

ŽILINSKÁ UNIVERZITA
ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA
KATEDRA TELEKOMUNIKÁCIÍ A MULTIMÉDIÍ



ING. NORBERT MAJER

**ZLEPŠENIE PARAMETROV PRENOSU V RÁDIOVÝCH
SIEŤACH S VIACESTNÝM ŠÍRENÍM SIGNÁLOV**

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE
ŽILINA 2009

ODBOROVÁ KOMISIA ELEKTROTECHNICKEJ FAKULTY
ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

ING. NORBERT MAJER

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**ZLEPŠENIE PARAMETROV PRENOSU V RÁDIOVÝCH
SIEŤACH S VIACCESTNÝM ŠÍRENÍM SIGNÁLOV**

NA ZÍSKANIE VEDECKO-AKADEMICKÉJ HODNOSTI
PHILOSOPHIAE DOCTOR

ŠTUDIJNÝ ODBOR: TELEKOMUNIKÁCIE 5-2-15
ŽILINA 2009

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre telekomunikácií a multimédií, Elektrotechnickej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline

Predkladateľ: Ing. Norbert Majer, KTaM EF ŽU v Žiline

Školiteľ: doc. Ing. Vladimír Wieser, PhD., KTaM EF ŽU v Žiline

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná oh. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v študijnom odbore doktorandského štúdia 5-2-15 Telekomunikácie, vymenovanou predsedom spoločnej komisie dňa..... na Elektrotechnickej fakulte, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Predseda spoločnej odborovej komisie:
prof. Ing. Milan Dado, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra telekomunikácií a multimédií
Univerzitná 8215/1

ÚVOD

Dizertačná práca sa zaoberá teoretickou analýzou problémov v mobilnom rádiovom kanáli a systémov, ktoré dôsledky týchto problémov určitým spôsobom zmierňujú. V práci je podrobne popísaný komplexný simulačný model vrátane generovania rádiového kanála, algoritmy, ktoré odhaľujú cesty šírenia signálu v rádiovom kanáli, algoritmus adaptácie modulácie a prenosovej rýchlosti a algoritmus, ktorý rozhoduje medzi použitím systému inteligentných antén a priestorovej diverzity podľa zistenej impulzovej odozvy rádiového kanála tak, aby sa minimalizovala symbolová chybovosť a optimalizovala prenosová rýchlosť v kanáli. Práca popisuje aj iné využitie vytvorených algoritmov, ako napr. určenie uhla príchodu prijímaného signálu v každej ceste šírenia.

SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

1. ŠÍRENIE RÁDIOVÝCH VĽN V MOBILNOM PROSTREDÍ

Elektromagnetická energia sa vo forme rádiových vln šíri do okolitého priestoru z vysielacej antény a spôsob šírenia závisí od vysielacej frekvencie. Vzhľadom na používané frekvenčné pásma v mobilných rádiových sieťach, budeme sa zaoberať len šírením rádiových vln v pásmach veľmi krátkych vln, VKV (30 MHz až 300 MHz) a ultra krátkych vln, UKV (300 MHz až 3 GHz).

Hlavný spôsob šírenia rádiových vln v týchto pásmach je šírenie priestorovou vlnou. Analýza šírenia rádiových vln priestorovou vlnou v pásmach VKV a UKV musí brať do úvahy odrazy od zeme, prírodných alebo umelých prekážok. Rovnako dôležitá je difrakcia (ohyb vln) cez vrcholy kopcov a budov a refrakcia (lom) v dolných vrstvách atmosféry [1].

Snaha o dosiahnutie vyššej prenosovej rýchlosti sa stala predmetom výskumu v oblasti využitia viacerých antén na prijímacej a vysielacej strane a ich kombinácie. Hovoríme teda o anténových sústavách a systémoch, ktoré eliminujú škodlivý vplyv viaccestného šírenia na užitočný signál [2]. Podľa počtu použitých antén na vysielacej a prijímacej strane vzniklo rozdelenie anténových systémov do nasledovných skupín:

- *SISO* (Single Input Single Output) – je anténový systém s jednou anténou na strane

prijímača a s jednou anténou na strane vysielacza.

- *SIMO* (Single Input Multiple Output) – tento systém má anténové pole na strane prijímača, zložené z viacerých antén, a jednu anténu na strane vysielacza.
- *MISO* (Multiple Input Single Output) – využíva anténové pole na strane vysielacza a jednu anténu na strane prijímača.
- *MIMO* (Multiple Input Multiple Output) – pri tejto konfigurácii sa anténové polia vyskytujú na oboch stranách komunikačného spoja. Väčšinou ide o symetrický systém s rovnakým počtom anténových elementov na oboch stranách.

1.1 SYSTÉM MIMO

Systém MIMO môže byť definovaný ako ľubovoľný bezdrôtový komunikačný systém, ktorý je na vysielacej a prijímacej strane vybavený anténovým poľom tak, ako to znázorňuje obr. 1.1. Princíp MIMO systémov spočíva v tom, že signály vysielacích antén na jednej strane a prijímacích antén na strane druhej sú kombinované takým spôsobom, že kvalita prenosu alebo prenosová rýchlosť bude zväčšená.

MIMO systémy používajú metódy priestorovo-časového spracovania, pretože časový rozmer (t.j. prirodzený rozmer prenášaných signálov) je spojený s rozmerom priestoru, ktorý vznikne použitím anténového poľa. MIMO systémy môžeme považovať za rozšírenie systémov inteligentných antén, avšak zo základného matematického popisu prostredia šírenia signálov v MIMO systémoch vyplýva, že je možné dosiahnuť oveľa lepšie výsledky ako sú dosahované u klasických inteligentných antén.



Obr. 1.1 Zobrazenie MIMO bezdrôtového prenosového systému [3]

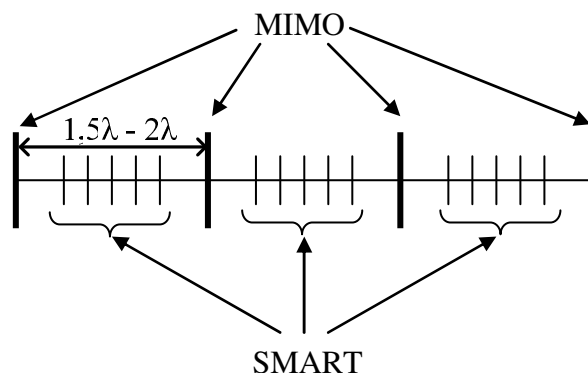
Najvýraznejšou vlastnosťou MIMO systémov je schopnosť využiť viaccestné šírenie pre nárast prenosovej rýchlosti účastníkov (zvyčajne je viaccestné šírenie nevýhodou pri bezdrôtovom prenose). V oblasti s viaccestným šírením sa vytvoria nezávislé cesty šírenia signálu medzi každým prvkom anténového poľa vysielacza a prijímača. Anténové pole môže byť

použité na získanie viaccestných signálov z prostredia a aplikáciou optimálneho kombinovania je zabezpečený zisk spracovania. [4]

1.2 HYBRIDNÝ MIMO SYSTÉM (H-MIMO)

V reálnych systémoch využívajúcich priestorovo-časovú diverzitu je vzájomná vzdialenosť medzi dvomi anténovými prvkami zvyčajne v rozpätí $1,5\lambda$ až 2λ . Priestor, ktorý sa nachádza medzi týmito dvomi anténovými prvkami je nevyužitý.

V práci [4] bola popísaná *hybridná technológia H-MIMO* (Hybridný MIMO systém), ktorá dokáže efektívne využiť priestor medzi MIMO prvkami a umiestniť tam fázovanú anténovú sústavu (Smart antenna). Súčasne bolo navrhnuté možné prepínanie medzi technológiou anténového poľa (mód „ADAPTIVE“, používaný na zužovanie vyžarovacej charakteristiky) a technológiou MIMO, ktorá využíva priestorovú diverzitu (mód „MIMO“) obr.1.2.



Obr. 1.2 Technológia H-MIMO [4]

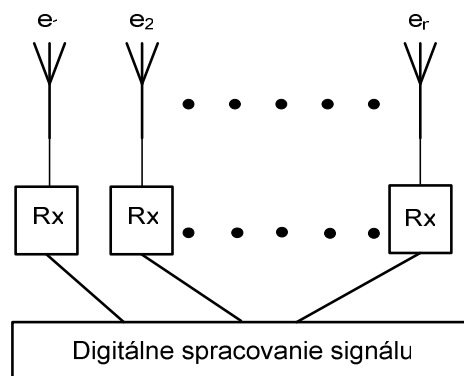
V prípade prítomnosti korelovaného úniku (nedostatočná časová disperzia signálov) je využité celé anténové pole, ktoré nie je nijako postihnuté vplyvom korelácie a slúži na zúženie výslednej vyžarovacej charakteristiky (mód ADAPTIVE). Ak sú pri prenose vhodné podmienky pre vznik viaccestného šírenia, systém H-MIMO pracuje v režime využívania priestorovej diverzity (mód MIMO) [4].

