové navrhnuté kódy s doteraz známymi QOCCC kódmi.
Posledná časť stručne pojednáva o možnom uplatnení výsledkov práce a o pôvodných prínosoch dizertačnej práce a uvádza publikácie dosiahnuté v doktorandskom štúdiu. V závere práce je v krátkosti zhrnutá dizertačná práca.

3.1 Metodika práce a metódy skúmania

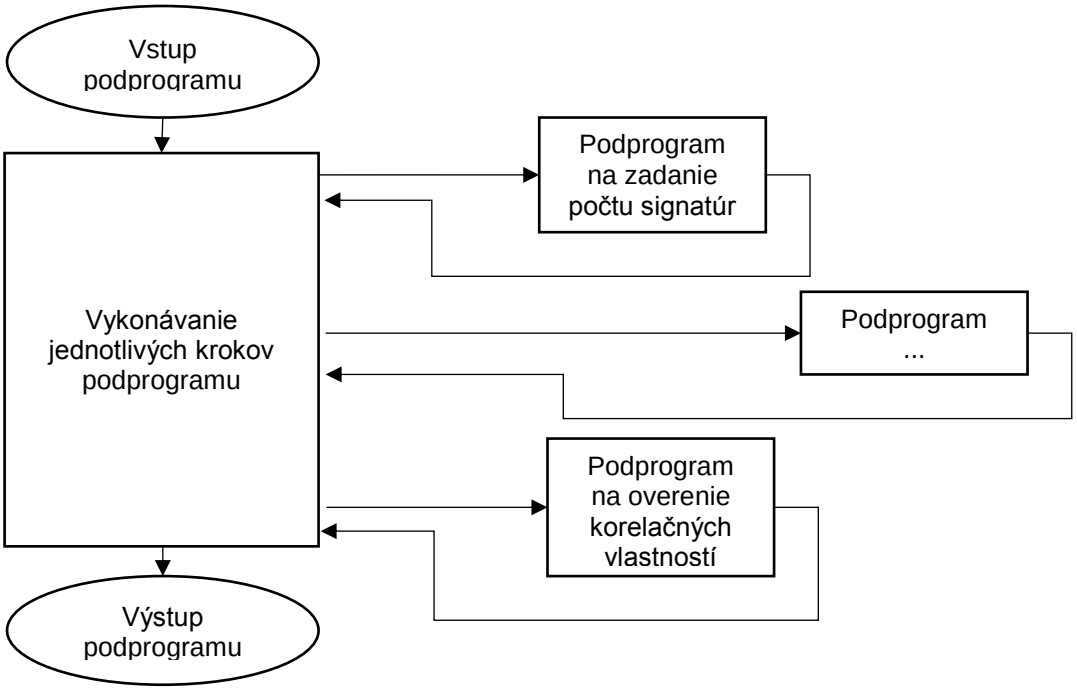
Ciele dizertačnej práce skúmajú CCC, hľadajú ich nové konštrukcie a overujú ich vlastnosti. Práca obsahuje aj ich porovnanie s existujúcimi metódami pre generovanie úplne komplementárnych kódov. Zaoberá sa aj otázkami ich možného využitia v telekomunikačnej technike. Prvým metodologickým krokom bolo vytvorenie prehľadu existujúcich konštrukčných metód. Nasledoval výber najvýznamnejších z nich a vytvorenie automatizovaného programového prostredia, ktoré sa následne využívalo pre ostatné výskumné úlohy a hľadaní riešení stanovených cieľov. Teoretické zistenia a výsledky boli následne overované v tomto automatizovanom prostredí. Takýto postup využíval kombináciu kvalitatívnych a kvantitatívnych techník.

4 Vytvorený automatizovaný systém

V tejto kapitole je veľmi stručne opísaný vytvorený automatizovaný systém, ktorý umožňuje vygenerovať CCC podľa konštrukcií vymenovaných v Tab. 1. Systém vychádza z pôvodných prác autora [43] a [44], ktoré boli prepracované a upravované. Automatizovaný systém reprezentujú skripty pospájané do modulárneho systému, ktorý je rozšíriteľný. Skripty boli programované procedurálne a príkazy sa vykonávajú krok za krokom. Pre návraty sú implementované slučky.



Obr. 1 Obsah hlavného programu



Obr. 2 Ilustrácia podprogramov volajúcich na čiastkové úlohy menšie podprogramy, funkcie a metódy

Jednotlivé príkazy sú okomentované priamo v kóde pre rýchlejšie porozumenie a skripty možno nájsť na CD nosiči priloženom v dizertačnej práci.

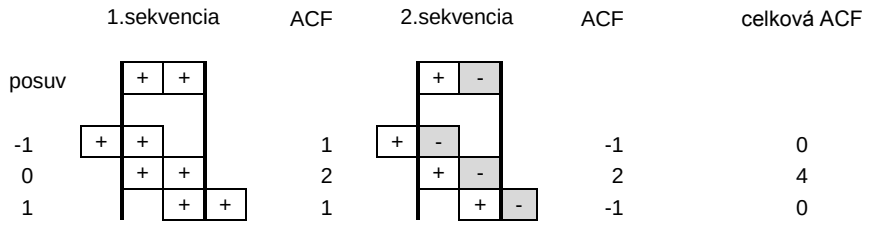
Nakoľko sa tento automatizovaný systém skladá z veľkého množstva menších špecializovaných skriptov a samotný systém predstavuje nástoj na skúmanie cieľov výskumu dizertačnej práce, je možné nájsť opis v dizertačnej práci a podrobnejší opis v samotných skriptoch.

5 Hľadanie alternatívneho spôsobu tvorby CCC

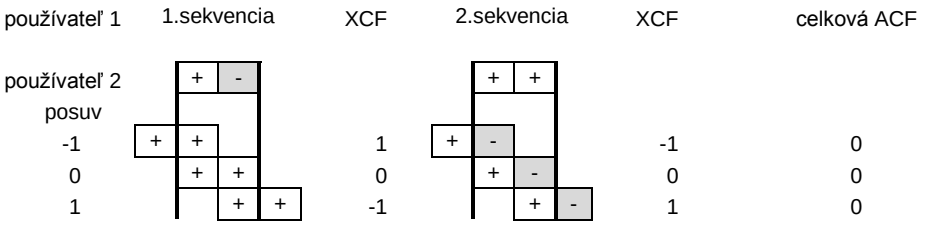
Úplne komplementárne kódy sú jedinečné a disponujú unikátnymi vlastnosťami ideálnej celkovej korelácie, vďaka ktorej našli široké uplatnenie. Aperiodická celková korelačná funkcia $\rho_{\mathbf{c}^{(i)},\mathbf{c}^{(j)}}(\tau)$ pre elementy $c^{(i)}, c^{(j)} \in C$ je definovaná nasledovne:

$$\rho_{\mathbf{c}^{(i)},\mathbf{c}^{(j)}}(\tau) = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{c}^{(i)}(l).\left[\mathbf{c}^{(j)}(l+\tau)\right]^* \qquad (2)$$

kde τ označuje posuv, c^* označuje komplexne konjugovanú sekvenciu c. Pre $i=j$ označuje táto rovnica autokoreláciu a pre $i \neq j$ označuje vzájomnú koreláciu. Samotný výpočet je demonštrovaný na Obr. 3 a Obr. 4.



Obr. 3 Výpočet aperiodickej auto-korelačnej funkcie (ACF) signatúry CCC.



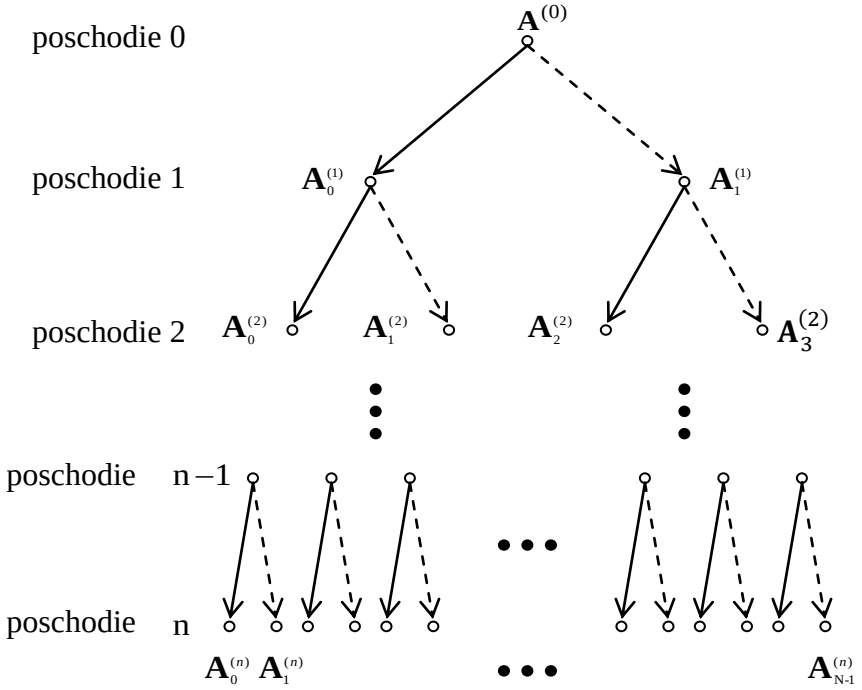
Obr. 4 Výpočet aperiodickej vzájomnej korelačnej funkcie (XCF) signatúr CCC.

Už od počiatkov až do súčasnosti sa vedci pokúšajú nájsť rôzne metódy konštrukcie týchto kódov a problematika týchto kódov je dlhodobo v pozornosti výskumníkov. Táto kapitola sa zaoberá predstavením alternatívnej metódy konštrukcie CCC s doteraz najkratšou dĺžkou elementu ako aj jej porovnaním s doterajšou metódou konštrukcie týchto kódov [2] (cieľ 1). Publikovaná metóda [2] predstavuje kódy s dĺžkou elementu rovnej samotnému počtu elementov ako jediná z doteraz publikovaných metód. Ostatné metódy konštruujú dlhšie sekvencie. Pre použitie v moderných telekomunikačných architektúrach je pre čo najväčšiu efektivitu spektra zaujímavá čo najkratšia dĺžka elementu [4]. To je dôvod prečo sa práca zameriava na hľadanie alternatívneho spôsobu tvorby CCC s najkratšou doteraz známou dĺžkou. Práca nehľadá kratšie kódy vzhľadom na fakt, že uvedená dĺžka predstavuje dolnú hranicu [2] dĺžky elementu. Motivácia k hľadaniu spočíva v množstve nevyhnutných krokov pri súčasnej metóde. Výhodou navrhnutej novej konštrukcie je zmenšenie tohto počtu krokov.

5.1 Predstavenie konštrukčnej metódy

Metóda sa opiera o fakty dokázané v prácach Tsenga a Liua [27]-[28]. Konkrétne uvedení autori dokázali, že novú signatúru je možné vytvoriť z existujúcej signatúry preusporiadaním elementov v súbore, ich negáciou alebo kombináciou negácie a preusporiadania elementov. Práca Tsenga a Liua [27]-[28] síce dokazuje, že je možné novú signatúru vytvoriť z pôvodnej preusporiadaním elementov, ale neudáva koľko elementov je nutné preusporiadať a akým spôsobom a ani iná doteraz známa práca to

nepopisuje. Rovnako ich práca nehovorí o tom, či je možné vytvorenie úplného súboru signatúr optimálneho CCC (počet signatúr je rovný počtu elementov). Navrhnutá metóda predstavuje tento doposiaľ chýbajúci návod. Opisuje ako toto preusporiadanie urobiť tak, aby sme našli nielen jednu ale všetky signatúry a vytvorili optimálny CCC. Zároveň hovorí aj o tom, v koľkých krokoch sa dané signatúry vytvoria a aj koľko signatúr vznikne (udané počtom elementov). Nie je viac potrebné hľadať ďalšie signatúry hrubou silou. Výpočtová náročnosť hľadania signatúr hrubou silou sa pritom zvyšuje s narastajúcou dĺžkou elementu a so samotným počtom elementov.



Obr. 5 Binárny strom ilustrujúci konštrukciu

Metóda vychádza z α-unitárnej matice rovnako ako analyzované konštrukčné metódy (Tab. 1) a je ilustrovaná pomocou binárneho stromu znázorneného na Obr. 5. Na rozdiel od doterajších metód nevychádza z multiplikatívnych operácií, ale presúva súčasti kódu a tvorí tak nový kód. Výstupom konštrukčnej metódy je optimálny CCC. Pod pojmom optimálny sa rozumie, že počet elementov signatúry N je rovný celkovému možnému počtu signatúr M pre daný kód. Inými slovami, platí $N = M$ a nie všeobecné $N \geq M$ [2].

<u>Konštrukčný algoritmus</u> (N, N, N)-CCC

Nech:

$$\mathbf{A}^{(0)} = \begin{bmatrix} a_0^{(0)} \\ a_1^{(0)} \\ \vdots \\ a_{N-1}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{3}$$

kde $\mathbf{A}^{(0)}$ je α-unitárna matica rádu N a $a_i^{(0)}$ pre $i = 0,1,2,\dots N-1$, sú riadkové vektory matice $\mathbf{A}^{(0)}$. Horný index v zátvorkách označuje poradové číslo poschodia stromu na Obr. 5. Matica $\mathbf{A}^{(0)}$ označuje signatúru, pričom jednotlivé riadky matice označujú jednotlivé elementy.

Každý uzol na príslušnom poschodí zodpovedá jednej matici, kde táto bola vytvorená z matice z predchádzajúceho poschodia podľa pravidiel konštrukčného algoritmu. Toto pravidlo hovorí:

1) Ak je spojenie s predchádzajúcim poschodím tvorené plnou čiarou, potom matica

v nasledujúcom poschodí je vytvorená jednoduchým kopírovaním matice z prechádzajúceho poschodia.

2) Ak je spojenie s predchádzajúcim poschodím tvorené prerušovanou čiarou, potom matica v nasledujúcom poschodí je vytvorená špecifickou zámenou podmnožín riadkov matice z prechádzajúceho poschodia. Opis tejto zámeny je uvedený nižšie.

Idúc pozdĺž prerušovanej čiary z počiatočného uzla stromu označeného ako $\mathbf{A}^{(0)}$ smerom na prvé poschodie k uzlu označeného ako $\mathbf{A}_1^{(0)}$, dochádza k nasledujúcej vzájomnej zámene podmnožín riadkov počiatočnej matice $\mathbf{A}^{(0)}$: Riadky matice $\mathbf{A}^{(0)}$ sú rozdelené do dvoch podmnožín: hornej $\mathbf{S}_U^{(0)}$ a dolnej podmnožiny $\mathbf{S}_L^{(0)}$, kde tieto pozostávajú z príslušných riadkov počiatočnej matice nasledovne:

$$\mathbf{S}_U^{(0)} = \begin{bmatrix} a_0^{(0)} \\ a_1^{(0)} \\ \vdots \\ a_{\frac{N}{2}-1}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{4}$$

a

$$\mathbf{S}_L^{(0)} = \begin{bmatrix} a_{\frac{N}{2}}^{(0)} \\ a_{\frac{N}{2}+1}^{(0)} \\ \vdots \\ a_{N-1}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Tieto riadkové podmnožiny sú následne na prvom poschodí vzájomne zamenené ak je tento príslušný uzol s predchádzajúcim poschodím spojený prostredníctvom prerušovanej čiary:

$$\mathbf{A}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_U^{(1)} \\ \mathbf{S}_L^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_L^{(0)} \\ \mathbf{S}_U^{(0)} \end{bmatrix} \tag{6}$$

kde $\mathbf{A}_1^{(1)}$ je zmenená matica z prvého poschodia a matica $\mathbf{A}_0^{(1)}$ je identická s maticou $\mathbf{A}^{(0)}$.

