

Přenos dat s podporou kódované modulace

Data Transmission by Trellis Coded Modulation

Bc. Matej Čičo



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Matej Čičo**
Osobní číslo: **A11431**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Počítačové a komunikační systémy**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Přenos dat s podporou kódované modulace**

Zásady pro vypracování:

1. Popište princip kódované modulace.
2. Uvedte klíčové parametry hodnocení Trellis kódové modulace (TCM).
3. Proveďte hodnocení šířky kmitočtového pásma TCM pro používané kódové zabezpečení v kombinaci s několika konstelačními diagramy modulací.
4. Navrhněte TCM systém a vyhodnoťte klíčové parametry TCM.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Dobeš J., Žalud V.: **Moderní radiotechnika**, BEN Technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-132-2.
2. Langton Ch.: **Trellis Coded Modulation**, <http://www.complextoreal.com> 2004.
3. Proakis J.G.: **Digital Communications**. 3. vyd., New York, McGraw-Hill International Series, 1995.
4. Ungerboeck, G.: **Trellis Coded Modulation, Part 1, Part 2**, IEEE Communication Magazine, vol. 25, no. 2, Feb. 1987, pp. 5-21.
5. Viterbi, A.J., et al.: **A Pragmatic Approach to Trellis-Coded Modulation**, IEEE Communications Magazine (probably vol. 27, no. 7), July 1989, pp. 12-21.

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Karel Vlček, CSc.

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání diplomové práce:

26. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

31. května 2013

Ve Zlíně dne 26. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Karel Vlček, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cieľom diplomovej práce je navrhnúť systém Trellis kódovej modulácie (TCM), popísať kľúčové parametre daného systému a zhodnotiť šírku kmitočtového pásma TCM pre používané zabezpečenie v kombinácii s niekoľkými konštelačnými diagramami modulácií.

Kľúčová slova: modulácia, TCM, PSK, konvolučné kódovanie, komunikačný systém, BER, signál, kodér, dekodér, MATLAB Simulink

ABSTRACT

The aim of this thesis is design a system Trellis coded modulation (TCM), describe the main parameters of the system and evaluate bandwidth of TCM for used security combined with several constellation diagrams of modulations.

Keywords: modulation, TCM, PSK, convolutional coding, communication system, BER, signal, encoder, decoder, MATLAB Simulink

Touto cestou by som rád poďakoval pánovi prof. Ing. Karlovi Vlčkovi, CSc. za cenné rady, pripomienky, návrhy pri konzultáciách a za všetok čas, ktorý mi venoval pri odbornom vedení tejto práce. Ďalej by som chcel poďakovať pánovi Ing. Martinovi Papežovi za cenné rady, pripomienky a strávený voľný čas, ktorý mi venoval.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 OBECNÉ SCHÉMA KOMUNIKAČNÉHO SYSTÉMU	11
1.1.1 Zdroj signálu	12
1.1.2 Kodér zdroja.....	12
1.1.3 Kodér kanálu	12
1.1.4 Modulátor	12
1.2 PRIJÍMACIA ČASŤ KOMUNIKAČNÉHO SYSTÉMU	12
1.3 PRENOSOVÁ KAPACITA KOMUNIKAČNÉHO KANÁLA	13
2 PREHĽAD SPÔSOBOV MODULÁCIE	14
2.1 ANALÓGOVÉ MODULÁCIE.....	14
2.2 IMPULZOVÉ MODULÁCIE V ZÁKLADNOM PÁSME.....	15
2.3 IMPULZOVÉ MODULÁCIE S NOSNÝMI KMITOČTAMI.....	16
3 ZÁKLADNÉ PARAMETRE MODULÁCIÍ	17
3.1 ŠÍRKA PÁSMO	17
3.2 POMER SIGNÁL/ŠUM A CHYBOVOSŤ.....	18
3.3 VÝKONOVÁ ÚČINNOSŤ A SPEKTRÁLNA ÚČINNOSŤ DIGITÁLNYCH MODULÁCIÍ	19
4 OCHRANNÉ KANÁLOVÉ KÓDOVANIE	21
4.1 KLASIFIKÁCIA KANÁLOVÝCH KÓDOV FEC.....	21
4.2 ZÁKLADNÉ PARAMETRE KANÁLOVÉHO KÓDOVANIA	22
5 KÓDOVANÉ MODULÁCIE	25
5.1 PRINCÍPY KÓDOVANÝCH MODULÁCIÍ.....	26
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
6 MŘÍŽKOVÉ KÓDOVANÉ MODULÁCIE TCM.....	30
6.1.1 Kodér - modulátor TCM	30
6.1.2 Dekodér - demodulátor TCM.....	32
7 KONVOLUČNÉ KÓDOVANIE.....	33
7.1 DELENIE KONVOLUČNÝCH KÓDOV	33
7.2 KÓDOVANIE KONVOLUČNÝMI KÓDAMI.....	34
7.2.1 Kódový strom (Tree diagram).....	36
7.2.2 Mřížkový diagram (Trellis diagram)	38
7.2.3 Stavový diagram.....	38
7.3 DEKÓDOVANIE KONVOLUČNÝMI KÓDAMI.....	39
7.3.1 Viterbiho algoritmus	40
7.3.2 Proces dekódovania pomocou Viterbiho algoritmu	40
7.3.3 Vhodné použitie Viterbiho algoritmu	40
8 MATLAB A SIMULINK.....	41
8.1 MATLAB	41
8.2 SIMULINK	41
8.2.1 Communication System Toolbox.....	41
9 TCM SYSTÉM V PROGRAME SIMULINK.....	43

