

Ing. Ivan Lapin

Autoreferát dizertačnej práce

NÁVRH A ANALÝZA KOMUNIKAČNÉHO SYSTÉMU VYUŽÍVAJÚCEHO DVOJROZMERNÉ ÚPLNE KOMPLEMENTÁRNE KÓDY

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: v študijnom odbore

Telekomunikácie 5.2.15. telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, 2016

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Ivan Lapin

Autoreferát dizertačnej práce

NÁVRH A ANALÝZA KOMUNIKAČNÉHO SYSTÉMU VYUŽÍVAJÚCEHO DVOJROZMERNÉ ÚPLNE KOMPLEMENTÁRNE KÓDY

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, 2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na	Ústav telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita					
	Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava					
Predkladateľ:	Ing. Ivan Lapin					
	Ústav telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická					
	univerzita, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava					
Školiteľ:	prof. Ing. Peter Farkaš, DrSc.					
	Ústav telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky					
	Slovenská technická univerzita, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava					
Oponenti:	doc. RNDr. Eugen Ružický, CSc.					
	Fakulta informatiky, Paneurópska vysoká škola					
	Tematínska 10, 851 05, Bratislava					
	Ing. Igor Grellneth, PhD.					
STC – Student Technology Center Bratislava						
	Novohradská 3, 821 09, Bratislava					

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o h.

Na

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

Obsah

1	Úvo	od	2				
2	Súč	asný stav poznania	2				
3	Cie	le práce	4				
4	Metodika vyhodnocovania RadCom systémov5						
	4.1	Dopplerov efekt	5				
	4.2	Funkcia nejednoznačnosti a normovaná funkcia nejednoznačnosti	5				
	4.3	Vzájomná funkcia nejednoznačnosti	5				
	4.4 Pomer maximálneho k postrannému laloku funkcie nejednoznačnosti		6				
	4.5	Pomer špičkovej a strednej hodnoty výkonu signálu	6				
	4.6	Pomer energie na bit ku spektrálnej hustote výkonu šumu	6				
5	Náv	vrh 2D-OCCC-OFCDM systému	7				
	5.1	Originalita zvoleného spôsobu riešenia	7				
	5.2	Konštrukcia druhej rodiny kódov 2D-OCCC	7				
	5.3	Návrh vysielača					
	5.3.	1 Stratégia vysielania kódov 2D-OCCC					
	5.3.2	2 Podkanálová štruktúra	9				
	5.4	Návrh prijímača 2D-OCCC-OFCDM					
	5.4.	1 Ekvalizácia CE					
	5.5	Koncepčné prispôsobenie 2D-OCCC-OFCDM systému do prostredia IEEE 802.11p	11				
6	Ana	lýza 2D-OCCC-OFCDM systému	12				
	6.1	Rozloženie výkonu v časovo-frekvenčnej rovine					
	6.2	Pomer špičkovej a strednej hodnoty výkonu signálu (PAPR)					
	6.3	Funkcia nejednoznačnosti kódov 2D-OCCC	14				
	6.4	Vzájomná funkcia nejednoznačnosti kódov 2D-OCCC	15				
	6.5	Chybovosť 2D-OCCC-OFCDM systému v prostredí V2V - diaľničný scenár					
	6.6	Chybovosť 2D-OCCC-OFCDM systému v prostredí V2V - mestský scenár	17				
7	Záv	er	19				
	Pôvod	né vedecké prínosy					
	Prínosy pre ďalší rozvoj vedy a techniky						
L	iteratú	ra	21				
P	ublikáo	cie autora	22				
Sı	íhrn		23				
A	bstract		23				

1 Úvod

Súčasný pokrok v oblasti informačno-telekomunikačných technológií umožňuje ich uplatnenie v širokej škále priemyselných odvetví. Za posledné roky sa do popredia záujmu dostala predovšetkým možnosť výmeny informácií medzi vozidlami typu V2V (Vehicle-to-Vehicle), poprípade vozidiel s pozemnou infraštruktúrou typu V2I (Vehicle-to-Infrastructure). Takéto systémy by umožnili znížiť nehodovosť na cestách, informovať vodičov o aktuálnom dianí a vytvoriť ad-hoc platformu, ktorá by bola podkladom na vývoj nových typov informačných aplikácií.

Prostredie šírenia signálov cestnej dopravy však so sebou prináša špecifické problémy, ktorým predtým mobilné technológie nemuseli čeliť. Zväčša vysoké vzájomné rýchlosti a nízko položené antény na strechách vozidiel sa stávajú zdrojom dynamických zmien kanála vplývajúcich na prenášaný signál. Súčasná špecifikácia IEEE 802.11p definuje vzájomnú komunikáciu vozidiel pomocou OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) metódy. Špecifikácia neuvažuje využitie frekvenčnej diverzity kanála. Navyše, pridaná hodnota komunikačných systémov v cestnom prostredí by zo začiatku bola iba veľmi nízka, keďže takouto technológiou by nedisponovali všetci účastníci na cestách a potrebná infraštruktúra by neexistovala. Jedným z možných riešení, ako odôvodniť prvotný pomalý nástup takýchto systémov, je rozšírenie komunikačnej funkcionality o radarové sledovanie okolia.

Práca je venovaná návrhu nového systému, ktorý by umožňoval duálne radarové a komunikačné fungovanie na báze CDMA rozptylu realizovaného pomocou dvojrozmerných úplne komplementárnych kódov 2D-OCCC (Two-Dimensional Orthogonal Complete Complementary Codes). Systém kombinuje výhody CDMA a OFDM metód. Je prezentované koncepčné prispôsobenie systému do prostredia IEEE 802.11p. V práci je optimalizovaná ekvalizačná metóda CE (Complementarity Equalization), pre ktorú systém dosahuje v simulovaných podmienkach za určitých podmienok nižšiu chybovosť než konvenčný OFDM systém. V práci sú analyzované aj výkonové pomery navrhovaného systému, ktoré môžu v závislosti na zvolených parametroch dosahovať lepšie výsledky než OFDM systém bez dvojrozmerného rozptylu v scenári V2V. Analýzou funkcie nejednoznačnosti kódov 2D-OCCC je ukázaná možnosť použitia navrhovaného systému aj pre radarové snímanie okolia.

2 Súčasný stav poznania

Pojem komplementárny pár sa prvýkrát objavil v roku 1951. Golay [1, 2] prezentoval možnosť dosiahnuť ideálny autokorelačný priebeh kódov pomocou kombinácie autokorelačných funkcií viacerých postupností a venoval sa syntéze komplementárnych párov. Spomenuté je aj ich možné využitie pre telekomunikačné účely. Komplementárne páry patria medzi prvé komplementárne postupnosti.

V roku 1972 Tseng a Liu [3] prezentovali konštrukciu binárnych komplementárnych množín. Táto konštrukcia je označovaná ako prvá úplne komplementárna postupnosť. Úplne komplementárne postupnosti majú okrem ideálnych priebehov autokorelačných funkcií aj ideálne vzájomné korelácie medzi množinami kódov pre všetky celočíselné bitové posuny. Úplne komplementárna postupnosť sa tiež nazýva úplne komplementárny kód (CCC – Complete Complementary Code). Konštrukciu nových CCC opísali aj Suehiro a Hatori v práci [4], ktorej výsledkom je N množín, z ktorej každá obsahuje N postupností s dĺžkami N^2 .

Dalším míľnikom v oblasti CCC je pridanie druhého rozmeru, ktorí prezentujú Farkaš a Turcsány [5, 6]. Vďaka tomu je možné rozptyl informačných bitov v CDMA uskutočniť zároveň v časovej a frekvenčnej rovine. Ideálne priebehy autokorelácie a vzájomnej korelácie sú zachované pre oba smery posunov kódu. Takéto postupnosti sa označujú ako 2D-OCCC.

Systémy, ktorých duálna radarová a komunikačná funkcionalita je umožnená za použitia jednotného hardvéru a jednotných signálov najlepšie vystihuje akronym RadCom [7]. Záujem o takúto technológiu prejavilo viacero odvetví, napr. letecká doprava a armáda. Najperspektívnejším sa však javí využitie RadCom na účely inteligentných transportných systémov (ITS – Intelligent Transportation System) [8]. Takto vzniknutá platforma by umožnila nie len zvýšiť bezpečnosť na cestách, ale aj inteligentne smerovať dopravu v mestách. Zadefinovanie RadCom efektívne zužuje problematiku návrhu systémov nájdením vhodných signálov a algoritmov.

Veľkým míľnikom systémov OFDM RadCom je algoritmus pracujúci v tzv. modulačnej symbolovej doméne, ktorý v roku 2009 prezentovali Sturm a spol. [9]. Na rozdiel od prechádzajúcich korelačných metód je založený na dekompozícii vzdialenosti a relatívnej rýchlosti sledovaného objektu priamo nad komplexnými OFDM symbolmi. Týmto spôsobom autori [9] dosiahli vynikajúce dynamické rozlíšenie radaru napriek kontinuálnemu prenosu dát. Autori zároveň poukázali na výhodu navrhovaného riešenia, a teda že radarová funkcionalita môže byť jednoducho pridaná do akéhokoľvek existujúceho OFDM telekomunikačného systému. Sturm a Wiesbeck [7] prezentovali funkčný RadCom systém, ktorý operuje na 24 GHz ISM pásme za pomoci Rohde&Schwarz SMJ100A generátora signálov s parametrami: 1024 nosných frekvencií a 256 analyzovaných symbolov. Vo vzdialenosti dosiahli teoretické rozlíšenie 1,61 m a v rýchlosti 1,97 $\frac{m}{s}$. Dosiahnuté výsledky sú oproti konvenčným korelačným metódam významne lepšie.

