

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODELOVÁNÍ NETWORK CODING V BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

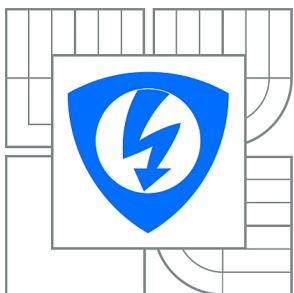
PETR SVOBODNÍK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODELOVÁNÍ NETWORK CODING V BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍCH

MODELLING OF NETWORK CODING IN WIRELESS NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR SVOBODNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZENON KUDER, MSc

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Petr Svobodník

ID: 154879

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Modelování network coding v bezdrátových sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Využití network codingu v bezdrátové komunikaci je zejména situace, kdy si dva uzly vyměňují data prostřednictvím třetího uzlu. Umožňuje snížit počet timeslotů potřebných pro přenos těchto dat díky využití znalosti odeslaných signálů. Prostudujte možnosti a různé přístupy k bezdrátovému network coding. Na základě získaných poznatků vytvořte přehled všech možných přístupů a porovnejte je z hlediska jejich efektivního využití.

V programovém prostředí MATLAB vytvořte model jednoduché bezdrátové sítě a modely vybraných technik network coding. Provedte simulaci komunikace v modelu bezdrátové sítě s vybranými technikami network coding i se základním postupem bez network coding. Dosažené výsledky porovnejte a stanovte doporučení pro využití jednotlivých technik.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] POPOVSKI, P., YOMO, H. Bi-directional Amplification of Throughput in a Wireless Multi-Hop Network. In Proceedings of the 63rd Vehicular Technology Conference VTC 2006-Spring. Melbourne, 2006, vol.2, p.588-593.
- [2] KATTI, S., GOLLAKOTA, S., KATABI, D. Embracing Wireless Interference: Analog Network Coding. In Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications SIGCOMM '07. Kyoto, 2007, p. 397-408.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Zenon Kuder, MSc

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Při výměně dat v bezdrátové síti typu bod-bod, kde není možné přímé spojení koncových prvků, se používá opakovač. Ten však nemusí vykonávat svou základní funkci Store-and-Forward, která přijatá data pouze přepoše, ale může s nimi provádět určitou operaci – Network Coding. Kombinací dat tekoucích v protiběžných směrech do jednoho odesílaného slova (paketu), kterou lze na základě znalosti dat dříve odeslaných dekodovat, se zkrátí čas potřebný pro přenos a celková datová propustnost celého spoje vzroste. Existuje několik metod, lišící se časovou úsporou, schopností funkce v kanále s vysokým šumem. Ty budou v této práci popsány a porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

datový tok, bezdrátový kanál, Wireless Network Coding, Decode-and-Forward, Amplify-and-Forward, Denoise-and-Forward

ABSTRACT

During data exchange in the Point-to-Point wireless topology, in case where end nodes aren't accessible directly, a relay is deployed. However, the basic approach to relays – Store-and-Forward – isn't the way to reach the maximum throughput. Network Coding operation is performed by combining data words (packets) travelling through the network in opposite directions into one packet. End nodes, with knowledge of the data sent, can decode received packet.

Packet exchange is then finished in shorter time which results in an increase of network throughput. There are more methods of Network Coding which differ from each other in the time requirements or the ability to work in a noisy channel. In this paper they will be described and compared.

KEYWORDS

Data Flow, Wireless channel, Wireless Network Coding, Decode-and-Forward, Amplify-and-Forward, Denoise-and-Forward

SVOBODNÍK, Petr *Modelování network coding v bezdrátových sítích*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 48 s. Vedoucí práce byl Ing. Zenon Kuder, MSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Modelování network coding v bezdrátových sítích“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Zenonu Kuderovi, MSc za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	10
1 Seznámení s fakty	11
1.1 Klasický přístup - routování	11
1.2 Max Flow – Min Cut teorém	11
1.3 Network Coding	12
1.4 Omezení dané teorií informace	14
2 Network Coding v bezdrátových sítích	15
2.1 Používané značení a symbolika	15
2.2 Modulace signálu	15
2.2.1 Analogové modulace	16
2.2.2 Digitální modulace	16
2.3 Rozhodovací oblasti modulace	18
2.4 Rozlišování amplitud a výkonů	19
2.5 Šum přijímače	19
2.6 Poměr signál/šum	19
2.7 Vlastnosti bezdrátového kanálu	19
3 Metody WNC	21
3.1 Tříkroková metoda	21
3.2 Dvoukrokové metody	23
3.2.1 Amplify-and-Forward – AF	23
3.2.2 Denoise-and-Forward – DNF	26
3.3 Porovnání metod WNC	27
4 Vliv symetrie provozu	28
4.1 Tříkroková metoda	28
4.2 Dvoukrokové metody	29
4.3 Symetrie reálného provozu	29
5 Simulace	31
5.1 Popis funkce	31
5.1.1 Úkol	31
5.1.2 Vstupní parametry simulace	31
5.1.3 Výstupní parametry	31
5.2 Realizace programu a popis jeho částí	32
5.2.1 Společná část	32

5.2.2	Modulace	34
5.2.3	Demodulace	34
5.2.4	Routování	35
5.2.5	DF	35
5.2.6	AF	35
5.3	Prezentace výsledků	36
5.3.1	Simulace při $E_b/N_0(B) = 10$ dB	36
5.3.2	Simulace při $E_b/N_0(A) = E_b/N_0(B)$	39
6	Závěr	40
	Literatura	41
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	42
	Seznam příloh	43
A	Grafy	44
A.1	Propustnost při $E_b/N_0(A) = 10$ dB	44
A.2	BER při $E_b/N_0(A) = 10$ dB	45
A.3	Propustnost při rovnajících se E_b/N_0	46
A.4	BER při rovnajících se E_b/N_0	47
B	Obsah přiloženého CD	48
B.1	Adresář matlab	48
B.2	Elektronická podoba bakalářské práce	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schéma sítě 2WRC	11
1.2	Výměna dat při routování	12
1.3	Max Flow-Min Cut teorém	12
1.4	Topologie Butterfly	13
2.1	Konstelační diagram BPSK	17
2.2	Konstelační diagram QPSK	18
2.3	Útlum energie signálu kanálem	20
3.1	Výměna dat tříkrokovou metodou DF	21
3.2	Průběh výkonových úrovní při DF a routování	22
3.3	Výměna dat dvoukrokovou metodou	23
3.4	Průběh výkonových úrovní při AF a DNF	24
3.5	Ilustrace přijatého symbolu a jeho složek	25
3.6	Znázornění QPSK symbolů před jejich součtem	25
5.1	Základní blokové schéma programu	32
5.2	Blok Technika WNC pro metodu routování	35
5.3	Blok Technika WNC pro metodu DF	35
5.4	Blok Technika WNC pro metodu AF	35
5.5	Konstelační diagram 1 – $E_b/N_0 = 0$ dB	36
5.6	Konstelační diagram 2 – $E_b/N_0 = 12$ dB	37
5.7	Konstelační diagram 3 – $E_b/N_0 = 18$ dB	38
5.8	Konstelační diagram 4 – $E_b/N_{0A} = E_b/N_{0B}$	39

SEZNAM TABULEK

1.1	Ukázka kódování funkcí XOR	13
2.1	Rozhodovací oblasti BPSK	18
3.1	Přiřazování symbolů u DNF	27
3.2	Porovnání metod NC.	27
4.1	Internetový provoz v Evropě	29

ÚVOD

V dnešní době panuje velká touha o zbavení se kabelů – být bezdrátový. Takový přenos informací má ovšem mnohá omezení, které se postupně daří odstraňovat a dosahovat tak vyšších přenosových rychlostí. Na druhou stranu je přítomný i druhý, protichůdný požadavek, a to co nejmenší energetická náročnost a s ní spojená dlouhá výdrž na baterie.

Vylepšení do této oblasti by mohla přinést technika Network Coding, volně přeloženo jako síťové kódování dat. Základní myšlenka spočívá v tom, že data nemusí sítí jen procházet ke své destinaci, ale při jejich kombinování s protijdoucím datovým provozem lze dosáhnout určitých výhod. Existuje několik metod, kterými lze tohoto kombinování dosáhnout a ty budou představeny.

Tato bakalářská práce se bude zabývat technikou Network Codingu v bezdrátových sítích. Nejprve bude popsána včetně různých modifikací a porovnána s klasickým přístupem k datům a v druhé části práce bude simulována na zjednodušeném modelu v prostředí Matlab.

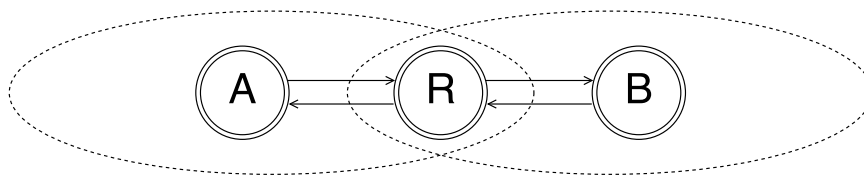
1 SEZNÁMENÍ S FAKTY

V první řadě bych rád ukázal klasický přístup výměny dat mezi uzly a způsob, jak jej udělat efektivnější - Network Coding (NC)

Hned na začátku bych měl vysvětlit a nějakým způsobem ospravedlnit hojné použití anglických výrazů v této práci. Tento důvod je prostý: čeština prostě ještě své odpovídající termíny nemá a už vůbec ne zažité. Tomu odpovídá i název tohoto tématu. A já nebudu se stavět do pozice někoho, kdo je zavede.

1.1 Klasický přístup - routování

U klasického přístupu je celá síť považována za množinu jednotlivých peer-to-peer linek, z čehož vyplývá způsob, jakým posíláme data. Mějme pro zjednodušení síťovou topologii Two Way Relay Channel - obousměrný relay kanál (2WRC) podle 1.1, kde A a B značí koncové uzly, které si chtějí přes uzel R (relay) vyměnit data. Připomeňme, že všechny prvky pracují v režimu half-duplex, takže nemůžou ve stejný okamžik data přijímat i odesílat.



Obr. 1.1: Schéma sítě 2WRC (čárkovaně jsou dosahy vysílačů)

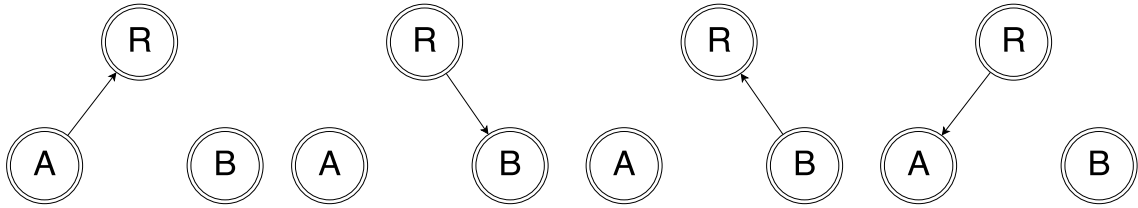
Potom výměna dat proběhne ve 4 krocích, které jsou naznačené v obr. 1.2 Tato metoda výměny dat nám stanovuje referenční hodnotu propustnosti kanálu, se kterou budeme srovnávat další metody:

$$R_R = \frac{2N}{4T_S} = \frac{N}{2T_S} = \frac{R_S}{2} \quad (1.1)$$

kde R_R značí propustnost při routování [b/s], N je počet bitů v paketu a T_S je délka timeslotu. R_S nám bude sloužit jako referenční jednotka rychlosti. V případě routování potřebujeme $4T_S$ pro výměnu $2N$ bitů.

1.2 Max Flow – Min Cut teorém

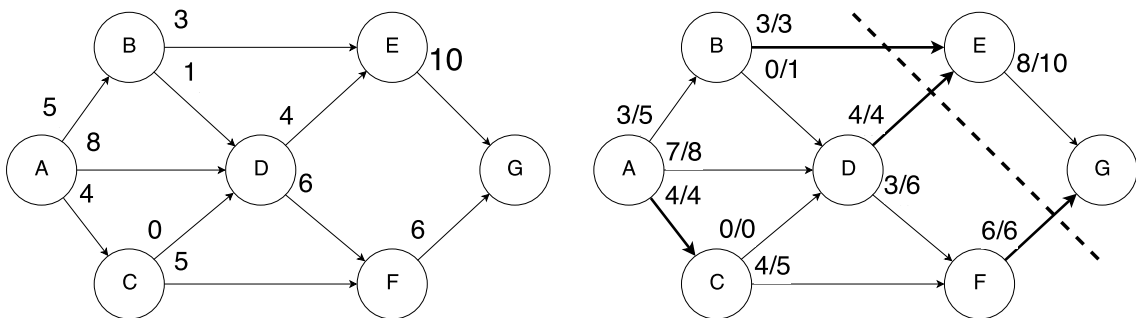
Pokud znázorníme složitější síť pomocí orientovaného grafu, ve kterém budou jednotlivé uzly označeny kroužkem a kladné číslo u jejich spojnice bude označovat



Obr. 1.2: Výměna dat při routování

kapacitu dané linky, můžeme vyčíslit celkovou kapacitu mezi libovolnými uzly. Přes danou linku nemůže téct více, než je její kapacita a pro úplnost je potřeba dodat, že i zde platí obdoba zákona zachování energie, tedy že do uzlu nelze poslat více dat než může odtéct. Potom s využitím Ford-Fulkersonova algoritmu (popsaný v [1]) můžeme stanovit hodnotu Max Flow – nejvyšší tok sítě, který se pro výměnu dat metodou routování bude rovnat hodnotě Min Cut – minimálnímu řezu.