9.1	POPIS BLOKOV SCHÉMY	43
9.1.1	Random Integer Generator block	43
9.1.2	Scope	43
9.1.3	Integer to Bit Converter	43
9.1.4	Discrete – Time Scatter Plot Scope	44
9.1.5	AWGN Channel	44
9.1.6	Error Rate Calculation	44
9.1.7	Display	44
9.1.8	Sink	44
9.1.9	Convolutional Encoder	45
9.1.10	Viterbi Decoder	45
9.1.11	Modulátory/Demodulátory BPSK, QPSK, 8PSK	45
9.2	POUŽITÝ KONVOLUČNÝ KODÉR PRE TCM SYSTÉM	45
9.3	TCM SYSTÉM S MODULÁCIOU BPSK	46
9.4	TCM SYSTÉM S MODULÁCIOU QPSK	51
9.5	TCM SYSTÉM S MODULÁCIOU 8-PSK	55
9.6	POROVNANIE CHYBOVOSTI BER MODULÁCIÍ BPSK, QPSK A 8PSK	59
ZÁVER		61
CONCLUSION		62
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY		63
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK		64
ZOZNAM OBRÁZKOV		65
ZOZNAM TABULIEK		67
ZOZNAM PRÍLOH		68

ÚVOD

V súčasnej dobe je jedna z najdôležitejších potrieb človeka získať a zdieľať informácie. Informácie sa môžu šíriť z rôznych zdrojov naprieč svetadielmi, ale nastáva otázka ako tieto informácie prenášať. Úzko späté s prenosom informácií je komunikácia a samotný komunikačný kanál, po ktorom sa daná informácia šíri. Za najväčší objav v oblasti telekomunikácií priniesla elektrina, resp. elektrická vodivosť, na základe ktorej bol vyvinutý elektrický telegraf. Postupne sa vývoj zdokonaľoval a prešiel mnohými vývojmí a technológiami, až po dnešný tvar komunikačného systému.

Komunikačné systémy sú neoddeliteľnou súčasťou informačných systémov, preto by sa im mala venovať veľká pozornosť. K tomu je potrebné dokonale poznať ich vlastnosti najskôr jednotlivo a potom ako celku zoradeného do jedného komunikačného systému. Dôležitou časťou komunikačného systému je prenos informácie pomocou signálu a tým pádom aj modulovanie daného signálu, zabezpečenie zdroja a kanálu. Na prenos signálu v súčasnej dobe sa používa množstvo typov modulácií a tiež viacero typov kódovaní. K dosiahnutiu čo najlepšieho prenosu je potrebné zabezpečiť komunikačný kanál pred chybovosťou.

Táto diplomová práca sa zameriava na prenos dát po komunikačnom kanále pomocou tzv. Trellis kódovej modulácie (TCM), ktorá sa skladá z konvolučného kódovania a jednej z modulačných metód PSK a QAM. Práca sa špecifikuje na kombináciu konvolučného kódovania a modulácie PSK. Je to metóda, ktorá prináša zlepšenie komunikácie. Prináša výhodu pre prenos správ bez nutnosti zväčšenia šírky kmitočtového spektra modulovaného signálu.