2. IMPULZOVÁ ODOZVA RÁDIOVÉHO KANÁLA

Bitovú chybovosť prenosu dátových signálov v rádiových kanáloch najviac ovplyvňuje intersymbolová interferencia (ISI). Rádiové kanály je možné charakterizovať ako “frekvenčne obmedzené filtre”. Vysielaním postupnosti impulzov cez frekvenčne obmedzený kanál prenosovou rýchlosťou porovnateľnou so šírkou frekvenčného pásma B vznikne v kanáli intersymbolová interferencia ISI. Druhá príčina vzniku ISI je v dôsledku časového rozptylu signálu v rádiovom kanáli, ktorý je spôsobený viaccestným šírením signálu. V prípade prenosu digitálnych signálov je prijímaná dátová vzorka skreslená impulzovými odozvami susedných dátových symbolov [7]. Systém SIMO je v súčasnosti jeden s najpoužívanejších, pretože v mobilnej stanici je použitá len jedna anténa, ale v základňovej stanici je použité anténové pole. Pri systémoch SIMO alebo MIMO je na prijímacej strane nie jedna, ale pole antén a preto sa meria impulzová odozva rádiového kanála na všetkých anténach. Metódy, podľa ktorých sa meria impulzová odozva v anténovom poli môžeme rozdeliť na [8] :

- Reálne pole – meranie prebieha na všetkých anténach súčasne.
- Prepínacie pole – krátky časový interval medzi meraním na rôznych elementoch.
- Virtuálne pole – jeden element svojím pohybom vytvorí anténové pole.

Pri reálnom poli (obr. 2.1) je pole antén zostavené z reálnych elementov. Z každého elementu je prijímaný signál privádzaný do prijímača, kde sa zmiešava, demoduluje, transformuje do digitálnej podoby a takto upravený signál sa privádza do bloku digitálneho spracovania signálu, kde sa následne spracuje vhodnými algoritmi.



Obr. 2.1 Princíp reálneho poľa

Nevýhodou takéhoto systému je, že na každom elemente musí byť pripojený prijímač, čo je finančne aj technologicky náročné. Riešením tohto problému je využitie šesť-portovej

technológie (ŠPR) [8, 9].

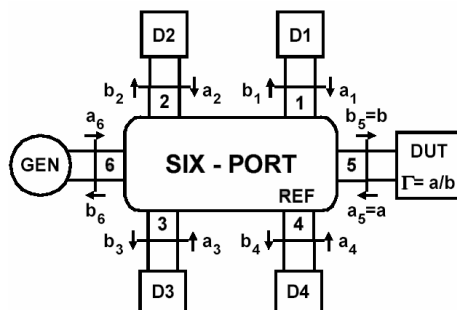
3. MERANIE IMPULZOVEJ ODOZVY S VYUŽITÍM ŠEŠT-PORTOVEJ TECHNOLOGIE

Šešť-portová metóda je metóda experimentálnej vektorovej analýzy obvodov, t.j. metóda merania rozptylových parametrov (koeficientov odrazu a prenosu) ako komplexných (vektorových) veličín. Metódy vektorového merania rozptylových parametrov možno rozdeliť do dvoch skupín:

- 1) metódu separácie vln,
- 2) interferenčnú metódu.

Do prvej skupiny patria prakticky všetky bežné heterodynové analyzátory obvodov. Šešť-portovú metódu zaraďujeme do druhej skupiny, kam patrí napr. aj klasické meracie vedenie. Pri *metóde separácie vln* sa jeden z portov meraného obvodu budí vlnou s harmonickým časovým priebehom (stimul) a extrahujú sa odozvy vystupujúce zo všetkých portov, vrátane vlny odrazenej z budeného portu. Na separáciu odrazenej vlny je nutné použiť smerový väzbový člen. Rozptylové parametre získame ako pomer komplexných amplitúd jednotlivých odoziav a budiacej vlny. Je teda potrebné merať pomer amplitúd a rozdiel fáz na mikrovlnových frekvenciách.

Pri *interferenčnej metóde* sa odozva od stimulu neoddeľuje, naopak, v meracom zariadení sa definovaným spôsobom vytvorí niekoľko ich lineárnych kombinácií (LK), u ktorých sa zmeria iba výsledná amplitúda, nie fáza. Z týchto čisto amplitúdových informácií možno získať veľkosť aj fázu rozptylových parametrov. Na získanie jedného parametra sú potrebné najmenej tri LK. Ich optimálny počet je štyri, pričom v jednej z nich prevláda stimul (*referenčný signál*) (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Principiálna schéma šesť-portového reflektometra

LK môžu byť vytvorené a pozorované súčasne na rôznych miestach (portoch) meracieho systému alebo postupne na jednom porte (tzv. viacstavové systémy).

Prvý spôsob je typický pre *šesť-portový reflektometer* (ŠPR) (obr. 3.1). Príkladom druhého typu je *meracie vedenie*, kde sa vstupná vlna a vlna odrazená od meraného objektu (odozva) skladajú pozdĺž vedenia, čím vzniká stojaté vlnenie. Amplitúda stojatej vlny sa pozoruje postupne na rôznych miestach vedenia posúvaním sondy [10].

3.1.1 VÝHODY A NEVÝHODY ŠEŠŤ-PORTOVÉHO REFLEKTOMETRA

Medzi výhody ŠPR patria [10]:

- Jednoduchosť mikrovlnového hardvéru. Dôsledkom je dlhodobá stabilita, a teda menej častá potreba kalibrácie.
- Hlavné zdroje nepresnosti merania a teplotnej závislosti sú sústredené v malom množstve lokalizovaných prvkov (štyri mikrovlnové detektory). Systematické vplyvy (nelinearita, teplotná závislosť) možno zmerať a softvérovo redukovat'.
- Nevyžadujú sa precízne zdroje signálu s fázovým závesom. To je zvlášť výhodné v priemyselných aplikáciách s voľne kmitajúcimi magnetrónmi (frekvenciu signálu je však vhodné merať).
- „Neobmedzený“ frekvenčný rozsah : šesťportovú metódu možno využiť v každom pásme, v ktorom existujú detektory výkonu, teda v princípe napr. aj v optických pásmach.

Hlavnou nevýhodou je širokopásmová podstata detekcie. To má dôsledky podobné ako pri skalárnych analyzátoroch obvodov :

- Znížený dynamický rozsah meraných výkonov v dôsledku šumu.
- Citlivosť na parazitné signály, napr. vyššie harmonické generátora.
- Citlivosť na externé rušivé signály (napr. signály prijímané testovanou anténou).

CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Predchádzajúce kapitoly sa zaoberali predovšetkým teoretickými analýzami a technológiami, ktoré by sa mohli efektívne využiť pri napĺňaní cieľov tejto dizertačnej práce. Nasledovné kapitoly sa už zaoberajú vlastnými návrhmi, ktoré sú založené na poznatkoch získaných nielen v predchádzajúcich kapitolách, ale aj v publikáciách, knihách, konferenciách a prácach od rôznych autorov.

Z rôznych parametrov charakterizujúcich kvalitu prenosu v rádiových sieťach s viacestným šírením signálu boli vybrané tieto parametre: symbolová chybovosť SER a prenosová rýchlosť v kanáli (bit/s). Prenosovú rýchlosť môžeme maximalizovať rôznymi adaptačnými metódami. V práci boli zvolené dve metódy: adaptácia modulácie a adaptácia anténového systému podľa okamžitého stavu rádiového kanála.

Z analyzovaných skutočností v tejto práci vyplynuli nasledovné ciele (témy) dizertačnej práce:

- Navrhnuť algoritmus na spracovanie a ohodnotenie impulzovej odozvy rádiového kanála, ktorý umožní získať základné parametre impulzovej odozvy (smer príchodu signálov, oneskorenie kópií, amplitúdu signálov jednotlivých kópií, Dopplerov posun...).
- Navrhnuť algoritmus umožňujúci adaptovať počet stavov modulácie podľa zistenej impulzovej odozvy rádiového kanála.
- Navrhnuť algoritmus umožňujúci adaptovať prenosovú rýchlosť v kanáli (šírku vysielaných symbolov) podľa zistenej impulzovej odozvy rádiového kanála.
- Navrhnuť algoritmus, ktorý bude rozhodovať medzi použitím MIMO systému, resp. systému inteligentných antén podľa zistenej impulzovej odozvy rádiového kanála tak, aby sa maximalizovala prenosová rýchlosť v kanáli.