Ta bude ve výsledku omezena úsekem s nejnižší propustností, který můžeme opět snadno najít pomocí zmíněného algoritmu: v grafu vyznačíme linky, které jsou v hledaném směru plně vytíženy, viz 1.3. Součtem kapacit těchto linek vybraných tak, abychom oddělili přijímač od vysílače odhalíme právě slabinu celé sítě. Závěrečným poznatkem pak je, že posílením vytížených linek se nemusí automaticky zvýšit hodnota Min Cut, ale může se vytvořit slabé místo sítě v jiném místě.



Obr. 1.3: Vlevo je zobrazena síť včetně kapacit jednotlivých linek v příslušných směrech. Vpravo pak s maximálním provozem podle Ford-Fulkersonova algoritmu a vyznačenými plně vytíženými linkami a Min Cutem (přerušovanou čarou). V tomto případě má hodnotu $3 + 4 + 1 + 6 = 14$.

1.3 Network Coding

Tato sekce se bude zabývat NC v drátových sítích, ve kterých vznikl. Základní principy jsou totiž shodné a navíc se o NC ví mnohem více nejen teoreticky, ale i prakticky,

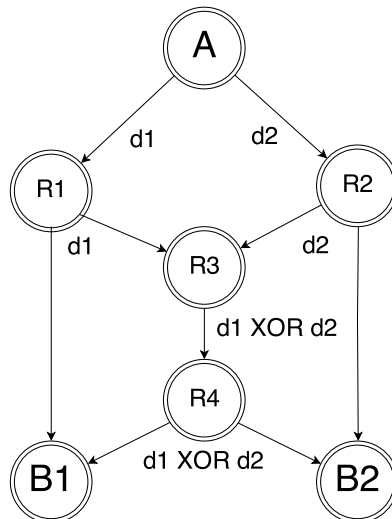
včetně reálných zisků tohoto přístupu.

Když v roce 2000 vydal R. Ahlswede článek [2], ve kterém představil NC, způsobil malou revoluci, o čemž svědčí i tisíce citací jeho článku. Jde o to, že data lze během jejich cesty sítí určitým způsobem modifikovat tak, že se zvýší její celková propustnost a tedy i rychlost přenosu, která tak může prolomit kapacitu danou teorémem Max-Flow Min-Cut. Důležité je, aby použitá funkce byla prostá (existuje k ní inverzní funkce). Jako výhodné se ukázalo kombinovat dva pakety v síti pomocí funkce bitový XOR, která při součtu výsledku s jedním z původních členů operace dá druhý původní člen. Tabulka 1.1 ukazuje ilustračně, že při znalosti libovolných

A	01110	$A \oplus B$	11000	$A \oplus B$	11000
B	10110	A	01110	B	10110
$A \oplus B$	11000	$(A \oplus B) \oplus A = B$	10110	$(A \oplus B) \oplus B = A$	01110

Tab. 1.1: Ukázka kódování funkcí XOR

dvou operandů lze spočítat třetí. Takže pokud je uzlem odeslán A a přijat $A \oplus B$, tak jejich exkluzivním součtem dopočítáme obsah zprávy od B. Ukázku takového řešení lze ukázat na topologii z obrázku 1.4 použité v [2]. Na této ukázal R. Ahlswede modelovou situaci, kdy využití Network Codingu vede k rychlejšímu přenosu síťového provozu. Při routování bychom museli pro přenos dat z R3 do R4 využít dvou časových slotů. S využitím NC tento stejný přenos trvá pouze jeden časový slot a příjemci si svá data odvodí na základě znalosti druhého operandu operace XOR.



Obr. 1.4: Topologie Butterfly

1.4 Omezení dané teorií informace

Dalším zásadní omezením rychlosti přenosu informací je celková kapacita kanálu. Myšlenku vyřkla dvojice amerických matematiků ve Shannon-Hartleyově teorému [3] již v čtyřicátých letech minulého století. Tvůrce byl matematik a informace považuje za měřitelnou veličinu, u které nemá vliv její hodnota nebo smysl. Tato kapacita (propustnost) je omezená a k její hranici se můžeme pouze přiblížit. V kanále s bílým Gaussovým šumem se tato maximální rychlost dá vyčíslit pomocí vzorce

$$C = B \log_2(1 + \gamma) \quad (1.2)$$

kde C značí propustnost kanálu [b/s]¹ a γ poměr signál/šum. Vzorec má dvě proměnné a pro jednodušší vyčíslení se vzorec normuje do podoby [4]

$$\frac{C}{B_0} = \frac{B}{B_0} \cdot \log_2\left(1 + \frac{B_0}{B}\right) = x \cdot \log_2\left(1 + \frac{1}{x}\right) \quad (1.3)$$

kde $B_0 = \gamma \cdot B$ představuje normovanou kapacitu, která konverguje k hodnotě $1,443(\text{bit/s})/\text{Hz}$. Tato hodnota je ovšem pouze teoretická a v praxi ji nelze dosáhnout

¹Ve své práci Shannon označuje propustnost písmenem C . V této práci bude nadále používáno označení R

2 NETWORK CODING V BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍCH

Po prozkoumání možností NC přišla myšlenka aplikace této techniky v bezdrátových sítích, jejichž základní principy se shodují s klasickými:

- Prostřední uzly sítě provádí určitou kombinaci příchozích dat
- Využívá se broadcastu (přirozená vlastnost bezdrátového kanálu)
- Odlišné je zpracování, tentokrát na fyzické vrstvě (PHY). Je sice náročnější, ale dovoluje nám prospěšně využít interference signálů. Musíme také vzít v úvahu nespolehlivost bezdrátového kanálu, který má (ve srovnání s drátovým přenosem) vyšší ztrátovost.

Dalším rozdílem oproti drátovému přenosu je charakter kanálu. Musíme proto signál vhodným způsobem přizpůsobit (modulovat). Následně existuje několik odlišných přístupů k provedení Wireless Network Coding – Network Coding v bezdrátové síti (WNC). Tím se budou zabývat následující kapitoly této práce.

2.1 Používané značení a symbolika

Na začátek si vyjasníme, jak budou v této práci značeny veličiny a také používané výrazy. Jako x_U bude označena zpráva od uzlu $U \in \{A, R, B\}$. Písmenem \mathbf{b} budeme značit paket o N bitech. Pokud bude U vysílat, tak $V \in \{A, R, B\} \setminus U$ (čili zdroj musí posílat svá data někomu jinému) bude přijímat:

$$y_V = L_{UV}x_U + n_V \quad (2.1)$$

kde y značí přijatý signál, L_{UV} je činitel popisující kanál mezi U a V . Více o něm bude zmíněno v kapitole 2.7. Složka n_V představuje šum s nulovou střední hodnotou a stanovenou úrovní výkonu σ^2 na přijímači, další informace v kapitole 2.5

Každý z uzlů vysílá statisticky všechny symboly rovnoměrně, takže jejich očekávaná hodnota $E\{x_U\} = 0$ a průměrná energie symbolu je $E\{|x_U|^2\} = 1$, protože se nachází na jednotkové normalizované kružnici (lze říct obecně pro PSK metody).

2.2 Modulace signálu

Pro přenos informací daným prostředím je nutné přenášený signál určitým způsobem přizpůsobit. Takové změny nazýváme modulace a jsou založeny na ovlivnitelných parametrech signálu. Těmi jsou jeho amplituda, frekvence a fázový posun.

Modulování probíhá v základním pásmu a tento signál je poté přenesen na vyšší frekvence, které vysílač odesílá do bezdrátového prostředí. O inverzní operaci, demodulaci, se stará přijímač.

2.2.1 Analogové modulace

Zejména v analogových obvodech se využívají jednoduché modulace, u kterých je ovlivněn pouze jeden parametr:

- AM (Amplitudová Modulace) – měníme amplitudu nosné
- FM (Frekvenční Modulace) – měníme mírně frekvenci nosné
- PM (Fázová Modulace) – měníme fázi nosné (nepoužívá se)

Jak ale bylo naznačeno, tyto metody jsou pro analogové signály, takže neřeší náš digitální problém.

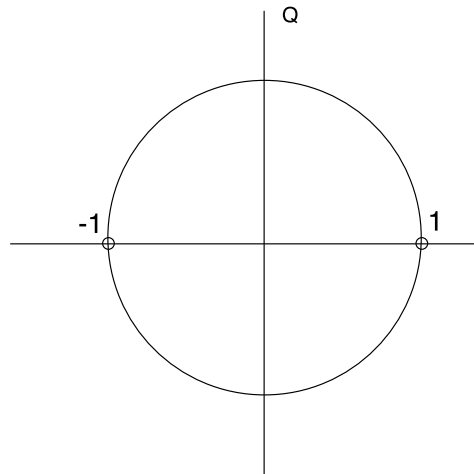
2.2.2 Digitální modulace

Při modulaci digitálním signálem nabývá on i vystupující modulovaný signál určených (diskrétních) hodnot – pouze nuly a jedničky, což je dáno nespojitým charakterem číslicového signálu. Z tohoto důvodu už se proto nemluví o modulaci, ale o klíčování (keying), nicméně tyto výrazy jsou často zaměňovány. Je důležité podotknout, že do modulátoru vstupují digitální data, označovaná v této práci jako b , a na výstupu jsou analogové signály, označené písmenem x .

Možnosti digitální modulace jsou stejné jako u analogové. Opět tedy můžeme měnit amplitudu, frekvenci a fázi nosné nebo lze tyto změny kombinovat. V této práci se zaměříme na možnost změny fáze. Označuje se jako Phase-Shift Keying – fázové klíčování (PSK). Spočívá v tom, že modulovaný signál má konstantní amplitudu a určité vymezené rozsahy fázového posuvu. Změnu fáze lze vyhodnocovat dvěma způsoby:

- Coherent PSK – porovnáním s referenční hodnotou nosné, která musí být udržována
- Differential PSK – porovnáním oproti předchozí hodnotě – sledujeme tedy změnu fáze. Metoda je jednodušší, ale při chybné demodulaci jednoho symbolu bude nesprávně demodulován i následující, proto je chyba rovnou dvojitá.

Danou pozici fáze označujeme dále jako modulační symbol (počet se volí $M = 2^N$), které pro přehlednost vynášíme do konstelačního diagramu. Všechny symboly dohromady tvoří modulační abecedu a podle počtu symbolů rozlišujeme variantu PSK, obecně značenou jako MPSK.



Obr. 2.1: Konstelační diagram BPSK

Binární fázové klíčování – BPSK

Fáze nabývá pouze dvou hodnot, a to 0° a 180° , takže se bude rovnat pouze ± 1 a počet rozlišitelných symbolů je 2. Jejich rozložení je ukázáno v konstelačním diagramu na obr 2.1.

Výhodou BPSK je jeho robustnost, čili velký odstup jednotlivých symbolů. Rušení, které by bylo schopné způsobit tak výraznou změnu fáze by muselo být opravdu silné, takže tuto modulaci můžeme používat i když je poměr SNR nízký. Jeho nevýhoda je naopak ta, že má jen dva symboly a z toho vyplývá nižší bitová rychlost 1 bit/symbol.

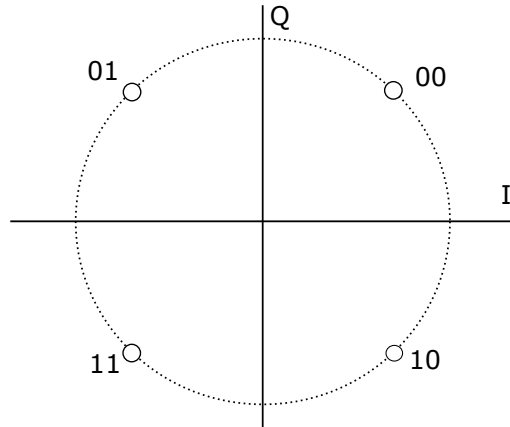
Kvadraturní fázové klíčování – QPSK

V tomto případě nabývá fáze 4 ekvidistantních hodnot, tzn. že se mění po 90° a celkem obsahuje 4 symboly. To odpovídá $\log_2(4) = 2$ bitům informace. Říkáme, že se přenáší *dibit*. Celková bitová rychlost je při zachování symbolové rychlosti [symbol/sekunda] dvojnásobná.

Konstelační diagram je znázorněn na obr. 2.2. QPSK je v porovnání s BPSK dvakrát tak rychlá, ale za cenu vyšší citlivosti na rušení. Další nevýhodou je velká parazitní amplitudová modulace při přechodu mezi protilehlými symboly. Tu je možné snížit například použitím modifikované metody O-QPSK [4].

Další varianty

Cestou zvyšování počtu symbolů bychom mohli pokračovat i dále, existuje 8/16/32-PSK, ale potom je výhodnější použít Quadrature-Amplitude Modulation – Kvadra-



Obr. 2.2: Konstelační diagram QPSK

turní amplitudová modulace (QAM), kde se mění dva parametry nosného signálu (amplituda a fáze). Konstelační diagram má potom podobu soustředných čtverců.

Opět platí, že se zvyšuje počet přenesených bitů v jednom symbolu, ale zároveň také citlivost na zarušení.