Ako súčasť ITS sa v roku 2006 objavila iniciatíva WAVE (Wireless Access for Vehicular Environments), ktorá naštartovala záujem o vývoj technológie umožňujúcej komunikáciu medzi vozidlami (V2V – Vehicle-to-Vehicle) a vozidlami s pozemnou infraštruktúrou (V2I – Vehicle to Infrastructure). Na základe existujúcich špecifikácií IEEE 802.11a/g/n bola pre V2V a V2I zadefinovaná IEEE 802.11p pre pásmo 5,9 GHz [10]. V roku 2012 Reichardt a spol. [11] ukázali použiteľnosť V2V RadCom systému pre tento štandard. Ukázali, že celé 30 MHz dostupné pásmo umožňuje rozlíšenie vzdialenosti s presnosť ou iba 5 m, ktorá je nedostačujúca. Ako možné riešenie navrhli využitie ďalších 60 MHz v priľahlom ISM pásme, čím potom dosiahli rozlíšenie vo vzdialenosti 1,7 m a v rýchlosti 4,3 $\frac{m}{s}$.

Príchod špecifikácie IEEE 802.11p priniesol okrem vývoja radarových algoritmov aj snahu o zlepšenie prenosových vlastností V2V komunikácia. Komunikácia V2V je charakterizovaná ako sieť VANET (Vehicular Ad-Hoc Network) [12]. Založená je na princípe CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) prístupu. Ten je však v dynamickom prostredí cestnej premávky nedostatočný. Jedným zo spôsobov ako zvýšiť priepustnosť VANET siete je využitie hybridného systému spájajúceho metódy CDMA (Code Division Multiple Access) a OFDM. Bolo ukázané, že použitím stĺpcovo kódovaných komplementárnych kódov je možné dosiahnuť lepšiu chybovosť v prostredí V2V [13]. Vysielané symboly sú pred mapovaním do časovo-frekvenčných slotov OFDM rozptýlené vhodnými komplementárnymi kódmi.

Kombinácia CDMA a OFDM sa nazýva tiež OFCDM (Orthogonal Frequency and Code Division Multiplexing) [14]. Prvýkrát bol takýto hybridný systém využitý v prototype 4G siete, ktorá na rozptyl používala Walsh-Hadamarove kódy. Označuje sa tiež ako VSF-OFCDM (Variable Spreading Factor OFCDM) [15]. Variabilný rozptyl umožňuje meniť dĺžku rozptylovej postupnosti podľa aktuálnych vlastností prenosového kanála. Nevýhodou použitia Walsh-Hadamardových kódov je však vysoká hodnota špičkového ku priemernému výkonu signálu (PAPR – Peak-to-Average Power Ratio). Na efektívne zníženie PAPR sa dá použiť predradený zmiešavač [16].

Parametre kanála Rician boli experimentálne zmerané a publikované v práci Acosta-Marum a Ingram [17]. Pre kanál V2V platí, že sa nedá považovať za WSSUS (Wide Sense Stacionary Uncorrelated Scatterers). V praxi to znamená, že prekážky sú, podobne ako vozidlá, vo vzájomnom pohybe a môžu sa objavovať naprieč viacerým časovým charakteristikám kanála.

Klasické stochastické modely sa nesnažia zrekonštruovať dokonalú fyzikálnu realitu, ale len priblížiť podobu možných vplyvov na šíriaci sa signál. Z toho dôvodu nie sú schopné zachytiť nestacionárny charakter kanála. Preto sa ako najvhodnejší druh modelov pre scenár V2V považujú geometrické stochastické modely (GSCM – Geometry-Based Stochastic Model). Karedal a spol. [18] publikovali jeden z takýchto modelov. Model priamo predpokladá dvojrozmerné rozmiestnenie reálnych prekážok (vozidlá, značky, atď.), pričom štatistické výsledky sú vypočítavané superpozíciou propagačných ciest v jednotlivých časoch. Ide teda o kombináciu stochastického modelu, zjednodušenej metódy sledovania lúča a oneskorovacej linky.

3 Ciele práce

Na základe súčasného stavu poznania uvedenej problematiky a definovaných nepreskúmaných problémov v oblasti duálneho fungovania radarového a komunikačného systému pre prostredie cestnej dopravy, sú hlavné ciele práce stanovené nasledovne:

1. Navrhnúť systém na báze kódov 2D-OCCC využívajúci princíp OFCDM

Na základe existujúcich riešení a poznatkov zo systémov OFCDM teoreticky navrhnúť inovatívny systém 2D-OCCC-OFCDM RadCom. Navrhnutý systém musí obsahovať spôsoby riešenia rozptylu, vhodnú podkanálovú štruktúru a opisy funkčných častí systému.

2. Koncepčne prispôsobiť navrhnutý systém do prostredia V2V

Navrhnutý systém koncepčne prispôsobiť do prostredia V2V tak, aby rozšíril definíciu fyzickej vrstvy špecifikácie IEEE 802.11p pre rôzne rády kódov 2D-OCCC.

3. Implementovať vhodný simulačný model komunikačnej časti systému pre prostredie V2V

Vybrať a implementovať vhodný simulačný model, ktorý dostatočne reflektuje prenosové charakteristiky prostredia V2V.

4. Overiť, analyzovať a porovnať navrhnutý systém s existujúcimi riešeniami na základe stanovenej metodiky

Analyzovať navrhnutý systém na základe stanovenej metodiky pre komunikačnú a radarovú časť RadCom, t.j. z pohľadu výkonových charakteristík, chybovosti v prostredí V2V a radarového rozlíšenia. Získané simulačné výsledky komunikačnej časti porovnať s riešením bez aplikovania dvojrozmerného rozptylu.

5. Nájsť vhodnú ekvalizačnú metódu na dosiahnutie prijateľnej chybovosti systému

Na základe analýzy simulačných výsledkov nájsť vhodnú ekvalizačnú metódu a stanoviť podmienky, pri ktorých systém dosahuje čo možno najnižšiu chybovosť komunikačnej časti v simulovanom prostredí V2V.

4 Metodika vyhodnocovania RadCom systémov

4.1 Dopplerov efekt

V prípade, že sú radar a pozorovaný objekt vo vzájomnom pohybe, dochádza k fenoménu označovanom ako Dopplerov efekt. Frekvencia prijatej vlny po odraze môže byť v závislosti od smeru pohybu objektu väčšia alebo menšia. Pri rýchlosti objektu v_0 platí pre Dopplerov efekt v, ktorý sa označuje aj ako Dopplerov posun, vzťah

$$\nu = \frac{2 \cdot v_0 \cdot f_c}{c} \cdot \cos(\alpha) , \qquad (4.1)$$

kde f_c je nosná frekvencia vyslanej elektromagnetickej vlny, c je rýchlosť svetla vo vákuu a α je vzájomný uhol medzi vektorom rýchlosti objektu a smerom pohybu elektromagnetickej vlny. Takýto Dopplerov efekt nastáva vtedy, keď je radar aktívny a vlnu vysiela smerom k objektu, ktorá sa potom odrazí a prichádza späť. Pre pasívny radar, kedy vlna prechádza iba z vysielača do prijímača, platí pre Dopplerov efekt ν rovnica

$$\nu = \frac{\nu_0 \cdot f_c}{c} \cdot \cos(\alpha) \,. \tag{4.2}$$

K Dopplerovmu efektu definovanom v rovnici (4.2) dochádza aj v telekomunikačnom scenári, keď je vysielaná vlna spracovaná v prijímači bez odrazu od prekážok.

4.2 Funkcia nejednoznačnosti a normovaná funkcia nejednoznačnosti

Z odrazeného signálu je potrebné extrahovať informácie o rýchlosti a vzdialenosti pozorovaného objektu. Za týmto účelom sa v radarovej technike používa tzv. funkcia nejednoznačnosti. Funkcia nejednoznačnosti $\chi(\tau, \nu)$ je časovo-frekvenčná funkcia vyjadrujúca koreláciu pôvodného signálu s jeho rôzne časovo-frekvenčne posunutou verziou [19]

$$\chi(\tau,\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s^*(t+\tau) \cdot e^{i2\pi\nu t} dt , \qquad (4.3)$$

kde $s^*(t)$ predstavuje konjugovanú verziu signálu s(t). Analýza funkcie sa vykonáva po vyjadrení obálky, a teda absolútnej hodnoty tejto funkcie $|\chi(\tau, \nu)|$.

Maximá funkcie nejednoznačnosti môžu nadobúdať rôzne hodnoty. Preto bola zavedená normovaná funkcia nejednoznačnosti $\chi_N(\tau, \nu)$, ktorej globálne maximum je vždy rovné jednej

$$\chi_N(\tau,\nu) = \frac{|\chi(\tau,\nu)|}{\max\left\{|\chi(\tau,\nu)|\right\}} . \tag{4.4}$$

Funkcia nejednoznačnosti v praxi opisuje výstupy spriahnutého filtra v prijímači pre signál podstupujúci rôzne časové a Dopplerove posuny. Na základe hodnôt funkcie nejednoznačnosti je možné odhadnúť polohu a vzájomnú rýchlosť pozorovaného objektu.

4.3 Vzájomná funkcia nejednoznačnosti

Pri analýze radarových signálov je užitočné vyjadriť aj vzájomné korelačné vlastnosti dvoch rozdielnych signálov. Ak nastane situácia, pri ktorej v rovnakom frekvenčnom pásme pracujú dva radary s rôznymi priebehmi signálov, je vhodné takúto analýzu vykonať. Korelácia dvoch rôznych vzájomne časovo a frekvenčne posunutých signálov sa označuje ako vzájomná funkcia nejednoznačnosti $\chi_{vz}(\tau, \nu)$ a je definovaná ako

$$\chi_{\nu z}(\tau,\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cdot v^*(t+\tau) \cdot e^{i2\pi\nu t} dt , \qquad (4.5)$$

kde u(t) je prvý signál a $v(t)^*$ je konjugovaná verzia druhého zo signálov. Normovaná funkcia nejednoznačnosti je potom $\chi_{N \nu z}(\tau, \nu)$ a definovaná je rovnako ako normovaná funkcia nejednoznačnosti v rovnici (4.4).