Vzhľadom na to, že existuje viacero spôsobov ako je možné dosiahnuť uvedené čiastkové výsledky, v práci bude vždy odôvodnené prečo sa zvolil daný postup, algoritmus alebo technológia.

ZVOLENÉ METÓDY RIEŠENIA A ANALÝZA VÝSLEDKOV

Simulačný model na overenie správnosti algoritmov, vysielač, rádiový kanál, prijímač, šesť-portová technológia, inteligentné antény, ako aj rôzne algoritmy, funkcie a procedúry, boli vytvorené vo vývojovom prostredí Delphi 7 a C++ Builder.

Vzhľadom na výhody ŠPR technológie, ako je jednoduchosť mikrovlnového hardvéru, sme mohli v prijímači použiť na meranie impulzovej odozvy rádiového kanála tzv. reálne pole s anténovou sústavou H-MIMO [4], ktorá efektívne využíva priestor medzi elementmi systému (MIMO, systém priestorovej diverzity) vyplnením systémom inteligentných antén, konkrétne systémom tvarovania vyžarovacej charakteristiky anténovej sústavy.

Priamu konverziu do základného pásma zabezpečuje ŠPR technológia v kombinácii s digitálnym spracovaním signálu (softvérovo definované rádio), takže demodulácia a celkové spracovanie signálu je realizované softvérom. Systém je vhodný aj pre náš prípad, pretože pri simuláciách často meníme parametre systému, ako je modulácia, prenosová rýchlosť, frekvencia, dĺžka impulzov a symbolov, dĺžka ochranného intervalu medzi symbolmi, odstup signál šum atď. a pri akejkolvek zmene prispôbíme len softvér bez zásahu do hardvéru.

Digitálne spracovanie signálu umožnilo vytvoriť jednotlivé algoritmy (spracovanie impulzovej odozvy rádiového kanála, adaptácia modulácie, adaptácia ochranného intervalu v systémoch OFDM a UWB, prepínanie medzi systémom inteligentných antén a systémom MIMO), ako aj softvérovú demoduláciu a vyhodnotenie výsledkov bez použitia hardvéru.

4. ALGORITMY NA SPRACOVANIE IMPULZOVEJ ODOZVY

Nové služby typu videotelefónia, streamovanie videa a pod. kladú požiadavky na zvýšenie prenosovej rýchlosti pri zachovaní dostatočnej kvality. Vlastnosti rádiového kanála sa v čase menia a preto, ak chceme zachovať požadovanú kvalitu služby, musia zariadenia pomerne rýchlo reagovať na aktuálny stav rádiového kanála. Aby sa zariadenia efektívne prispôbovali aktuálnemu stavu v rádiovom kanáli, musia zmerať jeho parametre, vyhodnotiť ich a adaptovať sa v reálnom čase.

Na určenie vlastností rádiového kanála pomocou impulzovej odozvy, boli vytvorené štyri algoritmy (PDA, RFWA, EPDA a MEPDA), ktoré nie sú náročné na hardvér ani na čas výpočtu. Úlohou algoritmov je rozpoznanie základných parametrov ciest šírenia signálu – amplitúda, fáza signálu a oneskorenie v danej ceste. Princíp prezentovaných algoritmov spočíva v spracovaní impulzovej odozvy kanála v časovej oblasti, kde sa ukladá do pamäti viacero po sebe nasledujúcich vzoriek prijímaného signálu, ktoré sú porovnávané s prichádzajúcimi vzorkami.

Na porovnanie jednotlivých algoritmov bol vytvorený program, ktorý generuje impulzovú odozvu, zapamätá si počet ciest šírenia, použije daný algoritmus, a porovná zapamätaný počet ciest s počtom ciest odhalených daným algoritmom.

```

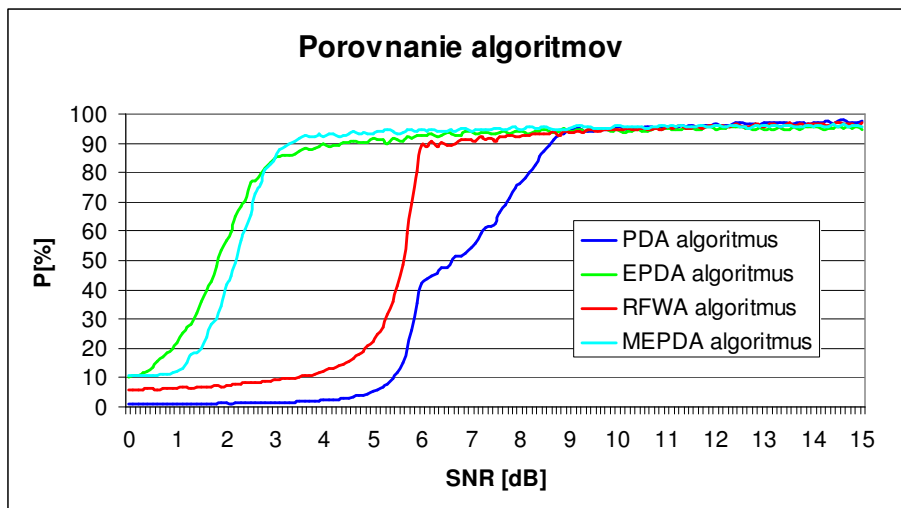
if (opc[i] <= pc[i]) then
P[i]:=opc[i]/pc[i]*100;
else
P[i]:=pc[i]/opc[i]*100;

```

kde opc - je počet ciest odhalených algoritmom, pc - je počet ciest vygenerovaný programom, $P[i]$ - pravdepodobnosť odhalenia všetkých ciest pre jednu impulzovú odozvu (IO) a i - počet opakovaní pre rovnakú hodnotu SNR. Bolo vygenerovaných 1000 impulzových odoziev pre rovnakú hodnotu SNR. Pomer SNR sa menil od 0 dB po 15 dB s krokom 0,1 dB. Potom pravdepodobnosť odhalenia ciest pre jednu hodnotu SNR je

$$P = (\sum P[i]) / 1000 [\%] \quad (4.1)$$

Pravdepodobnosť odhalenia ciest v závislosti od hodnoty SNR je na obr. 4.1.



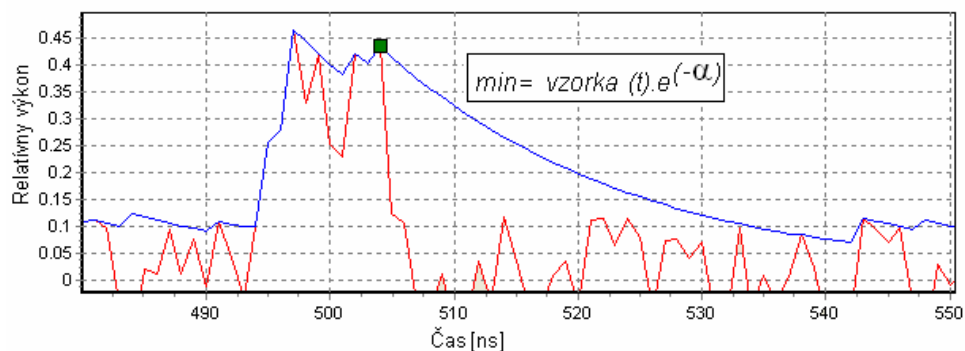
Obr. 4.1 Pravdepodobnosť odhalenia ciest v závislosti od hodnoty SNR

Pre jednoduchosť výpočtu a výborné výsledky vyplývajúce z obr. 4.1 bol zvolený EPDA algoritmus ako najvyhovujúcejší pre ďalšie použitie.

Princíp algoritmu *exponenciálneho poklesu výkonu EPDA* (Exponential Power Descend Algorithm) spočíva v tom, že od lokálneho maxima signál klesá podľa exponenciálnej funkcie (modrý priebeh) a vzorky tohto signálu sa zapisujú do premennej *min* (obr. 4.2).

```
if (rxsignal[t]>rxsignal[t+1]) then
max:=rxsignal[t];
min:=rxsignal[t]*exp(-α);
```

kde α je konštanta poklesu výkonu transformovaného signálu.