2.3 Rozhodovací oblasti modulace

U digitálních modulací musíme dále vyřešit problém dekódování symbolů, který nastane při současném vysílání signálů, ke kterému se dostaneme dále. Pro vysvětlení principu stačí použít modulaci BPSK. V tabulce 2.1 je naznačeno, jaký symbol přijme router při současném vysílání obou koncových stanic. Je vidět, že pro kombinace $[-1;-1]$ a $[1;1]$ jsou vstupní data jednoznačná a víme, co který uživatel poslal, zatímco při kombinacích $[-1;1]$, $[1;-1]$ nejsme schopni určit, který terminál poslal kterou informaci. Nicméně na relayi to nevadí, protože ten není cílová destinace a data pouze přeposílá a koncový uživatel bude schopný svá data extrahovat pomocí funkce XOR. Při modulaci QPSK bude možných stavů 9, ale opět to nepředstavuje problém

x_A	x_B	Σ
-1	-1	-2
-1	1	0
1	-1	0
1	1	2

Tab. 2.1: Součet symbolů BPSK při současném vysílání

2.4 Rozlišování amplitud a výkonů

U signálů je nutno rozlišovat, jestli je řeč o amplitudových nebo výkonových úrovních. Výkon signálu lze počítat jeho umocněním na druhou. Energie symbolu se označuje znakem ε . V této práci jsou pro větší názornost poměry voleny tak, aby měly při odesílání jednotkovou energetickou úroveň, tedy $\varepsilon = 1$, což jednak zjednoduší některé vztahy, ale hlavně jsou poměry názornější.

Vysílané symboly mají při použití modulace QPSK amplitudu $x = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \pm j \frac{1}{\sqrt{2}}$, ale jejich výkon je $|x|^2 = 1$. Při užití BPSK platí o energii to samé.

2.5 Šum přijímače

Každý reálný prvek má nějaký šum. Ať už je vlastní nebo přijatý od prostředí, zvyšuje pravděpodobnost špatného vyhodnocení přijatého symbolu. V této práci bude šum modelován pomocí Additive White Gaussian Noise – model bezdrátového kanálu pouze s bílým šumem (AWGN). Pro něj je typické, že šum má normální rozložení s nulovou střední hodnotou $E(n)$ a specifikovaným rozptylem σ^2 , který popisuje jeho výkon.

2.6 Poměr signál/šum

S úrovní šumu úzce souvisí důležitý parametr Signal to Noise Ratio – poměr signál/-šum (SNR). Ten označuje poměr výkonu nosné signálu vůči výkonu šumu. Veličina je bezrozměrná a obvykle se udává v logaritmické míře.

$$\text{SNR} = \frac{\varepsilon \cdot L^2}{\sigma^2} \quad (2.2)$$

pro symbol s jednotkovou energií lze ε vynechat a SNR v logaritmické míře potom bude

$$\text{SNR}_{[\text{dB}]} = 10 \cdot \log \frac{L^2}{\sigma^2} \quad (2.3)$$

Tímto způsobem je často měřen kanál, protože je metoda přehledná a nezáleží tak na konkrétních hodnotách, ale pouze na jejich poměru. Toho bude využito v simulaci, kde se bude měnit hodnota útlumu v závislosti na poměru SNR při stanoveném výkonu šumu.

2.7 Vlastnosti bezdrátového kanálu

Bezdrátový kanál je nespolehlivé médium, který má útlum a mění celkový posuv fáze. Vlastnosti tohoto kanálu jsou popisovány kanálovým koeficientem, kterým je

obecně komplexní číslo $|h| \leq 1$.

$$h = L \cdot e^{j\varphi} \quad (2.4)$$

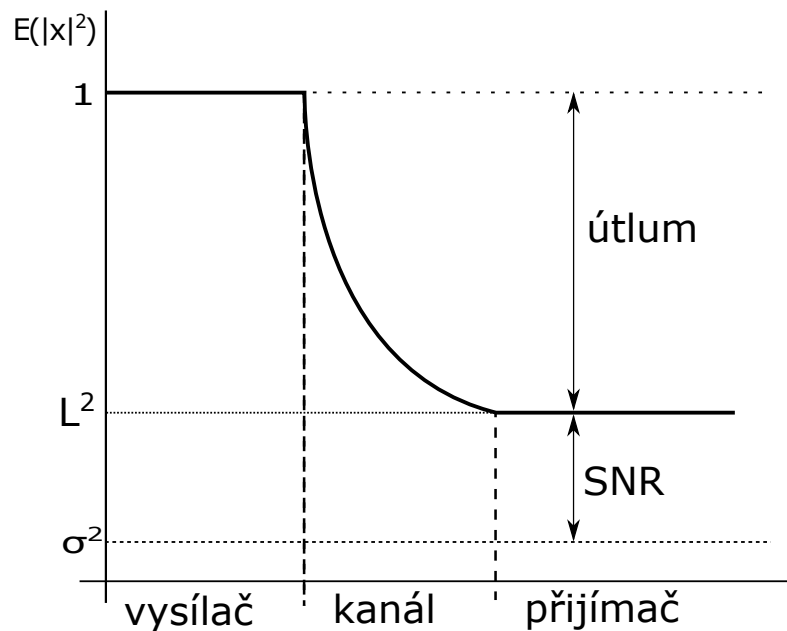
Jeho modul $L = |h|$ poskytuje informaci o útlumu a argument φ ovlivňuje fázi. Jak již bylo zmíněno dříve, tak se tento parametr může lišit i pro jednotlivé směry kanálu, ale v této práci je symetrický, protože lze bezdrátový kanál považovat za reciprokový, pokud se komunikuje na stejné frekvenci a ve stejném čase. Pro činitele kanálů tedy platí $h_{AR} = h_{RA} = h_A$ a $h_{RB} = h_{BR} = h_B$.

Pokud by se rovnalo $h = 1 \cdot e^{j0}$, kanál by byl ideální a neměl žádný útlum a ani neotáčel fázi. Při $h = 1 \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$ útlum sice stále bude nulový, ale fáze se změní o 90° . V takovém případě se např. u QPSK otočí konstelační diagram symbolů o stejný úhel a je potřeba tento fakt zohlednit při dekódování, jak bylo zmíněno v [5].

V této práci bude ovšem činitel vlastností kanálu kvůli zjednodušení demodulačního procesu považován za čistě reálný, takže se projeví jen jeho útlumová složka L . Jak je symbol ovlivněn útlumem je zobrazeno v obrázku 2.3

Pro vlastní linku může stanice svůj koeficient kanálu změřit na základě přijetí testovacího symbolu, se známými parametry a na základě jejich změn po přijetí vyčíslí koeficient L .

Obvykle útlum L má hodnotu větší než jedna. V této práci tomu je naopak. Pokud by bylo potřeba pracovat s útlumem jako s číslem větším než 1, stačí převrátit jeho hodnotu a výsledek bude odpovídat požadavkům.



Obr. 2.3: Energie signálu v důsledku průchodu kanálem klesne. Poměry veličin jsou pouze ilustrativní.

3 METODY WNC

Během zkoumání možností se přišlo na několik možností přístupu k řešení WNC. Některé přijaté signály dekodují a upraví, jiná pouze zesílí. Metody dělíme podle počtu kroků (tedy i timeslotů) potřebných k výměně dat mezi klienty.

3.1 Tříkroková metoda

Jako první byl uveden přístup v [6], který má nejbližší ke klasickému NC. Opět budeme mluvit o topologii 2WRC z obr. 1.1. Nyní proběhne přenos dat ve třech krocích ilustrovaných obrázkem 3.1:

- A odešle svá data na R
- B odešle svá data na R
- R přijme data a dekoduje je, načech provede bitovou operaci XOR mezi daty z A a B a výsledek pošle oběma stranám broadcastovým kanálem

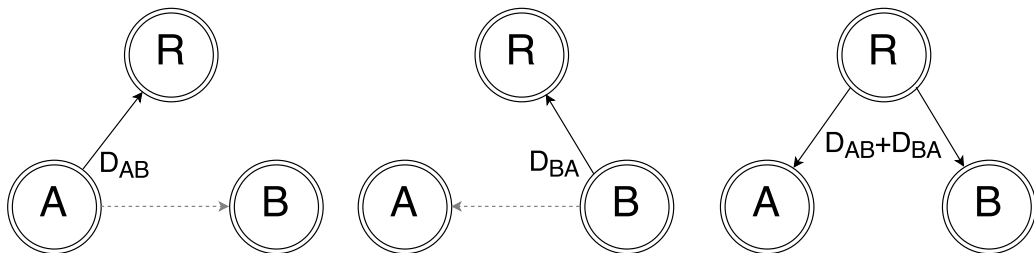
Příjemci zprávy pak podle tabulky 1.1 získají potřebná data. Z principu vychází i anglický název Decode-and-Forward (DF). Při tomto zpracování je signál zbaven svého šumu a vysílá se nanovo nezarušený a proto je tento princip výhodný pro kanály s nízkým SNR. Další výhodou je, že koncový uzel potřebuje znát parametr L pouze pro svou přímou linku k relayi (tedy A musí znát hodnotu L_A). Výměna dat probíhá ve třech krocích, takže propustnost kanálu je:

$$R_{DF} = \frac{2N}{3T_S} \quad (3.1)$$

a zisk oproti klasickému přístupu:

$$G_{DF} = \frac{\frac{2N}{3T_S} - \frac{2N}{4T_S}}{\frac{2N}{4T_S}} = \frac{\frac{2R_S}{3} - \frac{R_S}{2}}{\frac{R_S}{2}} = \frac{1}{3} = 33\% \quad (3.2)$$

V některých případech může dojít u DF v prvních dvou krocích k tomu, že uzel, který nevysílá, zachytí signál (např. B zachytí přímo signál od A). Situace je



Obr. 3.1: Výměna dat tříkrokovou metodou DF

naznačena v obr.3.1 přerušovanou čarou. Tuto informaci lze buď jednoduše ignorovat nebo ji lze zachytit a uložit do bufferu. Po přijetí sloučeného paketu pak může sloužit jako doplňková kontrola správnosti dekódování a může zvýšit propustnost sítě.

Přijímač za určitých okolností (např. příliš vysoká hodnota okamžitého šumu) není schopný správně dekódovat přijaté symboly a dochází k chybě – daný symbol není přenesen. Ze statistického hlediska se vyjadřuje chybovost pomocí Packet Error Rate (PER) a jejich hodnota se rovná pravděpodobnosti, že nastane chyba přenosu. Při uvážení stejné chybovosti v obou směrech ji pro linku A – R označíme jako p_{e1} a pro B – R jako p_{e2} .

Jak bylo ukázáno v [6], tak mohou nastat s různými pravděpodobnostmi 4 situace

- $(1-p_{e1})(1-p_{e2})$ – pakety budou úspěšně přijaty na oběma přijímači
- $(1-p_{e1})p_{e2}$ – na lince B–R dojde k chybě
- $p_{e1}(1-p_{e2})$ – na lince A–R dojde k chybě
- $p_{e1}p_{e2}$ – na obou linkách je přenos chybný

Obecně lze potom zapsat, že dlouhodobá propustnost spoje je:

$$R_{DF} = \frac{(2 - p_{e1} - p_{e2})R_S}{3} \quad (3.3)$$

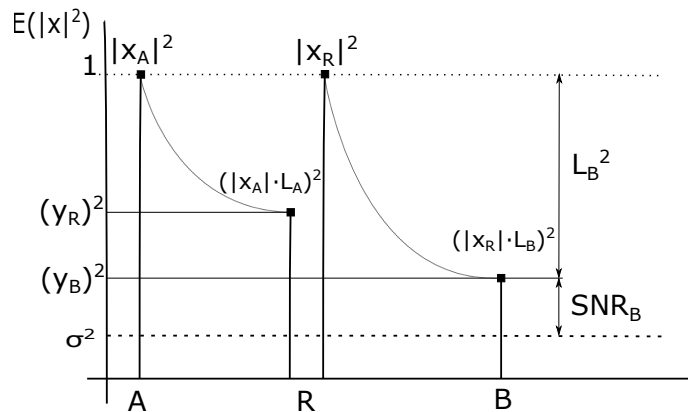
a při $p_{e1} = p_{e2} = p_{eDF}$

$$R_{DF} = \frac{2R_S}{3}(1 - p_{eDF}) \quad (3.4)$$

Za zmínku stojí uvést, že samotná operace Network Codingu, tedy slučování paketů, nemá podle [6] žádný vliv na chybovost kanálu.

Průběh výkonových úrovní při DF

Při každém vysílání je odeslán samotný symbol bez dalších přidavných složek. Průběh výkonové úrovně signálu je naznačen ilustrativně na obrázku 3.2



Obr. 3.2: Pokaždé je vyslán nový symbol. Obrázek platí i pro routování

3.2 Dvoukrokové metody

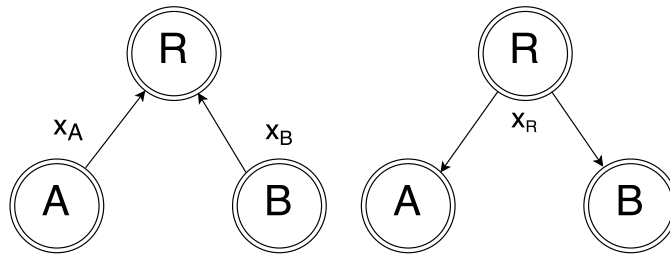
Jiný přístup k WNC zahrnuje pouze dva kroky pro obousměrnou výměnu dat. Pro všechny metody je společné, že v prvním kroku vysílají obě strany a ve druhém posílá relay jejich směs. Teď je ovšem rozdíl, jak se k této směsi stavíme. Vzhledem k half-duplexové povaze jednotlivých stanic zde ani nemůžeme brát v úvahu přímou linku mezi koncovými zařízeními a ilustrační schéma je na obrázku 3.3. Následující metody potřebují znát parametry obou linek L_A i L_B k tomu, aby byly schopny zpracovat přijatý signál. Liší se naopak tím, co relay provede za operaci před opětovným odesláním a z toho vychází jejich vlastnosti.