4.4 Pomer maximálneho k postrannému laloku funkcie nejednoznačnosti

Funkcia nejednoznačnosti môže okrem globálneho maxima v bode $\tau = 0$ a $\nu = 0$ vo svojom priebehu nadobúdať aj lokálne maximá. Ak sú lokálne maximá príliš vysoké, môžu spôsobiť nesprávnu identifikáciu objektu v priestore. Na opis takýchto deštruktívnych maxím bol zavedený pomer maximálneho k postrannému laloku (PSLR – Peak-to-Sidelobe Ratio) ako

$$PSLR\{|\chi(\tau,\nu)|\} = 10 \cdot \log\left(\frac{\max\{|\chi(\tau,\nu)|\}}{\max_{S}\{|\chi(\tau,\nu)|\}}\right), \tag{4.6}$$

kde $max_s \{\cdots\}$ vyjadruje najväčšie lokálne maximum mimo globálneho maxima. Čím je hodnota PSLR väčšia, tým je väčšia aj jednoznačnosť v radarovom obraze.

4.5 Pomer špičkovej a strednej hodnoty výkonu signálu

Pomer špičkovej a strednej hodnoty výkonu (PAPR – Peak-to-Average Power Ratio) je metrika na popis fluktuácie signálu. Vzniká v systémoch pracujúcich na viacerých nosných frekvenciách. Keďže nosné frekvencie OFDM signálu sú modulované navzájom nezávislými dátovými tokmi, PAPR môže nadobúdať rôzne hodnoty. Ak všetky nosné frekvencie nadobudnú rovnakú fázu, dochádza k maximálnej hodnote PAPR. PAPR je definované ako [20]

$$PAPR\{(s(t))\} = 10 \cdot \log\left(\frac{max|s(t)|^2}{E\{|s(t)|^2\}}\right), \qquad (4.7)$$

kde $E\{\dots\}$ je operáciou výpočtu strednej hodnoty. Vysoká hodnota PAPR môže spôsobiť skreslenie signálu v prijímači. Skreslenie nastáva vtedy, keď vstupný zosilňovač vplyvom vysokého PAPR pracuje mimo oblasti lineárneho zosilnenia. Tým prirodzene stúpa chybovosť systému. Parameter PAPR je štatisticky opisovaný pomocou komplementárnej kumulatívnej distribučnej funkcie (CCDF – Complementary Cumulative Distribution Function).

4.6 Pomer energie na bit ku spektrálnej hustote výkonu šumu

Pravdepodobnosť chyby na bit (BER – Bit Error Rate) systému je zisťovaná pre určitý pomer výkonu signálu k výkonu šumu (SNR – Signal-to-Noise Ratio). Na rovnocenné porovnanie systémov bez rozptylu a s rozptylom je však vhodnejšie BER zisťovať pre pomer energie na bit ku spektrálnej hustote výkonu šumu $\frac{E_b}{N_0}$. Pre konvenčné systémy OFDM bez rozptylu, v ktorom sú všetky nosné frekvencie použité na prenos informácie, platí pre závislosť medzi SNR a $\frac{E_b}{N_0}$ vzťah

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB}^{OFDM} = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{dB} + 10 \cdot \log\left(\frac{T_D}{T_{OFDM}}\right) + 10 \cdot \log\left(\log_2(M)\right), \tag{4.8}$$

kde M je stupeň modulácie. Pre 2D-OCCC-OFCDM systém je ešte potrebné zakomponovať vplyv viacnásobného prístupu a použitej vysielacej stratégie. Hodnotu SNR pre 2D-OCCC-OFCDM systém potom pre frekvenčné oddelenie podkanálov môžeme vyjadriť ako

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB}^{2D-OCCC-OFCDM} = \left(\frac{S}{N}\right)_{dB}^{OFDM} + 10 \cdot \log\left(\frac{U \cdot VSR}{N_c \cdot N}\right),\tag{4.9}$$

kde U je počet súčasne aktívnych používateľov, N_c je počet nosných frekvencií, N je rád kódu 2D-OCCC a VSR je variabilný rýchlostný faktor 2D-OCCC-OFCDM systému.

5 Návrh 2D-OCCC-OFCDM systému

V nasledujúcej kapitole predstavíme návrh inovatívneho systému, ktorý je založený na princípe dvojrozmerného rozptylu OFCDM použitím dvojrozmerných úplne komplementárnych kódov 2D-OCCC (Two-Dimensional Orthogonal Complete Complementary Codes).

5.1 Originalita zvoleného spôsobu riešenia

Na základe všeobecných charakteristík komunikácie V2V sa vozidlá môžu pohybovať navzájom oveľa vyššími rýchlosťami než je tomu v prípade mobilných bunkových sietí. Navyše, LOS propagačná cesta nemusí vždy existovať. Najväčším negatívnym vplyvom na prenos informácie je Dopplerov posun. Súčasný návrh protokolu v špecifikácii 802.11p využíva CSMA/CA princíp. Vysielanie je rozdelené do časových slotov rovnakej dĺžky. Žiaden zisk spracovania ani frekvenčná diverzita nie sú uvažované. Tým sa principiálne znižuje efektivita využitia frekvenčného pásma. Na rozdiel od bežných mobilných sietí, ktoré predpokladajú bunkové rozloženie s bázovými stanicami slúžiacimi ako premostenie medzi mobilnými stanicami a vonkajším svetom, vo V2V scenári nie je možné zaručiť synchrónny prenos informácie. Aj preto sa spôsob ad-hoc komunikácie vo V2V označuje pojmom VANET.

Jedným zo spôsobov ako zaručiť spoľahlivú komunikáciu v sieťach VANET je modifikovať fyzickú vrstvu použitím CDMA metódy. Pokrok v CDMA metódach poskytuje efektívny spôsob odstránenia efektu viacnásobného prístupu a Dopplerovho efektu. Inšpiráciou predkladanej dizertačnej práce je návrh systému využívajúceho rozptyl pomocou stĺpcovo kódovaných komplementárnych kódov, ktoré boli prezentované v práci [13]. Použitím kódov 2D-OCCC na rozptyl symbolov v OFCDM by sme chceli dosiahnuť zníženie chybovosti v prostredí V2V. Nakoľko OFCDM systém na báze kódov 2D-OCCC nebol doposiaľ uvažovaný a ani analyzovaný pre účely komunikácie vozidiel v prostredí V2V, tento prístup považujeme za originálny a inovatívny.

5.2 Konštrukcia druhej rodiny kódov 2D-OCCC

Na konštrukciu 2D-OCCC je potrebné mať vopred vygenerované dva jednorozmerné kódy CCC s rádmi Q a P. V prípade, že Q = P, stačí použiť iba jeden kód CCC, ktorý sa pri opise kódov 2D-OCCC nazýva generujúci základ.

Nech $C_n^{(k)}$ je komplexná dvojrozmerná matica s rozmermi LxL opisujúca n-tý element k-tej signatúry. S signatúr a E elementov nového kódu 2D-OCCC je potom možné zapísať ako súbor matíc $\{C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, ..., C_E^{(1)}\}, \{C_1^{(2)}, C_2^{(2)}, ..., C_E^{(2)}\}, ..., \{C_1^{(S)}, C_2^{(S)}, ..., C_E^{(S)}\}$. $C_{n,i}^{(k)}$ potom označuje i-ty riadok elementu, pričom $i \in \{1, 2, ..., L\}$.

Nech je ako generujúci základ vybraný len jeden kód CCC charakterizovaný ako (S, E, L). Ten vieme zapísať ako $\alpha(N)_n^{(k)} = (\alpha_{n,1}^{(k)}, \alpha_{n,2}^{(k)}, ..., \alpha_{n,L}^{(k)})$, pričom $\alpha_{n,i}^{(k)} \in \{\pm 1\}$. $\alpha(N)_n^{(k)}$ vyjadruje *n*-tý element *k*-tej signatúry jednorozmerného CCC s rádom *N*. Potom je možné pre prípad P = Q skonštruovať druhú rodinu kódov 2D-OCCC podľa vzťahu

$$\boldsymbol{C}_{n,i}^{(k)} = \alpha(Q)_{[(n-1) \mod E]-1}^{([(k-1) \mod S]+1)} \times \alpha(Q)_{\nu,i}^{(t)} \text{ pre } k = 1, 2, \dots, S^2, \ n = 1, 2, \dots, E^2,$$
(5.1)

kde $v = \left\lfloor \frac{n-1}{E} + 1 \right\rfloor$, $t = \left\lfloor \frac{k-1}{S} + 1 \right\rfloor$ a *i* je index riadku postupnosti. Operácia [...] predstavuje zaokrúhlenie nadol na najväčšie celé číslo. Takto vygenerovaný kód 2D-OCCC bude mať závislosť ($S^2, E^2, L \times L$).

Ak sa ako generujúci základ zoberú jednorozmerné komplementárne kódy publikované Suehirom a Hatorim [4], ktoré sú charakterizované ako (N, N, N), je možné vygenerovať kódy 2D-OCCC definované vzťahom

$$(N^2, N^2, N \times N), \qquad (5.2)$$

kde $N = 2^{z}$ je rád kódu a z je ľubovoľné prirodzené číslo. Štruktúra kódu 2D-OCCC pre N = 2 je uvedená v Tabuľke 1.