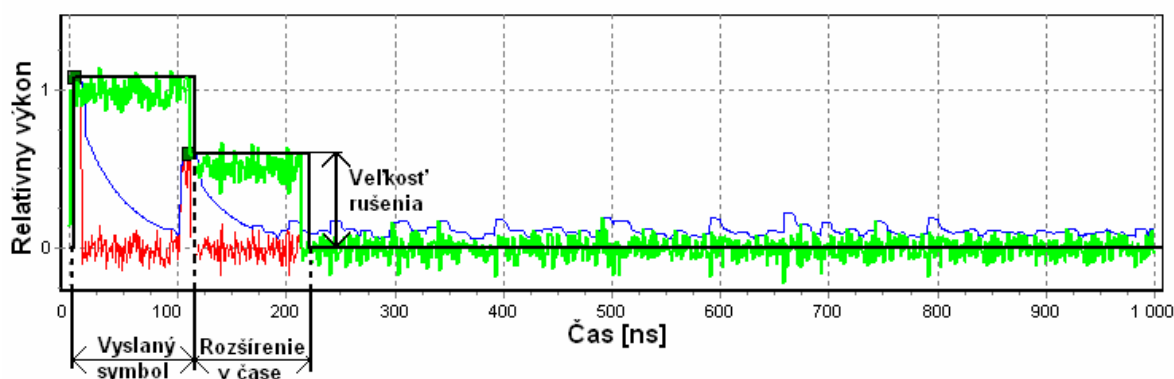


Obr. 4.2 Pokles výkonu transformovaného signálu podľa funkcie $e^{-\alpha}$

Tento algoritmus v skutočnosti nepracuje s obálkou pôvodného signálu, ale s obálkou transformovaného signálu (modrý priebeh). Vďaka takémuto spracovaniu, algoritmus exponenciálneho poklesu výkonu dosahuje lepšie výsledky ako predchádzajúce algoritmy, pričom sa náročnosť výpočtu nezvýšila.

5. ADAPTÁCIA MODULÁCIE PODĽA IMPULZOVEJ ODOZVY RÁDIOVÉHO KANÁLA

Algoritmus na určenie vhodného typu modulácie podľa počtu ciest odhalených EPDA algoritmom vypočíta, aká by bola veľká interferencia (rušenie) prvého symbolu v druhom symbole, a na základe týchto výpočtov určí, aká by bola vhodná modulácia pre tento typ rádiového kanála (Obr. 5.1).



Obr. 5.1 Rozšírenie symbolu v čase

Obrázok 5.1 zobrazuje IO rádiového kanála (červená) určenú pomocou ŠPR, rozpoznanie ciest šírenia pomocou EPDA algoritmu (modrá) a následne výpočet veľkosti rušenia v nasledujúcom symbole (čierna). Do toho istého kanála sa ešte vyše aj reálny signál, aby bolo možné porovnať vypočítané a skutočné rozšírenie symbolu v čase. Zelený signál znázorňuje ako bude vyzerat' skutočné rozšírenie symbolu. V tomto prípade bola nastavená šírka symbolu 111 ns¹, relatívny výkon signálu 1 a odstup SNR = 10 dB. Symbolová chybovosť bola vypočítaná podľa vzťahu:

$$SER = \frac{PNPS}{PVPS} \quad (5.1)$$

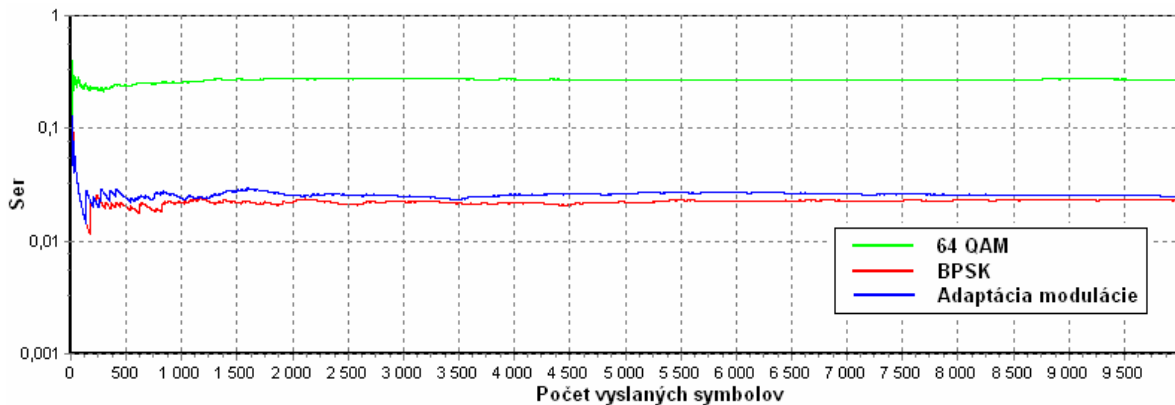
kde *PNPS* je počet nesprávne prijatých symbolov a *PVPS* je počet všetkých prijatých symbolov. Výsledky simulácie sú znázornené na obrázku 5.2 a v tabuľke 5.1.

Tab. 5.1 Výsledky simulácie

Modulácia	<i>SER</i>	Bitová rýchlosť R_b [Mb/s]
64-QAM	0,293	54
BPSK	0,0228	9
Adaptácia modulácie	0,023	24,18

Z tabuľky 5.1 je vidieť, že pri adaptácii modulácie je symbolová chybovosť takmer totožná s chybovosťou BPSK modulácie, ale bitová rýchlosť stúpla skoro trojnásobne.

¹ Šírka symbolu v IEEE 802.11 pre prenosovú rýchlosť 9Mb/s pri BPSK modulácii.

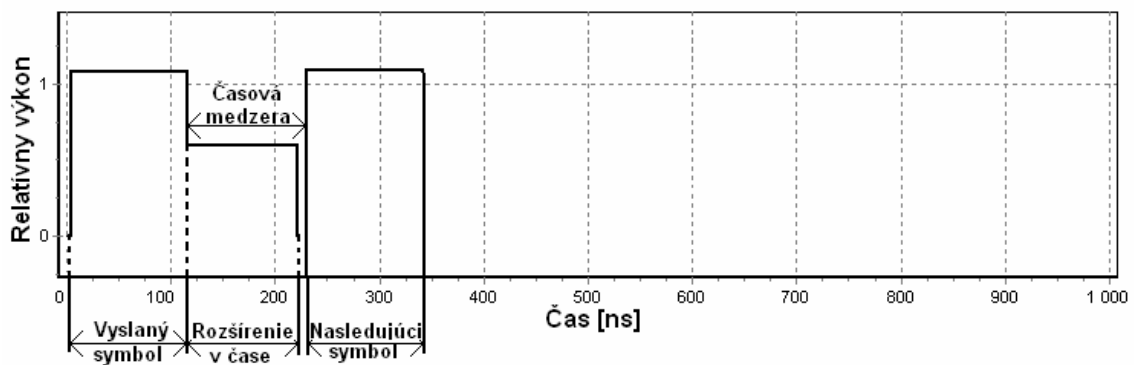


Obr. 5.2 Časový priebeh symbolovej chybovosti

6. ADAPTÁCIA PRENOSOVEJ RÝCHLOSTI PODĽA IMPULZOVEJ ODOZVY RÁDIOVÉHO KANÁLA

Princíp adaptácie prenosovej rýchlosti spočíva v určení časovej medzery medzi jednotlivými symbolmi tak, aby prvý vyslaný symbol nezasahoval vplyvom viaccestného šírenia do nasledujúcich symbolov.

Na určenie časovej medzery bol použitý EPDA algoritmus, ktorý odhalí poslednú cestu šírenia signálu a pripočíta k nej čas trvania jedného symbolu. Tým sa určí časové rozšírenie symbolu v čase a až po uplynutí tohto rozšíreného impulzu je možné vyslať ďalší symbol (obr.6.1). Takto sa mení časová medzera medzi symbolmi a tým sa mení aj prenosová rýchlosť.