Celá výměna dat nyní proběhne ve dvou timeslotech a pro přenosovou rychlost metody platí:

$$R_{2T_S} = \frac{2N}{2T_S} = \frac{N}{T_S} \quad (3.5)$$

a pro zisk metody oproti routování podobně jako v předchozí kapitole

$$G_{2T_S} = \frac{\frac{N}{T_S} - \frac{2N}{4T_S}}{\frac{2N}{4T_S}} = \frac{R_S - \frac{R_S}{2}}{\frac{R_S}{2}} = 1 = 100\% \quad (3.6)$$

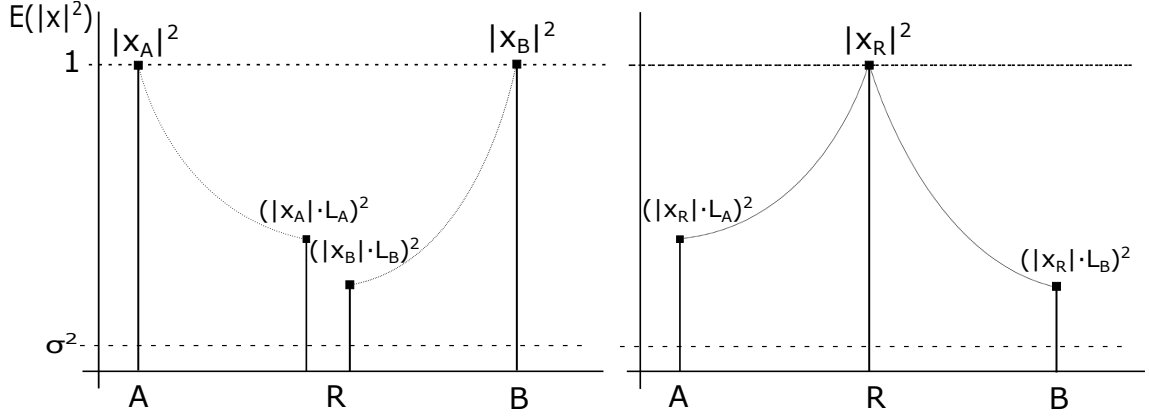


Obr. 3.3: Výměna dat dvoukrokovou metodou

3.2.1 Amplify-and-Forward – AF

První metoda, nazývaná podle [7] také jako Analogový Network Coding (ANC), se na posílanou informaci dívá jako na analogové signály, které se při současném vysílání lineárně sečtou. Takovou informaci poté stačí zesílit vhodným faktorem β takovým, aby střední hodnota výkonu výstupního signálu $E\{|x_R|^2\} = 1$. Poté mohou být použity vysílače se stejným výkonem. Je tedy potřeba zesílovat převrácenou hodnotou součtu přijatých výkonů a výsledek odmocnit, pro práci s amplitudami.

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{L_A^2 + L_B^2 + \sigma^2}} \quad (3.7)$$



Obr. 3.4: Průběh výkonových úrovní při AF (platí i pro DNF)

V praxi bude ještě potřeba vymyslet způsob, jak činitel β předat koncovým uzlům, protože jej potřebují pro správné dekodování. Jako nejpravděpodobnější se jeví předání v rámci signalizační komunikace, protože hodnotu zesílení nelze vyčíslit bez znalosti obou činitelů útlumu (výkon šumu by se při běžných podmínkách dal zanedbat).

Přijímající uzel by měl být schopný zesílený signál po níže uvedené úpravě správně dekodovat. V reálném světě bude ale obsahovat navíc šum, jehož část bude dokonce zesílena činitelem β . Z toho plyne nevýhoda této metody – vyšší chybovost při nízkém SNR. K tomu se váže druhá nepříjemná vlastnost, a to že jsou chyby na sobě závislé v případě vysoké okamžité hodnoty šumu na relayi. Takto poškozený symbol pak způsobí chybné vyhodnocení na obou přijímačích a projeví se jako dvojitá chyba. Celková propustnost metody se zohledněním chybovosti je dána vzorcem:

$$R_{AF} = \frac{R_S}{2}(2 - p_{e1} - p_{e2}) \quad (3.8)$$

Změny signálu po trase

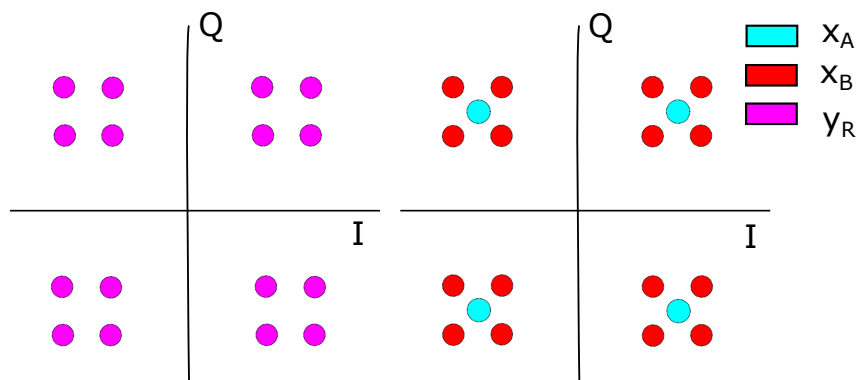
Vzhledem k tomu, že na relayi dochází k příjmu od obou uzlů ve stejnou dobu, tak bude i šumová složka shodná. Jak se mění úroveň výkonu signálu je naznačeno ilustrativně na obr. 3.4

Relay přijme signál y_r , který je součtem zeslabených signálů od obou uzlů (naznačeno v 3.5 a 5.6) a jeho vlastního šumu

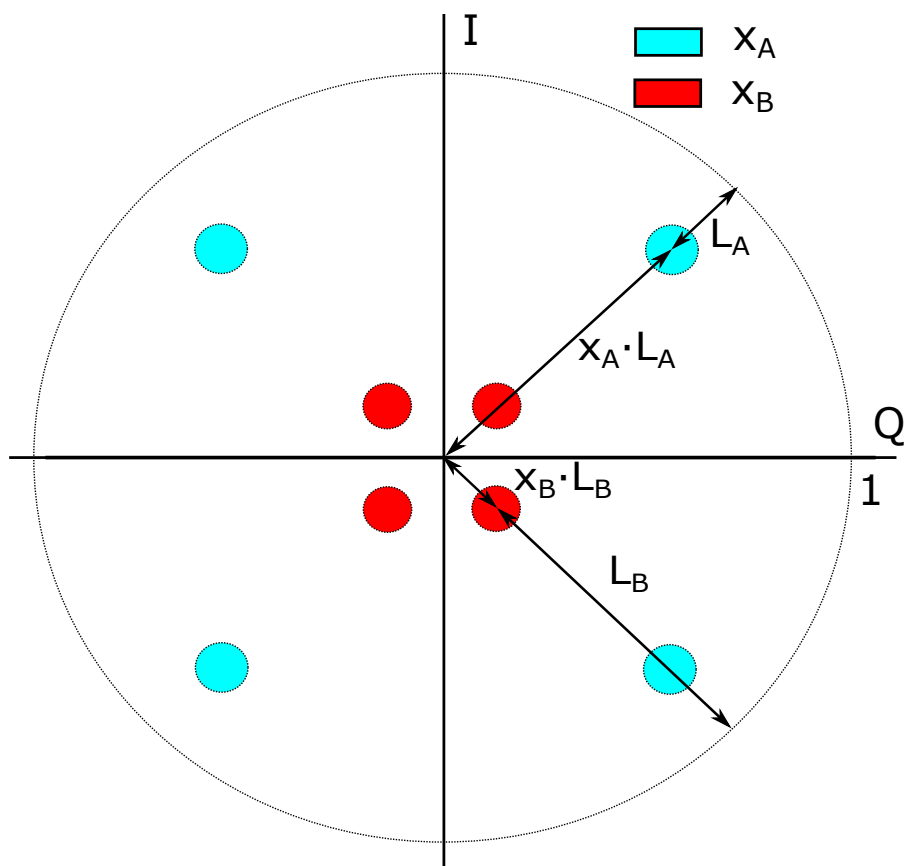
$$y_R = L_A \cdot x_A + L_B \cdot x_B + n_R \quad (3.9)$$

který před odesláním zesílí činitelem β za účelem vysílání s jednotkovým výkonem

$$x_R = \beta \cdot (L_A \cdot x_A + L_B \cdot x_B + n_R) = \beta \cdot y_R \quad (3.10)$$



Obr. 3.5: Vlevo je přijatý symbol. Vzniká součtem dvou QPSK symbolů naznačených v pravém obrázku



Obr. 3.6: Znázornění QPSK symbolů před jejich součtem

Tento signál dorazí utlumený na uzel (například A) a ještě se k němu přičte šum na přijímači. Můžeme ho popsat jako

$$y_A = L_A \cdot x_R + n_A = L_A^2 \cdot \beta \cdot x_A + L_A \cdot L_B \cdot \beta \cdot x_B + \beta \cdot n_R + n_A \quad (3.11)$$

za předpokladu, že uzel (v tomto případě A) zná signál který odeslal, parametry linky k relayi a zesilovací činitel β , lze provést úpravu, která povede ke správnému dekódování symbolů. Ta spočívá v odečtení prvního členu přijatého signálu a vydělení známým činitelem útlumu L_A , čímž dojde k zesílení

$$s_A = \frac{y_A}{\beta} - L_A^2 \cdot \beta \cdot x_A = L_B \cdot x_B + n_R + \frac{n_A}{\beta} \quad (3.12)$$

po této úpravě se teprve posílá signál do demodulátoru, kde při dostatečném odstupu signálu od šumu na obou linkách dojde k úspěšnému dekódování.

3.2.2 Denoise-and-Forward – DNF

V článku [8] byla představena pokročilejší metoda, ve které se pokouší relay přijímaná data dekódovat na symbolové úrovni a někdy bývá nazvaná jako Partial Decode-and-Forward (PDF). Rozdíl oproti DF je v tom, že se přijaté kombinaci dat pouze přiřadí vhodný symbol, ale nedekóduje je ani neprovádí s daty žádnou operaci. Přiřazování může být buď pro jednotlivé bity (resp. symboly) nebo pro pakety. První způsob je rychlejší a jednodušší, ale náchylnější k chybám. Protože relay pracuje na fyzické vrstvě a nezkoumá obsah dat, tak již nemluvíme o dekódování paketu, ale jen o odstranění šumu – denoise.

Prakticky poté přenos probíhá tak, že při současném vysílání A a B relay poslouchá a jednotlivým kombinacím bitů se snaží podle rozhodovacích oblastí konkrétní modulace přiřadit vhodný symbol. Pro BPSK je možné přiřazování uvedeno v tabulce 3.1. Dojde tedy (za předpokladu správného rozpoznání symbolu) k odstranění rušení a vysílá se tedy symbol s jednotkovou energií bez potřeby počítání zesilování přijatého signálu. Přijímající uzel následně může díky znalosti odeslaných dat demapovat přijatý symbol na data odeslaná protistranou.

Uplatnění této metody přístupu najdeme zejména při vysílání v oblasti nízkého SNR, kde bude ve srovnání s AF vykazovat menší chybovost a tedy vyšší přenosové rychlosti. S rostoucím SNR se budou křivky propustnosti přibližovat a ve vyšších oblastech už bude jedno, kterou metodu použijeme. Nevýhodou je vyšší složitost metody, zejména při použití modulací vyšších řádů a s tím související vyšší požadavky na výpočetní výkon síťových prvků.

Pokud se zaměříme opět na přenos v reálném kanálu, tak musíme zavést novou chybovou veličinu – p_d – pravděpodobnost špatného rozhodnutí o symbolu při odrušování. Potom, při uvažování $|h_1| = |h_2|$, a tedy $p_{e1} = p_{e2} = p_e$ bude přenosová

rychlost metody:

$$R_{DNF} = R_S \frac{2(1 - p_d)(1 - p_e)^2(1 + p_e - p_e^2)}{2 - p_e p_d - p_d - p_e^2 + p_e^2 p_d} \quad (3.13)$$

A	B	Σ	R
-1	-1	-2	-1
-1	1	0	1
1	-1	0	1
1	1	2	-1

Tab. 3.1: V prvních dvou sloupcích jsou symboly odeslané příslušnými uzly. Ve třetím je výsledek kolize těchto paketů a podle čtvrtého sloupce se přiřadí do bufferu k odeslání vhodný symbol.

V této sekci jsou klíčové vlastnosti jednotlivých metod WNC porovnány v tabulce. Podrobnější popis je v předchozích kapitolách zaměřených na konkrétní metody.

3.3 Porovnání metod WNC

V následující tabulce jsou shrnuty některé parametry metod WNC pro jejich lepší porovnání mezi sebou.

Počet kroků	4	3	2	
Metoda	routování	DF	AF	DNF
Zisk metody	0%	33%	100%	100%
Odolnost proti rušení	základní	základní	nízká	střední
Relay musí znát	–	–	L_A, L_B, β	L_A, L_B
Výpočetní náročnost	nízká	střední	nízká	vysoká

Tab. 3.2: Porovnání metod NC.