Flomont	Signaúra								
Liement	Ι		II		III		IV		
T	1	1	1	-1	1	1	1	-1	
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	
	1	-1	1	1	1	-1	1	1	
11	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	
III	1	1	1	-1	1	1	1	-1	
	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	
IV	1	-1	1	1	1	-1	1	1	
11	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	

Tabuľka 1. Štruktúra kódu 2D-OCCC pre $\pmb{N}=\pmb{2}$

5.3 Návrh vysielača

5.3.1 Stratégia vysielania kódov 2D-OCCC

Rozptyl kódmi 2D-OCCC umožňuje vďaka ideálnemu priebehu ich dvojrozmernej diskrétnej korelačnej funkcie vysielať čipy nového informačného symbolu už od okamihu vysielania druhého čipu predchádzajú symbolu. Tým prirodzene stúpa aj efektivita využitia dostupných zdrojov. V konvenčnom CDMA systéme toto nie je možné. V ňom vysielanie nového informačného symbolu môže začať až po vyslaní všetkých čipov predchádzajúceho informačného symbolu. Vzhľadom na ideálne priebehy dvojrozmerných korelačných funkcií je navyše prekrytie vysielaných matíc rozptýlených symbolov možné uskutočniť v časovej aj vo frekvenčnej oblasti. Z tohto dôvodu v navrhovanom 2D-OCCC-OFCDM systéme definujeme dva základne vysielacie parametre ι a κ

 ι – určuje paralelne vysielaný počet bitov pozdĺž časovej oblasti. Pre hodnotu parametra platí, že najviac sa môže prekrývať toľko symbolov, koľko je časová dĺžka jednej celej čipovej postupnosti. Ak predpokladáme ideálne nekonečnú dobu vysielania, parameter ι môže nadobúdať hodnotu

$$1 \le \iota \le N. \tag{5.3}$$

 κ – určuje paralelne vysielaných počet symbolov pozdĺž frekvenčnej oblasti. V prípade frekvenčného prekrývania symbolov sme obmedzení celkovým počtom nosných frekvencií systému, resp. počtom nosných frekvencií daného podkanála. Ak máme v podkanále dostupných K nosných frekvencií, pre hodnotu parametra κ platí

$$1 \le \kappa \le (\mathbf{K} - N + 1). \tag{5.4}$$

Navrhnutý 2D-OCCC-OFCDM systém umožňuje vysielať dáta variabilnou rýchlosťou, ktorú môžeme vyjadriť definovanými parametrami ι a κ . Za účelom metrického opisu 2D-OCCC-OFCDM systému sme definovali variabilný rýchlostný faktor *VRF* ako

$$VRF = \iota \cdot \kappa \,, \tag{5.5}$$

ktorý môže nadobúdať hodnoty

$$1 \le VRF \le N \cdot (K - N + 1). \tag{5.6}$$

Hodnota *VRF* prirodzene nemusí nadobúdať iba násobky parametrov ι a κ . Matice elementu sa môžu v čase a frekvencii prekrývať ľubovoľne. Hranice *VRF* však vždy budú platiť podľa rovnice (5.6). Parametre ι a κ nám v návrhu slúžia predovšetkým analytickému účelu pri vyhodnocovaní metodických postupov.

5.3.2 Podkanálová štruktúra

Frekvenčné rozmiestnenie podkanálov nám umožňuje elementy vysielať paralelne na viacerých nosných frekvenciách. Takáto podkanálova štruktúra nám zároveň prináša možnosť voľby parametra ι . Ak každému podkanálu pridelíme viac nosných frekvencií, než je minimálne nutné na vyslanie jedného elementu, čipové matice je možné prekrývať aj pozdĺž frekvenčnej oblasti pomocou parametra κ . Pre frekvenčné rozmiestnenie podkanálov bude platiť, že modulačná rýchlosť 2D-OCCC-OFCDM systému s počtom nosných frekvencií N_c bude v porovnaní s konvenčným systémom OFDM s rýchlosť ou $R_{S OFDM}$ pre jedného používateľa nadobúdať tvar

$$R_{S \ 2D-OCCC-OFCDM} = \frac{\iota \cdot \kappa}{N_c \cdot N} \cdot R_{S \ OFDM} = \frac{\iota \cdot \kappa}{K \cdot N^3} \cdot R_{S \ OFDM} , \qquad (5.7)$$

kde počet nosných frekvencií jedného podkanála je $K = \frac{N_c}{N^2}$. Pridaním variabilných hodnôt parametrov *i* a κ vieme vysielané symboly pomocou stĺpcového vektora vyjadriť ako

$$\zeta_{s,a}^{(u)} = \zeta_{s,a}^{(u)} + \vartheta_{s,a}(\iota,\kappa)$$
(5.8)

kde funkcia $\vartheta_{s,a}(\iota,\kappa)$ predstavuje prekrytie ostatných rozptýlených symbolov s práve vysielaným symbolom na základe parametrov $\iota a \kappa$. Rovnica (5.8) predstavuje základný mechanizmus rozptylu 2D-OCCC-OFCDM systému, ktorý je vo vysielači implementovaný v rozptylovom bloku. Vizualizácia dvojrozmerného rozptylu pri frekvenčnom oddelení podkanálov s prekrývaním je znázornená na Obr. 1.



Obr. 1. Dvojrozmerný rozptyl s prekrývaním v 2D-OCCC-OFCDM systéme.

Bloková schéma navrhovaného vysielača 2D-OCCC-OFCDM systému s jednotlivými časťami je znázornená na Obr. 2.



Obr. 2. Bloková schéma vysielača navrhovaného 2D-OCCC-OFCDM systému.

5.4 Návrh prijímača 2D-OCCC-OFCDM

Pri návrhu prijímača 2D-OCCC-OFCDM systému sme vychádzali z rovnakého princípu, aký využíva VSF-OFCDM systém [15]. Po vzorkovaní, odstránení CP, spracovaní signálu v FFT bloku a ekvalizácii sú dáta rekombinované v rekombinačnom bloku podľa podkanálovej štruktúry použitej vo vysielači. Bloková schéma navrhovaného prijímača 2D-OCCC-OFCDM systému je znázornená na Obr. 3.



Obr. 3. Bloková schéma prijímača navrhovaného 2D-OCCC-OFCDM systému.

5.4.1 Ekvalizácia CE

Ekvalizácia CE (Controlled Equalization) kombinuje ekvalizácie ZF a EGC. Ak je kanálový koeficient $|H_n|$ menší ako určitá hodnota α , je použitá ekvalizácia EGC, aby sa predišlo pridávaniu veľkého výkonu na výkonovo slabšie nosné frekvencie. V opačnom prípade je použitá ekvalizácia ZF. Kompenzačný koeficient *n*-tej nosnej frekvencie je definovaný ako [21]

$$G_{n} = \begin{cases} \frac{1}{H_{n}} & \text{pre } |H_{n}| \geq \alpha \\ \frac{H_{n}^{*}}{|H_{n}|} & \text{pre } |H_{n}| < \alpha \end{cases}$$
(5.9)

Nevýhodou ekvalizácie CE je, že optimálne hodnoty parametra α musia byť zistené vopred. Optimálna hodnota závisí od SNR a počtu používateľov.

5.5 Koncepčné prispôsobenie 2D-OCCC-OFCDM systému do prostredia IEEE 802.11p

Pri koncepčnom prispôsobení navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému do prostredia IEEE 802.11p sme vychádzali z definície špecifikácie uvedenej v práci [12]. Spolu definujeme tri varianty systému, ktoré sú uvedené v Tabuľke 6. Vysielacia stratégia zostáva variabilná. Za podkanálovú štruktúru sme si zvolili frekvenčné rozmiestnenie podkanálov. Pri návrhu predpokladáme, že na dátový prenos budú využité všetky nosné frekvencie špecifikácie, teda aj pilotné a ochranné.

Variant	I	II	III
Rád 2D-OCCC kódu N	2	4	4
Počet signatúr N ²	4	16	16
Počet elementov N^2	4	16	16
Rozmer elementu N×N	2×2	4×4	4×4
Parameter <i>i</i>	1 - 2	1 - 4	1 - 4
Minimálny potrebný počet nosných frekvencií	8	64	64
Zvolený celkový počet nosných frekvencií N _c	64	64	128
Počet frekvencií na jeden podkanál K	16	4	8
Počet potrebných IEEE 802.11p pásiem	1	1	2
Parameter <i>k</i>	1 - 15	1	1 - 5
VRF	1 - 30	1 - 4	1 - 20
Doba OFDM symbolu T _{OFDM}	8 μs	8 μs	8 μs
Počet FFT/IFFT bodov N _{IFFT}	64	64	128
Doba vzorkovania T _{Sample}	0,1 μs	0,1 μs	0,05 μs

Tabuľka 2. Návrh troch variantov 2D-OCCC-OFCDM systému koncepčne prispôsobených pre špecifikáciu IEEE 802.11p

6 Analýza 2D-OCCC-OFCDM systému

6.1 Rozloženie výkonu v časovo-frekvenčnej rovine

Jednou z dôležitých charakteristík 2D-OCCC-OFCDM systému je rozloženie výkonu v časovofrekvenčnej rovine. Časovo-frekvenčnú rovinu sme rozdelili na jednotlivé zdrojové bloky, pričom každý z nich sme definovali jednou nosnou frekvenciou a dobou trvania jedného symbolu. Vizualizácia rozloženia výkonu slúži predovšetkým na demonštratívne účely pri opise 2D-OCCC-OFCDM systému. Vysielané symboly generujeme pomocou metódy Monte Carlo, pričom vyobrazený je vždy náhodný úsek 40 symbolov po rozptýlení.



Obr. 4. Rozloženie normovaného výkonu 2D-OCCC-OFCDM systému - variant I: N = 2, 16-QAM modulácia, (a) $\kappa = 1$, $\iota = 2$, jeden aktívny používateľ a (b) $\kappa = 15$, $\iota = 2$, štyria aktívny používatelia.



Obr. 5. Rozloženie normovaného výkonu 2D-OCCC-OFCDM systému - variant II, N = 4, 16-QAM modulácia, (a) $\kappa = 1$, $\iota = 4$, jeden aktívny používateľ a (b) $\kappa = 1$, $\iota = 4$, 16 aktívnych používateľ ov.

Pri frekvenčnom prekrytí $\kappa = 1$ a časovom prekrytí pre $\iota = 2$ pre variant I, zobrazenom na Obr. 4(a) je možné vidieť, že výkon je v rámci každého časového okamihu na všetkých nosných frekvenciách rovnaký a z tohto pohľadu má deterministický charakter. Výkonové maximum, ktoré nastane na jednej nosnej frekvencii, nastane na všetkých. Využitím možnosti maximálneho frekvenčného prekrývania matíc elementov $\kappa = 15$ pre 2D-OCCC-OFCDM systém - variant I je na Obr. 4(b) možné vidieť rovnomernejšie rozloženie výkonu. Využité sú všetky nosné frekvencie každého podkanála. Takáto vysielacia stratégia zaručuje stochastický charakter výkonu rozloženom v časovo-frekvenčnej rovine.