V nasledujúcom kroku (t.j. medzi prvým a druhým poschodím binárneho stromu zobrazeného na Obr. 5) dochádza k obdobným vzájomným výmenám. V tomto kroku sa každá podmnožina $\mathbf{S}_U^{(0)}$ a $\mathbf{S}_L^{(0)}$ rozdelí na dve nové riadkové podmnožiny obdobne ako predtým $\mathbf{A}^{(0)}$. Tieto nové podmnožiny sú následne vzájomne vymenené. To znamená, že podľa opísaného postupu sa podmnožina $\mathbf{S}_U^{(0)}$ rozdelí na dve menšie podmnožiny nasledujúcim spôsobom:

$$\mathbf{S}_U^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{UU}^{(1)} \\ \mathbf{S}_{UL}^{(1)} \end{bmatrix} \tag{7}$$

a po vzájomnej výmene podmnožín sa $\mathbf{S}_U^{(2)}$ zmení na

$$\mathbf{S}_U^{(2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{UL}^{(1)} \\ \mathbf{S}_{UU}^{(1)} \end{bmatrix} \tag{8}$$

Potom

$$\mathbf{A}_1^{(2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{UL}^{(1)} \\ \mathbf{S}_{UU}^{(1)} \\ \mathbf{S}_{LL}^{(1)} \\ \mathbf{S}_{LU}^{(1)} \end{bmatrix} \tag{9}$$

V i-tom kroku (znamená pri prechode z $(i-1)$-poschodia na i-te poschodie) je príslušná podmnožina modifikovaná rovnakým spôsobom, t.j. vzájomnou výmenou riadkových podmnožín, ktoré možno formálne opísať nasledovne:

$$\mathbf{S}_X^{(i)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{XL}^{(i-1)} \\ \mathbf{S}_{XU}^{(i-1)} \end{bmatrix} \tag{10}$$

kde $\mathbf{S}_X^{(i)}$ označuje podmnožinu riadkových vektorov z i-teho poschodia konštrukčného algoritmu, $\mathbf{S}_{XU}^{(i-1)}$ označuje hornú a $\mathbf{S}_{XL}^{(i-1)}$ označuje dolnú podmnožinu z $(i-1)$-poschodia. Celý algoritmus skončí po n krokoch, pričom

$$n = \log_2 N \tag{11}$$

kde N predstavuje počet elementov.

Výsledkom tohto algoritmu je optimálny CCC v podobe matíc $\mathbf{A}_0^{(n)}, \mathbf{A}_1^{(n)}, \ldots, \mathbf{A}_{N-1}^{(n)}$, kde každá matica predstavuje jednu signatúru v MC-CDMA [4] a riadok matice predstavuje element dĺžky N. Elementy v navrhovanej MC-CDMA musia byť vysielané v samostatných kanáloch oddelených napríklad modulačnou frekvenciou [4].

Príklad

Nech počiatočná matica $\mathbf{A}$ je Walsh-Hadamard (WH) matica rádu $N = 4$. Potom je možné vytvoriť optimálny CCC kód v krokoch $(n = 2)$ nasledujúcim spôsobom. Nech je východisková WH matica rádu $N = 4$:

$$\mathbf{A}_0^{(0)} = \begin{bmatrix} + & + & + & + \\ + & - & + & - \\ + & + & - & - \\ + & - & - & + \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_U^{(0)} \\ \mathbf{S}_L^{(0)} \end{bmatrix} \tag{12}$$

Potom podľa rozdelenia počiatočnej matice na hornú $\mathbf{S}_U^{(0)}$ a dolnú $\mathbf{S}_L^{(0)}$ podmnožinu dostaneme:

$$\mathbf{S}_U^{(0)} = \begin{bmatrix} + & + & + & + \\ + & - & + & - \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\mathbf{S}_L^{(0)} = \begin{bmatrix} + & + & - & - \\ + & - & - & + \end{bmatrix} \tag{14}$$

Druhú signatúru získame zámenou týchto dvoch podmnožín (prvý krok):

$$\mathbf{A}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_L^{(0)} \\ \mathbf{S}_U^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} + & + & - & - \\ + & - & - & + \\ + & + & + & + \\ + & - & + & - \end{bmatrix} \tag{15}$$

Pre vytvorenie tretej signatúry je potrebné každú podmnožinu (hornú $\mathbf{S}_U^{(0)}$ a dolnú $\mathbf{S}_L^{(0)}$) opäť rozdeliť na menšie podmnožiny a vzájomne vymeniť. $\mathbf{S}_U^{(0)}$ sa rozdelí na hornú $\mathbf{S}_{UU}^{(1)}$, a dolnú $\mathbf{S}_{UL}^{(1)}$ podmnožinu:

$$\mathbf{S}_U^{(0)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{UU}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{UL}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{16}$$

a po vzájomnej výmene:

$$\mathbf{S}_U^{(2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{UL}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{UU}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{17}$$

Obdobne sa $\mathbf{S}_L^{(0)}$ sa rozdelí na hornú $\mathbf{S}_{LU}^{(1)}$, a dolnú $\mathbf{S}_{LL}^{(1)}$ podmnožinu:

$$\mathbf{S}_L^{(0)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{LU}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{LL}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{18}$$

a po vzájomnej výmene:

$$\mathbf{S}_L^{(2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{LL}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{LU}^{(0)} \end{bmatrix} \tag{19}$$

a po druhom kroku:

$$\mathbf{A}_1^{(2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{UL}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{UU}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{LL}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{LU}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} + & - & + & - \\ + & + & + & + \\ + & - & - & + \\ + & + & - & - \end{bmatrix} \tag{20}$$

a posledná signatúra:

$$\mathbf{A}_3^{(2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{LL}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{LU}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{UL}^{(0)} \\ \mathbf{S}_{UU}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} + & - & - & + \\ + & + & - & - \\ + & - & + & - \\ + & + & + & + \end{bmatrix} \tag{21}$$

Po dvoch krokoch sme dostali nasledovný optimálny CCC kód, ktorý je po jednotlivých signatúrach rozpísaný nasledovne:
Prvá signatúra:

$$\mathbf{A}_0^{(2)} = \begin{bmatrix} + & + & + & + \\ + & - & + & - \\ + & + & - & - \\ + & - & - & + \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \tag{22}$$

druhá signatúra:

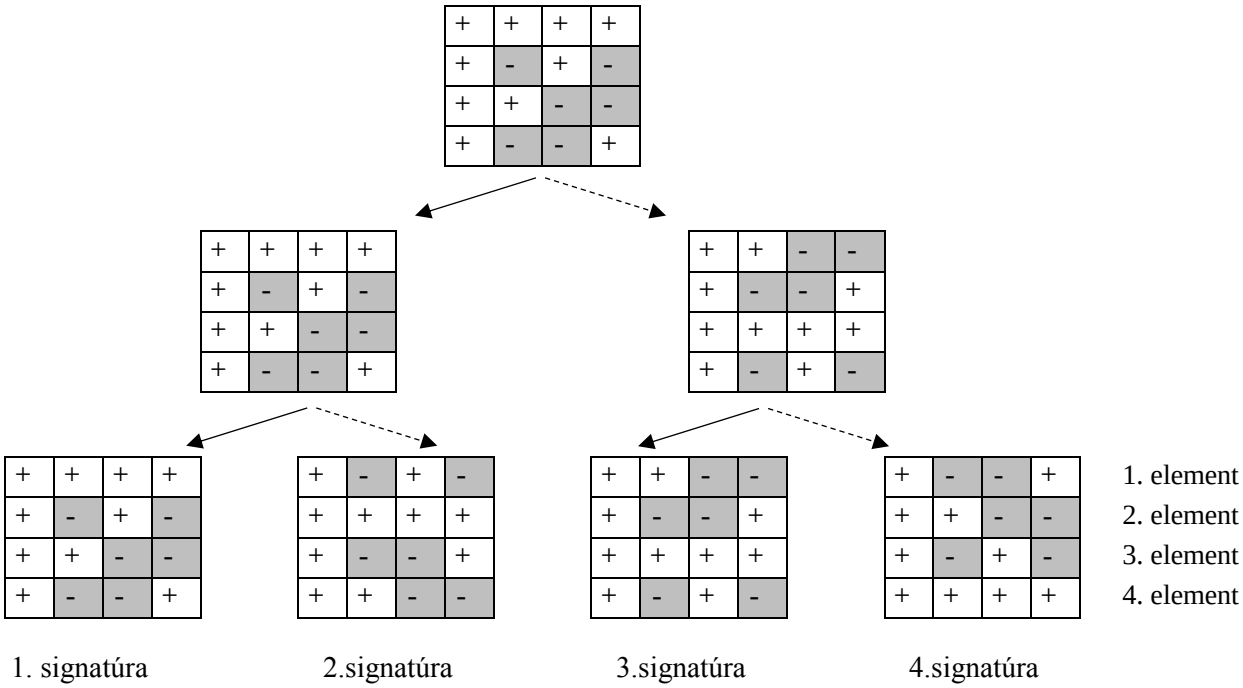
$$\mathbf{A}_1^{(2)} = \begin{bmatrix} + & - & + & - \\ + & + & + & + \\ + & - & - & + \\ + & + & - & - \end{bmatrix} \tag{23}$$

tretia signatúra:

$$\mathbf{A}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} + & + & - & - \\ + & - & - & + \\ + & + & + & + \\ + & - & + & - \end{bmatrix} \tag{24}$$

a posledná štvrtá signatúra:

$$\mathbf{A}_3^{(2)} = \begin{bmatrix} + & - & - & + \\ + & + & - & - \\ + & - & + & - \\ + & + & + & + \end{bmatrix} \tag{25}$$



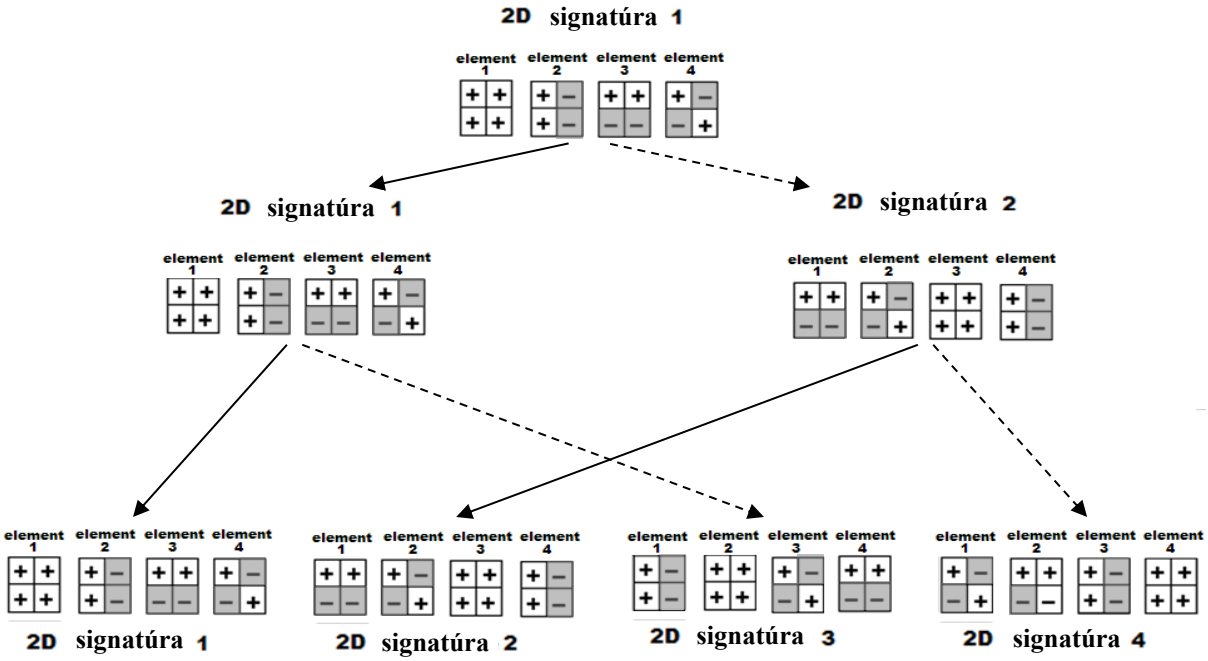
Obr. 6 Grafické zobrazenie príkladu konštrukcie 1D-CCC

5.2 Návrh konštrukčnej metódy pre dvojrozmerné signatúry

Navrhnutá metóda je platná aj pre dvojrozmerné (2D) signatúry. V tomto prípade je potrebné zameniť riadky za matice, nakoľko v 2D priestore predstavujú elementy matice a nie riadkové vektory. Na úvod algoritmu je potrebné vytvoriť jednu 2D-signatúru, na ktorú sa následne aplikuje vyššie opísaný postup. Túto signatúru je možné zostrojiť podľa algoritmu [43]. Je potrebné zdôrazniť, že navrhnutá metóda potrebuje len jednu signatúru a teda na tvorbu 2D-CCC stačí len jedna signatúra predgenerovaného 1D-CCC. Ostatné signatúry sa následne vytvoria aplikovaním navrhnutej metódy z vygenerovanej prvej signatúry 2D-CCC. Demonštrácia uvedeného postupu je znázornená na nasledujúcom príklade.

Príklad

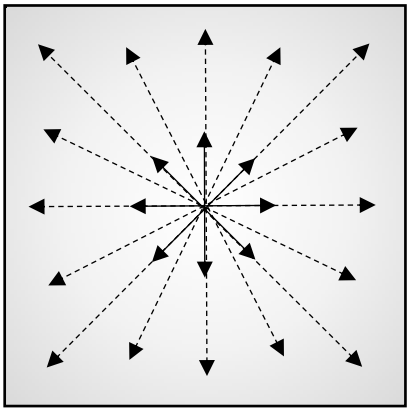
Vychádzajúc z 2D-CCC signatúry (vrchol stromu) a aplikovaním navrhnutej metódy je možné získať ostatné 2D signatúry a vytvoriť tak príslušný optimálny 2D-CCC kód. Pre $N = 4$ bude proces generovania zvyšných 3 signatúr prebiehať v 2 krokoch ($n = \log_2 N = \log_2 4 = 2$). Tento proces je zobrazený na nasledujúcom obrázku.



Obr. 7 Vygenerovanie ostatných 2D signatúr z prvej signatúry navrhnutou metódou

5.3 Opis navrhnutej konštrukčnej metódy v dvojrozmernom priestore

Novú metódu je možné vysvetliť na základe doteraz nespozorovaného aspektu centrosymetrickosti, pomocou stredovej symetrie, t.j. symetrie podľa stredu. Umožňuje v súbore optimálneho CCC vytvoriť rovnicu na generovanie ľubovoľnej signatúry v poradí.



Obr. 8 Symbolické znázornenie centrosymetrickej matice (matica symetrická voči stredu).

Na menších optimálnych CCC je centrosymetrické usporiadanie málo viditeľné, no s narastajúcim počtom je táto centrálna symetrickosť ľahšie spozorovateľná (Tab. 2). Teoreticky je možné po vytvorení prvej signatúry za pomoci centrosymetrickej matice bez akéhokoľvek algoritmu ihneď získať ľubovoľnú signatúru z príslušného súboru daného CCC kódu. Centrosymetrickosť usporiadania elementov je charakteristická aj pre jednorozmerný, aj pre dvojrozmerný priestor.