4 VLIV SYMETRIE PROVOZU

Pro dosažení maximálního zisku zvolené metody WNC je jeden z klíčových požadavků rovnoměrný (symetrický) síťový provoz v obou směrech. Tento požadavek byl uvažován v [6] a vzhledem k odlišnému přístupu k posílaným signálům v jednotlivých metodách bude potřeba vyčlenit zvlášť kapitoly podle počtu kroků potřebných k výměně dat.

4.1 Tříkroková metoda

Hned na začátku je potřeba zavést činitel nesymetrie provozu α . Mějme K_A paketů b_{AC} a analogicky K_B paketů b_{CA} , celkem tedy $K = K_A + K_B$ paketů dat. Činitel nesymetrie provozu potom bude:

$$\alpha = \frac{K_A}{K_A + K_B} \quad (4.1)$$

Při slovní interpretaci tento vzorec vyjadřuje, jaká část celkového provozu jde z A a pokud bude $A \in (0; 0,5)$, tak to znamená, že tento provoz je menší než z B. To vše platí za předpokladu dostatečně dlouhé pozorovací doby. Pro zjednodušení dále uvažujme kanál, ve kterém nenastávají chyby při přenosu.

Jelikož v obecných výrazech je někdy těžké se vyznat, bude pro lepší představu uvedena modelová situace: $\alpha = 0,4$ a $K=100$. Podle výše uvedeného lze spočítat: $K_A = \alpha K = 0,4 \cdot 100 = 40$ a $K_B = (1 - \alpha)K = (1 - 0,4) \cdot 100 = 60$.

Tato data budou odeslána broadcastovým kanálem metodou DF v $(1 - \alpha)K = (1 - 0,4) \cdot 100 = 60$ časových slotech. Relay tedy bude provádět operaci XOR mezi jednotlivými bity prvních $\alpha K = 40$ paketů a zbylých $(1 - 2\alpha)K = (1 - 2 \cdot 0,4) \cdot 100 = 20$ paketů bude muset odeslat klasicky – routováním. Pro celkovou výměnu je potřeba K časových slotů pro odeslání dat relayi a $(1 - \alpha) \cdot K$ pro jejich opětovné rozoslání, což dává dohromady $(2 - \alpha)K = (2 - 0,4) \cdot 100 = 160$ potřebných timeslotů. Při obsahu N bitů v každé paketu dostáváme propustnost kanálu:

$$R_{DF}(\alpha) = \frac{KN}{K(2 - \alpha)T_S} = \frac{R_S}{2 - \alpha} \quad (4.2)$$

kde $R_S = \frac{N}{T_S}$.

Zisk metody DF získáme porovnáním propustnosti s a bez použití WNC:

$$G_{DF}(\alpha) = \frac{\frac{R_S}{2 - \alpha} - \frac{R_S}{2}}{\frac{R_S}{2}} = \frac{\alpha}{2 - \alpha} \quad (4.3)$$

Zisk metody je, jak se dalo očekávat, nejvyšší při $\alpha = 0,5$, tedy při symetrickém provozu.

4.2 Dvoukrokové metody

Pro dvoukrokové metody je potřeba vzhledem k tomu, že se pracuje se signály (už ne s daty jak v předchozí sekci), zavést jiné jednotky.

Relay bude přijímat v K timeslotech data a v $K_1 < K$ z nich budou vysílat obě strany zároveň. Činitel symetrie provozu tedy lze vyjádřit obdobně jako dříve. Pro K_1 potom platí:

$$\alpha = \frac{K_1}{K + K_1} \rightarrow K_1 = \frac{\alpha K}{1 - \alpha} \quad (4.4)$$

Při zachování stejných čísel v tomto případě platí: $K = 60$ a $K_1 = 40$. Celkový potřebný počet timeslotů je v tomto případě $2K = 120$ a z toho vyplývá propustnost kanálu:

$$R_{AF}(\alpha) = \frac{(K + K_1)N}{2KT_S} = \frac{R_S(1 + \frac{\alpha}{1-\alpha})}{2} = \frac{R_S}{2(1 - \alpha)} \quad (4.5)$$

Zisk nad routováním vyčíslíme obdobně:

$$G_{AF} = \frac{\frac{R_S}{2(1-\alpha)} - \frac{R_S}{2}}{\frac{R_S}{2}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (4.6)$$

Maximální propustnost bude opět dosažena při symetrickém provozu.

4.3 Symetrie reálného provozu

V dnešní době, kdy skoro každý využívá internet, se rozhodně nedá říci, že by provoz byl rovnoměrný, čemuž odpovídá i vývoj a stav mobilních datových technologií, které jsou výrazně rychlejší ve směru ke koncovému uživateli. Na druhou stranu vyvstává otázka, jestli to vůbec vadí. Podle zprávy společnosti Sandvine o datovém provozu internetu vydané za první polovinu roku 2014 [10], která odlišuje pevné a mobilní přípojky pro každý kontinent zvlášť, lze sledovat průměrné chování uživatele. Data pro Evropu jsou uvedena v tab. 4.1. Z ní vyplývá, že v průměru tvoří upload jen asi 15% veškerého síťového provozu a u mobilních přípojek to je ještě méně (12%).

	Pevné připojení		Mobilní připojení	
	Medián	Střední hodnota	Medián	Střední hodnota
Upload	1,5 GB	5,1 GB	15,1 MB	69,5 MB
Download	8,7 GB	23,1 GB	108,8 MB	380,3 MB
Celkem	10,1 GB	28,2 GB	122,1 MB	449,5 MB

Tab. 4.1: Měsíční provoz v Evropě. Je uveden medián a střední hodnota provozu zvlášť pro mobilní a pevné internetové přípojky

Co to ale znamená ve výsledku? Můžeme snadno provozovat half-duplexovou linku se symetrickou kapacitou, která v případě rovnoměrného provozu bude využívat výhod network codingu a pokud by provoz byl čistě jednosměrný, tak se bude využívat klasický přístup – routování. Tyto stavy jsou mezní a dá se mezi nimi přecházet plynule, takže vždy bude použit způsob, který je v dané chvíli nejvhodnější. Výsledkem je tedy linka, která je schopna zajistit konektivitu plnou rychlostí při zachování jediné vysílací frekvence.

Přínos WNC se ale využije spíše v jiných aplikacích než v síti internet pro běžného uživatele. Aplikace bude vhodná pro spoje bod-bod (peer-to-peer), a zejména pro ty s retranslací (relay prvek). Taková spoje se často staví v průmyslovém odvětví, kde neslouží pro přenos provozu generovaného lidmi při běžné aktivitě na internetu, ale k výměně velkého objemu dat a tam požadavek na symetrii může být splnitelný.

5 SIMULACE

V této kapitole bude popsána aplikace pro simulaci WNC v programovém prostředí Matlab. Užitá verze programu je MATLAB R2012b (8.0.0.783).

5.1 Popis funkce

5.1.1 Úkol

Vytvořit simulaci přenosu dat bezdrátovým kanálem při použití klasického přeposílání a při použití vybraných technik WNC v šumovém prostředí. Následně výsledky porovnat mezi sebou a s teoretickými hodnotami.

5.1.2 Vstupní parametry simulace

V simulaci je jako hlavní ovlivnitelný parametr poměr signál/šum na jednotlivých spojích. Byl zvolen proto, že s poměrem signál/šum se v oblasti radiových spojů běžně pracuje a jsou známé jeho typické hodnoty na rozdíl od útlumu, který závisí na mnoha faktorech. SNR je zadáván v logaritmické míře. Na základě toho a volitelného výkonu šumu na přijímačích se vypočítá činitel útlumu (v lineární míře), který zajistí požadované úrovně signálů.

Úroveň šumu je zvolena jedna společná pro všechny tři přijímače záměrně, protože pokud by se lišila, tak by to mělo vliv i na výpočet útlumu dané linky v opačném směru. Jinými slovy by se koeficient útlumu měnil. Na začátku ale bylo zmíněno, že linky jsou symetrické, a proto platí i o šumu, že je jeho úroveň všude stejná.

Program podporuje dvě různé modulace dat, a to BPSK a QPSK. Dalšími parametry je počet bitů, pro které simulace proběhne a velikost paketů, do kterých je přenos rozdělen.

5.1.3 Výstupní parametry

Hlavním parametrem, který byl vrácen do hlavní funkce jako výsledek, je Bit Error Rate – BER. Ten označuje počet chybně přenesených bitů ku celkovému počtu bitů. Může být tedy považován za pravděpodobnost chyby p_e . K vyčíslení dojde porovnáním odesílaných a přijatých dekódovaných dat, která jsou sice náhodně generovaná, ale jsou známá. Počet chyb po vydělení celkovým počtem bitů udává BER. Ta není vztažená ke konkrétnímu počtu bitů, ale považuje se za veličinu statistickou, takže ji lze vztáhnout k jakémukoliv množství přenášených dat.

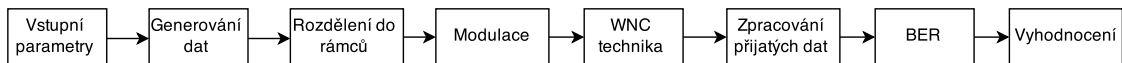
Na základě známé chybovosti je možné vyjádřit přenosovou rychlost úspěšně přenesených dat. Ta je pro názornost také normalizována a vynesena do grafu.

5.2 Realizace programu a popis jeho částí

Při psaní programu bylo hojně využíváno funkcí, které byly psány tak, aby byly co nejobecnější a mohly být využívány opakovaně v různých částech programu.

5.2.1 Společná část

Hlavní funkce programu, která spouští simulaci je `hlavni1.m`. Hlavní část programu jako je zadání vstupních parametrů, generování dat a dělení do paketů probíhá společně.



Obr. 5.1: Základní blokové schéma programu

Dále budou popsány jednotlivé funkční bloky programu. Blok WNC technika bude rozebrán důkladněji v jednotlivých sekcích. Pomocí něj se volí, jak napovídá název, způsob, jakým bude manipulováno s daty.

Počet bitů pro simulaci

V první řadě je potřeba zadat počet bitů, pro které bude simulace probíhat. Ten je uložen v proměnné `N`. Při počtu bitů řádově 10^6 je detekovatelná chybovost BER = 10^{-6} a tu lze považovat za dostatečnou.

Úroveň šumu a jeho přepočítání na útlum

Pro účely modelování digitálních modulací se využívá normalizovaný poměr energie bitu od šumu E_b/N_0 a zadává se v logaritmické míře. Ve výchozím nastavení je jeho hodnota na trase B-R konstantní a na A-R proměnná s pevným krokem. Pro přepočítání na útlum je nutno převést logaritmickou hodnotu odstupů na lineární: $E_b/N_0 = 10^{\frac{E_b/N_0[dB]}{10}}$ a následně dosadit do upraveného vzorce podle [9]. Matematickou úpravou lze odvodit útlum L jako

$$L = \sqrt{2 \cdot E_b/N_0 \cdot \sigma^2 \cdot N}, \quad (5.1)$$

kde N značí počet bitů přenesený jedním symbolem a v rámci simulace lze využít proměnné `modul`. Takto vypočítaná hodnota představuje hodnotu útlumu signálu.

V rámci simulace se může stát, že při nevhodné volbě hodnot SNR a σ^2 bude útlum číslo větší než jedna. To by ale znamenalo, že by byl signál kanálem zesilován. S takovou situací si program poradí, ale ve skutečnosti pochopitelně nastat nemůže.

Generování šumu

Šum, který je na přijímači má Gaussovo rozdělení a v rámci zjednodušení simulace je považován za bílý. Zahrnuje v sobě i případné interference v kanále. Ke generování je využita vestavěná funkce `awgn` a v programu je ve funkcích modelující kanál `model_kanal` a `model_kanal2`. Parametrem šumu je jeho výkon σ^2 , který je uložen v proměnné `Pn`. Hodnota je zadána uživatelem a odpovídá výkonu šumu ve watttech. Obvyklý výkon je 10^{-6} W a méně.

V první řadě je potřeba inicializovat proměnnou, ve které bude uložen. Rozměry musí být stejné jako počet symbolů v dané iteraci programu. Alespoň na jedné pozici musí být uloženo číslo v komplexním tvaru, aby byl i následně vygenerovaný šum komplexní (jinak by měl pouze reálnou složku). Požadavek je splněn příkazem

```
nuly (numel(symboly),1) = (1+1j)*1e-6;
```

Do této proměnné lze nyní přidat samotný šum příkazem

```
noise = awgn(nuly, 1/Pn, 1, 'linear')
```

Prvním parametrem je proměnná, do které bude šum uložen, druhý je poměr SNR a třetím definujeme výkon signálu 1 W. Funkce standardně počítá v logaritmické míře, ale při použití parametru `'linear'` i v lineární.

Generování dat

Ke generování dat (logických jedniček a nul) dochází ve funkci `generovani_dat`. Jejím jediným vstupním parametrem je počet bitů ke generování. Následně je vygenerována matice `[n,1]` náhodných čísel, které jsou zaokrouhlováním změněny na bity příkazem

```
data=round(rand(N,1));
```

Vektor `N` bitů je jako výstupní parametr vrácen nadřazené funkci.

Dělení datového toku do paketů

Datový tok musí být z mnoha praktických důvodů rozdělen do menších paketů. Vždy je potřeba volit kompromis jejich délky, protože kratší paket je náročnější na výpočetní výkon. Příliš dlouhý zase zavádí zpoždění a vyžaduje větší buffer. Na výsledky simulace ale žádný vliv délka paketu nemá.