Obr. 6.1 Znáznornenie časovej medzery medzi symbolmi

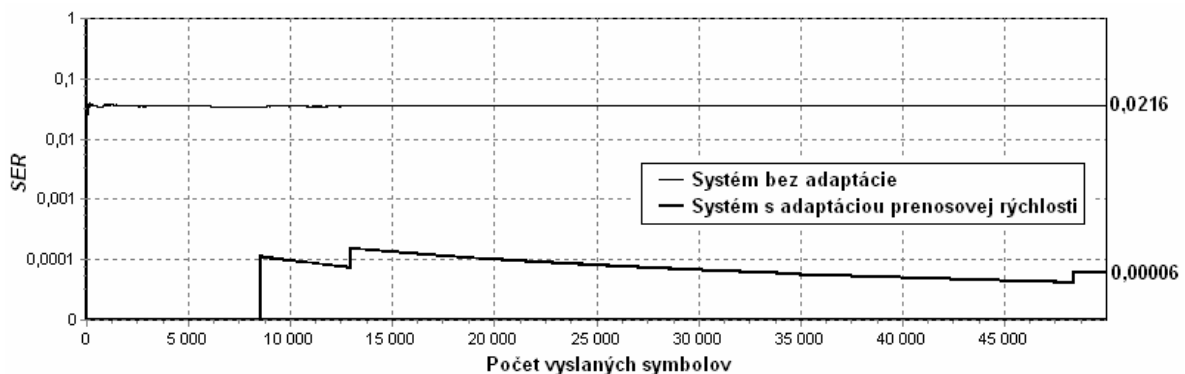
Tento spôsob adaptácie je možné využiť v systémoch využívajúcich kľúčovanie posunom amplitúdy ASK (Amplitude Shift Keying), v systémoch využívajúcich na prenos rôzne impulzy [14], v systémoch využívajúcich OFDM multiplex (Orthogonal Frequency Division

Multiplexing) [15], resp. v systémoch UWB (Ultra-Wideband). [11,12,13]

Aby sa zabránilo intersymbolovej interferencii ISI, multiplex OFDM využíva tzv. cyklickú predponu CP (Cyclic Prefix), ktorá je tvorená niekoľkými poslednými vzorkami OFDM symbolu. CP tvorí v časovej oblasti ochranný interval medzi susednými prenášanými OFDM symbolmi. Tento ochranný interval (časová medzera medzi symbolmi) by mal byť dlhší ako čas, kým dozníe impulzová odozva kanála [15].

Ak budeme meniť dĺžku CP podľa okamžitého stavu kanála, je možné zväčšiť prenosovú rýchlosť v prípade, keď impulzová odozva kanála je „vhodná“ na prenos väčšou prenosovou rýchlosťou. Naopak, v prípade, keď v kanáli existuje veľká časová disperzia (veľký rozdiel dĺžok ciest šírenia signálu), je výhodnejšie použiť väčší CP.

Porovnanie symbolovej chybovosti medzi systémom bez adaptácie a s adaptáciou prenosovej rýchlosti je na obrázku 6.2 a v tabuľke 6.1.



Obr. 6.2 Porovnanie symbolovej chybovosti

Tab. 6.1 Výsledky simulácie adaptácie prenosovej rýchlosti v UWB systéme

Systém	SER (BER)	Bitová rýchlosť R_b [Mb/s]
Bez adaptácie	0,0216	9
S adaptáciou	0,00006	3,715

Z výsledkov je vidieť, že systém bez adaptácie prenosovej rýchlosti dosiahol priemernú prenosovú rýchlosť 9 Mb/s, ale bitová (symbolová) chybovosť bola 0,0216. Systém s adaptáciou prenosovej rýchlosti dosiahol priemernú prenosovú rýchlosť 3,715 Mb/s, ale bitová chybovosť klesla až na $6 \cdot 10^{-5}$.

7. ALGORITMUS PREPÍNANIA MIMO - SA

Pri syntéze vyžarovacej charakteristiky anténovej sústavy AS a jej následnej implementácii do rádiového kanála, boli zistené niektoré prípady, kedy si takýto systém počínal horšie, ako keby bol miesto anténovej sústavy použitý jeden izotropický žiarič. Z tohto dôvodu je nutné systém tvarovania vyžarovacej charakteristiky AS kombinovať so systémom, v ktorom tieto prípady nenastávajú.

Pre vytvorenie algoritmu, ktorý by rozhodoval medzi aplikáciou inteligentnej anténovej sústavy SA (Smart antenna) a MIMO systémom musela byť vytvorená aplikácia, ktorá by simulovala systém inteligentných antén v rádiovom kanáli. V tejto práci bol na realizáciu SA použitý systém tvarovania vyžarovacej charakteristiky BF (Beamforming) a signál z MIMO kanála bol spracovaný systémom priestorovej diverzity s výberom SC (Selection Combining), resp. systémom priestorovej diverzity s maximálnym pomerom MRC (Maximum Ratio Combining).

Okrem tvarovania vyžarovacej charakteristiky bolo potrebné vytvoriť systém na zistenie uhla príchodu signálu, čo umožnilo nasmerovať vyžarovací diagram anténovej sústavy požadovaným smerom.

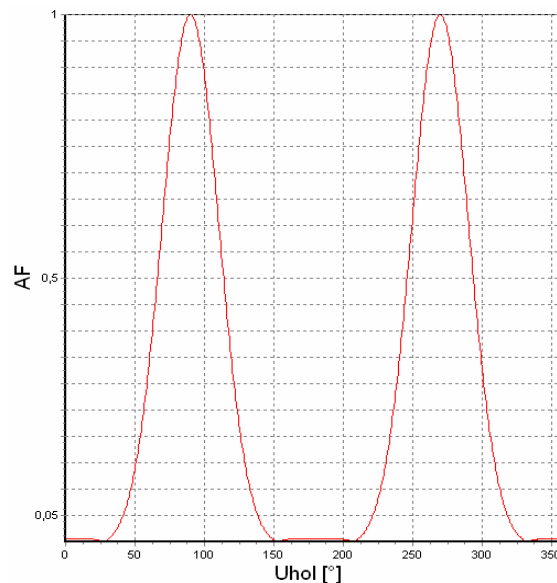
7.1 SYNTÉZA VYŽAROVACEJ CHARAKTERISTIKY INTELIGENTNEJ ANTÉNOVEJ SÚSTAVY

V našej aplikácii sme použili Hammingovo váhovanie pre výrazné potlačenie postranných lalokov. Váhovaciu funkciu Hammingovho váhovania môžeme napísať :

$$w_i = g_0 + g_1 \cos\left(2\pi \frac{i}{N}\right), \quad -\frac{N-1}{2} \leq i \leq \frac{N-1}{2} \quad g_0 = 0,53836, \quad g_1 = 0,46164 \quad (7.1)$$

$$\text{Párne} \longrightarrow i = \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2} \dots \quad \text{Nepárne} \longrightarrow i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

kde i je počet párných, alebo nepárných prvkov AS. Ak vypočítame AF ako v predchádzajúcich prípadoch získame vyžarovaciu charakteristiku AS s Hammingovým váhovaním (obr.7.1).



Obr. 7.1 Smerová charakteristika AS s Hammingovým váhovaním

7.2 SYSTÉM PRIESTOROVEJ DIVERZITY

Viac anténových prvkov na vstupe prijímača v MIMO systémoch môžu využívať rôzne diverzité systémy. Z rôznych dostupných diverzítých metód sme použili priestorovú diverzitu, pretože nespôsobuje zväčšenie času prenosu a šírky pásma prenášaných signálov. Pokiaľ je k dispozícii MIMO systém v prenosovom kanále s nezávislým únikom signálov a prenášaný signál je vhodne konštruovaný, prijímač môže kombinovať prichádzajúce signály takým spôsobom, že výsledný signál je ovplyvňovaný únikom v oveľa menšom rozsahu v porovnaní so systémom SISO.

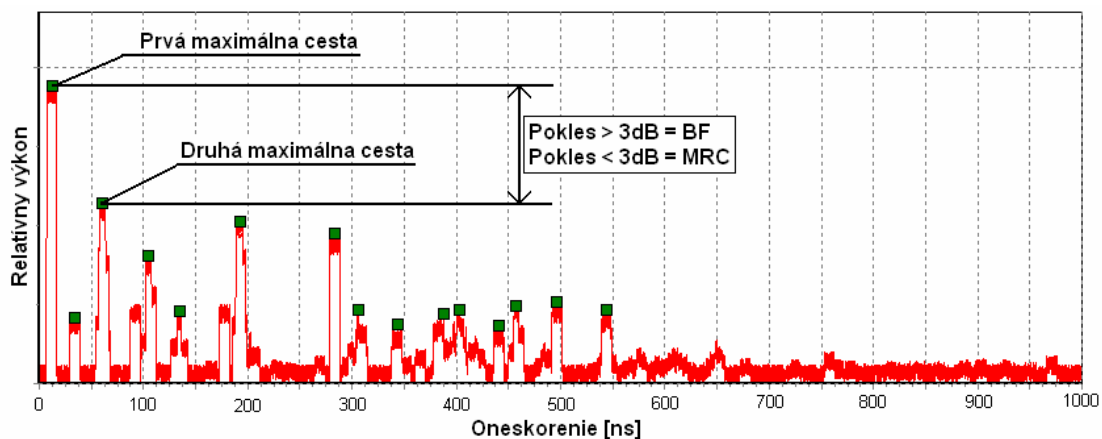
Pri systémoch s priestorovou diverzitou a s kombinovaním s maximálnym pomerom sú signály prijaté anténovou sústavou na prijímacej strane váhované a kombinované tak, aby výstupný signál mal čo najväčšiu hodnotu odstupu signál/šum. Rovnako ako v predchádzajúcom prípade sa takýto systém realizuje v prijímači s anténovou sústavou na vstupe. Pri váhovaní sa pracuje nielen s fázou ale aj amplitúdou signálu. Signálom s malou amplitúdou sú pridelené nižšie váhy ako signálom s veľkou amplitúdou [16, 17].