Tab. 2 Symbolické znázornenie usporiadania elementov v signatúrach optimálneho (8,8,8)-CCC

	signatúra							
element	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
e_1	1	2	3	4	5	6	7	8
e_2	2	1	4	3	6	5	8	7
e_3	3	4	1	2	7	8	5	6
e_4	4	3	2	1	8	7	6	5
e_5	5	6	7	8	1	2	3	4
e_6	6	5	8	7	2	1	4	3
e_7	7	8	5	6	3	4	1	2
e_8	8	7	6	5	4	3	2	1

5.3.1 Analýza indexov

Vychádzajúc z centrálnej symetrickosti optimálnych CCC, je možné hľadať súvis medzi zmenou indexu elementu a signatúry. Sledujúc zmeny elementov vo vzťahu k signatúram (Tab. 2), je možné dopracovať sa analýzou k vzťahu nasledujúcej rovnici, ktorá vyjadruje vzťah medzi indexami *i*-teho elementu a *j*-tej signatúry:

$$s_j = i + (j-1)\mathrm{mod}2(-1)^{\lfloor i-1 \rfloor} + \left\lfloor \frac{(j-1)}{2} \right\rfloor \mathrm{mod}2.\left(2.(-1)^{\left\lfloor \frac{\lfloor i-1 \rfloor}{2} \right\rfloor}\right) + \left\lfloor \frac{(j-1)}{4} \right\rfloor \mathrm{mod}2.\left(4.(-1)^{\left\lfloor \frac{\lfloor i-1 \rfloor}{4} \right\rfloor}\right) + \cdots +$$

$$\left\lfloor \frac{(j-1)}{\frac{N}{2}} \right\rfloor \mathrm{mod}2.\left(\frac{N}{2}.(-1)^{\left\lfloor \frac{i-1}{\frac{N}{2}} \right\rfloor}\right) = i + \left\lfloor \frac{(j-1)}{2^0} \right\rfloor \mathrm{mod}2.\left(2^0.(-1)^{\left\lfloor \frac{\lfloor i-1 \rfloor}{2^0} \right\rfloor}\right) + \left\lfloor \frac{(j-1)}{2^1} \right\rfloor \mathrm{mod}2.\left(2^1.(-1)^{\left\lfloor \frac{\lfloor i-1 \rfloor}{2^1} \right\rfloor}\right) +$$

$$+ \left\lfloor \frac{(j-1)}{2^2} \right\rfloor \mathrm{mod}2.\left(2^2.(-1)^{\left\lfloor \frac{\lfloor i-1 \rfloor}{2^2} \right\rfloor}\right) + \cdots + \left\lfloor \frac{(j-1)}{2^{n-1}} \right\rfloor \mathrm{mod}2.\left(2^{n-1}.(-1)^{\left\lfloor \frac{\lfloor i-1 \rfloor}{2^{n-1}} \right\rfloor}\right) \quad (26)$$

Podrobnú analýzu po jednotlivých krokoch možno nájsť v dizertačnej práci.

5.4 Výhody a nevýhody navrhnutej metódy

Výhody navrhnutej metódy v porovnaní so známymi konštrukčnými metódami možno zhrnúť nasledovne:

1) Metóda je platná v 1D aj v 2D-preistore pričom postup ostáva zachovaný.
2) Konštrukčný algoritmus prebieha v relatívne menšom počte krokov (v n krokoch, kde $n = \log_2 N$ pre počet elementov N).
3) Pri použití rozdielnych vstupov sú skonštruované súbory signatúr rozdielne.
4) Metóda nájde $N-1$ signatúr pre získanie optimálneho CCC z jednej existujúcej signatúry v najmenšom možnom počte krokov a umožňuje tak vyhnúť sa hľadaniu týchto kódov pomocou hrubej sily, pri ktorej výpočtová zložitosť niekoľkonásobne narastá s narastajúcim počtom elementov, signatúr ale aj s narastajúcou dĺžkou elementu.
5) Na konštrukciu je potrebná jedna α-unitárna matica typu WH, Golay-Hadamard (GH) alebo diskrétnej Fouriérovej transformácie (DFT) nakoľko tieto matice predstavujú jednu signatúru 1D-CCC.
6) Na generovanie 2D-CCC nie je potrebný kompletný predgenerovaný 1D-CCC, stačí jedna signatúra východzieho 1D-CCC. V kombinácii s predchádzajúcim aspektom umožňuje navrhnutá metóda vytvoriť 2D-CCC z α-unitárnych matíc uvedených v bode 5.
7) Metóda po každom kroku poskytuje použiteľné signatúry. Metódu je preto možné v ktoromkoľvek kroku prerušiť a pracovať so signatúrami z príslušného kroku.

8) Metóda vo svojej podstate nevyužíva násobenie, čo znižuje výpočtovú náročnosť pre komplexné čísla, ktoré sú potrebné ako v prípade, že ako východisková matica je použitá DFT.
9) Metóda je ľahko pochopiteľná a jednoduchá.
10) Matematická interpretácia v podobe rovnice umožňuje vytvoriť ktorúkoľvek signatúru v poradí zo súboru optimálneho CCC.

Navrhnutá metóda má však niekoľko obmedzení, ktorými sú predovšetkým nasledujúce aspekty:

1) Pre vstup metódy je potrebná jedna signatúra CCC.
2) Metóda neobsahuje dynamické predlžovanie dĺžky elementov.

5.5 Zhrnutie návrhu alternatívnej metódy konštrukcie CCC

Táto časť predstavuje alternatívnu metódu tvorby CCC kódov, ktorá je platná v 1D aj v 2D-priestore. Táto metóda predstavuje prínos k súčasnému stavu poznania v podobe doposiaľ chýbajúceho návodu a dopĺňa zistenie Tsenga a Liua, ktorí dokázali, že je možné vytvoriť novú signatúru z existujúcej signatúry. Ich práca však nehovorí o tom, ako a v koľkých krokoch. Navrhnutá metóda predstavuje tento chýbajúci návod. Na rozdiel od doteraz existujúcich metód platí v 1D aj v 2D bezo zmeny (vymieňajú sa elementy). Metóda má viacero výhod ale aj niekoľko obmedzení.

6 Hľadanie novej rovnice tvorby 2D-CCC z α-unitárnej matice

Táto časť sa zameriava na hľadanie novej rovnice pre tvorbu 2D-CCC, priamo z α-unitárnej matice, pretože doterajšie metódy si vyžadujú najprv vygenerovať 1D-CCC a následne je možné z neho vytvoriť 2D-CCC.

6.1 Hľadaná rovnica

Hľadá sa rovnica, ktorá by umožnila aby sa v generujúcom algoritme nemuseli násobiť vektory, ale samotné prvky (symboly, či súradnice) elementov. Využili sa na to doteraz zistené fakty (centrosymetrickosť, počiatočná α-unitárna matica). Nasledujúca rovnica spĺňa tieto požiadavky:

$$c_{2D}(r,s,e) = c_{1D}(s_1,e_1).c_{1D}(s_2,e_2) \tag{27}$$

kde r označuje riadok, s označuje stĺpec a e označuje element nového 2D-CCC elementu; s_1 označuje stĺpec a e_1 označuje element pôvodného 1D-CCC elementu; s_2 označuje stĺpec a e_2 označuje element pôvodného 1D-CCC elementu.
Pri tejto analýze bola využitá substitúcia, menovite elementy boli nahradené ich indexami. Analýza vychádza z CCC skonštruovaných podľa existujúcich konštrukčných metód. Analýza a jej výsledky sú demonštrované na nasledujúcom príklade.

Príklad
Nech je na vstupe nasledovná α-unitárna matica **H** rádu 2:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} + & + \\ + & - \end{bmatrix} \tag{28}$$

Potom prvá 1D-CCC signatúra je tvorená dvomi nasledujúcimi elementami:
Prvý element prvej signatúry:

$$\chi_1^{(1)} = [+ \quad +] \tag{29}$$

Druhý element prvej signatúry:

$$\chi_2^{(1)} = [+ \quad -] \tag{30}$$

Potom dosadením do rovnice konštrukčnej metódy [43] zjednodušenej pre vytvorenie len jednej signatúry:

$$\mathbf{c}_{n,i} = \chi_{[(n-1)\bmod N]+1} \times \chi_{v,i} \tag{31}$$

pre $N = 2$ dostaneme rovnice pre výpočet jednotlivých elementov nasledujúce rovnice:

pre prvý 2D element: $\mathbf{c}_{1,i} = \chi_{[(1-1)\bmod 2]+1} \times \chi_{v,i} = \chi_1 \times \chi_{1,i}$ (32)

s riadkami:
$\mathbf{c}_{1,1} = \chi_1 \times \chi_{1,1} = [+ +].[+] = [++]$ (33)
$\mathbf{c}_{1,2} = \chi_1 \times \chi_{1,2} = [+ +].[+] = [++]$ (34)

pre druhý 2D element:
$\mathbf{c}_{2,1} = \chi_2 \times \chi_{1,1} = [+ -].[+] = [+-]$ (35)
$\mathbf{c}_{2,2} = \chi_2 \times \chi_{1,2} = [+ -].[+] = [+-]$ (36)

pre tretí 2D element:
$\mathbf{c}_{3,1} = \chi_1 \times \chi_{2,1} = [+ +].[+] = [++]$ (37)
$\mathbf{c}_{3,2} = \chi_1 \times \chi_{2,2} = [+ +].[-] = [--]$ (38)

pre štvrtý 2D element:
$\mathbf{c}_{4,1} = \chi_2 \times \chi_{2,1} = [+ -].[+] = [+-]$ (39)

$$\mathbf{c}_{4,2} = \chi_2 \times \chi_{2,2} = [+-].[-] = [-+] \quad (40)$$

Vyjadrením rovníc pomocou indexov prvkov, ktoré sa podieľajú na násobení v rovniciach (33)-(40) je možné analyzovať vzťahy medzi indexami pre hľadanie detailnejšieho zápisu rovnice (27). Vychádzajúc z pôvodnej signatúry, je tak možné skonštatovať nasledujúce indexy vo vyššie uvedených rovniciach:

$$\mathbf{c}_{1,1,1} = \chi_{1,1} \cdot \chi_{1,1} \quad (41)$$

$$\mathbf{c}_{1,2,1} = \chi_{2,1} \cdot \chi_{1,1} \quad (42)$$

...

Nasledujúca tabuľka zobrazuje zmeny v indexoch vo vyššie uvedených rovniciach.

Tab. 3 Zmeny indexov pri výpočte prvej signatúry analyzovaného kódu.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
e	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
r	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
s	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
e_1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
s_1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
e_2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
s_2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

i označuje iteračný krok, r označuje riadok, s označuje stĺpec a e označuje element nového 2D-CCC elementu; s_1 označuje stĺpec a e_1 označuje element pôvodného prvého 1D-CCC elementu; s_2 označuje stĺpec a e_2 označuje element pôvodného druhého 1D-CCC elementu podieľajúceho sa na násobení.

Vzhľadom na to, že sa generuje N^2 elementov, kde každý element predstavuje rovnicu rádu N (t.j. maticu o rozmeroch $N \times N$), tak je pre vytvorenie prvej signatúry potrebných N^4 iterácií.

Každý 2D-CCC element predstavuje maticu o rozmeroch $N \times N$, tj. obsahuje *4* prvky v dvoch riadkoch po dvoch prvkoch. Preto premenná *e* nadobúda hodnoty *1,2,3,4* zatiaľ čo premenné r a s nadobúdajú len hodnoty *1,2*.

Porovnávajúc riadky premennej s a s_2 je možné skonštatovať, že sú identické, teda sa menia rovnakým pravidlom. Obdobne je možné túto skutočnosť skonštatovať pri premenných r a s_2.

Teda rovnicu (27) je možné zjednodušiť na:

$$c_{2D}(r, s, e) = c_{1D}(s, e_1).c_{1D}(r, e_2) \quad (43)$$

Potom je možné pre premenné i, r, s, e, e_1 a e_2 zapísať nasledujúce vzťahy:

$$i = 1,2,3, \dots N^4 \quad (44)$$

$$e = \left\lfloor \frac{i-1}{N^2} \right\rfloor + 1 \quad (45)$$

$$r = \left\lfloor \frac{i-1}{N} \right\rfloor \mathrm{mod} N + 1 \quad (46)$$

$$s = (i-1) \mathrm{mod} N + 1 \quad (47)$$

$$e_1 = \left\lfloor \frac{i-1}{N^3} \right\rfloor \mathrm{mod} N + 1 \quad (48)$$

$$e_2 = \left\lfloor \frac{i-1}{N^2} \right\rfloor \mathrm{mod} N + 1 \quad (49)$$

Na základe uvedených rovníc je možné generovať priamo 2D-CCC kód z jednej signatúry optimálneho 1D-CCC dĺžky N, kde prvú 1D-CCC signatúru predstavuje samotná α-unitárna matica jedného z nasledujúcich typov: WH, GH, DFT. Z nich je možné vytvoriť 2D-CCC signatúru bez potreby predgenerovania celého 1D-CCC. Následne je možné vytvoriť úplný súbor optimálnych CCC aplikovaním metódy z časti 5.

6.2 Zhrnutie hľadania novej rovnice tvorby 2D-CCC

V rámci tejto kapitoly bola nájdená nová rovnica generovania 2D-CCC priamo z α-unitárnej matice. Tento nový generujúci algoritmus predstavuje prínos k súčasnému poznaniu nakoľko doterajšie konštrukčné metódy boli postavené na násobení vektora prvkom a táto metóda násobí len jednotlivé prvky medzi sebou a tak vytvára 2D-CCC. Takýto rozklad umožní jednoduchšiu realizáciu pomocou fyzických generátorov.

7 Súbežné použitie signatúr s odlišnými rádmi elementov

Výsledky vedcov [2] ukázali, že je možné súčasne použiť aj signatúry s rôznymi dĺžkami elementov v 1D-priestore. Nebolo však publikované, či takéto použitie signatúr s rôznymi dĺžkami má nejaké obmedzenia. Rovnako nebolo doteraz skúmané, či je takýto prenos možný aj v 2D, kedy sú elementy tvorené maticami s rôznymi rádmi. Táto problematika predstavuje zatiaľ ešte nedostatočne prebádanú oblasť. Nakoľko sa vedci doteraz vo svojich konštrukciách zaoberali len skúmaním CCC kódov rovnakej dĺžky. Zároveň by súčasné použitie kódov rôznej dĺžky mohlo viesť k zvýšeniu maximálneho počtu súbežných prenosov. Z tohto dôvodu bola táto oblasť skúmaná v rámci dizertačnej práce. Výskum bol vykonaný pre 2D-CCC skonštruovaný podľa troch rozdielnych podkladových 1D-CCC z Tab. 1 a to konkrétne pomocou metód [2], [3] a [34].

V tejto kapitole premenná N označuje počet elementov v jednej signatúre vo východiskovom optimálnom 1D-CCC a zároveň je pomocou nej vyjadrená dĺžka elementu a počet signatúr úplného súboru signatúr optimálneho CCC.

7.1 Vzájomná korelácia kódov s parametrami ($N^2, N^2, N^2 \times N^2$)

Metódou uvedenou v [3] boli skonštruované východiskové 1D-CCC kódy s rôznymi dĺžkami parametrov (pre rôzne maximálne počty signatúr) a následne boli vytvorené 2D-CCC podľa [43]. Porovnané boli kódy s nasledujúcimi parametrami: (16,16,16x16) a (64,64,64x64), (4,4,4x4) a (16,16,16x16). Následne bola počítaná vzájomná korelácia pre uvedené dvojice 2D-CCC kódov a bolo zistených množstvo prípadov porušenia ideálnych vlastností vzájomnej korelácie. Zachytených bolo však aj niekoľko prípadov zachovania ideálnych vlastností. Tieto sú zachytené v Tab. 4 a Tab. 5. Prvý stĺpec tabuľky uvádza signatúry prvého kódu s väčším rádom elementu a druhá časť tabuľky uvádza zoznam signatúr druhého kódu s menším rádom elementu, pre ktoré bola potvrdená ideálna vzájomná korelácia s uvedenou signatúrou prvého kódu (s nulovými výslednými hodnotami pre všetky možné posuvy).