K dělení do paketů dochází ve funkci `vypocet.m` ještě před modulací dat prostým výběrem skupiny `R` bitů. Jelikož následný program využívá cyklu `for`, dochází k velkému zpomalení výpočtu. Pro účel simulace je tedy výhodné zvolit paket dlouhý.

Model kanálu

Samotný AWGN kanál je realizován dvěma samostatnými funkcemi `model_kanal.m` a `model_kanal2.m`. Liší se mezi sebou v tom, že první funkce modeluje příjem dat od jednoho vysílače a druhá od dvou vysílačů ve stejný čas, čehož využívá AF.

Funkce spočívají utlumení přijatého signálu (resp. přijatých signálů) a přičtení šumu k symbolům.

5.2.2 Modulace

Program je navržen pro podporu dvou druhů fázové modulace, a to dvoustavové (BPSK) a čtyřstavové (QPSK). Mezi nimi se vybírá proměnnou `modul` v hlavní funkci. Pokud je v ní uloženo číslo 1, je nastavena BPSK a při čísle 2 modulace QPSK.

BPSK

Ve funkci `bpsk.m` se nulovým bitům přiřadí symbol -1 a jedničkovým bitům +1 pomocí příkazu:

```
symbols = 2*data-1;
```

QPSK

Probíhá ve funkci `qpsk.m`. V první řadě je potřeba rozdělit datový tok na dva vektory obsahující jen sudé a jen liché bity. Opět se přiřadí nulovým bitům hodnota -1 a následně jsou tyto vektory sloučeny tak, že liché bity představují reálnou a sudé imaginární složku symbolu. Nakonec se celý symbol vynásobí hodnotou $\frac{1}{\sqrt{2}}$ za účelem získání jednotkové energie symbolu. Celkový počet symbolů je poloviční oproti počtu bitů.

5.2.3 Demodulace

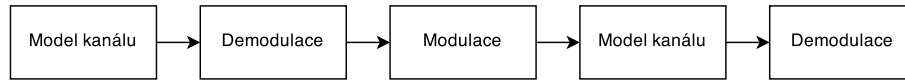
Pro demodulování symbolů se šumem zpět na bity slouží funkce `demodulace.m`. Je společná pro všechny techniky posílání dat i pro obě modulace. Z toho důvodu je potřeba jako vstupní parametr předávat kromě samotných symbolů i informaci o zvolené metodě modulování. Na základě toho rozhodne `switch` další postup.

U BPSK je rozhodování založeno jen na polaritě přijatého signálu. Pokud je kladný, symbol je vyhodnocen jako logická 1 a naopak.

Při použití QPSK je potřeba oddělit reálnou a imaginární složku signálu a následný postup je obdobný jako u BPSK. Nakonec se vektory dat proloží střídavě zpět pomocí funkce `reshape`.

5.2.4 Routování

Klasická metoda posílání dat je realizována ve funkci `routovani.m`. Její průběh je naznačen v blokovém schématu níže

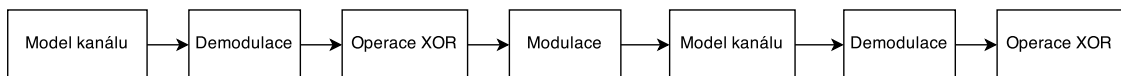


Obr. 5.2: Blok Technika WNC pro metodu routování

Signál přijatý na relayi je předán přímo k demodulaci. Relay datovou informaci opět moduluje a předá koncovému uzlu, kde proběhne opět přímá demodulace.

5.2.5 DF

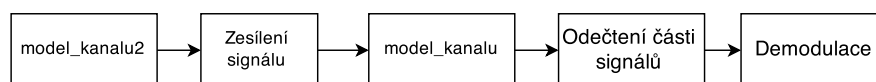
Metoda Decode-and-Forward funguje dost obdobně jako routování, navíc ale proběhne po každém příjmu operace XOR na bitové úrovni mezi daty přijatými od A a od B (na relayi) nebo mezi daty přijatými a odeslanými.



Obr. 5.3: Blok Technika WNC pro metodu DF

5.2.6 AF

Při využívání Amplify-and-Forward po přijetí signálu musí proběhnout nějaké matematické operace před tím, než je znovu odeslán nebo demodulován. Mělo by být připomenuto, že ve funkci `model_signalu2` dojde rovnou k sečtení signálů od A i B a že k výsledku je přidán šum a signál následně zesílen.



Obr. 5.4: Blok Technika WNC pro metodu AF

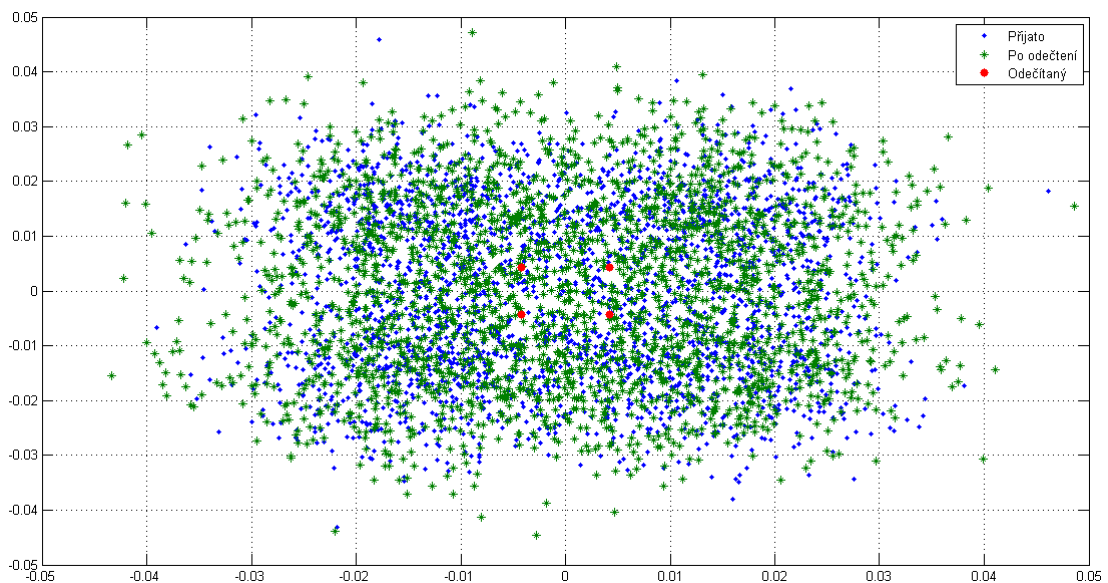
5.3 Prezentace výsledků

Kromě grafů průběhu normalizované rychlosti zde budou uvedeny konstelační diagramy při užití metody AF, které objasňují jak technika funguje. Modrou barvou jsou přijaté symboly, červenou původně odeslané. Zelené jsou získány jejich rozdílem a následně předány do demodulátoru.

Jak bylo již zmíněno, odstup signálu od šumu je během simulace na spoji A-R proměnný v konstantní

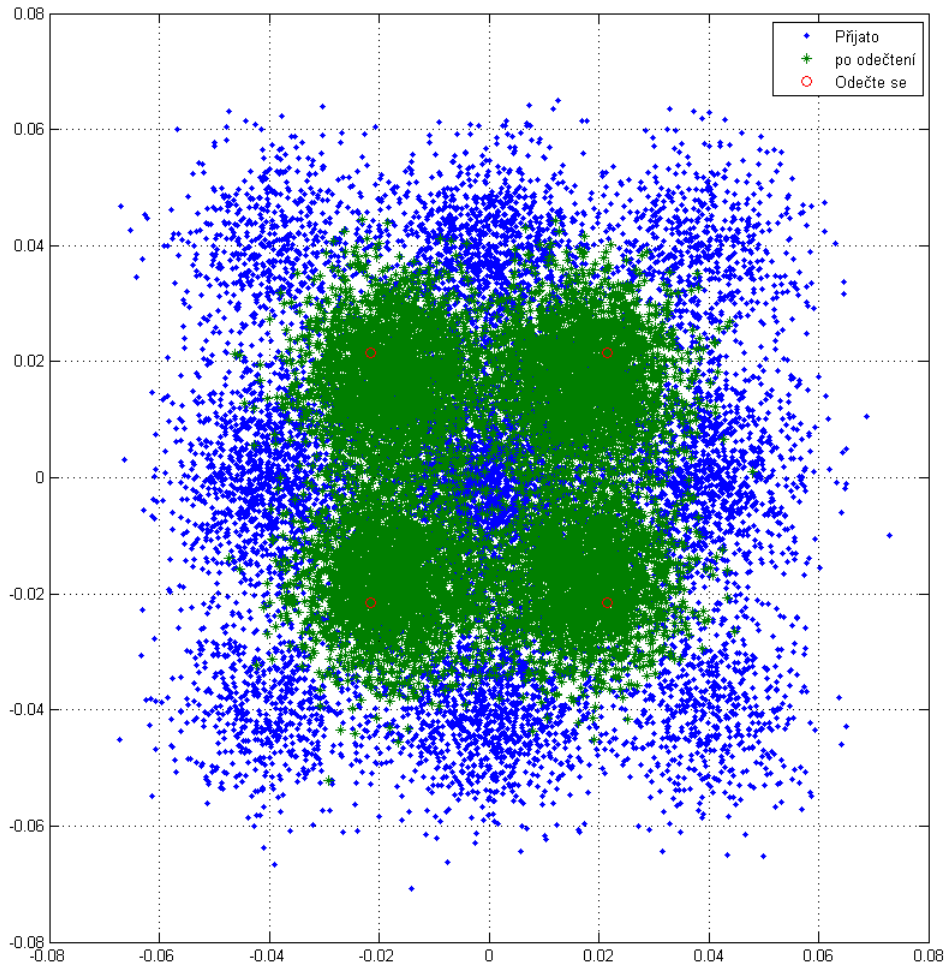
5.3.1 Simulace při $E_b/N_0(B) = 10$ dB

$E_b/N_0(A) = 0$ dB



Obr. 5.5: Konstelační diagram 1 – $E_b/N_0 = 0$ dB

V této situaci jsou v konstelačním diagramu (5.5) rozlišitelné symboly odeslané příjemcem. Nicméně po jejich odečtení zůstane jen slabý signál s velkým zarušením a přenos proběhne s velkou chybovostí.



Obr. 5.6: Konstelační diagram 2 – $E_b/N_0 = 12$ dB

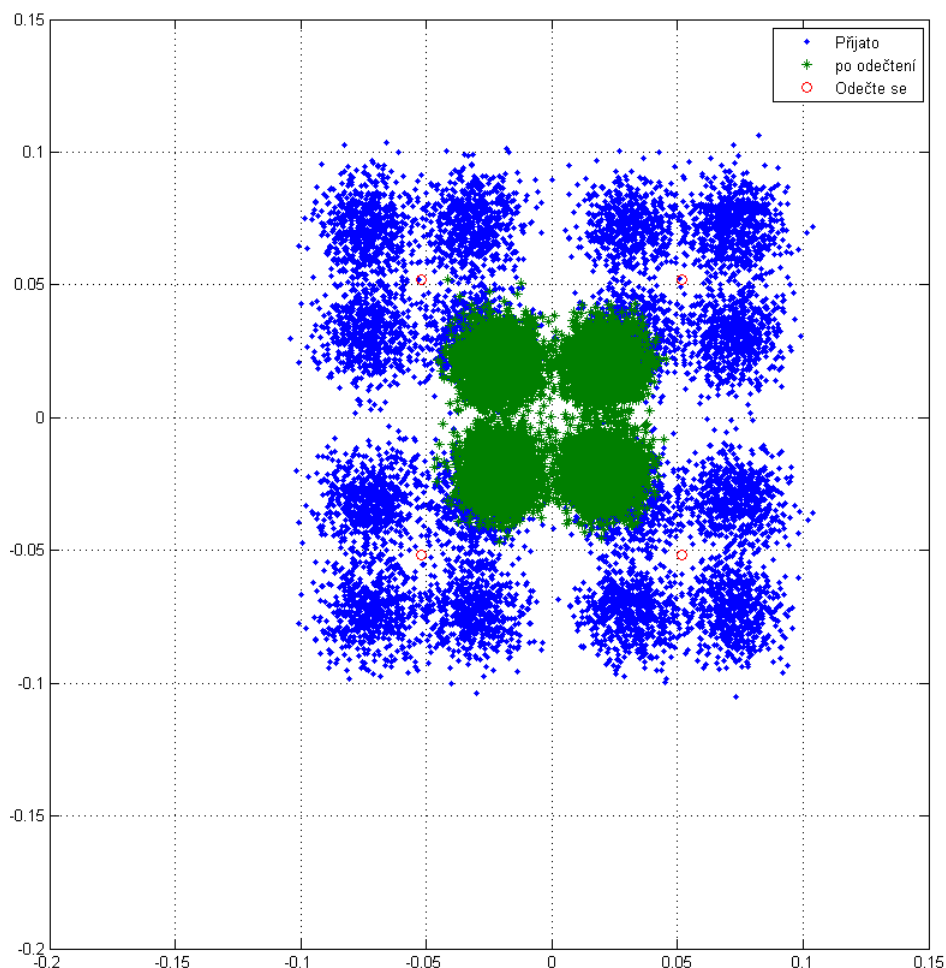
$E_b/N_0(A) = 12$ dB

Při snížení útlumu (a tedy zvýšení energie signálu při konstantním výkonu šumu) se začínají přijaté symboly v obr. 5.6 slučovat do devíti skupin. Pět z nich (ležících na osách) je složených ze dvou podskupin.