7.3 REALIZÁCIA PREPÍNACIEHO ALGORITMU

V prípade výskytu rádiového kanála, v ktorom nenastáva únik spôsobený viaccestným šírením, je výhodné používať systém tvarovania vyžarovacej charakteristiky AS (BF), pretože zisk hlavného laloka spôsobí, že systém pracuje s väčšou hodnotou SNR. V AS so systémom BF

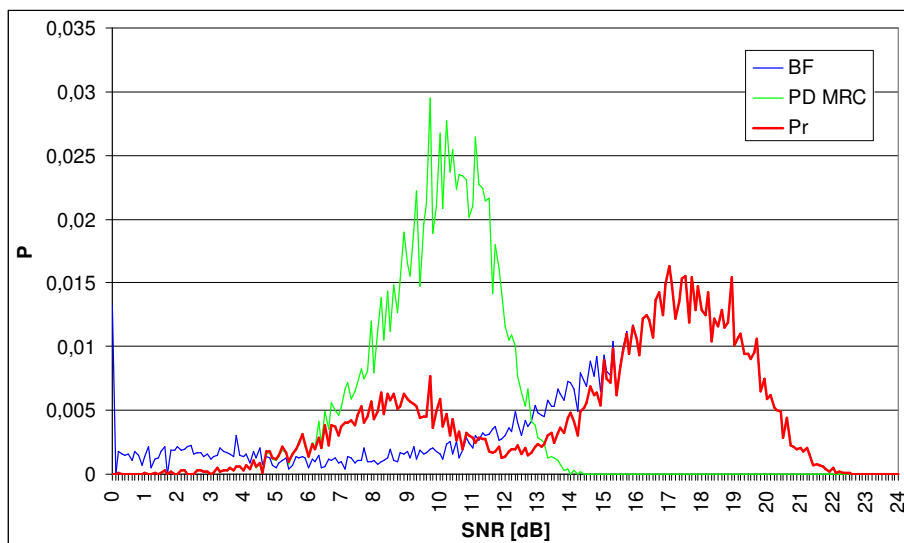
môže nastať nielen tzv. fatálny prípad, ktorý sa v praxi odstraňuje sektorizáciou AS, keď sa zrkadlový lalok odstráni vložением vhodnej steny za AS, ale aj prípad, keď vplyvom úniku poklesne hodnota SNR prijímaného signálu a z tohto dôvodu sa AOA určí s väčšou chybou. Vplyvom väčšej chyby odhadu AOA, sa nesprávne zameria smer príchodu užitočného prijímaného signálu a zisk hlavného laloka AS môže zosilniť rušiaci signál viac ako užitočný. Tento prípad nastáva vtedy, keď cesty šírenia majú približne rovnakú amplitúdu a vtedy je vhodné použiť MIMO systém s PD s kombinovaním MRC (PD MRC). Naopak, ak IO rádiového kanála má jednu dominantnú cestu, hlavný lalok AS sa dokáže nasmerovať na túto cestu šírenia a systém bude pracovať s väčšou hodnotou SNR. V tomto prípade je teda výhodnejšie použiť inteligentnú anténovú sústavu SA s tvarovaním laloka BF.

Na prepínanie medzi systémom PD MRC a BF nemusel byť vyvíjaný ďalší algoritmus, ale stačilo využiť EPDA algoritmus. EPDA algoritmus zistí cesty šírenia, určí ich amplitúdy, fázy a oneskorenia. Z týchto ciest je vybraná najdominantnejšia cesta a porovnaná s druhou najdominantnejšou cestou. Ak je rozdiel (pokles druhej dominantnej cesty) medzi týmito cestami väčší ako 3 dB (obr. 7.2), prijímač bude pracovať so systémom BF, v opačnom prípade v IO nebude existovať dominantná cesta a rádiový kanál bude pravdepodobne NLOS kanál. V tomto prípade je vhodné použiť systém PD MRC.



Obr. 7.2 Princíp algoritmu prepínania medzi systémami BF a SD MRC

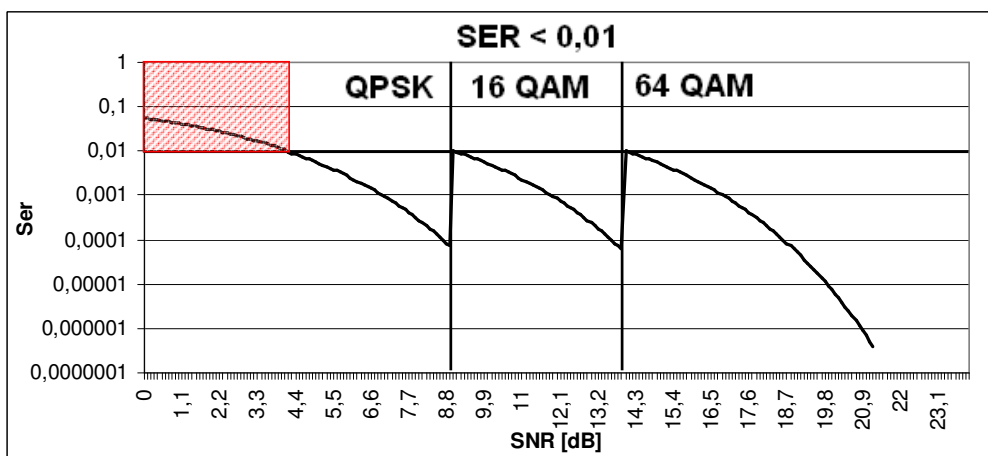
Na určenie pravdepodobnosti výskytu hodnoty SNR, s ktorou porovnávané systémy pracujú, boli nastavené parametre simulácie ako v predchádzajúcom prípade. Simulácia bola opakovaná 10 000 krát a bola určená hustota pravdepodobnosti hodnoty SNR pre daný typ kanála (obr.7. 3).



Obr. 7.3 Porovnanie hustoty pravdepodobnosti SNR pre PD MRC, BF a Pr

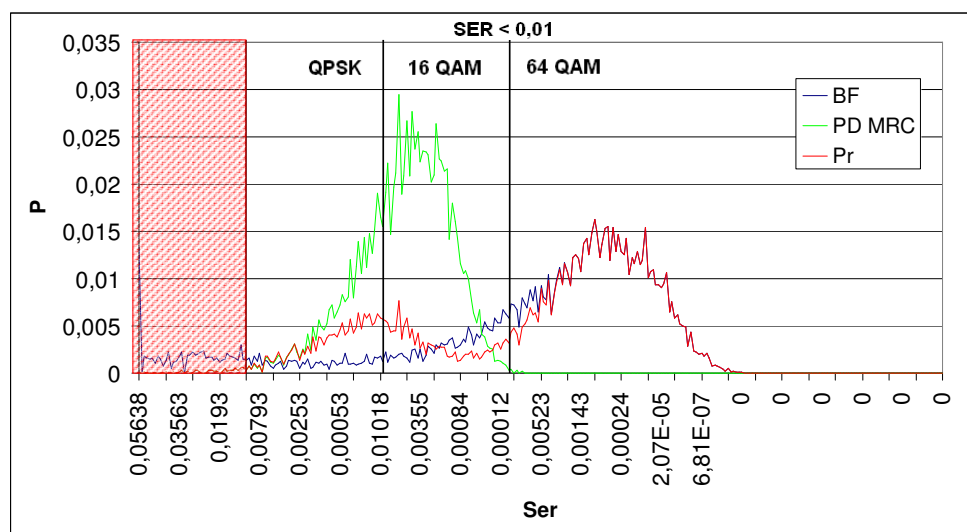
Z obrázku vidieť, že systém PD MRC bude s pravdepodobnosťou 0,025 pracovať s hodnotou SNR 10 dB. Pravdepodobnosť, že tento systém bude pracovať s hodnotou SNR väčšou ako 14 dB, alebo že v tomto systéme nastane únik ($SNR \leq 0$ dB) je skoro nulová (0,0002). Naopak, systém BF bude pracovať prevažne s hodnotou SNR 17 dB (pravdepodobnosť výskytu tejto hodnoty je 0,017), ale pravdepodobnosť, že v tomto systéme nastane únik je až 0,013 (1,3 %). Pravdepodobnosť, že v systéme Pr (systém prepínania medzi týmito systémami) nastane únik je rovnaká ako v systéme PD MRC 0,0002, ale pravdepodobnosť, že systém bude pracovať s hodnotou SNR 17 dB je rovnaká ako pri systéme BF, t.j. 0,017.