Z výsledkov možno vyčítať, že nie je možné použiť prvú signatúru prvého 2D-CCC kódu (64,64,64x64) spolu s prvou, piatou, deviatou a trinástou signatúrou druhého kódu. To znamená, že je potrebné vylúčiť každú štvrtú signatúru druhého kódu začínajúc prvou signatúrou. Toto pravidlo rovnako platí pre druhú signatúru prvého kódu. Treba vylúčiť každú štvrtú signatúru druhého kódu začínajúc vylúčením druhej signatúry, t.j. druhú, šiestu, desiatu a štrnástu signatúru druhého kódu. Toto pravidlo sa opakuje pre každú štvrtú signatúru prvého kódu a z tohto dôvodu je tabuľka skrátená.

Z analýzy údajov v Tab. 5 možno vyčítať, že každú signatúru prvého kódu možno použiť výlučne s dvomi signatúrami druhého kódu.

Tab. 4 Prehľad vzájomnej korelácie pre (64,64,64x64) a (16,16,16x16)

Signatúra 1. kódu	Signatúry 2. kódu s ideálnou vzájomnou koreláciou											
1	2	3	4	6	7	8	10	11	12	14	15	16
2	1	3	4	5	7	8	9	11	12	13	15	16
3	1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16
4	1	2	3	5	6	7	9	10	11	13	14	15
5	2	3	4	6	7	8	10	11	12	14	15	16
6	1	3	4	5	7	8	9	11	12	13	15	16
7	1	2	4	5	6	8	9	10	12	13	14	16
8	1	2	3	5	6	7	9	10	11	13	14	15
…	…											

Tab. 5 Prehľad vzájomnej korelácie 2D-CCC kódov pre (16,16,16x16) a (4,4,4x4)

Signatúra 1. kódu	Signatúry 2. kódu s ideálnou vzájomnou koreláciou	
1,3,5,7,9,11,13,15	2	4
2,4,6,8,10,12,14,16	1	3

7.2 Vzájomná korelácia kódov pre (N^2, N^2, 2N×2N)

Skonštruované boli východiskové 1D-CCC kódy [34] s rôznymi dĺžkami parametrov (pre rôzne maximálne počty signatúr) a následne boli vytvorené 2D-CCC podľa [43]. Porovnané boli kódy s nasledujúcimi parametrami: (16,16,8x8) a (4,4,4x4).

Tab. 6 Analýza 2D-CCC kódov (16,16,8×8) a 2D-CCC kódu (4,4,4×4)

Signatúra 1. kódu	Signatúry 2. kódu s ideálnou vzájomnou koreláciou
1,3,5,7,9,11,13,15	2, 4
2,4,6,8,10,12,14,16	1, 3

Analýzou získané poradie je viditeľné aj pri väčších rádoch elementu 2D-CCC kódov. Výsledky výskumu opäť potvrdili, že počet signatúr, ktoré možno navzájom súčasne použiť pri zachovaní ideálnych vlastností vzájomnej korelácie medzi použitými signatúrami je nižší ako je počet signatúr kódu s vyšším rádom elementu.

7.3 Zhrnutie zistení o súbežnom použití signatúr s rôznymi dĺžkami elementov

1D-CCC kódy umožňujú použitie signatúr s elementami rôznych dĺžok so zachovaním ideálnych vlastností vzájomnej korelácie pre všetky možné posuvy za predpokladu, že tieto signatúry pochádzajú z rozdielnych konštrukčných vetiev (t.j. nemajú rovnakého predka, resp. nevznikli z rovnakého pôvodného elementu). Toto je možné dosiahnuť aj v 2D-CCC pre signatúry pozostávajúce z elementov s rozdielnym rádom. Túto skutočnosť potvrdil výskum urobený v dizertačnej práci hrubou silou prostredníctvom výpočtov vzájomnej korelácie rôznych kombinácií s rozličnými dĺžkami vybraných konštrukčných algoritmov. Analýzou bolo zistené, že ideálne vlastnosti vzájomnej korelácie sú zachované výlučne pri rozdielnych poradiach jednotlivých elementov v rámci signatúry. Zistenia rovnako ukazujú, že takéto použitie neumožňuje navýšiť maximálny počet signatúr, naopak, tento počet signatúr sa zníži a to na maximálny počet signatúr daný počtom signatúr s kratšou dĺžkou elementu (menším rádom elementu).

8 Súbežné použitie signatúr skonštruovaných rôznymi algoritmami

Neboli nájdené publikácie týkajúce sa zisťovania vzájomnej korelácie medzi signatúrami skonštruovanými podľa rozličných konštrukčných algoritmov. Dizertačná práca sa preto zaoberá otázkou, či je takéto súčasné použitie vôbec možné. V pozitívnom prípade by bolo možné vytvoriť systémy používajúce naraz viaceré typy kódov súčasne a mohol by sa zvýšiť maximálny počet súčasne komunikujúcich používateľov. Pri skúmaní tejto oblasti bol zahrnutý aj aspekt preusporiadania elementov vzhľadom na to, že poradie elementov vplýva na koreláciu. Nakoľko sa jednalo o rôzne konštrukčné metódy, tak výsledné signatúry môžu mať elementy navzájom inak preusporiadané. Tento aspekt sa však zaslúžil o vysokú výpočtovú zložitosť analýzy tejto problematiky.
V tejto kapitole premenná *N* označuje počet elementov v jednej signatúre vo východiskovom optimálnom 1D-CCC a zároveň je pomocou nej vyjadrená dĺžka elementu vo vzťahu k počtom elementov jednej signatúry.

8.1 Vzájomná korelácia pre (N^2, N^2, N^2xN^2) a (N^2, N^2, 2N×2N)

Analýza zahŕňala kontrolu kombinácií (N^2, N^2, N^2xN^2) a (N^2, N^2, 2N×2N) typov CCC a výpočet vzájomnej korelácie medzi príslušnými kódmi. Východiskové 1D-CCC kódy boli skonštruované podľa [3] a [34] a následne podľa [43] boli vytvorené 2D-CCC. Na analýzu bola použitá hrubá sila a skúmali sa všetky možné kombinácie elementov (čo do poradia).
Zistenia ukázali, že je možné súbežné použitie signatúr, no s výraznými obmedzeniami. Signatúry týchto rôznych kódov zachovávajú vlastnosti ideálnej vzájomnej korelácie len v obmedzených počtoch. Zároveň boli identifikované usporiadania elementov, pre ktoré je zachovaná ideálna vzájomná korelácia. Výsledky sú demonštrované na kódoch (16,16,16x16) a (16,16,8x8). Nasledujúca tabuľka obsahuje získané výsledky. Viac výsledkov je uvedených v dizertačnej práci.

Tab. 7 Signatúry kódov (16,16,16×16) a (16,16,8×8) so zachovanými vlastnosťami ideálnej vzájomnej korelácie s nasledujúcim usporiadaním elementov druhého kódu:
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
9 10 11 12 13 14 15 16 1 2 3 4 5 6 7 8
3 4 1 2 7 8 5 6 11 12 9 10 15 16 13 14

(16,16,16×16)	***(16,16,8×8)***
1, 3, 9, 11	2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16
2, 4, 10, 12	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16
5, 7, 13, 15	1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16
6, 8, 14, 16	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15

8.2 Vzájomná korelácia pre (N^2, N^2, N^2xN^2) a (N^2, N^2, N×N)

Skúmané boli kombinácie príslušných typov CCC, kde boli overované vlastnosti vzájomnej korelácie signatúr týchto kódov. Východiskové 1D-CCC kódy pre konštrukciu 2D-CCC podľa [43] boli skonštruované podľa [3] a [2]. Hrubou silou boli overované všetky kombinácie poradí elementov.
Zo zistení vyplýva, že súbežné použitie CCC kódov týchto dvoch typov nie je možné. Ani pri rôznych usporiadaniach elementov nebolo možné nájsť kombinácie, pre ktoré by bola zachovaná ideálna vzájomná korelácia. Skúmané boli rozličné kombinácie s rozličnými počtami elementov. Podrobnejšie informácie možno nájsť v dizertačnej práci.

8.3 Vzájomná korelácia pre (N^2, N^2, 2Nx2N) a (N^2, N^2, N×N)

Výsledky výskumu hľadania kombinácií kódov so zachovanými ideálnymi vlastnosťami vzájomnej korelácie medzi príslušnými 2D-CCC skonštruovaných podľa [43] s podkladovými 1D-CCC [34] a [2] ukázali, že súbežné použitie je možné obdobne ako to bolo v prípade 2D-CCC kódov (N^2, N^2, N^2xN^2) a (N^2, N^2, N×N). Inými slovami, súbežné použitie je možné len s výraznými obmedzeniami. Signatúry týchto rôznych kódov zachovávajú len v obmedzených počtoch vlastnosti ideálnej vzájomnej korelácie. Výsledky výskumu identifikovali usporiadania elementov, pre ktoré je zachovaná ideálna vzájomná korelácia. Príklad výsledkov výskumu je v nasledujúcej tabuľke. Viac informácií je uvedených v dizertačnej práci.

Tab. 8 Prvý 2D-CCC kód typu (16,16,8×8) a druhý 2D-CCC kód typu (16,16,4×4) s nasledujúcimi usporiadaniami elementov:
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
5 6 7 8 1 2 3 4 13 14 15 16 9 10 11 12
2 1 4 3 6 5 8 7 10 9 12 11 14 13 16 15
6 5 8 7 2 1 4 3 14 13 16 15 10 9 12 11

Signatúra 1. kódu	Signatúry 2. kódu s ideálnou vzájomnou koreláciou
1, 2, 5, 6	3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
3, 4, 7, 8,	1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
9, 10, 13, 14	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 15, 16
11, 12, 15, 16	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14

8.4 Zhrnutie výsledkov výskumu o súbežnom použití kódov pochádzajúcich z rôznych konštrukčných algoritmov

Výskum bol zameraný na skúmanie možnosti súbežného použitia CCC kódov pochádzajúcich z rôznych konštrukčných algoritmov. Výsledky ukázali, že takéto súbežné použitie je pri niektorých algoritmoch možné a pri niektorých nie. Príslušné kapitoly podrobnejšie opisujú, za akých podmienok a v ktorých prípadoch je takého súbežné použitie možné. Isté však ostáva, že takéto súbežné použitie znižuje maximálny počet signatúr.

9 Súbežné použitie jedno- a dvojrozmerných signatúr

V literatúre neboli nájdené výsledky týkajúce sa zisťovania vzájomnej korelácie medzi signatúrami 1D- a 2D-CCC. Výskum v rámci dizertačnej práce bol preto zameraný aj na túto problematiku. Takéto možnosti by mohli umožniť nové návrhy architektúry alebo zvýšiť maximálny počet signatúr. Pri skúmaní tejto oblasti bol, obdobne ako v predošlom prípade, zahrnutý aj aspekt preusporiadania elementov. V tejto kapitole premenná *N* označuje počet elementov v jednej signatúre vo východiskovom optimálnom 1D-CCC a zároveň je pomocou nej vyjadrená dĺžka elementu vo vzťahu k počtom elementov jednej signatúry.

9.1 Vzájomná korelácia pre (N, N, N^2) a (N^2, N^2, N^2×N^2)

1D-CCC boli skonštruované pomocou algoritmu [3] generujúceho 1D-CCC kódy typu (N,N,N^2) a následne bola pre konštrukciu 2D-CCC použitá metóda [43] pre vytvorenie kódov typu (N^2, N^2,N^2xN^2). Použitím hrubej sily boli skúmané vlastnosti vzájomnej korelácie aj pri rôznych preusporiadaniach elementov príslušných kódov. Výsledky výskumu potvrdili možnosť súbežného použitia takýchto 1D- a 2D-CCC kódov pri dosiahnutí ideálnych vlastností vzájomnej korelácie. Príklad výsledkov výskumu je uvedený v nasledujúcej tabuľke. Viac výsledkov výskumu je uvedených v dizertačnej práci.

Tab. 9 Kombinácie 1D-CCC (2,2,4) a 2D-CCC (4,4,4x4)

2D-CCC (4,4,4x4)		1D-CCC (2,2,4)	
Signatúra	Elementy	Signatúra	Elementy
2	1, 2	1	1, 2
2	3, 4	1	1, 2
4	1, 2	1	1, 2
4	3, 4	1	1, 2
1	1, 2	2	1, 2
1	3, 4	2	1, 2
3	1, 2	2	1, 2
3	3, 4	2	1, 2

9.2 Vzájomná korelácia kódov pre (N, N, 2N) a (N^2, N^2, 2N×2N)

Súčasné použitie 1D-CCC typu (N, N, 2N)[34] a 2D-CCC typu (N^2, N^2, 2Nx2N)[43] nie je možné ani pri rozdielnych preusporiadaniach. Nebolo možné detegovať žiaden prípad zachovania ideálnych vlastností vzájomnej korelácie.

9.3 Vzájomná korelácia pre (N, N, N) a (N^2, N^2, N×N)

Pre konštrukciu 1D-CCC kódov boli použité konštrukčné algoritmy [2] generujúce 1D-CCC kódy typu (N,N,N) a následne 2D-CCC[43]. Skúmané boli vlastnosti vzájomnej korelácie použitím hrubej sily vrátane skúmania rôznych preusporiadaní elementov. Výpočty ukázali, že je možné dosiahnuť ideálne vlastnosti vzájomnej korelácie pri obrátenom poradí elementov. Príklad výsledkov výskumu je uvedený v nasledujúcej tabuľke. Viac výsledkov výskumu je uvedených v dizertačnej práci.

Tab. 10 Kombinácie 1D-CCC (2,2,2) a 2D-CCC (4,4,2x2)

2D-CCC (4,4,2x2)		1D-CCC (2,2,2)	
Signatúra	Elementy	Signatúra	Elementy
1	2, 1	1	1, 2
1	4, 3	1	1, 2
2	1, 2	1	1, 2
2	3, 4	1	1, 2
3	2, 1	1	1, 2
3	4, 3	1	1, 2
4	1, 2	1	1, 2
4	3, 4	1	1, 2
1	1, 2	2	1, 2
1	3, 4	2	1, 2
2	2, 1	2	1, 2
2	4, 3	2	1, 2
3	1, 2	2	1, 2
3	3, 4	2	1, 2
4	2, 1	2	1, 2
4	4, 3	2	1, 2

9.4 Vzájomná korelácia pre (N,N,N) a (N^2,N^2,N^2×N^2), (N,N,N^2) a (N^2,N^2,N×N)

Pre kombinácie 2D-CCC (N,N,NxN) a 1D-CCC (N,N,N^2) ako aj pre kombinácie 2D-CCC (N,N,N^2xN^2) a 1D-CCC (N,N,N) nebolo možné nájsť žiadne vyhovujúce kombinácie so zachovanými vlastnosťami ideálnej vzájomnej korelácie. Kombinácie boli analyzované až do počtu signatúr rovného 16. Vo všetkých prípadoch bolo možné zistiť obdobné nenulové výsledky.

9.5 Zhrnutie súbežného použitia 1D- a 2D-CCC

Výskum v rámci dizertačnej práce bol zameraný na skúmanie aspektu súbežného použitia 1D- a 2D-CCC signatúr a skúmaniu ich vzájomnej korelácie. Výsledky výskumu identifikovali kombinácie konštrukčných algoritmov, pre ktoré je takéto súbežné použitie signatúr možné a zároveň vylúčili kombinácie konštrukčných algoritmov, pre ktoré takéto použitie nie je možné. Súbežné použitie 1D-CCC kódov a 2D-CCC kódov v 2D priestore časovo-frekvenčnej domény pre MC-CDMA môže viesť k vyššej efektivite využitia kanála bez vzájomnej interferencie prenosových signálov a k novým návrhom MC-CDMA architektúr. Môže sa tak využiť výhod príslušných kódov. Konkrétne, 2D-CCC kódy disponujú diverzitou a 1D-CCC kódy vyžadujú menší počet kanálov na samotný prenos.