Po odečtení odeslaných symbolů (ošetřených útlumem a zesílením β) se tvoří již samostatný QPSK symbol (zelený), který lze dobře demodulovat.

$$E_b/N_0(A) = 18 \text{ dB}$$

Další zvyšování poměru signál šum vede v obr. 5.7 k osamostatnění symbolů a blíží se k situaci v obr. 3.6. Dochází ke správné demodulaci s malou chybovostí. Při dalším růstu tato chybovost klesne až na nulu.



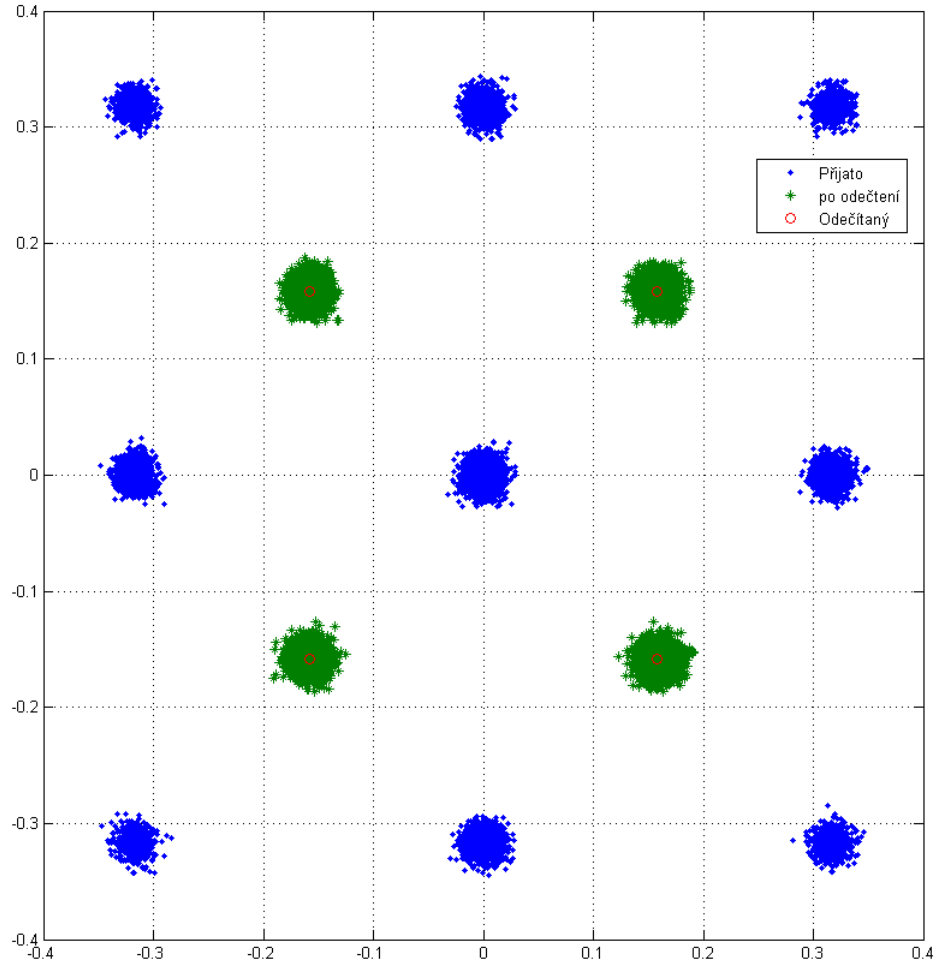
Obr. 5.7: Konstelační diagram 3 – $E_b/N_0 = 18 \text{ dB}$

Propustnost systému

Graf celkové rychlosti a chybovosti přenosu je v grafu v příloze A.1 a A.2. U chybovosti stojí za zmínku provázanost metod DF a routování. Chybovost DF je vždy větší, ale konverguje k nule při stejných šumových podmínkách. To je způsobeno zřejmě tím, že při chybě v prvních dvou krocích DF dojde ke špatnému provedení operace XOR a chyba je dvojitá. Jakmile se poměr signál/šum zlepší natolik, aby nedocházelo k chybě při jednoduchém přenosu, přestane chybovat i metoda DF.

5.3.2 Simulace při $E_b/N_0(A) = E_b/N_0(B)$

Pokud se útlumy obou linek rovnají, dojde k vykreslení konstelačního diagramu s devíti body při všech vyšších hodnotách E_b/N_0 tak, jak je v v obrázku 5.8



Obr. 5.8: Konstelační diagram 4 – $E_b/N_{0A} = E_b/N_{0B}$

V diagramu je dále vidět, jak se symboly, které leží vedle sebe, sečtou vždy na ose, takže má přijatý signál čistě reálný nebo imaginární charakter. To odpovídá teoretickým předpokladům a sčítání symbolů.

Propustnost systému

Křivka průběhu rychlosti a chybovosti v příloze A.3 a A.4 se od A.1 a A.4 liší svým průběhem. Ten je v tomto případě strmější a má pozdější nástup.

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce popisuje poměrně novou metodu, jak výrazně zvýšit datová propustnost bezdrátových sítí – Wireless Network Coding. V úvodní části proběhlo seznámení s problematikou naprostého základu. I přesto bylo provedeno mnoho zjednodušení, které tato práce neřešila (signalizace, synchronizace a další). Metody byly teoreticky popsány, byly řečeny jejich kladné i záporné vlastnosti a závěrem byly porovnány mezi sebou.

Ve druhé části práce byla provedena v Matlabu simulace datového přenosu použitím vybraných metod WNC a pro porovnání i klasického způsobu přeposílání dat. Program, který provádí simulaci, byl popsán tak, aby čtenář věděl, k čemu která funkce slouží a u vybraných bylo popsáno, jak funguje. Dále bylo více do hloubky popsáno, jak se mění signál v konstelačním diagramu, což pomáhá v ucelení pochopení funkce.

Samotná simulace probíhala za dvou různých podmínek. Poprvé se parametr E_b/N_0 měnil pouze na jedné lince a na druhé byl konstantní a v druhém případě se tento parametr měnil pro obě linky stejně. Výsledky simulace vyšly trochu jinak, než v ostatních pracích, zabývajících se touto problematikou. Zejména je zvláštní velmi nízká bitová chybovost při $E_b/N_0 = 0$ dB a že se chybovost blíží 100% až pro hodnoty $E_b/N_0 = -20$ dB. Dále v podobných člancích byla úspěšnost metody AF horší než routování a DF v podmínkách nízkého E_b/N_0 . To by mohlo být zapříčiněno odlišnou reprezentací simulovaných dat. V této práci je pro výpočet propustnosti použita bitová chybovost (BER), zatímco jiní autoři vyhodnocovali na základě paketové chybovosti (PER).

Techniky WNC by mohly být uplatnitelné v oblasti spojů bod-bod, kde je z určitých důvodů zařazený opakovač, který vykonává s procházejícími daty určitou kombinační operaci předtím, než je pošle k jejich cílové destinaci. Mohlo by být dosaženo i finanční úspory díky tomu, že systém vystačí s jednou pracovní frekvencí (s potřebnou šířkou pásma). Pokud by tento kmitočet byl v licencovaném pásmu, musí se za jeho využívání platit příslušnému úřadu.

Při aplikaci v mobilních zařízeních se jako výhoda projeví, že k odvysílání stejného množství informací stačí kratší čas vysílání a tím dochází k úspoře energie.

Další oblastí, ve které má NC velký potenciál, jsou víceskokové sítě (od tří skoků), kde při testování bylo zvýšení rychlosti dokonce několikanásobné, než se teoreticky čekalo [11] (snížil se počet zahozených paketů ve frontách, které byly kratší). Touto oblastí se ale tato práce nezabývala.

Vývoj NC stále není dokončen a v současnosti probíhají snahy o implementaci do reálných sítí, zakomponování korekčních kódů pro snížení chybovosti a integraci TCP/IP protokolu včetně podpory spolehlivých služeb [12].

LITERATURA

- [1] Maximum Flow and the Minimum Cut. <http://www.sce.carleton.ca/> [online]. [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://goo.gl/N4qBvm>
- [2] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li, and R. W. Yeung, *Network information flow*, IEEE Trans. Inf. Theory, vol. IT-46, pp. 1204–1216, 2000.
- [3] C. E. Shannon, *A mathematical theory of communication*, The Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379–423, 623–, july, october 1948.
- [4] S. Hanus, *Rádiové a mobilní komunikace*, Elektronické skriptum FEKT VUT v Brně. Brno: VUT, 2012. 129 s. (cs)
- [5] M. Hekrdla, *Design of Modulations for Wireless (Physical Layer) Network Coding* [online]. Praha, 2013 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://goo.gl/g5VmtY>.
- [6] P. Popovski and H. Yomo, *Bi-directional amplification of throughput in a wireless multi-hop network*, in IEEE 63rd Vehicular Technology Conference (VTC), Melbourne, Australia, May 2006.
- [7] S. Katti, S. Gollakota, and D. Katabi, *Embracing wireless interference: Analog network coding*, in Proc. ACM Signal Commun. (SIGCOMM), 2007.
- [8] P. Popovski and H. Yomo, *The anti-packets can increase the achievable throughput of a wireless multi-hop network*, in Proc. IEEE Internat. Conf. on Commun. (ICC), vol. 9, jun. 2006, pp. 3885 – 3890
- [9] BER Vs Eb/N0 for QPSK modulation over AWGN. [online]. 2010 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.gaussianwaves.com/2010/10/ber-vs-ebn0-for-qpsk-modulation-over-awgn-2/>
- [10] The Global Internet Phenomena Report: 2H 2014. www.sandvine.com [online]. 2014 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: <http://goo.gl/3Vt3zV>
- [11] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard, and J. Crowcroft, *XORs in the air: Practical wireless network coding*, IEEE Trans. Networking, vol. 16, pp. 497 – 510, June 2008
- [12] P. Popovski and H. Yomo, *Physical network coding in two-way wireless relay channels*, in Proc. IEEE Internat. Conf. on Commun. (ICC), june 2007.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

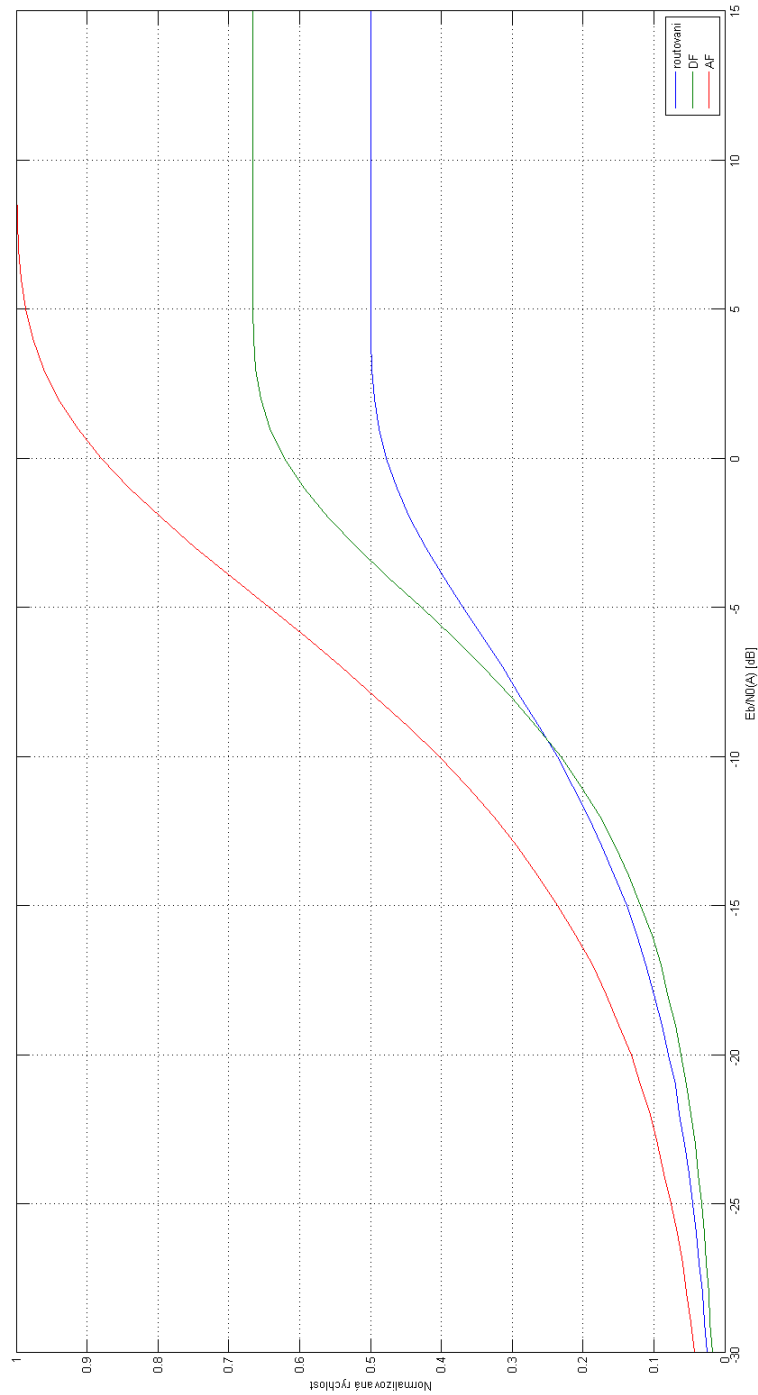
2WRC	Two Way Relay Channel - obousměrný relay kanál
ITU	International Telecommunication Union
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
NC	Network Coding
PSK	Phase-Shift Keying – fázové klíčování
BPSK	Binary Phase-Shift Keying – binární fázové klíčování
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying – kvadrurní fázové klíčování
WNC	Wireless Network Coding – Network Coding v bezdrátové síti
PHY	fyzická vrstva
SNR	Signal to Noise Ratio – poměr signál/šum
QAM	Quadrature-Amplitude Modulation – Kvadrurní amplitudová modulace
AWGN	Additive White Gaussian Noise – model bezdrátového kanálu pouze s bílým šumem
ANC	Analogový Network Coding
DF	Decode-and-Forward
AF	Amplify-and-Forward
DNF	Denoise-and-Forward