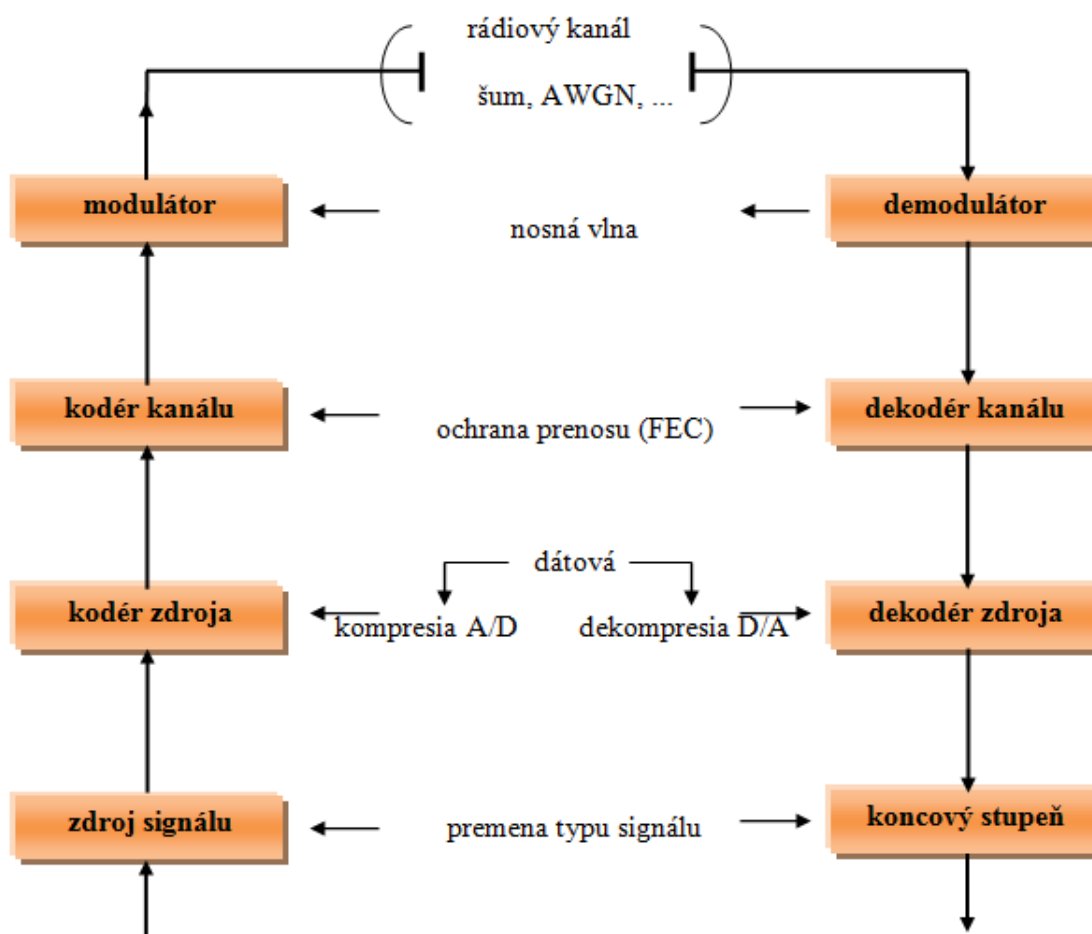
Cieľom práce je popis princípov kódovej modulácie, zhodnotenie kľúčových parametrov TCM, zhodnotenie šírky kmitočtového pásma TCM pre používané zabezpečenie v kombinácii s niekoľkými konštelačnými diagramami PSK modulácií a návrh TCM systému v programe MATLAB Simulink s následným vyhodnotením kľúčových parametrov systému.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBECNÉ SCHÉMA KOMUNIKAČNÉHO SYSTÉMU

V roku 1948 Shannon popísal obecné schéma komunikačného systému vo svojej fundamentálnej práci „Matematické základy komunikácie“. Neskôr vydával ďalšie príspevky. Napriek tomu, že je to už viac ako 60 rokov, stále platí, že toto schéma je aktuálne. Hlavne od neho sa odrážajú a vytvárajú ďalšie schémy pre rozvoj modernej digitálnej komunikácie [1], [6].

Na obrázku *Obr.1* je znázornené obecné schéma rádiového komunikačného systému, ktoré koncipoval práve Shannon. Toto schéma je primárne určené pre digitálne systémy, pokiaľ sa však vypustia niektoré bloky, je použiteľné aj pre staršie analógové systémy. Uvažované schéma sa skladá z vysielacej a prijímacej časti. Obe spolu komunikujú prostredníctvom rádiového kanálu. Konceptia podľa obrázku *Obr. 1* predstavuje určitú idealizáciu komunikačného systému. V praxi obsahuje ešte niektoré ďalšie funkčné bloky, ktoré síce nie sú potrebné, avšak môžu výrazne zlepšiť jeho funkciu [2,s. 72].



Obr. 1 Obecné Shannonové schéma rádiového komunikačného systému [1]

1.1.1 Zdroj signálu

Na začiatku celého reťazca je zdroj signálu, ktorý prevádza určité spojitý fyzikálne veličiny napr. zvuk, obraz, alebo teplotu na elektrický signál. Jeho výstupný signál predstavuje náhodný proces, ktorý môže byť ako z hľadiska času, tak z hľadiska amplitúdy spojitý, alebo nespojitý, čiže diskretný.

1.1.2 Kodér zdroja

Za zdrojom signálu je kodér zdroja. V najjednoduchšom prípade plní úlohu A/D prevodníku, ktorý prevádza analógový signál na postupnosť čísiel. Tiež môže plniť úlohu zložitejších zariadení ako je napríklad potláčanie nadbytočnej informácie, čiže redundanciu, ktorá je takmer vždy prítomná v spracovanom signáli.

1.1.3 Kodér kanálu

Na rozdiel od kodéra zdroja, kodér kanálu sa používa preto, aby do postupnosti symbolov, ktoré prichádzajú na jeho vstup vniesol zámerne redundanciu. Avšak v tomto prípade ide o kontrolovanú redundanciu, ktorá môže byť nápomocná ku potlačeniu chyby pri prenose signálu.

1.1.4 Modulátor

Z kodéra kanálu ide postupnosť výstupných symbolov do modulátora. Úlohou modulátora je previesť túto postupnosť na signály, ktorých forma je vhodná na prenos daným rádiokomunikačným kanálom. Zväčša sa jedná o sínusovú nosnú vlnu, ktorej amplitúda, kmitočet, alebo fáza sa mení. Všetky tieto modulačné faktory závisia na signále prichádzajúcom z kodéra kanálu.