Ak stanovíme podmienku pre adaptáciu modulácie: $SER < 0,01$, potom môžeme x -ovú os SNR v obr. 7.3 nahradiť symbolovou chybovosťou pre danú moduláciu (obr. 7.4).



Obr. 7.4 Ser pre rôzne modulácie v závislosti od SNR

Ak zameníme x -ovú os SNR v obr. 7.3 za y -ovú os SER v obr. 7.4 dostaneme hustotu pravdepodobnosti symbolovej chybovosti pre jednotlivé modulácie (obr. 7.5).



Obr. 7.5 Hustota pravdepodobnosti SER pre jednotlivé modulácie

Z obr. 7. 5 je zrejmé, že systém PD MRC nedosiahne takú prenosovú rýchlosť ako systém BF, pretože prevažne pracuje s moduláciou 16 QAM a QPSK, a pravdepodobnosť, že systém bude pracovať s moduláciou 64 QAM je skoro nulová.

Pre presnejšie vyhodnotenie výsledkov sú dôležité údaje zapísané v tabuľke 7.1.

Tab. 7.1 Vyhodnotenie systémov

	BF	MRC	Pr
P (SER > 0,01) [%]	7,65	0,62	0,62
R_b (priemerná)[Mb/s]	45,42	30,71	45,1
SER	0,0042	0,0032	0,0019

Z výsledných grafov a z tabuľky 9.4 je zrejmé, že systém BF pracuje s priemernou bitovou rýchlosťou 45,42 Mb/s (pretože symbolová rýchlosť bola nastavená na 9 Ms/s) pri celkovej symbolovej chybovosti 0,0042, ale až so 7,65 % pravdepodobnosťou, že systém bude pracovať so $SER > 0,01$ a preto tento systém pri zhoršených podmienkach rádiového kanála nebude schopný garantovať symbolovú chybovosť menšiu ako 0,01.

Systém PD MRC zabezpečí hodnotu SER s väčšou pravdepodobnosťou ako systém BF, pretože pravdepodobnosť, že systém bude pracovať so $SER > 0,01$ je iba 0,62 % ale systém pracuje s priemernou prenosovou rýchlosťou len 30 Mb/s. Celková symbolová chybovosť bola v tomto systéme 0,0031.

Najlepšie výsledky dosiahol systém prepínania Pr medzi systémami BF a PD MRC

pomocou EPDA algoritmu, pretože je iba 0,62 % pravdepodobnosť (rovnaká ako v systéme PD MRC), že systém bude pracovať so $SER > 0,01$, ale priemerná prenosová rýchlosť je 45,1 Mb/s (podobná ako v systéme BF). Celková symbolová chybovosť bola v tomto systéme 0,0019, čo je najmenšia SER zo všetkých systémov.

ZÁVER

Práca sa zaoberá problematikou viaccestného šírenia v rádiovom kanáli, vplyvmi spôsobenými týmto javom a metódami ako tieto vplyvy v prijímači minimalizovať pomocou merania impulzovej odozvy rádiového kanála.

Úvodná časť práce popisuje analýzu súčasného stavu riešenej problematiky v rádiovom kanáli v rôznych mobilných rádiových sieťach a teoretický rozbor systémov využívajúcich viaccestné šírenie vo svoj prospech. Práca analyzuje rôzne systémy, ktoré v rádiovom kanáli s viaccestným šírením zvyšujú zisk pri prijímaní signálu, zväčšujú prenosovú rýchlosť, ale aj eliminujú úniky spôsobené viaccestným šírením. V úvodnej časti práce je popísaný matematický model rôznych typov rádiových kanálov a systémov, ktoré sa budú v práci využívať.

Na základe teoretického rozboru boli vytýčené ciele dizertačnej práce. Aby bolo možné merať vlastnosti rádiového kanála, boli vo vývojárskom prostredí Delphi 7 vytvorené rôzne typy rádiového kanála. Na konverziu signálu do základného pásma bola použitá šesť-portová technológia a následne boli vytvorené štyri algoritmy na zistenie ciest šírenia signálov.

Na základe identifikovaných ciest a ich parametrov sa zisťuje okamžitý stav rádiového kanála. Informácia o okamžitom stave rádiového kanála je využívaná na adaptáciu prenosovej rýchlosti, počtu stavov modulácie a na prepínanie medzi systémom tvarovania vyžarovacej charakteristiky anténovej sústavy a systémom priestorovej diverzity s kombinovaním s maximálnym pomerom.

Počas napĺňania jednotlivých cieľov práce bolo zistené, že vytvorený algoritmus má vysokú pravdepodobnosť odhalenia všetkých ciest šírenia a dá sa využiť aj na zistenie uhla príchodu prijímaného signálu.

Vytvorený algoritmus na odhaľovanie ciest šírenia sa dá ešte zdokonaľiť a využiť v rôznych systémoch, ktoré využívajú digitálne spracovanie signálov. Algoritmus je vhodný pre radarové systémy a systémy využívajúce na prenos rôzne typy impulzov, ako napríklad UWB systémy.

PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Pri vypracovávaní dizertačnej práce sa vyskytlo mnoho otázok, problémov a úloh, ktoré pri dosahovaní cieľov bolo nutné rôznymi spôsobmi vyriešiť.

Pre rýchle zorientovanie sa v danej problematike, je v tejto práci realizovaná stručná teoretická analýza danej problematiky a systémov, ktoré sa v súčasnosti snažia rôznymi spôsobmi daný problém riešiť.

Vo vývojárskom prostredí Delphi bol vytvorený rádiový prijímač s využitím novej šesť-portovej technológie v kombinácii so softvérovo definovaným rádiom.

Pre vytvorenie simulačného modelu museli byť do vývojárskych programov implementované rôzne typy rádiových kanálov. Za týmto účelom bola vytvorená prípojná knižnica, ktorá generuje čísla s Riceovým, Rayleighovým a Gaussovým rozdelením, keďže programy Delphi a C++ Builder majú generátor čísel len s rovnomerným rozdelením. Vytvorenú knižnicu je možné pripojiť k týmto programom a pomocou procedúry *rician(q,v)* je možné generovať čísla s rôznym rozdelením, ktoré je závislé od parametrov q, v .

Po vyhodnotení cieľov a realizácii experimentov vyplynuli pôvodné vedecké prínosy dizertačnej práce :

- Návrh využitia 6-portovej technológie a softvérovo definovaného rádia na meranie impulzovej odozvy rádiového kanála
- vytvorenie a realizácia štyroch algoritmov na odhalenie ciest šírenia signálu v rádiovom kanáli,
- vytvorenie algoritmu, ktorý adaptuje počet stavov modulácie vo vysieláči na základe aktuálneho stavu rádiového kanála zisteného pomocou EPDA algoritmu,
- vytvorenie a implementácia algoritmu riadenia dĺžky ochranného intervalu v systémoch UWB a OFDM za účelom zníženia symbolovej chybovosti pri optimálnej prenosovej rýchlosti,
- vytvorenie algoritmu, ktorý rozhoduje medzi použitím systému inteligentných antén a systémom priestorovej diverzity podľa zistenej impulzovej odozvy rádiového kanála tak, aby sa maximalizovala prenosová rýchlosť v kanáli,
- výpočet uhla príchodu signálu v každej ceste šírenia odhalenej EPDA algoritmom.

Pri vypracovávaní práce bolo vytvorených celkovo 87 aplikácií, množstvo procedúr a algoritmov, z ktorých niektoré priamo súviseli s dizertačnou prácou, ako napríklad aplikácia na porovnanie vytvorených algoritmov, aplikácia merania DOA, symbolovej chybovosti, prenosovej rýchlosti, aplikácia prepínania medzi systémami priestorových diverzít a systémom tvarovania vyžarovacej charakteristiky, aplikácia porovnávajúca systém priestorovej diverzity s kombinovaním s výberom a s maximálnym pomerom. Boli vytvorené aj aplikácie, ktoré súviseli s prácou len čiastočne, ako aplikácia porovnávania šírky impulzov v spektre pomocou DFT, aplikácia, ktorá z krivky hustoty pravdepodobnosti vypočíta kumulatívnu distribučnú funkciu, aplikácia, ktorá vypočíta krivky symbolovej chybovosti v závislosti od hodnoty SNR pre rôzne modulácie.