SEZNAM PŘÍLOH

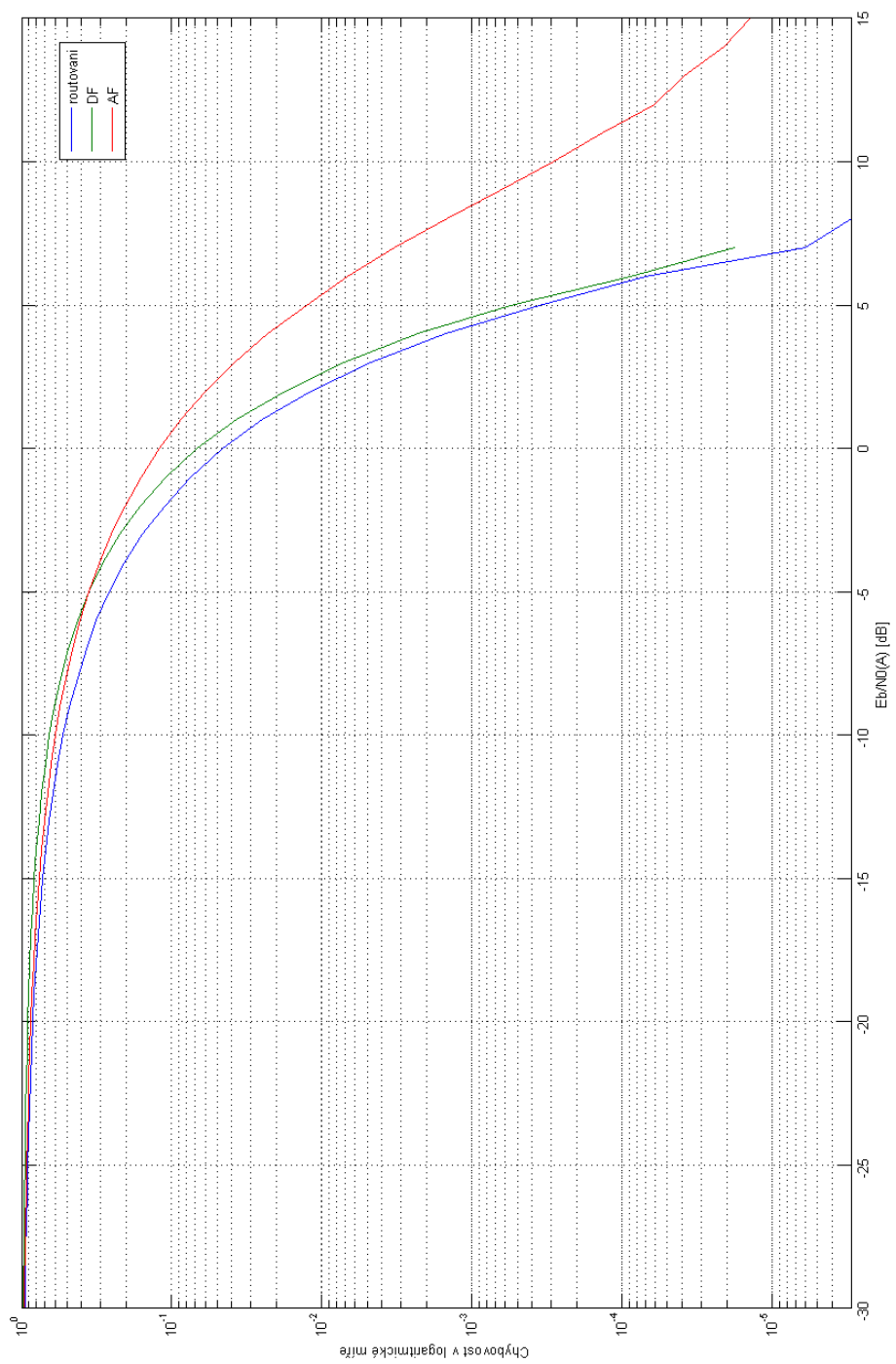
A Grafy	44
A.1 Propustnost při $E_b/N_0(A) = 10$ dB	44
A.2 BER při $E_b/N_0(A) = 10$ dB	45
A.3 Propustnost při rovnajících se E_b/N_0	46
A.4 BER při rovnajících se E_b/N_0	47
B Obsah přiloženého CD	48
B.1 Adresář matlab	48
B.2 Elektronická podoba bakalářské práce	48

A GRAFY

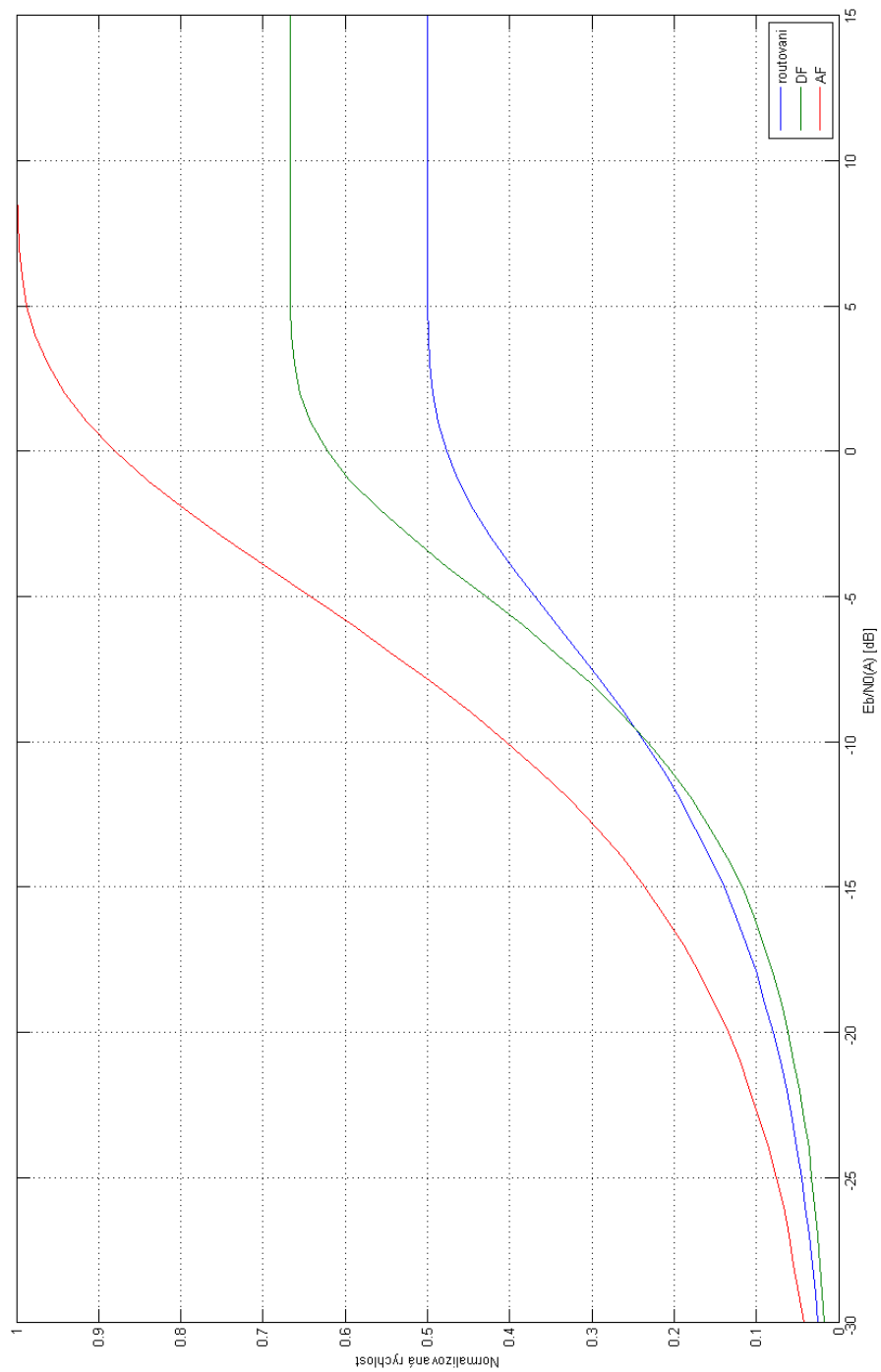
A.1 Propustnost při $E_b/N_0(A) = 10$ dB



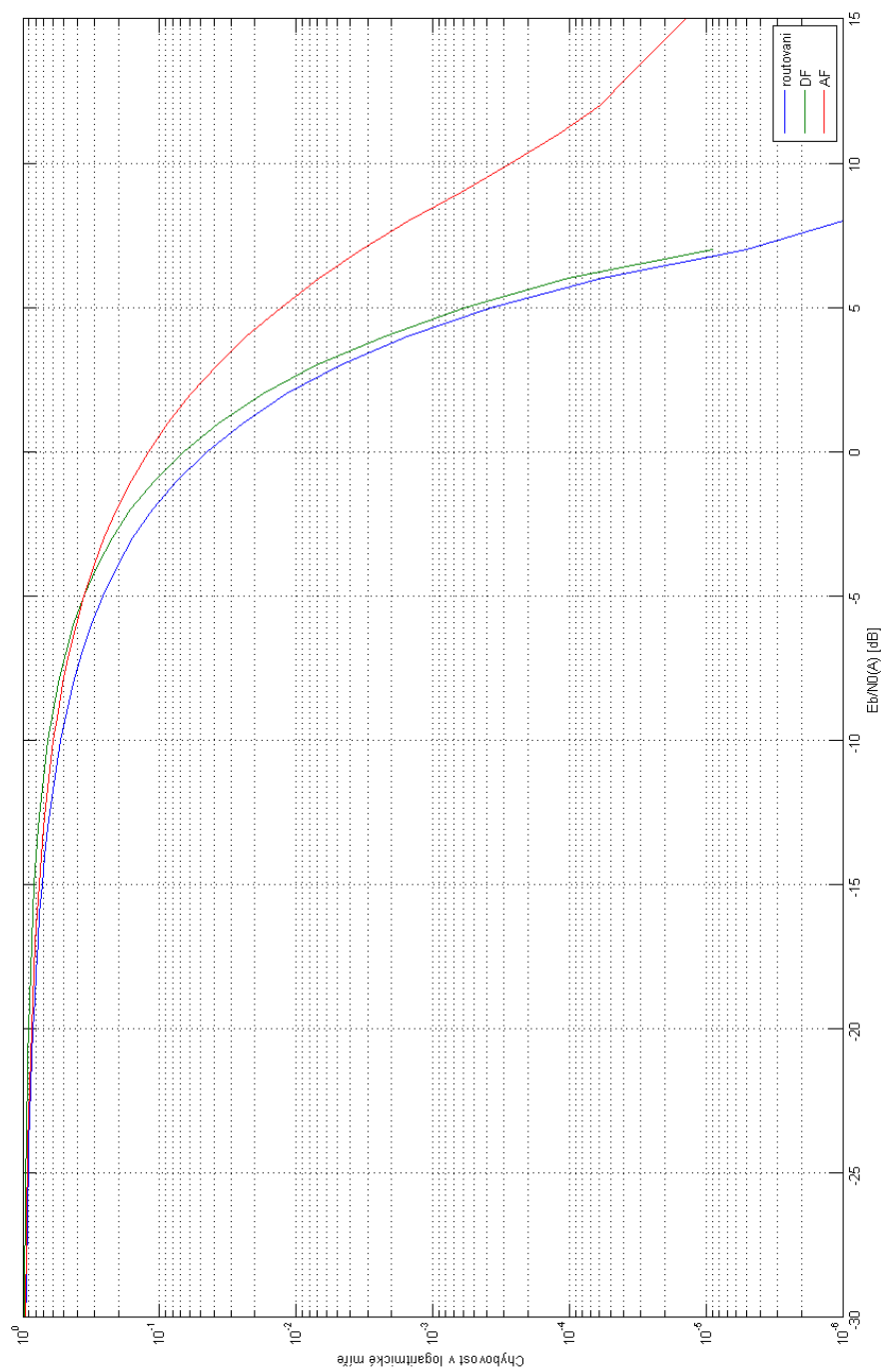
A.2 BER při $E_b/N_0(A) = 10$ dB



A.3 Propustnost při rovnajících se E_b/N_0



A.4 BER při rovnajících se E_b/N_0



B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

B.1 Adresář matlab

Složka obsahuje veškeré soubory potřebné pro simulaci WNC. Jako spouštěcí skript slouží soubor `hlavni1.m`. Všechny volitelné parametry se nastavují právě v této funkci a ostatní není potřeba ani otevírat. Každá funkce má základní popis dostupný v nápovědě pomocí `help nazev_funkce` a jsou okomentované i jednotlivé skupiny příkazů.

B.2 Elektronická podoba bakalářské práce

Elektronická verze je uložena ve formátu `.pdf` pro garantované zachování správného zobrazení.