1.2 Prijímacia časť komunikačného systému

V prijímacej časti komunikačného systému sa signál spracováva v opačnom zmysle ako vo vysielači. Demodulátor prevádza prijímaný vysokofrekvenčný modulovaný signál na postupnosť symbolov, ktorú potom dekodér kanálu transformuje do tej istej podoby, aká je na vstupe kodéra kanálu. Dekodér zdroja na svojom vstupe odovzdáva analógový signál, ktorý sa až na isté skreslenie a šumovú zložku zhoduje so signálom privádzaným na vstup kodéra zdroja. V koncovom stupni prijímača sa realizuje záverečná fáza celého procesu, to

je prevod elektrického výstupného signálu na príslušnú analógovú fyzikálnu veličinu, ktorú predstavuje obraz, zvuk, atď.

1.3 Prenosová kapacita komunikačného kanála

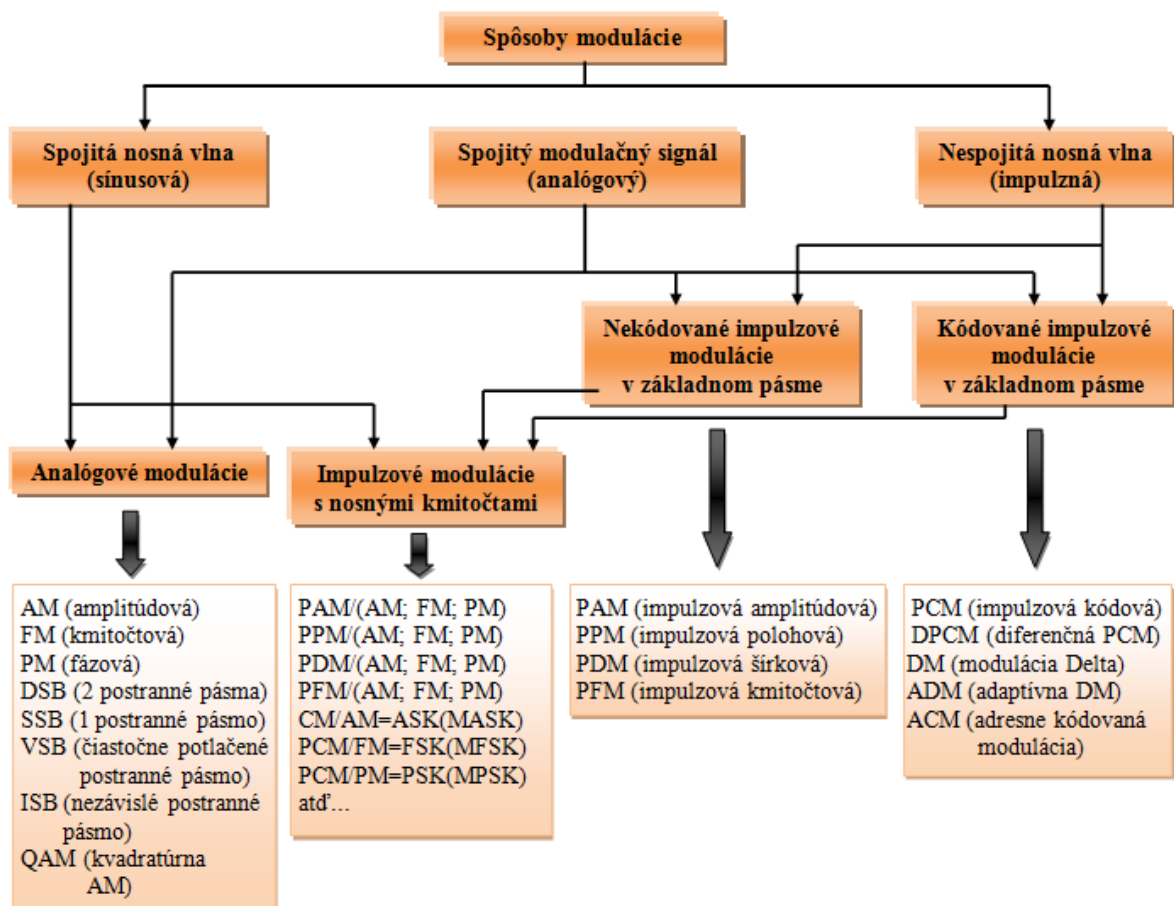
Reálny komunikačný kanál nemôže v určitom čase preniesť ľubovoľné množstvo informácie, ale iba množstvo, ktoré nepresahuje prenosovú kapacitu kanála značenú C_k . V reálnom komunikačnom kanále je vždy prítomný istý šum, ktorý nedovoľuje na prijímacej strane rozlíšiť jemnejšie zmeny spracovávaného signálu, ako je jeho vlastná úroveň. Prenosová kapacita kanála C_k je definovaná ako maximálne množstvo informácie, ktorá môže byť kanálom prenesená za 1 sekunda. Ak označíme stredné hodnoty výkonu signálu na vstupe demodulátoru prijímača S a šumu N a šírku pásma kanála B , je kapacita C_k určená nasledujúcim vzťahom (1.1), nazývaným tiež *Shannonov-Hartleyov vzťah*.

$$C_k = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.1)$$

Jedná sa o základný vzťah teórie rádiovkej komunikácie. Veličina C_k je vyjadrená v jednotkách bit za sekundu [bit/s].