Rozloženie výkonu 2D-OCCC-OFCDM systému - variant II, zobrazenom na Obr. 5(a), má pre jedného aktívneho používateľ a a pri maximálnom časovom prekrytí elementov $\iota = 4$ znova deterministický charakter na jednotlivých nosných frekvenciách. Na rozdiel od 2D-OCCC-OFCDM systému - variant I však rovnaký výkon nenastáva na všetkých nosných frekvenciách. Rovnaký výkon sme zaznamenali iba pre nosné frekvencie daného podkanála. Pri súčasnom vysielaní všetkých 16 používateľ v síce dochádza ku zvýšeniu náhodnosti, avšak z Obr. 5(b) vidieť opakujúce sa výkonové vzory v priebehu rozloženia normovaného výkonu v časovo-frekvenčnej rovine.

6.2 Pomer špičkovej a strednej hodnoty výkonu signálu (PAPR)

Blumenstein a Ferda [16] demonštrovali, že VSF-OFCDM systémy s rozptylom pomocou Walsh-Hadamardových postupností vykazujú oveľa vyššie hodnoty PAPR než klasické OFDM systémy bez rozptylu. Aj keď bolo ukázané, že použitím zmiešavača je možné hodnoty PAPR znížiť, stále zostávajú vyššie než hodnoty v systémoch OFDM [16]. Cieľom podkapitoly je zistiť vplyv použitia kódov 2D-OCCC na hodnoty PAPR v nami navrhnutom 2D-OCCC-OFCDM systéme s rozptylom. Analyzujeme všetky tri varianty nášho systému pomocou metódy Monte Carlo a porovnávame ich s hodnotami vypočítanými pre OFDM systém bez rozptylu. PAPR počítame pomocou metriky uvedenej v rovnici (4.7). Grafy hodnôt sú zobrazené štatisticky pomocou CCDF, ktorá opisuje pravdepodobnosť, že dané PAPR nastane.



Obr. 6. CCDF metriky PAPR pre 2D-OCCC-OFCDM systém - variant I, N = 2, $\kappa = 15$, $\iota = 2$, viacerí aktívni používatelia, (a) QPSK modulácia a (b) 16-QAM modulácia.



Obr. 7. CCDF metriky PAPR pre (a) variant II, N = 4, 16-QAM modulácia, $\kappa = 1$, $\iota = 4$, viacerí aktívni používatelia a (b) variant III, N = 4, 16-QAM modulácia, $\kappa = 5$, $\iota = 4$, viacerí aktívni používatelia.

Zvyšujúci sa počet aktívnych používateľov pri plnom prekrytí 2D-OCCC-OFCDM systému – variant I spôsobuje zvýšenie CCDF metriky PAPR pre obe modulácie. Výsledky sú zobrazené na Obr. 6(a) a Obr. 6(b). Ani v jednom z prípadov CCDF hodnoty PAPR 2D-OCCC-OFCDM – variant I však neprevýšia hodnoty systému OFDM bez rozptylu. Zvyšujúci sa počet používateľov vo variante II spôsobuje znižovanie pozorovanej hodnoty PAPR. Výsledok je zobrazený na Obr. 7(a). Ak naraz vysiela všetkých 16 aktívnych používateľov, je možné vidieť značné potlačenie hodnôt PAPR. Stúpajúci počet aktívnych používateľov pre variant III má taktiež pozitívny efekt na priebeh PAPR. Výsledok je zobrazený na Obr. 7(b). Ak naraz vysiela všetkých 16 aktívnych používateľov, PAPR hodnota 2D-OCCC-OFCDM systému – variant III je nižšia než u OFDM systému bez rozptylu. Z výsledok simulácií je možné usúdiť, že pri niektorých podmienkach dosahujú všetky tri varianty nášho systému 2D-OCCC-OFCDM s rozptylom nižší pozorovaný priebeh CCDF metriky PAPR než OFDM systém, ktorý rozptyl nepoužíva. Plné prekrytie matíc v časovo-frekvenčnej rovine poskytuje pre jedného používateľa lepšie hodnoty PAPR len v prípade variantu I. Pri súčasnom vysielaní všetkých používateľov s maximálnou *VRF* dosahuje navrhovaný 2D-OCCC-OFCDM systém pre všetky varianty nižšie hodnoty PAPR než konvenčný systém OFDM bez rozptylu.

6.3 Funkcia nejednoznačnosti kódov 2D-OCCC

Hodnotenie výkonnosti 2D-OCCC-OFCDM systému v radarovej oblasti spočíva v analýze funkcie nejednoznačnosti. Pri radarovej analýze 2D-OCCC-OFCDM systému je nutné zadefinovať podmienky, v ktorých systém funguje. Dĺžka trvania jedného OFDM symbolu je podľa špecifikácie IEEE 802.11p $T_{OFDM} = 8 \,\mu s$. Pre zachovanie ortogonality nosných frekvencií musí byť v prípade odstránenia cyklického prefixu z vysielaného symbolu upravená aj vzorkovacia frekvencia. Pre jeden normovaný posun symbolu $\frac{\tau}{T_{OFDM}}$ sa dá odvodiť rozlíšenie radaru $\Delta R = 960 \, m$. Hodnoty normovaného Dopplerovho posunu $v \cdot T_{OFDM}$ priamo vychádzajú zo vzájomných rýchlostí automobilov v prostredí V2V. Maximálny normovaný Dopplerov posun je pre radarový scenár V2V $v \cdot T_{OFDM} = 0,2$ pri vzájomnej rýchlosti vozidiel $300 \, \frac{km}{h}$. Pre telekomunikačný scenár je to $v \cdot T_S = 0,1$. Takáto vysoká vzájomná rýchlosť môže nastať jedine v prostredí diaľnice, ktorá je buď v Nemecku, alebo sa na nej porušuje zákon. Táto uvažovaná rýchlosť má viac demonštratívny než praktický charakter.



Obr. 8. Normovaná funkcia nejednoznačnosti prvej signatúry 2D-OCCC (a) pre N = 2, variant I a (b) pre N = 4, varianty II a III.

Z Obr. 8(a) je vidieť, že pre časové posuny $|\tau| > T_{OFDM}$ je funkcia nejednoznačnosti kódu 2D-OCCC použitom v 2D-OCCC-OFCDM systéme - variant I v celom svojom obore hodnôt nulová. Hlavný lalok končí v časovom posune $|\tau| = \frac{T_{OFDM}}{2}$, ktorý predstavuje vzájomnú vzdialenosť automobilu a sledovaného objektu $\Delta R = 480 \ m$. Hodnota PSLR postranného laloku vznikajúcom za týmto posunom je 17,23 dB. Pre radarové rozlíšenie systému je takýto výsledok nedostačujúci. Objekty nachádzajúce sa v blízkosti radaru už len niekoľko desiatok metrov by neboli rozoznateľné a radarová časť systému by bola nepoužiteľná. Podobný problém nastáva aj pri Dopplerovom posune, kedy má funkcia nejednoznačnosti rovnaký priebeh aj pri vysokých vzájomných rýchlostiach.

Funkcia nejednoznačnosti kódu 2D-OCCC použitom v 2D-OCCC-OFCDM systéme - variant II a III je zobrazená na Obr. 8(b). Funkcia znova nadobúda nulové hodnoty pre časové posuny $|\tau| > T_{OFDM}$ vo všetkých Dopplerových posunoch. Hlavný lalok funkcie nejednoznačnosti končí v hodnote $|\tau| = \frac{T_{OFDM}}{4}$, ktorá predstavuje vzájomnú vzdialenosť vozidla a sledovaného objektu $\Delta R = 240 m$. Aj takéto rozlíšenie radarovej časti systému však nie je dostatočné.

Pre telekomunikačný scenár však naše simulácie prinášajú veľmi pozitívny výsledok. Z priebehu funkcií nejednoznačností oboch kódov vyplýva, že priebeh časovej korelácie nebude ovplyvnený Dopplerovým posunom. Ideálny priebeh autokorelácie zostáva zachovaný aj pri vysokých vzájomných rýchlostiach TX a RX. Kódy sú v navrhovaných variantoch Dopplerovsky odolné a 2D-OCCC-OFCDM systém je vhodné použiť vo vysokorýchlostných mobilných scenároch.

6.4 Vzájomná funkcia nejednoznačnosti kódov 2D-OCCC

Na analýzu vzájomnej funkcie nejednoznačnosti kódov 2D-OCCC, podobne ako v podkapitole (6.3), uvažujeme ideálne nezávislé vysielanie elementov príslušných signatúr. Vzájomnú funkciu nejednoznačnosti jednotlivých elementov sme vypočítali podľa rovnice (4.5) a normovali podľa maxima funkcie nejednoznačnosti jednej signatúry. Všetky predpoklady spomenuté v podkapitole (6.3) sú pre túto simuláciu totožné.



Obr. 9. Normovaná vzájomná funkcia nejednoznačnosti (a) prvej a štvrtej, druhej a tretej; (b) prvej a tretej, druhej a štvrtej a (c) prvej a druhej, tretej a štvrtej signatúry kódu 2D-OCCC pre N = 2, variant I.

Spolu sme pozorovali tri rôzne priebehy vzájomných normovaných funkcií nejednoznačností, ktoré sú zobrazené na Obr. 9. Priebehy funkcií nám slúžia ako podklad pre analýzu telekomunikačnej časti 2D-OCCC-OFCDM systému, pri ktorom je zaujímavé sledovať vplyv Dopplerovho posunu na priebeh korelácie pri asynchrónnom, resp. neceločíselnom symbolovom posune jednotlivých signatúr. Uspokojivý priebeh vzájomnej korelačnej funkcie nastáva medzi prvou a štvrtou, druhou a treťou, prvou a druhou, a treťou a štvrtou signatúrou. Tieto priebehy sú zobrazené na Obr. 9(a) a Obr. 9(c). Aj pri extrémnom Dopplerovom posune $v \cdot T_{OFDM} = 0,1$ vo všetkých nasimulovaných priebehoch platí, že výsledná vzájomná korelačná funkcia nadobúda hodnoty $\chi_N < 0,35$. Pri kombinácií prvej a tretej, a druhej a štvrtej signatúry dochádza k porušeniu ideálnej vzájomnej korelácie pri vzájomnom neceločíselnom symbolovom posune elementov jednotlivých signatúr. Tento nedostačujúci výsledok nastáva pri všetkých analyzovaných Dopplerových posunoch. Priebeh je zobrazený na Obr. 9(b). Dopplerov posun však nemá vplyv na ideálny priebeh vzájomnej korelácie, ak sú tieto signatúry zosynchronizované v čase $\tau = 0$.