10 Korelačné vlastnosti 2D-QOCCC

Skúmaniu QOCCC sa venuje len niekoľko publikácií [39], [43] napriek tomu, že tieto kódy umožňujú súčasný prenos vyššieho počtu účastníkov súčasne pri nižšom počte kanálov potrebných na prenos výmenou za porušenie ideálnosti korelačných vlastností v porovnaní s CCC. Výskum dizertačnej práce skúma doteraz známe QOCCC a zmenu ich korelačných vlastností, ktorá sa mení v závislosti od východiskového 1D-CCC, z ktorého boli vytvorené.

V tejto kapitole premenná *N* označuje počet elementov v jednej signatúre vo východiskovom optimálnom 1D-CCC a zároveň je pomocou nej vyjadrená dĺžka elementu vo vzťahu k počtom elementov jednej signatúry a celkový počet signatúr vygenerovaného kódu.

10.1 Korelačné vlastnosti QOCCC v závislosti od východiskového 1D-CCC

QOCCC skonštruované z východiskových 1D-CCC konštrukčných algoritmov [3], [34] a [2] umožňujú konštrukciu QOCCC s rôznymi parametrami, ktoré sa líšia aj v korelačných vlastnostiach. Výsledky porovnania sú uvedené v nasledujúcej tabuľke. Parametre kódu sú uvedené v nasledujúcom poradí: počet signatúr, počet elementov, rozmery elementu.

Tab. 11 Porovnanie QOCCC skonštruovaných z rôznych východiskových 1D-CCC

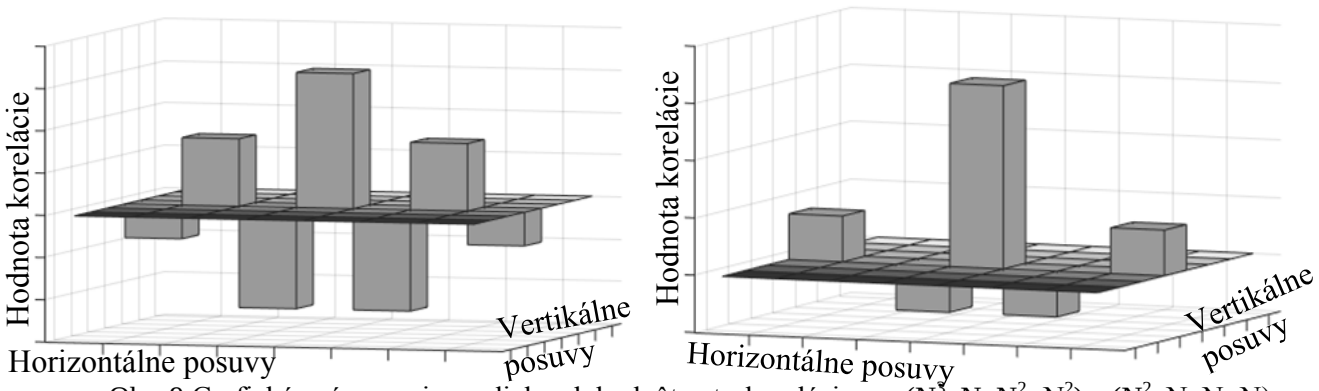
Parametre východiskového 1D-CCC [zdroj]	Parametre vytvoreného QOCCC [zdroj]
(N, N, N^2) [3]	(N^3, N, $N^2 \times N^2$) [39], [43]
(N, N, 2N) [34]	($2N^2$, N, 2N×2N) [43]
(N, N, N) [2]	(N^2, N, N×N) [43]

Počet signatúr vygenerovaného 2D-QOCCC sa mení podľa nasledujúceho vzťahu:

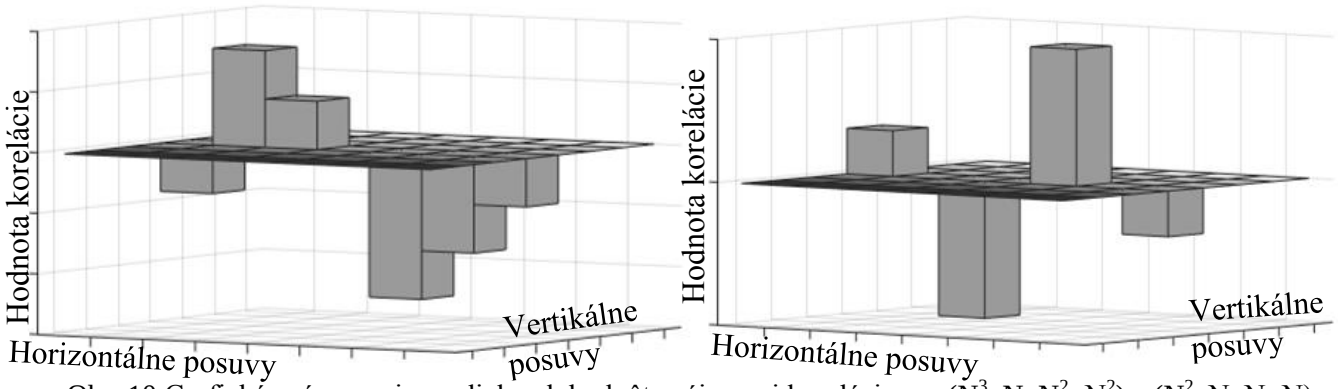
$$počet\ signatúr QOCCC = \frac{dĺžka\ elementu\ 1D}{počet\ elementov\ 1D}.počet\ signatúr\ 1D^2 = \frac{L_{1D}}{N_{1D}}.M_{1D}^2 \qquad (50)$$

Korelačné vlastnosti sú narušené pre všetky 3 uvedené typy QOCCC pre nultý horizontálny posuv rôzne, v závislosti od typu kódu. Pre (N^2, N, N×N)-QOCCC sú nenulové všetky vertikálne posuvy a vzájomná korelačná funkcia nadobúda hodnoty <-0.75max; 0.75max> (max označuje maximálnu hodnotu auto-korelačnej funkcie). Pre (N^3, N, $N^2 \times N^2$)-QOCCC sú nenulové len niektoré vertikálne posuny. Vzájomná korelačná funkcia nadobúda hodnoty <-0.5max; 0.5max>.

K porušeniu korelačných vlastností dochádza aj pri auto-korelačnej funkcii. (N^2, N, N×N)-QOCCC má nenulové všetky vertikálne posuvy a auto-korelačná funkcia nadobúda hodnoty <-0.75max; max>. Pre (N^3, N, $N^2 \times N^2$)-QOCCC sú nenulové len niektoré vertikálne posuvy. Vzájomná korelačná funkcia nadobúda hodnoty <-0.33max; max>. Obdobne pre ($2N^2$, N, 2N×2N)-QOCCC.



Obr. 9 Grafické znázornenie rozdielnych hodnôt auto-korelácie pre (N^3, N, $N^2 \times N^2$) a (N^2, N, N×N)



Obr. 10 Grafické znázornenie rozdielnych hodnôt vzájomnej korelácie pre (N^3, N, $N^2 \times N^2$) a (N^2, N, N×N)

10.2 Zhrnutie analýzy korelačných vlastností QOCCC

QOCCC umožňujú generovanie vyššieho počtu signatúr s nižším počtom elementov v porovnaní s 2D-CCC. Napriek týmto zaujímavým vlastnostiam sa skúmaniu QOCCC venuje len niekoľko publikácií [39] a [43]. Vzhľadom na uvedené vlastnosti bola výskumu QOCCC v rámci dizertačnej práce venovaná pozornosť. Výskum QOCCC poukázal na zmenu vlastností pre QOCCC skonštruovaných z východiskových 1D-CCC s kratšou dĺžkou elementu. S kratšou dĺžkou východiskového elementu je možné vygenerovať menší počet signatúr výsledného QOCCC a dochádza k väčšiemu narušeniu korelačných vlastností. Takéto narušenie korelačných vlastností (vzájomná korelačná funkcia je porušená pre všetky vertikálne posuvy nultého horizontálneho posuvu a nadobúda od -0.75 do 0.75 maximálnej hodnoty auto-korelačnej funkcie) by si vyžadovala veľmi presnú detekciu na strane prijímača. Z porovnania korelačných vlastností QOCCC vyplýva prednosť použitia pôvodného východiskového 1D-CCC, ktorý umožňuje generovanie QOCCC s vyšším počtom signatúr a menším narušením korelačných vlastností.

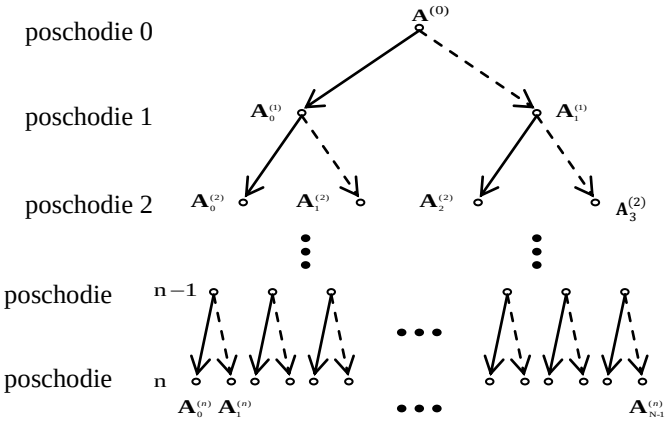
11 Hľadanie nových 2D-QOCCC kódov

QOCCC predstavujú nový typ kódov, ktoré je možné vytvoriť z CCC. Samotné CCC umožňujú skonštruovať obmedzený počet signatúr pre súčasný prenos účastníkov. Vo všeobecnosti CCC neumožňuje skonštruovať vyšší počet signatúr ako je samotný počet kanálov potrebný na prenos elementov. QOCCC predstavujú možný spôsob navýšenia počtu signatúr výmenou za čiastočnú stratu ideálnosti celkových korelačných vlastností a zároveň znížiť počet kanálov potrebných pre prenos v porovnaní s 2D-CCC. Z uvedeného dôvodu bola tejto oblasti venovaná pozornosť v dizertačnej práci pri hľadaní nových QOCCC.

V tejto kapitole premenná *N* označuje počet elementov v jednej signatúre vo východiskovom optimálnom 1D-CCC a zároveň je pomocou nej vyjadrená dĺžka elementu vo vzťahu k počtom elementov jednej signatúry a celkový počet signatúr vygenerovaného kódu.

11.1 Návrh nového typu 2D-QOCCC

Nové QOCCC je možné vytvoriť z 2D-CCC aplikovaním postupu, ktorý je analogický k navrhnutému spôsobu tvorby 2D-CCC v kapitole 5 s tým rozdielom, že sa postup aplikuje na samotné elementy signatúry. Všetky elementy signatúry sú spracovávané paralelne. Príklad je uvedený na nasledujúcom obrázku Obr. 12. Pre pohodlie čitateľa je postup opätovne v skratke uvedený:



Obr. 11 Binárny strom ilustrujúci konštrukciu (zmenšený Obr. 5).

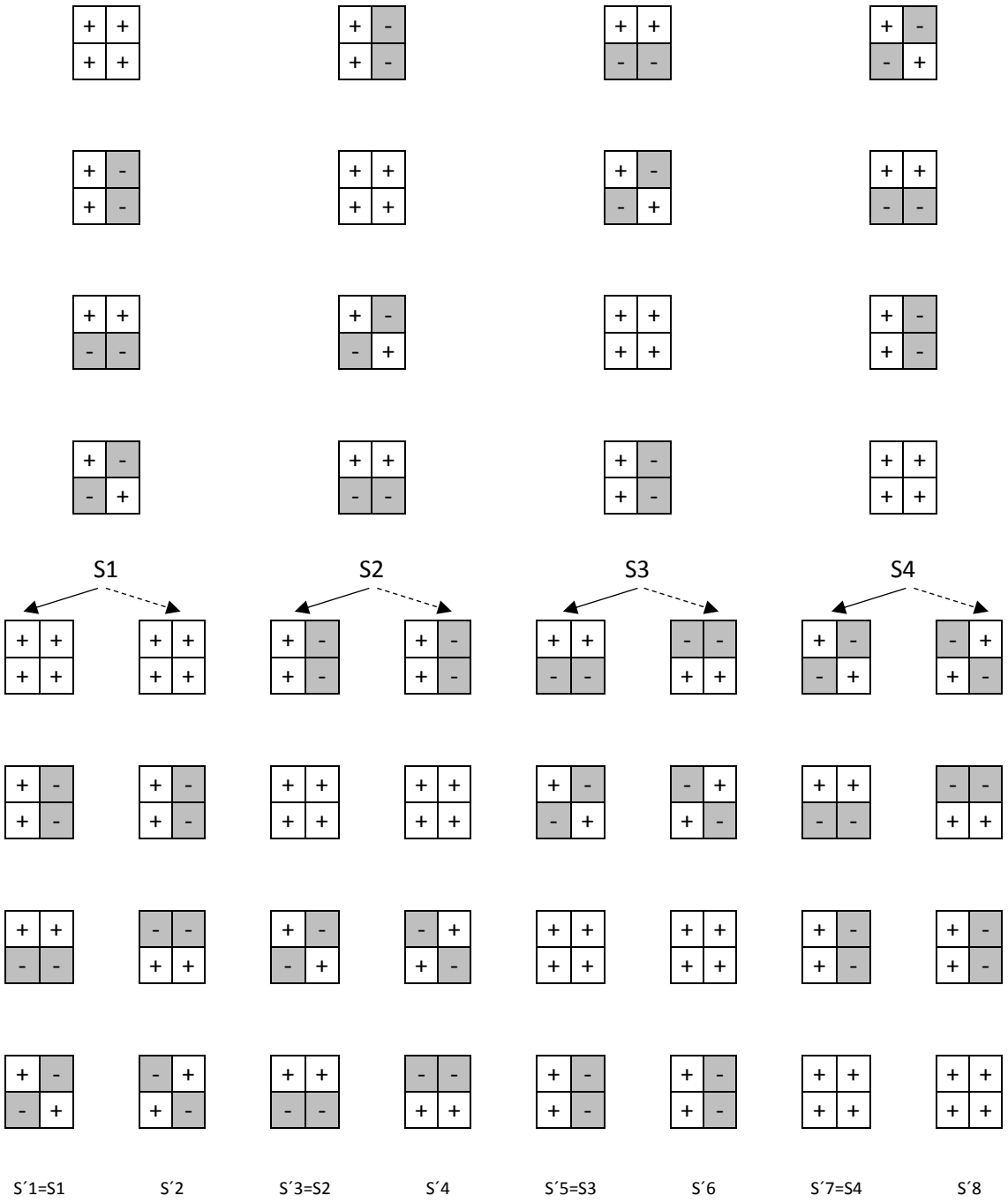
Uzly na príslušnom poschodí zodpovedajú jednotlivým elementom (maticiam), kde tieto elementy boli vytvorené z predchádzajúceho poschodia podľa nasledujúcich pravidiel:

1) Spojenie poschodí plnou čiarou znázorňuje kopírovanie z predchádzajúceho poschodia bez zmeny.
2) Spojenie tvorené prerušovanou čiarou popisuje, že element v nasledujúcom poschodí je vytvorený špecifickou vzájomnou výmenou podmnožín riadkov elementu z prechádzajúceho poschodia. Špecifická vzájomná výmena vymieňa súvisiace podmnožiny riadkov. Bližší popis je uvedený v dizertačnej práci.