2 PREHLAD SPÔSOBOV MODULÁCIE

V rádiovkej komunikácii sa v dnešnej dobe používa viacero rôznych typov modulácií. Ako je možné vidieť na Obr. 2, existujú štyri základné typy modulácií: analógové modulácie, impulzové modulácie s nosnými kmitočtami, nekódované impulzové modulácie v základnom pásme a kódované impulzové modulácie v základnom pásme [6].



Obr. 2 Prehľad základných spôsobov modulácie v rádiovkej komunikácii [6]

2.1 Analógové modulácie

Vznikajú tak, že sa pomocou spojitého modulačného signálu ovplyvňuje niektorý parameter spojitej sínusovej nosnej vlny. V prípade, že sa mení amplitúda nosnej vlny, ide o amplitúdovú moduláciu (AM). Pri kmitočtovej modulácii [FM] dochádza k zmene kmitočtu nosnej vlny. A podobne pri zmene fázy sa jedná o fázovú moduláciu (PM).

Okrem týchto troch základných analógových modulácií existujú ďalšie modifikované modulácie, ktoré môžu byť zvláštnym prípadom základných modulácií, prípadne ich kombináciou. SSB je amplitúdová modulácia s potlačenou nosnou a úplne

potlačeným jedným postranným pásmom. Obdobne aj VSB je amplitúdová modulácia, ale iba s čiastočne potlačeným jedným postranným pásmom, s plne prenášanou nosnou vlnou a druhým postranným pásmom. V prípade, že je v každom pásme AM prenášaná nezávislá informácia jedná sa o ISB moduláciu. Táto modulácia je prvá najjednoduchšia multiplexová forma prenosu. O niečo zložitejšia modulácia multiplexového prenosu je QAM, kde sa s dvoma modulačnými signálmi modulujú aj dve nosné, obe majú rovnaký kmitočet, avšak sú v tzv. kvadratúre, čo znamená, že majú na seba fázový posun o 90° .

2.2 Impulzové modulácie v základnom pásme

Pri týchto moduláciách sa využíva impulzová nosná vlna. Je to periodický sled impulzov o ktorých môžeme uvažovať ako o pravouhlých. Obdobne ako pri analógových moduláciách sa mení niektorý z parametrov impulzovej nosnej vlny pomocou modulačného signálu. Ak ide o zmenu amplitúdy, šírky, polohy, alebo kmitočet impulzov modulácie sa nazývajú PAM (impulzová amplitúdová), polohová PPM, šírková (PDM, PWM) alebo kmitočtová (PFM). Pri zmienených moduláciách sa jedná o to, že informácia je prenášaná iba v určitých diskretných časových okamžikoch, čiže nespojito. Modulovaný parameter amplitúda, šírka, poloha, či kmitočet je prenášaný spojito, čo môže znamenať, že modulovaný signál môže mať teoreticky podobu nekonečného počtu hodnôt. Dôležitou podmienkou je vzorkovací Shannonov-Kotelnikov teorém, čo znamená, že opakovací kmitočet impulzovej nosnej vlny musí byť najmenej dvakrát väčší ako je najvyšší modulačný kmitočet. Pri zachovaní tejto podmienky teorému nedôjde ku skresleniu modulovaného signálu.

Pri kódových impulzových moduláciách v základnom pásme je spracovanie signálu zložitejšie. V tejto kategórii je najstaršou používanou moduláciou impulzová kódová modulácia (PCM). Pri tejto modulácii sa vysielačnej strane vytvorí najskôr z modulačného signálu a impulzovej nosnej vlny signál PAM. Tento signál sa potom podrobí kvantovaniu, čo spočíva v tom, že pri signáli PAM rozdelí celý dynamický rozsah modulovaných impulzov na konečný počet diskretných úrovní a každej skutočnej úrovni impulzu sa priradí najbližšia diskretná hodnota. Kvantovaný signál sa potom zakóduje. Čím sa myslí prevod skutočnej kvantovanej napäťovej úrovne určitého impulzu najčastejšie vyjadrenej v binárnej sústave. Tým sa vytvorí signál odpovedajúci modulácii PCM.

Ďalším typom spadajúcej do tejto kategórie je Delta modulácia (DM). Od modulácie PCM sa líši tým, že sa u nej nekóduje kvantovaný signál PAM, ale diferenčný

signál, ktorý sa tvorí ako rozdiel pôvodného modulačného signálu a jeho schodovitej aproximácie. Kódovanie diferenčného signálu sa vytvára tak, že sa jeho ľubovoľným kladným hodnotám prideluje logická hodnota 1 a záporným hodnotám logická 0.