Na základe predpokladu, že v sieťach VANET na báze kódového rozdelenia používateľov môže dochádzať k asynchrónnemu prenosu informácie, funkcia nejednoznačnosti a vzájomná funkcia nejednoznačnosti opisujú korelačný priebeh kódových postupností pri rôznych Dopplerových posunoch. Z výsledkov pre 2D-OCCC-OFCDM systém - variant I je evidentné, že kvôli porušeniu ideálnosti vzájomnej korelácie v prípade vysokých vzájomných rýchlostí TX a RX nemôžu byť všetky signatúry kódu 2D-OCCC pre N = 2 použité asynchrónne naraz. Riešením by mohlo byť zredukovanie počtu použitých signatúr na polovicu. Tým by však došlo aj k zníženiu počtu používateľov. Druhým možným riešením je síce taktiež zníženie počtu používateľov na polovicu, avšak každý používateľ by mal k dispozícii dve signatúry na rozptyl dát naraz, čím by sa mu zdvojnásobila maximálna možná prenosová rýchlosť. Medzi týmito dvoma signatúrami by bola zachovaná synchrónnosť, čím by ideálny priebeh korelačných funkcií zostal zachovaný pre všetky Dopplerove posuny.

6.5 Chybovosť 2D-OCCC-OFCDM systému v prostredí V2V - diaľničný scenár

Na simuláciu systému použijeme model diaľničného prostredia GSCM V2V [18]. RX a TX sa pohybujú v protismere so vzájomnou rýchlosťou $\Delta v = 260 \frac{km}{h}$. Komunikácia prebieha na úseku dlhom $\Delta x = 250 m$. Počiatočné polohy vozidiel sú $x_{TX} = 30 m$ a $x_{RX} = 220 m$. Pre porovnanie výsledkov simulácie navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému uvádzame v grafoch chybovostí referenčné priebehy BER v závislosti od $\frac{E_b}{N_0}$ podľa OFDM AWGN a OFDM V2V. Referenčné priebehy sme vypočítali pre nasledujúce podmienky:

- OFDM AWGN OFDM systém bez rozptylu v prostredí AWGN šumu v ktorom nie je prítomný vplyv kanála. Tento priebeh v práci uvádzame ako spodnú hranicu optimálnej chybovosti. Systém využíva všetky nosné frekvencie na prenos dát bez možnosti využitia ekvalizácie.
- OFDM V2V OFDM systém bez rozptylu v prostredí V2V s AWGN šumom. Systém využíva všetky nosné frekvencie na prenos dát. Pre tento referenčný priebeh sme vždy použili rovnakú ekvalizáciu ako pre navrhnutý 2D-OCCC-OFCDM systém.

Nami navrhnutý 2D-OCCC-OFCDM systém je v grafoch chybovostí v legende označený skrátene ako OFCDM V2V. V prijímači predpokladáme úplnú znalosť kanálových koeficientov. Použili sme ekvalizácie ZF, EGC a CE.



Obr. 10. BER 2D-OCCC-OFCDM systému - variant I: QPSK modulácia, (a) ekvalizácia ZF a (b) ekvalizácia EGC.



Obr. 11. BER 2D-OCCC-OFCDM systému – variant I: (a) QPSK modulácia, ekvalizácia CE pre parameter $\alpha = 0, 25$ a (b) 16-QAM modulácia, ekvalizácia CE pre parameter $\alpha = 0, 10$.

Z Obr. 10(a) je možné vidieť, že pri použití ekvalizácie ZF je chybovosť 2D-OCCC-OFCDM systému - variant I v diaľničnom scenári vyššia pre všetky hodnoty $\frac{E_b}{N_0}$ pre QPSK moduláciu než u referenčného systému OFDM V2V. Podobný výsledok bol zaznamenaný aj pre 16-QAM moduláciu. BER 2D-OCCC-OFCDM systému je rovnaké pri 1 aj 4 používateľoch. To naznačuje, že použitie ekvalizácie ZF umožňuje plné obnovenie ortogonality vysielaných kódov 2D-OCCC. BER 2D-OCCC-OFCDM so stúpajúcim $\frac{E_b}{N_0}$ konverguje ku chybovosti systému OFDM V2V. Pri použití QPSK modulácie a ekvalizácie EGC v 2D- OCCC-OFCDM systéme - variant I je chybovosť v prípade jedného používateľa nižšia než u referenčného systému OFDM V2V. Priebeh chybovosti je zobrazený na Obr. 10(b). V prípade štyroch používateľov sme zistili, že ekvalizácia EGC nedokáže dostatočne obnoviť vzájomnú ortogonalitu signatúr a chybovosť je horšia. Na Obr. 11 je možné vidieť, že pre ekvalizáciu CE má na niektorých úsekoch systém 2D-OCCC-OFCDM nižšiu BER než referenčný systém OFDM V2V pre všetky počty aktívnych používateľov. Použili sme QPSK a 16-QAM modulácie symbolov, ktoré sú ukázané na Obr. 11(a) a Obr. 11(b). Na rozdiel od referenčného systému OFDM V2V je chybovosť 2D-OCCC-OFCDM - variant I značnou mierou závislá na hodnote parametra α . Pre rôzne počty používateľov je na základe výsledkov možné predpokladať, že pre niektoré kombinácie hodnoty $\frac{E_b}{N_0}$ a parametra α je možné dosiahnuť nižšiu chybovosť navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému než u referenčného systému OFDM V2V.

6.6 Chybovosť 2D-OCCC-OFCDM systému v prostredí V2V - mestský scenár

Na dosiahnutie minimálnej BER nášho riešenia potrebujeme nájsť optimálne α pre všetky možné kombinácie $\frac{E_b}{N_0}$ a počtu používateľov ekvalizačnej metódy CE. Keďže model GSCM V2V je výpočtovo náročný, prostredie V2V simulujeme Rayleighovým modelom kanála parametrizovaným do mestského prostredia V2V podľa práce [17]. Takúto substitúciu odôvodňujeme tým, že pri oboch simuláciách predpokladáme úplnú znalosť kanálových koeficientov a že oneskorenie omeškania na vzdialenosti $\Delta x =$ **250** *m* nikdy neprekročí dobu trvania cyklického prefixu $T_G = 1,6 \,\mu s$. Aby sme však NWSSUS neporušili, dobu koherencie Rayleighovho kanála uvažujeme len po dobu trvania jedného vysielaného symbolu. Signál sa z TX do RX šíri bez dominantnej LOS cesty a maximálna predpokladaná vzájomná rýchlosť je $\Delta v =$ $120 \frac{km}{b}$. Zistené optimálne hodnoty α sú zobrazené na Obr. 12(a) a Obr. 12(b).



Obr. 12. Priebehy optimálneho parametra **a** CE metódy v 2D-OCCC-OFCDM systéme – variant I pre rôzne počty aktívnych používateľov pre mestský model Rayleighovho kanála V2V pre (a) QPSK moduláciu a (b) 16-QAM moduláciu.



Obr. 13. BER 2D-OCCC-OFCDM systému - variant I: optimalizovaná ekvalizácia CE pre (a) QPSK moduláciu a (b) 16-QAM moduláciu.



Obr. 14. BER 2D-OCCC-OFCDM systému - variant III: optimalizovaná ekvalizácia CE pre (a) QPSK moduláciu a (b) 16-QAM moduláciu.

Na Obr. 13(a) je možné vidieť nižšiu chybovosť navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému – variant I pre QPSK moduláciu než u referenčneho systému OFDM pri použití optimalizovanej ekvalizácie CE. Ekvalizácia CE efektívne znižuje chybovosť pri 1 aj 4 aktívnych používateľoch. Pre 16-QAM moduláciu, ktorej BER priebeh je zobrazený na Obr. 13(b), dosahuje optimalizácia ekvalizácia CE lepšiu chybovosť než ekvalizácia ZF. Taktiež je možné vidieť, že pri jednom aktívnom používateľovi je pre $\frac{E_b}{N_0} > 12 \, dB$ chybovosť navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému – variant I nižšia než u referenčného OFDM systému bez rozptylu. Pri súčasnom aktívnom vysielaní všetkých používateľov je chybovosť navrhované systému o čosi vyššia než v prípade OFDM V2V, avšak pre $\frac{E_b}{N_0} > 18 \, dB$ túto nevýhodu optimalizovaná ekvalizácia CE prekonáva.

Priebeh chybovosti navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému - variant III pre QPSK moduláciu je zobrazený na Obr. 14(a). Z obrázku je vidieť, že použitím optimalizovanej ekvalizácie CE je pre QPSK moduláciu priebeh BER lepší než u referenčného OFDM systému. Optimalizovaná CE ekvalizácia dokáže zlepšiť priebeh chybovosti navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému - variant III aj pre 16-QAM moduláciu. Priebeh BER je zobrazený na Obr. 14(b). V prípade jedného aktívneho používateľa je chybovosť 2D-OCCC-OFCDM systému – variant III nižšia než u referenčného OFDM systému. V prípade všetkých 16 aktívnych používateľoch je lepšia chybovosť dosiahnutá až pre $\frac{E_b}{N_0} > 15 \ dB$.

7 Záver

Inteligentné transportné systémy budúcnosti predstavujú perspektívny smer vývoja telekomunikačnej techniky. V predkladanej dizertačnej práci sme sa zamerali na návrh inovatívneho systému na báze OFCDM, v ktorom je rozptyl realizovaný dvojrozmernými úplne komplementárnymi kódmi. Koncepčné prispôsobenie 2D-OCCC-OFCDM systému navrhnutého v rámci riešenia dizertačnej práce v prostredí V2V, ktoré vychádza priamo zo špecifikácie IEEE 802.11p sme overili pomocou numerických simulácií. Ukázali sme, že rozšírenie OFDM o dvojrozmerný rozptyl pomocou kódov 2D-OCCC dokáže priniesť zníženie chybovosti komunikačnej časti systému v cestnom scenári.