V hornej polovici obrázka Obr. 12 je znázornený (N^2,N^2,$N\times N$)-2D-CCC pre $N=2$. Aplikovaním uvedeného postupu na jednotlivé elementy získame ($2N^2$,N^2,$N\times N$)-2D-QOCCC, t.j. dvojnásobný počet signatúr v porovnaní s 2D-CCC.

Porovnaním s doterajšími QOCCC je možné konštatovať, že navrhnutý spôsob umožňuje zvýšiť počty signatúr oproti doterajším QOCCC pri nižších rozmeroch elementov a zároveň zachováva ideálne vlastnosti celkovej auto-korelácie, čo umožňuje jednoduchšiu detekciu príslušnej signatúry na strane prijímača. V porovnaní s doterajšími QOCCC však navyšujú počet elementov, t.j. počet kanálov potrebný

na prenos. V porovnaní s 2D-CCC umožňuje navrhnutý QOCCC prenos vyššieho počtu signatúr pri rovnakom počte kanálov, pri zachovaní ideálnej celkovej autokorelácie jednotlivých signatúr výmenou za porušenie ideálnej celkovej vzájomnej korelácie vo vertikálnych posuvoch nultého horizontálneho posuvu (obdobne ako pri doterajších QOCCC).



Obr. 12 Grafické znázornenie konštrukcie navrhnutého nového typu QOCCC

Parametre navrhnutého QOCCC sú: $(LM^2, N^2, L \times L)$-2D-QOCCC.
počet signatúr: LM^2
počet elementov: N^2
rozmery elementov: $L \times L$
kde M je počet signatúr, N je počet elementov a L je dĺžka elementu východiskového 1D-CCC.

Zachovanie ideálnej celkovej autokorelácie bolo overené hrubou silou. Nebolo detegované porušenie. Overenie ideálnych vlastností celkovej vzájomnej korelácie ukázalo porušenie ideálnosti vo vertikálnych posuvoch nultého horizontálneho posuvu. Obdobne ako pri doterajších QOCCC.

11.2 Zhrnutie zistení o navrhnutých QOCCC

Navrhnuté QOCCC umožňujú generovanie vyššieho počtu signatúr v porovnaní s 2D-CCC pri rovnakom východiskovom 1D-CCC výmenou za čiastočnú stratu ideálnosti celkovej vzájomnej korelácie vo vertikálnych posuvoch nultého horizontálneho posuvu.

V porovnaní s doterajšími QOCCC umožňujú navrhnuté QOCCC konštrukciu vyššieho počtu signatúr pri nižších rozmeroch elementov a zároveň zachovávajú ideálne vlastnosti celkovej autokorelácie. Pri navrhnutých QOCCC dochádza k porušeniu ideálnych vlastností celkovej vzájomnej korelácie obdobne ako pri doterajších QOCCC: vo vertikálnych posuvoch nultého horizontálneho posuvu. Vzhľadom na zachovanú ideálnu autokoreláciu pri navrhnutých QOCCC je ich detekcia na strane prijímača možná vo všetkých posuvoch: okrem nultého vertikálneho a nultého horizontálneho posuvu zároveň sú hodnoty autokorelácie nulové. Pri tomto jednom stave (bez posuvu) dosahuje autokorelácia maximálnu hodnotu. Hodnoty vzájomnej korelácie nedosahujú maximálnu hodnotu autokorelácie.

V porovnaní s doterajšími QOCCC dochádza k navýšeniu počtu kanálov pri navrhnutých QOCCC.

12 Stručný návrh možných uplatnení výsledkov práce

Dizertačná práca a výskum vykonaný v rámci doktorandského štúdia sa zameriaval na skúmanie viacerých oblastí, ktoré nebolo možné identifikovať vo výsledkoch výskumu v rámci súčasného stavu poznania v uvedenej oblasti. Výsledky výskumu predstavujú nové rovnice generovania CCC kódov v 1D aj v 2D, ktoré umožňujú generovanie kódov s doteraz známymi rozmermi elementov. Vďaka uvedeným rovniciam sa pri konštrukciách násobia samotné prvky a nie vektory. Okrem toho sú priamo aplikovateľné na α-unitárne matice. Porovnania s existujúcimi konštrukčnými metódami sú uvedené v príslušných kapitolách.

Výskumy v oblasti skúmania možnosti súbežného použitia signatúr s rozdielnymi rozmermi elementov alebo pochádzajúcich z rozdielnych konštrukčných algoritmov identifikujú kombinácie signatúr, pre ktoré je takéto použitie možné pričom zároveň informujú o obmedzeniach takéhoto použitia, ktoré je pri návrhoch systémov využívajúcich takéto usporiadanie dôležité zohľadniť.

Vytvorené prehľady môžu byť nápomocné pri oboznamovaní sa s oblasťou CCC kódov a pri skúmaní tejto oblasti. Výskum CCC kódov môže byť prospešný pre viaceré vedné odbory vzhľadom na široké využitie týchto kódov, kde výsledky výskumu môžu nájsť využitie.

Skoncipovaný automatizovaný systém môže napomôcť pri ďalších výskumoch pri simuláciách ako aj pri iných výskumoch zameraných na konštrukčné algoritmy CCC kódov. Rovnako daný systém môže byť využitý pre edukačné účely.

Výskum v rámci dizertačnej práce analyzoval korelačné vlastnosti existujúcich 2D-QOCCC a poukázal na nevýhody a výhody QOCCC skonštruovaných z rôznych východiskových 1D-CCC ako aj odporúčané používať 1D-CCC s dlhšími dĺžkami elementu na tvorbu QOCCC vzhľadom na zistenia z výskumu, ktoré sú v neprospech 1D-CCC s krátkou dĺžkou elementu: menší počet signatúr a porušenie ideálnych vlastností celkovej korelácie.

V rámci výskumu dizertačnej práce boli navrhnuté nové typy 2D-QOCCC, ktoré by bolo vhodné v ďalšom výskume preskúmať a ktoré vykazujú úplné zachovanie ideálnych auto-korelačných vlastností týchto kódov v porovnaní s doterajšími 2D-QOCCC. Zároveň navrhnuté kódy umožňujú generovanie vyššieho počtu signatúr pri menších dimenziách elementov. Na rozdiel od pôvodných QOCCC však navyšujú počet elementov.

Príspevky publikované v rámci doktorandského štúdia na ústave telekomunikácií FEI STU, ktoré dokumentujú dosiahnuté výsledky, boli prezentované na niekoľkých zahraničných konferenciách vrátane IEEE konferencií a zahrnuté do zborníkov, ktoré boli indexované v niekoľkých indexačných databázach (SCOPUS, IEEE Xplore, Web of Science, Google Scholar, a iné). Dokazuje to záujem o získané výsledky výskumu v rámci dizertačnej práce.

13 Záver

Dizertačná práca sa venovala výskumu v oblasti úplne komplementárnych kódov (CCC), ktoré našli široké uplatnenie vo viacerých vedných odboroch, pričom najširšie uplatnenie bolo zaznamenané v oblastí telekomunikácií. Tieto kódy disponujú jedinečnými ideálnymi vlastnosťami korelácie, ktoré upriamili pozornosť viacerých vedcov na ich skúmanie a ktorým sa aj v súčasnosti venuje pozornosť.
Výskum vykonaný v rámci doktorandského štúdia sa zameral aj na skúmanie niekoľkých aspektov, ktoré predstavovali neprebádanú oblasť.
V analytickej časti práce bol vytvorený stručný prehľad o CCC kódoch zahŕňajúci vybrané algoritmy generovania CCC, ktoré zároveň tvoria míľniky vo vývoji samotnej teórie v tejto oblasti. V rámci tejto práce bol vytvorený modulárny automatizovaný systém na tvorbu vybraných CCC kódov, ktorý bol zároveň použitý aj ako nástroj pri skúmaní ďalších aspektov výskumu predstavujúcich ciele dizertačnej práce. Vďaka tomu sa podarilo dosiahnuť nasledujúce prínosy k vedeckému poznaniu:

Bola navrhnutá nová alternatívna metóda tvorby optimálneho CCC, ktorá s jednou signatúrou na vstupe doplní súbor ostatných *N-1* signatúr zo súboru *N* signatúr optimálneho CCC. Táto navrhnutá metóda bola porovnaná s predchádzajúcimi metódami tvorby CCC kódov a boli zistené aj jej výhody a nevýhody, resp. obmedzenia.

Uskutočnený výskum odhalil centrosymetrické vlastnosti optimálnych CCC kódov a odkryl tak nové vzťahy, ktoré umožňujú generovať ľubovoľnú signatúru v poradí zo súboru optimálneho CCC z prvej signatúry a v spojení s novou formulovanou rovnicou tvorby 2D-CCC kódov umožňujú generovanie 2D-CCC kódov z α-unitárnej matice, čo nebolo doteraz možné prostredníctvom doterajších konštrukčných metód.

Výskum venovaný skúmaniu vzájomnej korelácie medzi signatúrami rovnakého konštrukčného algoritmu s rozličnými dĺžkami elementov (či rozmermi v prípade 2D-CCC) potvrdili, že je možné súčasne používať elementy rozdielnej dĺžky len ak pochádzajú z rozličných konštrukčných línií.

Výskum skúmajúci vzájomnú koreláciu medzi signatúrami pochádzajúcich z rozdielnych konštrukčných algoritmov potvrdil možnosť súbežného využitia signatúr skonštruovaných podľa rozličných algoritmov.
Výsledky výskumu v oblasti skúmania vlastností vzájomnej korelácie potvrdili dokonca možnosť súbežného použitia 1D-CCC a 2D-CCC kódov.

Posledná časť výskumu poukázala na rozdielne korelačné vlastnosti doterajších QOCCC závislé od východiskového 1D-CCC a viedla k návrhu nových 2D-QOCCC kódov. Tieto ponúkajú zachovanie ideálnych vlastností autokorelácie a vyšší počet signatúr pri kratšej dĺžke (resp. menšej dimenzii) elementu v porovnaní s doterajšími QOCCC.

Vykonaný výskum bol sčasti publikovaný na niekoľkých zahraničných konferenciách a vo vedeckých časopisoch, čo možno považovať za záujem odbornej verejnosti o dosiahnuté výsledky. Dosiahnuté výsledky výskumu možno využiť v ďalšom výskume a sú vhodné aj pre edukačné účely.

14 Podrobnejšia špecifikácia prínosu predloženej dizertačnej práce

Ciele dizertačnej práce boli zamerané na skúmanie neprebádaných aspektov a oblastí teórie CCC. Jednotlivé ciele boli rozpracované v samostatných kapitolách, kde jednotlivé kombinácie konštrukčných algoritmov bolo nevyhnutné skúmať samostatne. Výsledky zastúpené v autoreferáte sú uvedené v skrátenej, ilustračnej informatívnej forme. Ďalšie informácie ako aj ďalšie výsledky možno nájsť v samotnej dizertačnej práci.

Za pôvodné prínosy dizertačnej práce na základe súčasného stavu problematiky a získaných výsledkov možno považovať:

1. **Nájdenie alternatívneho spôsobu tvorby CCC** s najkratšou dĺžkou sekvencie a jej porovnanie s doterajšou konštrukčnou metódou [2] (kapitola 5).
   Táto metóda predstavuje prínos k súčasnému stavu poznania v podobe doposiaľ chýbajúceho praktického návodu konštrukcie a dopĺňa zistenie Tsenga a Liua, ktorý dokázali, že je možné vytvoriť novú signatúru z existujúcej signatúry. Ich práca však nehovorí o tom, ako a v koľkých krokoch. Navrhnutá metóda predstavuje tento chýbajúci návod. Na rozdiel od doteraz existujúcich metód platí v 1D aj v 2D bezo zmeny (vymieňajú sa pri nej elementy). Metóda má viacero výhod ale aj niekoľko obmedzení.

2. **Nájdenie novej rovnice umožňujúcej tvorbu 2D-CCC priamo z α-unitárnej matice** (kapitola 6).
   V rámci tejto kapitoly bola nájdená nová rovnica umožňujúca generovanie 2D-CCC priamo z α-unitárnej matice. Tento nový generujúci algoritmus predstavuje prínos k súčasnému poznaniu nakoľko doterajšie konštrukčné metódy boli postavené na násobení vektora prvkom a nová metóda násobí len jednotlivé prvky medzi sebou a tak vytvára 2D-CCC. Takýto rozklad umožňuje jednoduchšiu integráciu do fyzických generátorov.

3. **Zistenie, že je možné súbežné použitie signatúr s odlišnými rádmi elementov v 2D a špecifikácia platných obmedzení** (kapitola 7).
   1D-CCC kódy umožňujú použitie signatúr s elementami rôznych dĺžok so zachovaním ideálnych vlastností vzájomnej korelácie pre všetky možné posuvy za predpokladu, že tieto signatúry pochádzajú z rozdielnych konštrukčných vetiev. Toto je možné dosiahnuť aj v 2D-CCC pre signatúry pozostávajúcich z elementov s rozdielnym rádom. Túto skutočnosť potvrdil výskum hrubou silou prostredníctvom výpočtov vzájomnej korelácie rôznych kombinácií s rozličnými dĺžkami vybraných konštrukčných algoritmov. Bolo zistené, že ideálne vlastnosti vzájomnej korelácie sú zachované výlučne pri rozdielnych poradiach jednotlivých elementov v rámci signatúry. Výsledky rovnako ukazujú, že takéto použitie neumožňuje navýšiť maximálny počet signatúr, naopak, tento počet signatúr sa zníži a to na maximálny počet signatúr udaný počtom signatúr s kratšou dĺžkou elementu (menším rádom elementu).

4. **Zistenie, že je možné súbežné použitie signatúr skonštruovaných podľa rôznych generujúcich konštrukčných algoritmov** (kapitola 8).
   Výskum sa zameriaval na skúmanie možnosti súbežného použitia CCC kódov pochádzajúcich z rôznych konštrukčných algoritmov, nakoľko doteraz nebolo detegované skúmanie tejto oblasti v dostupnej literatúre. Ak by bolo možné ich súbežné použitie, tak by to mohlo viesť k zvýšeniu efektivity využitia kanála. Z tohto dôvodu bol tento aspekt skúmaný v rámci dizertačnej práce. Výsledky ukázali, že takéto súbežné použitie je pri niektorých signatúrach možný a pri niektorých nie. Príslušné kapitoly podrobnejšie opisujú, za akých podmienok a v ktorých prípadoch je takého súbežné použitie možné. Výsledky výskumu však ukazujú, že takéto súbežné použitie znižuje maximálny počet signatúr.

5. **Skúmanie súbežného použitia 1D- a 2D-CCC signatúr** (kapitola 9).
   Výskum v rámci dizertačnej práce bol zameraný na skúmanie aspektu súbežného použitia 1D- a 2D-CCC signatúr a skúmaniu ich vzájomnej korelácie, pretože táto oblasť nebola doposiaľ prebádaná. Výsledky výskumu identifikovali kombinácie konštrukčných algoritmov, pre ktoré je takéto súbežné použitie možné a zároveň vylúčili kombinácie konštrukčných algoritmov, pre ktoré takéto použitie možné nie je. Súbežné použitie 1D-CCC kódov a 2D-CCC kódov v 2D priestore časovo-frekvenčnej domény pre MC-CDMA môže viesť k vyššej efektivite využitia kanála bez vzájomnej interferencie prenosových signálov a k novým návrhom MC-CDMA architektúr. Môžu sa tak uplatniť výhody príslušných kódov. Konkrétne, 2D-CCC kódy disponujú diverzitou a 1D-CCC kódy vyžadujú menší počet kanálov na samotný prenos.