Diferenčná impulzová kódová modulácia (DPCM) je mladšia a dokonalejšia alternatíva modulácií PCM a DM. Kóduje sa kvantovaný rozdiel medzi skutočnou hodnotou istého vzorku a predikovanou hodnotou, teda hodnotou získanou ako najpravdepodobnejšia aproximácia z niekoľkých predchádzajúcich vzoriek.

Adaptívna modulácia Delta (ADM) je charakterizovaná tým, že sa podľa okamžitých charakteristík modulačného signálu mení veľkosť kvantizačného kroku, poprípade aj vzorkovaciu frekvenciu signálu. Obe naposledy spomenuté modulácie sa vyznačujú tým, že čiastočne odstraňujú redundanciu.

2.3 Impulzové modulácie s nosnými kmitočtami

Používajú sa pri zvýšených nárokoch na kapacitu prenosu. Ich uplatnenie je hlavne v bezdrôtovom prenose. Do tejto skupiny sa radí veľké množstvo typov modulácií, pretože modulácie sa v základnom pásme modulujú na vysokofrekvenčnú sínusovú nosnú vlnu tromi spôsobmi (amplitúdou, kmitočtom, fázou). Amplitúdovým modulovaním signálu PAM na vysokofrekvenčnú nosnú vznikne modulácia PAM/AM.

Najjednoduchšie varianty s modulačným signálom PCM alebo DM sa vyznačujú tým, že sa u nich nosná vlna mení iba medzi dvomi diskretnými stavmi. Tento spôsob sa nazýva kľúčovanie, preto sa napr. modulácia PCM/AM nazýva kľúčovanie amplitúdovým posunom (ASK = *amplitude shift keying*). Obdobne to platí aj pri ostatných moduláciách PCM/FM (FSK) a PCM/PM (PSK).

3 ZÁKLADNÉ PARAMETRE MODULÁCIÍ

Medzi základné parametre analógových a digitálnych modulácií patria šírka pásma modulovaného signálu, pomer signálu k šumu a pre digitálne modulácie ešte spektrálna a energetická účinnosť a chybovosť [1].

3.1 Šírka pásma

Vysokofrekvenčná šírka pásma značená ako B_{RF} je dôležitým parametrom pre špecifikáciu pásmových modulovaných signálov. V praxi sa využíva niekoľko rôznych definícií tejto veličiny, ktoré poskytujú pre konkrétny modulovaný signál rozdielne hodnoty, preto je nutné ich vždy presne špecifikovať. Definície šírky pásma väčšinou vychádzajú z pojmu výkonovej spektrálnej hustoty pásmových signálov $S(f)$.

Absolútna šírka pásma B_a je určená rozsahom frekvencií, na ktorých má daný signál nenulovú spektrálnu hustotu. To však často nie je vhodné označenie, pretože množstvo modulačných signálov má neobmedzené frekvenčné pásmo, čo vedie ku neobmedzenému pásmu modulovaných signálov. Preto sa často používa šírka pásma nula-nula B_{00} , čo je šírka pásma hlavného laloku výkonového spektra. Táto definícia má však platnosť iba vtedy, ak má spektrum jednoznačné nulové body, obmedzujúce hlavný lalok.

Šírka pásma obmedzená frekvenciami, pri ktorých výkonová spektrálna hustota $S(f)$ klesne o 3dB oproti svojej maximálnej hodnote sa nazýva Trojdecibelová šírka pásma B_3 . Obdobne sa používajú definície značené symbolmi B_{20} , B_{45} , B_{60} . Napríklad pri definícii B_{20} namiesto poklesu o 3dB ako tomu je pri B_3 sa obmedzuje šírka pásma frekvenciami, pri ktorých klesá hustota $S(f)$ o 20dB pod svoje maximum. Pomer B_{20} / B_3 je nazývaný činiteľ tvaru, ktorý výstižne charakterizuje strmosť krivky $S(f)$ a teda aj potlačenie susedných rádiových kanálov. Podobne sú definované B_{45} a B_{60} , kde klesá hustota o 45 dB, resp. o 60 dB voči maximu.

Pri skúmaní šumu prechádzajúcim určitým pásmovým filtrom je dôležitý pojem šumová šírka pásma B_n , označovaná tiež ako výkonová šírka pásma. Tá sa obvykle určuje pomocou amplitúdovej charakteristiky $|H(f)|$ daného filtru vo vzťahu (3.1),

$$B_n = \frac{1}{H_{\max}} \int_0^{\infty} |H(f)|^2 df \quad (3.1)$$

pričom H_{max} je maximálna hodnota funkcie $|H(f)|^2$, to zn. maximum prenosu danej priepuste, dosahovanej obvykle v strede pásma B_n , alebo v jej blízkosti. Podľa tejto definície je šumová šírka pásma rovná šírke pásma ekvivalentného filtra s pravouhlou charakteristikou o amplitúde H_{max} , ktorý prepúšťa rovnaké množstvo bieleho šumu ako skúmaný filter.