Dosiahnuté výsledky môžeme zhrnúť vzhľadom na stanovené ciele dizertačnej práce nasledovne:

1. Navrhnúť systém na báze kódov 2D-OCCC využívajúci princíp OFCDM

- Navrhli sme vysielač a prijímač, ktoré využívajú výhody rozptylu pomocou kódov 2D-OCCC. Vysielaciu stratégiu sme definovali parametrami paralelného vysielania rozptýlených symbolov v časovej a frekvenčnej oblasti. Na základe týchto parametrov sme odvodili variabilnú prenosovú rýchlosť systému.
- Určili sme, že frekvenčné oddelenie podkanálov predstavuje najvhodnejšiu podkanálovú štruktúru pre navrhnutý 2D-OCCC-OFCDM systém. Na základe optimálnej štruktúry podkanálov sme definovali spôsob rozptylu.

2. Koncepčne prispôsobiť navrhnutý systém do prostredia V2V

• Definovali sme tri rôzne varianty 2D-OCCC-OFCDM systému, ktoré sú koncepčne prispôsobené pre špecifikáciu IEEE 802.11p. Varianty vychádzajú z dvoch rôznych rádov kódov 2D-OCCC.

3. Implementovať vhodný simulačný model komunikačnej časti systému pre prostredie V2V

- Implementovali sme simulátor vysielača a prijímača 2D-OCCC-OFCDM systému, ktorý umožňuje systém ľubovoľne parametrizovať pre rôzne podmienky a modelovať v rôznych modeloch kanála.
- Implementovali sme GSCM V2V model, ktorý odzrkadľuje fyzikálne podmienky prostredia V2V. Model sme použili v zostrojenom simulátore.
- 4. Overiť, analyzovať a porovnať navrhnutý systém s existujúcimi riešeniami na základe stanovenej metodiky
 - 2D-OCCC-OFCDM systém sme charakterizovali rozložením výkonu v časovo-frekvenčnej rovine. Takáto vizualizácia zjednodušuje pochopenie princípu dvojrozmerného rozptylu pomocou kódov 2D-OCCC.
 - Analyzovali sme štatistické distribúcie metriky PAPR navrhovaných variantov systému. Na základe analýz sme zistili, že PAPR nami navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému pre všetky tri zvolené varianty je závislé na zvolenom časovom a frekvenčnom prekrývaní elementov. Pri maximálnom časovofrekvenčnom prekrývaní a pri aktívnom vysielaní všetkých používateľov sme v závislosti na zvolenom variante zaznamenali nižšie, poprípade rovnaké hodnoty štatistickej distribúcie metriky PAPR v porovnaní s konvenčným OFDM systémom.
 - Analýzou funkcie nejednoznačnosti sme ukázali, že 2D-OCCC-OFCDM systém zatiaľ vykazuje nedostatočné rozlíšenie radarovej časti v aplikovanom cestnom scenári. Zároveň sme zistili, že autokorelačná funkcia kódov 2D-OCCC zostáva ideálna aj pre veľké Dopplerove posuny.
 - Ukázali sme, že vzájomná funkcia nejednoznačnosti niektorých kombinácií signatúr kódov 2D-OCCC nie je ideálna. Na dosiahnutie vhodnej vzájomnej diskrétnej korelácie je nutné tieto kombinácie signatúr vopred synchronizovať.
- Dokázali sme, že navrhnutý 2D-OCCC-OFCDM systém dosahuje pri použití vhodných ekvalizačných metód pre určité hodnoty SNR lepší priebeh chybovosti než konvenčný OFDM systém bez rozptylu.
- 5. Nájsť vhodnú ekvalizačnú metódu na dosiahnutie prijateľ nej chybovosti systému
 - Použitím ekvalizačnej metódy CE s optimalizáciou jej parametra sme v simulovanom prostredí pre QPSK moduláciu zaznamenali nižšiu chybovosť nami navrhnutého systému využívajúceho rozptyl pomocou kódov 2D-OCCC oproti referenčnému OFDM systému. V prípade 16-QAM modulácie sme nižšiu chybovosť zaznamenali iba pre určité hodnoty SNR.

Pôvodné vedecké prínosy

Pôvodné vedecké prínosy dizertačnej práce môžeme na základe súčasného poznania v predmetnej vednej oblasti zhrnúť nasledovne:

- 1. Navrhli sme inovatívny 2D-OCCC-OFCDM systém, ktorý využíva princíp dvojrozmerného rozptylu pomocou rôznych rádov kódov 2D-OCCC v závislosti na dostupnom počte nosných frekvencií. Pre systém sme zadefinovali parametre prekrývania rozptýlených symbolov v časovej a vo frekvenčnej oblasti, variabilnú prenosovú rýchlosť, frekvenčné rozloženie podkanálov a navrhli sme schémy vysielača a prijímača. Navrhnutý systém je možné prispôsobiť a integrovať do ľubovoľne špecifikovaného prostredia OFDM. Koncepčne sme 2D-OCCC-OFCDM systém prispôsobili špecifikácii IEEE 802.11p. Ide o prvé použitie takéhoto systému v prostredí V2V.
- 2. Zistili sme, že navrhnutý 2D-OCCC-OFCDM systém dosahuje porovnateľné výsledky priebehov PAPR pri porovnaní s konvenčným systémom OFDM. Pri použití dlhších kódov sme dokonca zaznamenali nižšie hodnoty PAPR.
- 3. Zistili sme, že radarová časť systému, ktorú sme overili pomocou funkcie nejednoznačnosti kódov 2D-OCCC, zatiaľ nedosahuje požadované rozlíšenie potrebné pre scenár V2V. Pre komunikačnú časť sme však zistili, že ideálny priebeh autokorelačnej funkcie 2D-OCCC zostáva zachovaný aj pre veľké Dopplerove posuny. Analýzou vzájomnej funkcie nejednoznačnosti sme ukázali, že Dopplerov posun má pre niektoré kombinácie signatúr negatívny vplyv na priebeh ich vzájomnej korelačnej funkcie a preto je nutné tieto kombinácie pri vysielaní vopred synchronizovať.
- 4. Na simuláciách v implementovanom simulačnom prostredí V2V sme ukázali, že komunikačná časť 2D-OCCC-OFCDM systému pri použití optimalizovanej ekvalizačnej metódy CE pre QPSK moduláciu dosahuje nižšiu chybovosť ako konvenčný OFDM systém pre všetky rády kódov 2D-OCCC. V prípade 16-QAM modulácie sme nižšiu chybovosť dosiahli iba pre určité hodnoty SNR. Simulačne sme zistili optimálne hodnoty ekvalizačnej metódy CE.

Prínosy pre ďalší rozvoj vedy a techniky

- 1. Ukázali sme, že systémy kombinujúce metódy OFDM a CDMA a využívajúce kódy 2D-OCCC predstavujú vo všeobecnosti perspektívny smer výskumu a vývoja telekomunikačnej techniky, ktorý odporúčame v budúcnosti ďalej rozvíjať. Za dôležitý ďalší krok považujeme prakticky realizovať hardvérovú implementáciu navrhnutého systému a jeho experimentálne overenie v scenári V2V.
- 2. Navrhnutý 2D-OCCC-OFCDM systém, ktorý je z pohľadu svojho dizajnu otvorený a univerzálny pre rôzne scenáre, je využiteľný v pedagogickom procese a vytvára predpoklady pre ďalší výskum v oblasti dvojrozmerných úplne komplementárnych kódov. V predmetnej oblasti výskumu je možné ho použiť pri riešení bakalárskych, diplomových a dizertačných prác alebo pri riešení vedeckých projektov.
- 3. Navrhnutý systém by mohol byť pre praktické aplikácie koncepčne prispôsobený nižšej dobe vysielania jedného symbolu, pri ktorej by radarová funkcionalita dosahovala potrebné rozlíšenie. Aj keď sme ukázali, že prostredie V2V takúto možnosť priamo nepodporuje, vhodne modifikovaný 2D-OCCC-OFCDM systém by mohol nájsť svoje uplatnenie v iných odvetviach hospodárstva. Ako perspektívnu oblasť praktickej aplikácie vidíme napríklad automatizovanie poľných prác v poľnohospodárstve, kde by systém asistoval pri presnom navigovaní, komunikácii a riadení poľnohospodárskych strojov.