6. **Analýza korelačných vlastností doterajších 2D-QOCCC** (kapitola 10).
   QOCCC umožňujú generovanie vyššieho počtu signatúr s nižším počtom elementov v porovnaní s 2D-CCC. Napriek týmto zaujímavým vlastnostiam sa skúmaniu QOCCC venuje len niekoľko publikácií [39] a [43]. Vzhľadom na uvedené vlastnosti bola výskumu QOCCC v rámci dizertačnej práce venovaná pozornosť. Výskum QOCCC poukázal na zmenu vlastností pre QOCCC skonštruovaných z východiskových 1D-CCC s kratšou dĺžkou elementu. S kratšou dĺžkou východiskového elementu je možné vygenerovať menší počet signatúr výsledného QOCCC a dochádza k väčšiemu narušeniu korelačných vlastností. Takéto narušenie korelačných vlastností (vzájomná korelačná funkcia je porušená pre všetky vertikálne posuvy nultého horizontálneho posuvu a nadobúda od -0.75 do 0.75 maximálnej hodnoty auto-korelačnej funkcie) by si vyžadovala veľmi presnú detekciu na strane prijímača. Z porovnania korelačných vlastností QOCCC vyplýva prednosť použitia pôvodného východiskového 1D-CCC, ktorý umožňuje generovanie QOCCC s vyšším počtom signatúr a menším narušením korelačných vlastností.

7. **Návrh nového typu 2D-QOCCC** (kapitola 11).
   Navrhnuté QOCCC umožňujú generovanie vyššieho počtu signatúr v porovnaní s 2D-CCC pri rovnakom východiskovom 1D-CCC výmenou za čiastočnú stratu ideálnosti celkovej vzájomnej korelácie vo vertikálnych posuvoch nultého horizontálneho posuvu.
   V porovnaní s doterajšími QOCCC umožňujú navrhnuté QOCCC konštrukciu vyššieho počtu signatúr pri nižších rozmeroch elementov a zároveň zachovávajú ideálne vlastnosti celkovej autokorelácie. Pri navrhnutých QOCCC dochádza k porušeniu ideálnych vlastností celkovej vzájomnej korelácie obdobne ako pri doterajších QOCCC: vo vertikálnych posuvoch nultého horizontálneho posuvu. Vzhľadom na zachovanú ideálnu autokoreláciu pri navrhnutých QOCCC je ich detekcia na strane prijímača možná vo všetkých posuvoch: okrem nultého vertikálneho a nultého horizontálneho posuvu zároveň sú hodnoty autokorelácie nulové. Pri tomto jednom stave (bez posuvu) dosahuje autokorelácia maximálnu hodnotu. Hodnoty vzájomnej korelácie nedosahujú maximálnu hodnotu autokorelácie.
   V porovnaní s doterajšími QOCCC dochádza k navýšeniu počtu kanálov pri navrhnutých QOCCC.

Za užitočné je možné považovať aj nasledujúce výsledky:

1. **Vytvorenie stručného prehľadu doterajších navrhovaných uplatnení CCC** (kapitola 2.1)
   Doterajší výskum CCC kódov je roztrúsený bez celistvého či uceleného prehľadu, čo sťažuje oboznámenie sa s príslušnou oblasťou vedy. Takýto prehľad napomáha pri oboznámení sa s rozšírením týchto kódov a ich uplatnením. Popri odbornej verejnosti je takýto prehľad vhodný aj pre edukačné účely.

2. **Vytvorenie stručného prehľadu vývoja a míľnikov teórie CCC** (kapitola 2.2).
   Nakoľko nie je v doterajšej literatúre prieraz vývojom teórie CCC a samotný vývoj je roztrúsený, vytvorenie uceleného krátkeho prehľadu napomáha pri oboznámení sa s problematikou ako aj jedinečnými vlastnosťami týchto kódov a vysvetľuje výhody a obmedzenia jednotlivých vybraných konštrukčných algoritmov. Okrem odbornej verejnosti je takýto prehľad vhodný aj pre edukačné účely.

3. **Skoncipovanie automatizovaného systému na generovanie CCC vybraných konštrukčných metód** (kapitola 4).
   Vytvorený automatizovaný systém napomáha pri generovaní uvedených kódov príslušných konštrukčných algoritmov. Systém je vhodný aj na edukačné účely pre oboznámením sa s uvedenými kódmi. Vygenerované kódy je možné použiť aj v simuláciách a v ďalšom výskume.
4. **Stručný prieskum možného uplatnenia výsledkov výskumu** (kapitola 12).
   Stručný prieskum umožňuje nájsť nové podnety pre ďalší výskum.

15 Resume

The doctoral thesis deals with research in the field of complementary codes with a narrower focus on complete complementary codes (CCC). These codes attract attention of scientists since 1949 to the present. Researchers focus on these codes thanks to their unique correlation properties. That is why these codes are also very interesting for the use in modern telecommunications systems, for example, in an effort to increase the capacity of transmission systems and in order to improve the transmission parameters.

In the first part of this work, in the analytical part, a brief overview of the application of complementary and complete complementary codes is presented together with a brief overview of the development of the theory of complete complementary codes. These chapters denote already the content of partial objectives of the thesis. The provided theory development includes a more detailed description of selected significant generating algorithms representing milestones in the development of the theory of CCC. Research results include an automated system for automated code generation by analyzed construction methods that is also included in the partial objectives of the thesis. This chapters denote already the carried out research that was necessary in preparation for the fulfillment of the main objectives described in later chapters.

The main results of the doctoral thesis include new defined method for the construction of one- and two-dimensional optimal CCCs, identification of possible concurrent use of CCCs with different element lengths or signatures stemming from different construction algorithms.

The objectives of the dissertation work focused on exploring insufficiently researched areas and aspects of the theory of CCCs. The individual objectives are developed in separate chapters, where each combination of design algorithms being necessary to examine separately. The results represented in separate chapters are given in abbreviated, illustration informative form. Further information and results can be found in the dissertation thesis.

Obtained research outcomes and results of this dissertation thesis can be considered to represent original contributions to the state of the knowledge in given field:

1. **Alternative approach for the construction of CCC with the shortest length of the sequence and its comparison with the existing construction method** [2] (Chapter 5).
   This method represents a contribution to the state of knowledge in the form of previously missing instructions for the findings of Liu and Tseng, who proved that it is possible to create a new signature from an existing signatures. Their work, however, does not say how, and how many steps are necessary for the construction. Presented method represents this missing manual. In contrast with the existing method, the proposed approach applies in 1D as well as in 2D unchanged (exchanging elements). The method has many advantages and some limitations.

2. **Formulation of a new equation/new equations for the construction of the 2D-CCC directly from an α-unitary matrix** (Chapter 6).
   Within this chapter a new formula for generating 2D CCC directly from an α-unitary matrix was proposed. This new generating equation denotes a contribution to the knowledge of the prior knowledge as the previous construction methods are based on vector multiplication and are multiplying individual element lines with element coordinates among themselves and thus create 2D-CCC. This decomposition may allow easier integration of physical generators.

3. **The discovery that it is possible to concurrently use signatures with different orders of elements in 2D and identifying the restrictions of such a use** (Chapter 7).
   1D-CCCs allow the use of signatures with elements of different lengths with the maintenance of

the characteristics of the ideal cross-correlation properties for all possible shifts, provided that the signatures come from different construction lines. This can also be achieved in 2D-CCC signatures with different element orders. This was confirmed through research with brute force calculations of cross-correlation properties for combinations of signatures with different lengths of elements. Through research it has been found that the ideal cross-correlation properties are only maintained for the signatures stemming from different construction lines and for different signature order. The findings also show that such use does not raise the maximum number of signatures on the contrary, the number of signatures will be reduced to the maximum number of signatures indicated by the maximal number of signatures with the shorter length of the element (shorter element order).

4. **The discovery that it is possible to simultaneously use signatures constructed by different generating algorithms** (Chapter 8).
   The research investigates the possibility of the concurrent use of CCCs stemming from different construction algorithms, since this has not yet been explored in the current state of knowledge. When the compatibility of the code would allow a simultaneous use, this could lead to the increase in efficiency of the channel usage. Therefore, this aspect has been researched in the context of the dissertation thesis. The results have shown that such combined use is possible for some algorithm pairs, and that it is not possible for some combinations. The relevant chapters describe in more detail the conditions and the cases in which such concurrent use is possible. The research results show, however, that such concurrent use reduces the maximum number of signatures.

5. **The examination of the concurrent use of 1D- and 2D-CCC signatures** (Chapter 9).
   Research carried out in the dissertation thesis aimed to investigate aspects of the concurrent use of 1D- and 2D-CCC signatures including the investigation of their cross-correlation, where this area has not yet been explored in the current state of the knowledge in given field. Research results identified combinations of construction algorithms for which such simultaneous use is possible while excluding combinations of design algorithms for which such use is not possible. Concurrent use of 1D CCCs and 2D-CCCs in the 2D domain of time-frequency space for MC-CDMA can lead to more effective utilization of the channel without mutual interference of the transmission signals and to introduction of new MC-CDMA architecture proposals that would take advantage of the benefits of given 2D-CCCs (diversity) and 1D-CCCs (require a smaller number of channels during the transmission).

6. **Analysis of the correlation properties of existing 2D-QOCCC** (Chapter 10).
   QOCCC enable generating of higher number of signatures if compared with 2D-CCC. Despite of these interesting properties of these codes, only some publications [39] and [43] consider this topic. These codes were analyzed and researched based on the given advantages. The research findings show, that the correlation properties of QOCCC are changing with the change of the element length of the source 1D-CCC. Analyses show that QOCCCs based on 1D-CCC with longer elements dispose of more advantageous correlation properties: smaller values of cross- and auto-correlation disturbances (where the correlation is not ideal) in overall. At the same time, the number of possible distinguish signatures of QOCCC shrinks with the shrinking length of the element of the source 1D-CCC. This is why it is recommended to generate QOCCC based on long element lengths of the source 1D-CCC on input.

7. **Proposal of new 2D-QOCCC** (Chapter 11).
   The research in this dissertation thesis resulted in introducing new type of QOCCC that enables the construction of higher number of signatures for given element length in comparison with 2D-CCC. In comparison with existing QOCCCs, the proposed codes allow the construction of higher number of signatures by smaller element dimension and maintain ideal properties of the overall auto-correlation.

Existing QOCCC dispose of lower number of elements if compared with proposed codes. The ideal overall autocorrelation (which is maintained by proposed codes and broken by existing QOCCCs) allows more simplifies detection of proposed codes on receiving end.

The benefits to the current knowledge in the field of CCCs may well include also minor contributions that help to form a picture of the extent of the prevalence of CCC codes across different science fields as well as other minor contributions, summarized as follows:

A. **Creating a brief review of the proposed applications of the existing CCCs** (section 2.1)
   Existing research of the CCCs is scattered without a coherent and comprehensive overview, making it difficult to familiarize oneself with the subject of the given area of science. This survey helps to get familiar with the applications of these codes and their prevalence. In addition to the professional research community is such an overview suitable for educational purposes.

B. **Creating a concise overview of developments and milestones of the CCC theory** (section 2.2).
   Since the available literature is missing a concise review of the CCC theory development due to its scattering, creating a comprehensive brief overview may help to get familiar with the unique properties of these codes and explains the advantages and limitations of each of the selected construction algorithms. In addition to the professional research community is such an overview suitable for educational purposes.

C. **Automated system for generating CCC of selected construction methods** (Chapter 4).
   Created automated system helps to generate the codes of applicable generating algorithms. The system is also suitable for educational purposes for familiarization with these codes. Generated codes can also be used in simulations and in further research.

D. **A brief survey of the possible application of research results** (Chapter 12).
   A brief survey may represent an impetus for further research.

Zoznam použitej literatúry

[1] VERDÚ, Sergio – SHAMAI, Shlomo: Spectral efficiency of CDMA with random spreading. In: IEEE Transactions on Information Theory, roč. 45, č. 2 (1999), s. 622–640. ISSN: 0018-9448.

[2] HAN, Chenggao – SUEHIRO, Naoki - HASHIMOTO, Takeshi: A Systematic Framework for the Construction of Optimal Complete Complementary Codes. In: Computing Research Repository - CoRR, roč. abs/1003.2681, 2010. s. 1-25. Dostupné na: http://arxiv.org/abs/1003.2681

[3] SUEHIRO, Naoki – HATORI, Mitsutoschi: N-Shift Cross-orthogonal Sequences. In: IEEE Transaction, Information Theory, roč. 34, č.1 (1988), s. 143-146. ISSN: 0018-9448.

[4] CHEN, Hsiao-Hwa – YEH, Jun-Feng – SUEHIRO, Naoki: A multicarrier CDMA architecture based on orthogonal complementary codes for new generations of wideband wireless communications. In: IEEE Communications Magazine, roč. 39, č. 10 (2001), s. 126-135. ISSN: 0163-6804.

[5] KALASHNIKOV, Elana: An Introduction to Golay Complementary Sequences. In: Eureka, vol. 4, no. 1, 2014, s.40-48. ISSN 1923-1512.

[6] PARKER, Matthew Geoffrey – PATERSON, Kenny G. – TELLAMBURA, Cintha: Golay Complementary Sequences. In: Encyclopedia of Telecommunications, 2004, s.1-18. ISBN 0-471-36972-1.

[7] WU, Di – SPASOJEVIC, Predrag: Complementary set matrices satisfying a column correlation constraint. In: IEEE Transactions on Information Theory, roč. 54, č. 7 (2008), s. 3330–3339. ISSN: 0018-9448.

[8] TSENG, Chin Chong: Signal Multiplexing in Surface-Wave Delay Lines Using Orthogonal Pairs of Golay's Complementary Sequences. In: IEEE Transaction on Sonics and Ultrasonics, roč. 18, č. 2 (1971), s.103-107. ISSN: 0018-9537.

[9] FRANK, Robert L.: Polyphase Complementary Codes. In: IEEE Transaction on Information Theory, roč. 26, č. 6 (1980), s. 641-647. ISSN: 0018-9448.

[10] JUN, Tang – NING, Zhang - ZHIKUN, Ma – BO, Tang: Construction of Doppler Resilient Complete Complementary Code in MIMO Radar. In: Signal Processing, IEEE Transactions on, roč. 62, č. 18, 2014, s. 4704-4712. ISSN: 1053-587X.

[11] BAUDZUS, Lars – KRUMMRICH, Peter M.: CDM-Based (λ) -OTDR for Rapid TDM- and WDM-PON Monitoring. In: Photonics Technology Letters, IEEE roč. 26, č. 12, 2014, s. 1203-1206. ISSN: 1041-1135.

[12] DONGHANG, Jiao – YANMING, Xue – CONG, Wang – FEI, Gao: Dual-tree complex wavelet transform blind video watermark based on complete complementary codes. In: Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2014 IEEE International Conference on, 2014, s. 250-253. ISBN: 978-1-4799-5272-4.

[13] SHENG, Zhou – XIAOCHUN, Wang – QINGSHENG, Ye – JUN, Yang – JIANJUN, Ji – YANQUN, Wang: Medical high-frequency ultrasound imaging using Golay-coded pulse excitation. In: Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 2012 5th International Conference on, 2012, s. 71-75. ISBN: 978-1-4673-1183-0.

[14] KOJIMA, Tetsuya – OIZUMI, Akihiro – OKAYASU, Kohei – PARAMPALLI, Udaya: An audio data hiding based on complete complementary codes and its application to an evacuation guiding system. In: Signal Design and Its Applications in Communications, The Sixth International Workshop on, 2013, s. 118-121. ISBN: 978-1-4799-6028-6.

[15] KOJIMA, Tetsuya – TACHIKAWA, T. – OIZUMI, Akihiro – YAMAGUCHI, Y. – PARAMPALLI, Udaya: A disaster prevention broadcasting based on data hiding scheme using

complete complementary codes. In: Information Theory and its Applications (ISITA), 2014 International Symposium on, 2014, s. 45-49. ISBN neuvedené.