V šírke pásma B_{99} sa nachádza 99% celkového výkonu daného signálu. Poznáme tiež šírky pásma B_{95} a B_{90} , ktoré obsahujú 95%, resp. 90% celkového výkonu.

So šírkami pásma súvisí frakčná pásmová účinnosť. Táto veličina vyjadruje pre konkrétnu moduláciu a pre zvolenú definíciu šírky pásma frakčnú (relatívnu) šírku pásma v jednotkách Hz, pripadajúcich na jeden prenášaný bit za sekundu [Hz/bit/s].

3.2 Pomer signál/šum a chybovosť

Šumové vlastnosti analógových komunikačných systémov sa hodnotia pomocou pomeru výkonu užitočného signálu k výkonu šumového signálu. Pokiaľ sa jedná o modulovaný signál, označuje sa ako pomer nosná – šum *CNR* (*carrier-to-noise ratio*). Pri signáloch v základnom pásme sa označuje ako pomer signál – šum *SNR* (*signal-to-noise ratio*). Viac informácií ako pomer signál – šum poskytuje pomer signál – interferencia *SIR* (*signal-to-interference ratio*). Pod pojmom interferencia sa rozumie súčet šumu a skutočných interferencií (harmonické, intermodulačné skreslenie). Spomenuté parametre sa používajú tiež pri digitálnych komunikačných systémoch. Ďalším využívaným parametrom je pravdepodobnosť chyby v prenose bitu P_e (*probability of a bit error*), ktorý je definovaný vzťahom (3.2)

$$P_e = \frac{\text{množstvo chybných bitov prenesených za 1 sekundu}}{\text{celkové množstvo bitov prenesených za 1 sekundu}}. \quad (3.2)$$

Pravdepodobnosť P_e je veličina, ktorá sa stanoví pre komunikačný systém určitého typu na základe teoretického rozboru. Avšak skutočná chybovosť zistená meraním konkrétneho systému sa označuje ako bitová chybovosť *BER* (*Bit Error Rate*). Pri diskretných moduláciách sa okrem bitovej chybovosti *BER* určuje tiež symbolová chybovosť *SER* (*Symbol Error Rate*), paketová chybovosť *PER* (*Packet Error Rate*) a rámcová chybovosť *FER* (*Frame Error Rate*). Ako merný časový interval sa bežne používa jednotka sekunda. Chybovosť *BER* je závislá hlavne na pomere *CNR*. Dá sa

charakterizovať funkčnými závislosťami $P_e = f(CNR)$ alebo $BER = f(CNR)$. Pravdepodobnosť chyby P_e je však v praxi často zväčšovaná viacerými faktormi, napríklad nedokonalou frekvenčnou filtráciou vo vysielacom a prijímači, fázovým šumom oscilátorov zúčastnených pri spracovaní signálu, demoduláciou a podobne. Preto je teoretický výpočet pravdepodobnosti chyby P_e veľmi zložitý a tak sa priamym meraním určuje chybovosť BER .

Veličiny P_e a BER rôznych modulačných spôsobov sa vyjadrujú nielen ako funkcie pomeru CNR , ale tiež ako funkcie pomeru priemernej energie užitočného signálu E_b pripadajúceho na jeden modulačný bit, ku spektrálnej jednostrannej šumovej hustote šumu N_0 . Tento pomer N_0 / E_b je niekedy označovaný ako normovaný pomer signálu k šumu. Jeho prevrátená hodnota E_b / N_0 sa nazýva výkonová (energetická) účinnosť η_e . Medzi veličinami E_b , N_0 , výkonom nosnej vlny C a výkonom šumu N_0 platí vzťah (3.3a, b)

$$E_b = CT_b = \frac{C}{f_b}; \quad N_0 = \frac{N}{B_n}. \quad (3.3a, b)$$

3.3 Výkonová účinnosť a spektrálna účinnosť digitálnych modulácií

Pri digitálnych moduláciách s nosnými vlnami sú dôležitými parametrami výkonová (energetická) účinnosť a spektrálna (pásmová) účinnosť. Ako je uvedené vo vzťahu (3.4a,b) energetická účinnosť η_e je definovaná ako pomer spektrálnej výkonovej hustoty šumu N_0 ku strednej energii užitočného signálu E_b prenášajúceho 1 bit informácie pri určitej bitovej chybovosti $BER = P_e$.

$$\eta_e = \frac{N_0}{E_b}, \quad \eta_{dB} = 10 \log \frac{N_0}{E_b} \text{ [dB]}. \quad (3.4a,b)$$

Spektrálna účinnosť η_s je definovaná ako pomer bitovej rýchlosti f_b ku šírke pásma rádiového kanálu B_{RF} . Platí teda definičný vzťah (3.5)