Literatúra

- [1] Golay, M. J. E. Static Multislit Spectrometry and Its Application to the Panoramic Display of Infrared Spectra. In: *Journal of the Opt. Soc. of America*. 1951, **41**(7), s. 468-472.
- [2] Golay, M. J. E. Complementary Series. In: IRE Transactions on Information Theory. 1961, 7(2), s. 82-87. ISSN 0096-1000.
- [3] Tseng, C. C. Liu, C. L. Complementary Sets of Sequences. In: IEEE Transactions on Information Theory. 1972, 18(5), s. 644-652. ISSN 0018-9448.
- [4] Suehiro, N. Hatori, M. N-shift Cross-Orthogonal Sequences. In: IEEE Transactions on Information Theory. 1988, 34(1), s. 143-146. ISSN 0018-9448.
- [5] Farkaš, P. Turcsány, M. Two-Dimensional Orthogonal Complete Complementary Codes. In: Joint First Workshop on Mobile Future and Symposium on Trends in Communications, SympoTIC '03. 2003, s. 21-24.
- [6] Turcsány, M. Farkaš, P. New 2D-MC-DS-SS-CDMA Techniques based on Two dimensional Orthogonal Complete Complementary Codes. In: 4th International Workshop on Multicarrier Spread Spectrum. 2003.
- [7] Sturm, C. Wiesbeck, W. Waveform Design and Signal Processing Aspects for Fusion of Wireless Communications and Radar Sensing. In: *Proceedings of IEEE*. 2011, 99(7), s. 1236 – 1259. ISSN 0018-9219.
- [8] Bishop, R. Intelligent vehicle technology and trends. Artech House, 2005. ISBN 978-1580539111.
- [9] Sturm, C. Pancera, E. Zwick, T. Wiesbeck, W. A Novel Approach to OFDM Radar Processing. In: Proceedings of IEEE Radar Conference. 2009, s. 1 – 4. ISSN 1097-5659.
- [10] Rappaport, T. S. Annamalai, A. Buehrer, R. M. Tranter, W. H. Wireless communications: Past events and a future perspective. In: *IEEE Communications Magazine*. 2002, 40(5), s. 148 – 161. ISSN 0163-6804.
- [11] Reichardt, L. Sturm, C. Grunhaupt, F. Zwick, T. Demonstrating the Use of the IEEE 802.11p Car-to-Car Communication Standard for Automotive Radar. In: *Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation*. 2012, s. 1576 – 1580. ISBN 978-1-4577-0918-0.
- [12] Cunha, F. Villas, L. Boukerche, A. Maia, G. Viana, A. Mini, R. A. F. Loureiro, A. A. F. Data Communication in VANETs: Protocols, Applications and Challenges. In: *Ad Hoc Networks*. 2016, 44, s. 90 – 103. ISSN 1570-8705.
- [13] Wang S. Taso Y. Chen H. Doppler-Resistant Column-Wise Complementary Coded CDMA Technology for V2V Communications. In: Ad Hoc Networks. 2012, 10(2), s. 199 – 211. ISSN 1570-8705.
- [14] Fazel, K. Kaiser, S. Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX, 2nd ed. Chichester: Wiley. 2008. ISBN 0470998210.
- [15] Maeda, N. Kishiyama, Y. Atarashi, H. Sawahashi, M. Variable Spreading Factor-OFCDM with Two Dimensional Spreading that Priorizes Time Domain Spreading for Forward Link Broadband Wireless Access. In: *IEICE Transactions on Communications*. 2005, E88-B(2).
- [16] Blumenstein, J. Fedra, Z. The PAPR and Simple PAPR Reduction of the 2D Spreading Based Communication Systems. In: Radioengineering. 2010, 19(1), s. 27 - 31. ISSN 1805-9600.
- [17] Acosta-Marum, G. Ingram, M. A. Six Time- and Frequency- Selective Empirical Channel Model for Vehicular Wireless LANs. In: IEEE Vehicular Technology Magazine. 2007, 2(4), s. 4 – 11. ISSN 1556-6072.
- [18] Karedal, J. Tufvesson, F. Czink, N. Paier, A. Dumard, C. Zemen, T. Mecklenbrauker, C. F. -Molisch, A. F. A Geometry-Based Stochastic MIMO Model for Vehicle-to-Vehicle Communications. In: IEEE Transactions on Wireless Communications. 2009, 8(7), s. 3646–3657. ISSN 1536-1276.
- [19] Rihaczek, A. W. Principles of High-Resolution Radar. Artech House, 1996, s. 516. ISBN 978-0890069004.
- [20] Gangwar, A. Bhardwaj, M. An Overview: Peak to Average Power Ratio in OFDM system & its Effect. In: International Journal of Communication and Computer Technologies. 2012, 1(2), s. 22 – 25. ISSN 2278-9723.
- [21] Cosovic, I. Schnell, M. Springer, A. on the Performance of Different Channel Pre-Compensation Techniques for Upling Time Division Duplex MC-CDMA. In: *Vehicular Technology Conference*. 2003, s. 857 – 861. ISSN 1090-3038.

Publikácie autora

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

ADE01 Lapin, I. - Kultan, M. Performance Evaluation of Wireless Attendance System Based on a Bluetooth Connection. In: Učenye zapiski Instituta socialnych i gumanitnych znani No. 1. 2014, s. 253 – 259. ISSN 2078-6980.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 Lapin, I. Farkaš, P. Peak-to-Average Power Ratio of Two-Dimensional Orthogonal Complete Complementary Codes. In: *ELMAR 2016*, 2016. Akceptovaná. Kategória **B**.
- AFC02 Lapin, I. Farkaš, P. Ambiguity Function of Two-Dimensional Orthogonal Complete Complementary Codes. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*. 2016. ISBN 978-1-4673-9554-0. Kategória **B**.
- AFC03 Varga, M. Lapin, I. Kačur J. Performance Evaluation of GMM and KD-KNN Algorithms Implemented in Speaker Identification Web-Application Based on Java EE. In: *Proceedings ELMAR-2014*. 2014, s. 1 – 4. ISSN 1334-2630. Kategória B.

Citácia: Chou, C. - Kuan, T. - Barma, S. - Chen, B. - Ji, W. - Peng, C. - Wang, J. A New Binary-Halved Clustering Method and ERT Processor for ASSR System. In: *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2016, s.* 1871 – 1884, 24(5). ISSN 1063-8210. Kategória A.

- AFC04 Lapin, I. Performance Improvement of Voice Processing Web-Application Using WebRTC and Flex Audio Streaming. In: Proceedings of Redžúr 2014: 8th International Workshop on Multimedia and Signal Processing. 2014, s. 21 – 24. ISBN 978-80-227-4162-0.
- AFC05 Kačur, J. Lapin, I. Ďurajka, J. Rozinaj, G. Speaker Identification System Based on a Web Interface. In: *Proceedings ELMAR-2012*. 2012, s. 191-194. ISSN 1334-2630.
- AFC06 Lapin, I. Ďurajka, J. Kačur, J. Speaker Identification Web-Application Based on Java EE Implementing MFCC and KNN Algorithms. In: Proceedings of Redžúr 2012: International Workshop on Multimedia and Signal Processing. 2012, s. 19-22. ISBN 978-80-227-3686-2.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 Lapin, I. Varga, M. Voice Processing Web-Application Based on Java EE Utilizing GMM Algorithm and WebRTC Technology. In: Proceedings of Redžúr 2015: 9th International Workshop on Multimedia and Signal Processing, 2015, s. 71 – 74. ISBN 978-80-227-4346-4.
- AFD02 Lapin, I. Kultan, M. BlueRadar: Wireless Attendance System for Educational Purposes Based on a Bluetooth Sensing. In: *Proceedings of Inovačný proces v elearningu 2014*. 2014, s. 7 – 11. ISBN 978-80-225-3840-4.

Súhrn

Dizertačná práca je venovaná návrhu inovatívneho systému, ktorý by umožňoval duálnu radarovú a komunikačnú funkcionalitu typu RadCom (Radar and Communication) pomocou dvojrozmerných úplne komplementárnych kódov (2D-OCCC - Two-Dimensional Orthogonal Complete Complementary Code) v prostredí mobilnej komunikácie medzi vozidlami typu V2V (Vehicle-to-Vehicle). Navrhnutý 2D-OCCC-OFCDM (Orthogonal Frequency and Code Divisiopn Multiplexing) systém kombinuje výhody metód CDMA (Code Division Multiple Access) a OFDM (Orthogonal Frequency Divison Multiplexing). V dizertačnej práci sú navrhnuté schémy vysielača a prijímača, optimálna stratégia vysielania a podkanálová štruktúra systému. Sú opísané metodiky vyhodnotenia vhodnosti použitia systému v komunikačnej a radarovej časti. Koncepčné prispôsobenie navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému pre špecifikáciu IEEE 802.11p je overované pomocou numerických simulácií v prostredí V2V. Nakoľko OFCDM systém na báze 2D-OCCC nebol doposiaľ uvažovaný a ani analyzovaný pre účely komunikácie vozidiel v prostredí V2V, zvolený prístup riešenia je možné považovať za originálny a inovatívny. Navrhnutý systém je analyzovaný z pohľadu výkonových charakteristík, chybovosti v prostredí V2V a radarového rozlíšenia pomocou metodiky rozpracovanej v dizertačnej práci. Numerickými simuláciami rôznych scenárov je zistené, že štatistický priebeh pomeru špičkovej hodnoty výkonu k priemernej (PAPR – Peak-to-Average Power Ration) navrhnutého 2D-OCCC-OFCDM systému môže byť v závislosti na zvolených parametroch lepší pri porovnaní s konvenčným OFDM systémom, ktorý nevyužíva rozptyl pomocou kódov 2D-OCCC. Analýzou funkcie nejednoznačnosti je ukázané, že systém zatiaľ vykazuje nedostatočné rozlíšenie radarovej časti v aplikovanom cestnom scenári. Je ukázané, že použitím optimalizovanej ekvalizačnej metódy CE (Controlled Equalization) dosahuje 2D-OCCC-OFCDM systém za určitých podmienok v simulovanom prostredí V2V nižšiu chybovosť komunikačnej časti než referenčný OFDM systém bez rozptylu.

Kľúčové slová: 2D-OCCC, RadCom, V2V, dvojrozmerný rozptyl

Abstract

The dissertation thesis is focused on the design of novel system providing dual Radar and Communication (RadCom) functionality based on Two-Dimensional Orthogonal Complete Complementary Codes (2D-OCCC) in Vehicle-to-Vehicle (V2V) environment. The designed Orthogonal Frequency and Code Division Multiplexing (2D-OCCC-OFCDM) system combines the benefits of Code Division Multiple Access (CDMA) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) methods. An optimal strategy of code transmission, suitable channel structure and detailed schemas of transmitter and receiver with corresponding methodology are presented. The conceptual adaptation of the designed 2D-OCCC-OFCDM system in IEEE 802.11p specification is evaluated using numerical simulations under V2V environment assumption. Since the 2D-OCCC-OFCDM system has not been assumed or analyzed for V2V scenario yet, the system designed in the thesis may be considered to be original and innovative. The power characteristics, bit error rate performance and radar resolution of the 2D-OCCC-OFCDM system is analyzed using the corresponding methodology. It is shown that the statistical distribution of Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) of the designed system under certain conditions is better as compared to that of the OFDM system without spreading. The results of the analysis of the ambiguity function suggests that the proposed design does not achieve suitable radar resolution. The 2D-OCCC-OFCDM system shows improvement in Bit Error Rate (BER) under simulated V2V scenario under certain conditions when the optimized Controlled Equalization (CE) method is used as compared to that of the OFDM system without spreading.

Keywords: 2D-OCCC, RadCom, V2V, Two-Dimensional Spreading