[16] OZGUR, Soner – WILLIAMS, Douglas B. Temporal partition particle filtering for multiuser detectors with mutually orthogonal sequences. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. Proceedings (ICASSP '05), č. 2, Marec 2005, s. iii/1033–iii/1036. ISSN: 1520-6149.

[17] LIU, Jichao – KANG, Guixia – LU, Shan – ZHANG, Ping. Preamble design based on complete complementary sets for random access in MIMO-OFDM systems. In Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2007), Marec 2007, s. 858–862. ISSN: 1525-3511.

[18] KHIRALLAH, Chadi – STANKOVIC, Ljubiša – STANKOVIC, Vladimir: Multi-session Network spread coding. Signal Processing Conference, 2008 16th European, 2008, s.1-5. ISSN: 2219-5491.

[19] DILIPKUMAR, Jalan R. – ROUT, D.K. – DAS, S.: Performance enhancement of MIMO/UWB based wireless Body area network. In: Communication Technologies (GCCT), 2015 Global Conference on, 2015, s. 604-609. ISBN: 978-1-4799-8552-4.

[20] LI, Shufeng – ZHANG, Yuchi – JIN, Libiao: Spread spectrum communication system performance analysis based on the complete complementary sequence. Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), 2015 5th International Conference on, 2014, s. 80-83. ISBN: 978-1-4799-7283-8.

[21] FIEDLER, Frank – JEDWAB, Jonathan: How do more Golay sequences arise? In: IEEE Transactions on Information Theory, roč. 52, č. 9 (Júl 2006), s. 3220–3232. ISSN: 0018-9448.

[22] CHEN, Hsiao-Hwa: The REAL Approach to Generate Orthogonal Complementary Codes for Next Generation CDMA Systems. In: Interdisciplinary Information Sciences, 2006, roč. 12, č. 2, s.147-161. ISSN: 1347-6157.

[23] GOLAY, Marcel Jules Eduard: Multislit spectrometry. In: Journal of the Optical Society of America, roč. 39, č. 6 (1949), s. 437-444. ISSN: 1084-7529.

[24] GOLAY, Marcel Jules Eduard. Complementary Series. In: IRE Transaction on Information Theory, roč. 7, č. 2, 1961, s. 82-87. ISSN: 0096-1000.

[25] TURYN, R.: Ambiguity Function of Complementary Sequences. In: Information Theory IEEE Transaction, 1963, roč. 9, č. 1, s. 46-47. ISSN: 0018-9448.

[26] TAKI, Yasuo – MIYAKAWA, Hiroshi – HATORI, Mitsutoshi – NAMBA, Seiischi: Even-shift Orthogonal Sequences. In: IEEE Transactions Information Theory, 1969, roč. 15, č. 2, s. 295-300. ISSN: 0018-9448.

[27] TSENG, Chin Chong – LIU, C.L.: Complementary Sets of Sequences. In: IBM Thomas J. Watson Res. Cen., Yorktown Heights, N.Y., Rep. RC 3397; April 1971. ISBN neuvedené.

[28] TSENG, Chin Chong - LIU, C. L.: Complementary Sets of Sequences. In: IEEE Transactions on Information Theory, roč. 18, č. 5 (1972), s. 664-652. ISSN: 0018-9448.

[29] SIVASWAMY, R.: Multiphase Complementary Codes. In: IEEE Transactions on Information Theory, roč. 24, č.5 (1978), s. 546-552. ISSN: 0018-9448.

[30] SUEHIRO, Naoki – KUROYANAGI, Noriyoshi – IMOTO, Toshiaki – MATSUFUJI, Shinya: Very efficient frequency usage system using convolutional spread time signals based on complete complementary code. In: Proceedings of The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2000), č. 2 (September 2000), s. 1567–1572. Print ISBN: 0-7803-6463-5.

[31] SUEHIRO, Naoki - KUROYANAGI, Noriyoshi: Multipath-tolerant binary signal design for approximately synchronized CDMA systems without co-channel interference using complete complementary codes. In: Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference The

Bridge to Global Integration (GLOBECOM 1998), roč. 3 (November 1998), s. 1356–1361. ISBN: 0-7803-4984-9.

[32] HAN, Chenggao – SUEHIRO, Naoki – IMOTO, Toshiyaki: A generation method for constructing complete complementary sequences. In: The World Scientific and English Academic Society (WSEAS) Transsactions on Communicaion, roč. 3, č. 2 (Apríl 2004), s. 530–534. ISSN neuvedené.

[33] HAN, Chenggao – SUEHIRO, Naoki: A generation method for constructing *(N,N,MN/P)* complete-complementary sequences. In Proceedings of Joint IST Workshop on Mobile Future, 2004 and the Symposium on Trends in Communications (SympoTIC '04), Október. 24–26, 2004, s. 70–73. ISBN: 0-7803-8556-X.

[34] ZHANG, Chao – HAN, Chenggao – LIAO, Yiting – LIN, Xiaokang – HATORI, Mitsutoshi: Iterative Method for Constructing Complete Complementary Sequences with Lengths of 2mN. In Proceedings of Tsinghua Science and Technology, October 2005, roč. 10, č. 5, s. 605-609. ISSN neuvedené.

[35] GARCIA, Enrique – URENA, Jesus – GARCIA, Juan Jesus: Generation and Correlation Architectures of Multilevel Complementary Sets of Sequences. In: IEEE Transactions on Signal Processing, roč. 61, č. 24 (2013), s. 6333–6343 . ISSN: 1053–587X.

[36] CHAO-YU, Chen – CHUNG-HSUAN, Wang – CHI-CHAO, C.: Complete complementary codes and generalized Reed-Muller codes. In: IEEE Communications Letters, roč. 12, č. 11 (November 2008), s. 849–851. ISSN: 1089-7798.

[37] TORII, Hideyuki – NAKAMURA, Makoto – SUEHIRO, Naoki: Generalized method for constructing modulatable periodic complete complementary codes. In: Proceedings of IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC 2001), Marec 2001, s. 259–262. ISBN: 0-7803-6720-0

[38] ZHANG, Chao – LIN, Xiaokang – HATORI, Mitsutoshi: Two dimensional combined complementary sequence and its application in multicarrier CDMA. In: IEICE Transactions on Communications, roč. E88-B, č. 2 (Február 2005), s. 478–486. ISSN: 1745-1361.

[39] TURCSANY, Matúš – FARKAŠ, Peter: Two-dimensional quasi orthogonal complete complementary codes. In. Proceedings of Joint First Workshop on Mobile Future and Symposium on Trends in Communications (SympoTIC '03), Október 2003, s. 37- 40. ISBN: 0-7803-7993-4.

[40] HAN, Chenggao – HASHIMOTO, Takeshi – SUEHIRO, Naoki: A new construction method of zero-correlation zone sequences based on complete complementary codes. IEICE Transactions on Fundamentals, roč. E91-A, č. 12 (December 2008), s. 3698–3702. ISSN: 1745-1337.

[41] LU, Liru – DUBEY, Vimal K.: Performance of a complete complementary code-based spread-time CDMA system in a fading channel. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, roč. 57, č. 1 (Január 2008), s. 250–259. ISSN: 0018-9545.

[42] FARKAŠ, Peter - TURCSANY, Matúš: Two-dimensional orthogonal complete complementary codes. In: Proceedings of Joint IST Workshop on Mobile Future and Symposium on Trends in Communications (Sympotic'03), Október 2003, s. 21–24. ISBN: 0-7803-7993-4

[43] DÁVIDEKOVÁ, Monika: Aplikácia dvojrozmerných signatúr v mobilných bezdrôtových systémoch. Diplomová práca. Bratislava: FEI STU, 2011. 65 s.

[44] DÁVIDEKOVÁ, Monika - FARKAŠ, Peter: Automatizovaný systém tvorby jednorozmerných ortogonálnych úplných komplementárnych kódov (OCCC). In: ŠAGÁTOVÁ, A. -- PETRISKA, M. -- PAVLOVIČOVÁ, J. ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011. Bratislava: STU v Bratislave FEI, 2011, s. 596--599. ISBN 978-80-227-3508-7.

Zoznam publikácii autora počas doktorandského štúdia

ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch, resp. vedecké práce ostatných zahraničných časopisoch

[1] ADE01 DÁVIDEKOVÁ, Monika (95%) - FARKAŠ, Peter. On the cross-correlation properties of two-dimensional complete complementary codes of different orders for (N, N, N2xN2). In *GRANT Journal [elektronický zdroj]*. Vol. 3, iss. 1 (2014), online, s. 68-71. ISSN 1805-062X. V databáze: DAOJ, BASE, Google Scholar. Universal Impact Factor for year 2012: 1.3076.

ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch, resp. vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

[2] ADF01 DÁVIDEKOVÁ, Monika (100%). Generalized Construction of Two-Dimensional Quasi Complete Complementary Codes. In *Vedecké práce MtF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Vol. 21 SI (2013), s. 12-17. ISSN 1336-1589. V databáze: DOAJ, Google Scholar.

ADM Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

[3] ADM01 DÁVIDEKOVÁ, Monika (25%) – GREGUŠ, Michal ml. - FARKAŠ, Peter - RÁKUS, Martin. Applications of Complete Complementary Codes and Propositions for Future Research Areas of These Codes. In *Procedia Computer Science*, Elsevier, v tlači (2016), 8 s. ISSN 1877-0509. V databáze: SCOPUS, ScienceDirect, Google Scholar. Source Normalized Impact per Paper (SNIP): 0,705.

ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

[4] ADN01 DÁVIDEKOVÁ, Monika (50%) - FARKAŠ, Peter. On the Construction of Optimal Complete Complementary Codes. In *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 67, v tlači (2016), 4 s. ISSN 1335-3632. V databáze: SCOPUS, Thomson-Reuters SCIE, INSPEC, IET, ADS Harvard and CSA/ProQuest, Google Scholar. Impact Factor: 0.378. 5-year impact factor: 0.483. Scimago Journal Ranking (2013): 0,109.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

[5] AFC01 DÁVIDEKOVÁ, Monika (100%). Generalized Construction of Two-Dimensional Quasi Complete Complementary Codes. In *IDS 2013. International Doctoral Seminar 2013 [elektronický zdroj] : Proceedings of the 8th International Doctoral Seminar (IDS 2013), Dubrovnik, 13 - 15 May 2013*. Zagreb : University of Zagreb, 2013, s.CD ROM, s. 46-52. ISBN 978-953-6071-40-1.

[6] AFC02 DÁVIDEKOVÁ, Monika (98%) - FARKAŠ, Peter - RUŽICKÝ, Eugen. Generalized Construction of Two-Dimensional Complete Complementary Codes. In *TSP 2013 Telecommunications and Signal Processing : 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing; Rome, Italy, July 2-4, 2013*. Brno : VUT v Brně pre IEEE, 2013, s.747-750. ISBN 978-1-4799-0403-7. V databáze: SCOPUS, Web of Science, IEEE, Google Scholar.

[7] AFC03 DÁVIDEKOVÁ, Monika (95%) - FARKAŠ, Peter. On the cross-correlation properties of complete complementary codes of different families (N, N, N2) and (N, N, N). In *CER Comparative European Research 2014 : 1st Biannual CER Comparative European research Conference. London, UK, March 17-21, 2014*. London : Sciemcee Publishing, 2014, s. 117-120. ISBN 978-0-9928772-0-0. V databáze: British Library, Google Scholar.

[8] AFC04 DÁVIDEKOVÁ, Monika (95%) - FARKAŠ, Peter. On the cross-correlation properties of two-dimensional complete complementary codes of different orders for (N, N, N2xN2). In *QUAERE 2014, vol. IV : Interdisciplinary scientific international conference for PhD students and assistants. Hradec Králové, Czech Republic, May 26-30, 2014*. Hradec Králové : Magnanimitas, 2014, S. 1296-1302. ISBN 978-80-87952-04-7. V databáze: DAOJ, Google Scholar.

[9] AFC05 DÁVIDEKOVÁ, Monika (95%) - FARKAŠ, Peter. On the ideality of cross-correlation properties for complete complementary codes (N, N, N2xN2) and (N, N, 2Nx2N). In *Proceedings of the 2nd CER Comparative European Research Conference [elektronický zdroj] : International Scientific Conference for PhD Students of EU Countries*. 1. vyd. London : Sciemcee Publishing, 2014, CD ROM, s. 88-92. ISBN 978-0-9928772-2-4. V databáze: British Library, Google Scholar.

[10] AFC06 DÁVIDEKOVÁ, Monika (95%) - FARKAŠ, Peter. On the ideality of cross-correlation properties for (N, N, 2N) complete complementary codes. In *Telecommunication systems services and applications (TSSA)*. Danvers : IEEE, 2014, S. 1-4. ISBN 978-1-4799-7447-4. V databáze: SCOPUS, IEEE, Google Scholar.

[11] AFC07 DÁVIDEKOVÁ, Monika (100%). On the ideality of cross-correlation properties for concurrent use of (N2, N2, 2Nx2N) and (N2, N2, NxN) of complete complementary codes. In *SPIN 2015 : 2nd International conference on signal processing and integrated networks. Noida, India. 19-20 February 2015*. Danvers : IEEE, 2015, S. 291-295. ISBN 978-1-4799-5991-4. V databáze: SCOPUS, IEEE, Google Scholar.

[12] AFC08 DÁVIDEKOVÁ, Monika (25%) - FARKAŠ, Peter, - GREGUŠ, Michal ml. Analysis of the Correlation Properties of QOCCC. In *IWSSIP 2016 : 23rd International Conference on Systems, Signals and Processing. Bratislava, Slovakia. 23-25 May 2016*. IEEE, 2016, v tlači, 4 s. V databáze: SCOPUS, IEEE, Google Scholar.

[13] AFC09 DÁVIDEKOVÁ, Monika (25%) - GREGUŠ, Michal ml - FARKAŠ, Peter. MatLab Implementation of the Recent CCC Construction Approach. In *TSP 2016 : 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Vienna, Austria. 27-29 July 2016*. IEEE, 2016, v tlači, 4 s. V databáze: SCOPUS, Web of Science, IEEE, Google Scholar.

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

[14] ADC01 DÁVIDEKOVÁ, Monika (25%) – FARKAŠ, Peter – RÁKUS, Martin – GREGUŠ, Michal ml. Construction of One- And Two-Dimensional Complete Complementary Codes. In *Kybernetika: international journal published by Institute of Information Theory and Automation*. Praha : Institute of Information Theory and Automation of the ASCR, vol. 52, v posúdení: zaslané 1. januára 2016, 13 s. ISSN: 1805-949X. Časopis indexovaný v databázach: Current

Contents, SCOPUS, Current Mathematila Publications, Zentralblatt math.... Impact Factor (2014): 0.541.

Tab. 12 Štatistika: kategória publikačnej činnosti

ADC	Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch	(1)
ADE	Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch	1
ADF	Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch	1
ADN	Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS	1
ADN	Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS	1
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	9
Súčet		**13 (+1)**

Tab. 13 Štatistika: indexačné databázy

SCOPUS	7
Web Of Science	2
IEEE	5
Google Scholar	12
DAOJ	3

...

Účasť autora na výskumných projektoch

1. VEGA 1/0518/13 - Kódovanie pre distribuovanú informačnú infraštruktúru typu Cloud, zodpovedný riešiteľ: prof. Ing. Peter Farkaš, DrSc., Ústav telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013–2016.

Pedagogická činnosť autora (2011-2014)

1. Cvičenia z predmetu Digitálne komunikácie
2. Cvičenia z predmetu Mobilné a satelitné komunikácie I
3. Cvičenia z predmetu Mobilné a satelitné komunikácie II
4. Oponent bakalárskej práce, Člen komisie bakalárskych štátnych skúšok