ZOZNAM PUBLIKOVANÝCH PRÁČ

- [1] HARING, J. – MAJER, N. – HRONEC, R. : Antennas Calibration by Standard Site Method, Transcom 2007, Žilina, 2007.
- [2] HARING, J. – MAJER, N. – KRASNOVSKÝ, M. : Automatizácia kalibračného merania antén s využitím metódy SSM, IEEE Workshop Zvule 2007, Zvule, 2007.
- [3] HARING, J. – MAJER, N. – HRONEC, R. : Využitie mikropásikového meniča fázy ako napájača anténovej sústavy, KIT 2007, Tatranské Zruby, 2007.
- [4] KRASNOVSKÝ, M. – HARING, J. – MAJER, N. : Vlastnosti smerovacích protokolov v mobilných rádiových ad-hoc sieťach, IEEE Workshop Zvule 2007, Zvule, 2007.
- [5] MAJER, N. – HARING, J. – KRASNOVSKÝ, M. – WIESER, V. : Meranie impulzovej odozvy pomocou šesťportového reflektometra, IEEE Workshop Zvule 2007, Zvule, 2007.
- [6] MAJER, N. – HARING, J. – WIESER, V. : Inexpensive and Simple Radar by Six – Port Reflectometer, Transcom 2007, Žilina, 2007.
- [7] MAJER, N. – HARING, J. – WIESER, V. : DOA Estimation by Six – Port Reflectometer Array, Rádioelektronika 2007, Brno, 2007.
- [8] MAJER, N. – HARING, J. – KRASNOVSKÝ, M. – WIESER, V. : Meranie impulzovej odozvy MIMO kanála pomocou šesť – portového prijímača, KIT 2007, Tatranské Zruby, 2007.
- [9] BRÍDA, P. - MAJER, N. - KRŇÁČ, B. - DÚHA, J.: Angle of Arrival Measurement Based on Software Defined Radio Receiver for Ad hoc Networks, RTT2008 - Research in Telecommunication Technology, 9th International Conference, Vyhne, 2008, ISBN 978-80-227-2939-0.
- [10] HARING, J. – MAJER, N. – HRONEC, R. : Antennas Calibration by Standard Site Method (SSM), OWD 2007, strany 157 – 160, Gliwice - Poľsko, ISBN 83-922242-2-1, 2007.
- [11] HARING, J. – MAJER, N. – POLOHA, P. – HRONEC, R. : A Microstrip Phase Shifter as An Driven Element of Dynamic Phased Array, Science & Military, strany 68 – 71, číslo 2., ISSN 1336-8885, 2007.
- [12] MAJER, N. – HARING, J. – POLOHA, P. – WIESER, V. : Pulse Response Measurement and Processing by Six – Port Reflectometer, Science & Military, strany 14 – 17, číslo 3., ISSN 1336-8885, 2008.

- [13] HARING, J. – MAJER, N. – HRONEC, R. : Directional Pattern Analysis of a Linear Phased Antenna Arrays, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, strany 74 – 77, číslo 7., ISSN 1336 – 1376, 2008.
- [14] MAJER, N. – HARING, J. – POLOHA, P. – WIESER, V. : Pulse Response Measurement and Processing by Six – Port Reflectometer, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, strany 71 – 73, číslo 7., ISSN 1336 – 1376, 2008.
- [15] POLOHA, P. – WIESER, V. – HARING, J. – MAJER, N. : Mathematical Model of MIMO Channel, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, strany 66 – 70, číslo 7., ISSN 1336 – 1376, 2008.
- [16] MAJER, N. – HARING, J. – POLOHA, P. – WIESER, V. : Meranie impulzovej odozvy MIMO rádiového kanála pomocou šesť – portového reflektometra, *Nové smery v spracovaní signálov IX, Zborník abstraktov Tatranské Zruby*, ISBN 978 – 80 – 8040 – 345 – 4, 2008.
- [17] MAJER, N. – HARING, J. – POLOHA, P. – WIESER, V. : Meranie impulzovej odozvy MIMO rádiového kanála pomocou šesť – portového reflektometra, *Nové smery v spracovaní signálov IX, Zborník príspevkov Tatranské Zruby*, ISBN 978 – 80 – 8040 – 344 – 4, 2008.
- [18] POLOHA, P. – WIESER, V. – MAJER, N. – HARING, J. : Zvýšenie účinnosti manažmentu rádiových zdrojov v systéme UMTS, *IEEE Workshop Zvule 2008*, strany 204-207, ISBN 978-80-214-3709-8, 2008.
- [19] BRÍDA, P. – MAJER, N. - DÚHA, J. - CEPPEL, P.: A Novel AoA Positioning Solution for Wireless Ad Hoc Networks Based on Six-Port Technology. *2nd Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference WMNC'09- Wireless Sensor and Actor Networks*, 2009.
- [20] WIESER, V. – MAJER, N. – HARING, J. : New Baseband Radio Channel Impulse Processing Algorithms. *Electronics and Electrical Engineering*, Kaunas, Litva 2009. (v tlači)

LITERATÚRA

- [1] DOBOŠ L., DÚHA J., MARCHEVSKÝ S., WIESER V.: Mobilné rádiové siete I. Odborná knižná publikácia, Vydavateľstvo Žilinskej univerzity EDIS, 2002, 312 strán, ISBN 80-7100-936-9.
- [2] JANASWAMY R. : Radiowave propagation and smart antennas for wireless communications. Kluwer Academic Publishers 2001. ISBN 0-7923-7241-7
- [3] GESBERT, D. : AKHTAR, J.: Breaking the barriers Of Shannon's capacity: An overview of MIMO wireless systems, *Teletronik Telenor Journal*. Január 2002.
- [4] ČEPEL, P. : Využitie adaptívnych anténových sústav na potlačenie vzájomnej interferencie v mobilných komunikačných sieťach, Dizertačná práca, Žilina 2006.
- [5] IEC: Smart Antenna Systems. <http://www.iec.org>.
- [6] ROY R.: Application of smart antenna technology in wireless communication systems, <http://www.arraycomm.com>
- [7] PROAKIS, J. G.: Digital Communication. McGraw-Hill, Third Edition, New York, ISBN 0-07-113814-5.
- [8] TUFVESSON F. : Directional Channel Models, Channel Sounding, Channel Modelling – ETI 085, 2006.
- [9] KMEC M., SACHS J., PEYERL P., RAUSCHENBACH P., THOMÄ R., ZETIK R.: A Novel Ultra-Wideband Real-Time MIMO Channel Sounder Architecture, EuMC Munich Germany, 2006.
- [10] BILÍK V. : Šesťportové reflektometre a ich využitie v rádiokomunikáciách a priemyselných aplikáciách, <<http://www.s-team.sk/download/SixPortTechnique.pdf>>
- [11] FOERSTER J.: "The Effects of Multipath Interference on the Performance of UWB Systems in an Indoor Wireless Channel," submitted to VTC2001, to be presented in May 2001.
- [12] WIN M. Z. and SCHOLTZ R. A.: "On the Robustness of Ultra-Wide Bandwidth Signals in Dense Multipath Environments," *IEEE Comm., Letters*, Vol. 2, No. 2, Feb. 1998.
- [13] WANG Y., KILAMBI S., GAUDAT V., and INIEWSKI K.: "A low power CMOS transmitter design for IR-UWB communication systems," in *Proc. IEEE Conf. on Ultra-Wideband*, Sep. 2007, pp. 823–827.
- [14] ZHENG Y., and TTONG Y.: "A novel wireless interconnect technology using impulse radio for inter-chip communications," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 4, pp. 1912–1920, Apr. 2006.
- [15] LIU H., Li G.: OFDM-Based Broadband Wireless Networks – Design and Optimization, ISBN 0-471-72346-0, 2005.

- [16] ROY S. and PORTIER P.: “Maximal-ratio combining architectures and performance with channel estimation based on a training sequence”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 7, pp. 1154-1164, Jul. 2004.
- [17] AKYILDIZ Y. and RAO B. D.: “Maximum Ratio Combining Performance with Imperfect Channel Estimates”, *IEEE International conf on Acoustics speech and signal processing, 2002, ICASSP-02*, pp. 2485-2488.

SUMMARY

The dissertation work deals with theoretical analysis of problems and systems in the mobile radio channel. The complex simulation model, generation of radio channel, channel impulse processing algorithms, modulation adaptation algorithm, bit rate adaptation algorithm and switching algorithm between the beam forming system and the spatial diversity system by pulse response of radio channel were proposed and simulated. The aim of algorithms is to improve QoS parameters of radio transmission in mobile radio channel (minimum symbol error rate and maximum throughput). Also various usages of designed algorithms is described in this work, for example: angle of arrival estimation in each path of signal propagation and positioning estimation of mobile station.