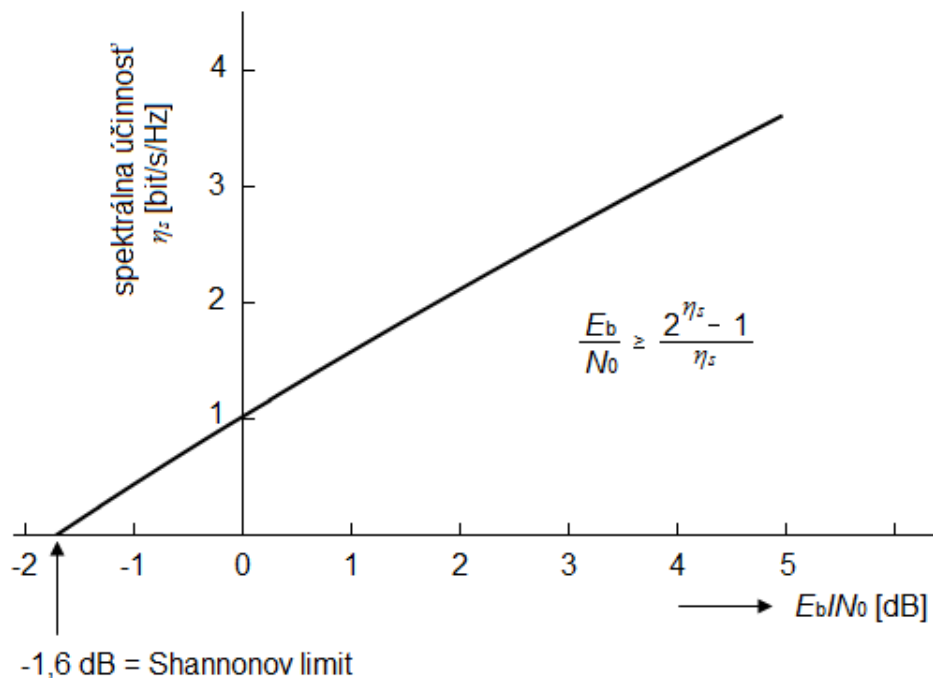
$$\eta_s = \frac{f_b}{B_{RF}} \text{ [bit / s / Hz]}. \quad (3.5)$$

Vzťah (3.6) je znázornený na obrázku Obr. 3, a to pri uvažovaní znamienka rovnosti medzi ľavou a pravou stranou tohto vzťahu. Z grafu vyplýva, že napríklad ku zaisteniu spektrálnej účinnosti $\eta_s \approx 2$ bity/s/Hz by teoreticky postačoval pomer $E_b / N_0 \approx 2$ dB. Avšak pri súčasne používaných typoch modulácií a kódovaní je potrebný pomer

minimálne 10dB. Z nasledujúceho vzťahu (3.6) vieme určiť limitnú hodnotu pomeru E_b / N_0 , pre spektrálnu účinnosť η_s blížiacu sa k nule

$$\lim_{\eta_s \rightarrow 0} \left\{ \frac{E_b}{N_0} \right\} = \lim_{\eta_s \rightarrow 0} \left\{ \frac{2^{\eta_s} - 1}{\eta_s} \right\} = 2 \log_e(2) = 0,693; -1,59 \approx -1,6 \text{ dB} \quad (3.6)$$

Hodnota -1,6 dB predstavuje minimum, pri ktorom je rádiová komunikácia v kanále AWGN (aditívny biely gaussovský šum) ešte možná, pričom sa prenosová rýchlosť f_b blíži k nule. Táto hodnota sa nazýva Shannonov limit.



Obr. 3 Závislosť maximálnej dosiahnuteľnej spektrálnej účinnosti η_s na pomere E_b/N_0 [1]

Keď sa zvyšuje spektrálna účinnosť η_s , musí klesať energetická účinnosť prenosu $\eta_e = E_b / N_0$. Tiež sa dá povedať, ak má narastať prenosová rýchlosť f_b pri danej šírke pásma $B = B_{\text{RF}}$, musí sa zväčšovať pomer E_b / N_0 . Tento problém je znázornený grafom na Obr. 3. Postupným zlepšovaním metód kanálového kódovania a rozvojom kódovaných modulácií sa tento problém postupne odstraňuje.

4 OCHRANNÉ KANÁLOVÉ KÓDOVANIE

Rádiový prenos pred chybami sa môže chrániť dvoma spôsobmi FEC (Forward Error Correction) a ARQ (Automatic Repeat Query). Popredná korekcia chýb FEC zabezpečuje prenos pomocou ochranných paritných bitov, ktoré sú pridávané ku dátovým bitom v kodére. Tieto bity vnášajú do prenášaného signálu redundantnú zložku, ktorá umožňuje na prijímacej strane detekciu chýb a prípadne ich opravu.

ARQ je založené na automatickom opakovaní prenosu. Pri tejto metóde vysielateľ vysielá redundantné paritné bity, určené ku detekcii chýb. Ak sú zistené nejaké chyby na prijímacej strane, je automaticky vyslaná žiadosť ku vysielateľu o opakovanie prenosu chybne prijatej informácie. Okrem týchto dvoch základných spôsobov ochrany prenosu sa používajú ešte hybridné metódy ochrany, ktoré vznikajú spojením základných princípov niektorých ochrán. Tie sa používajú v prípade, ak FEC alebo ARQ nestačia na potrebné zníženie chybovosti, alebo naopak zbytočne vedie ku predimenzovanému systému [1].

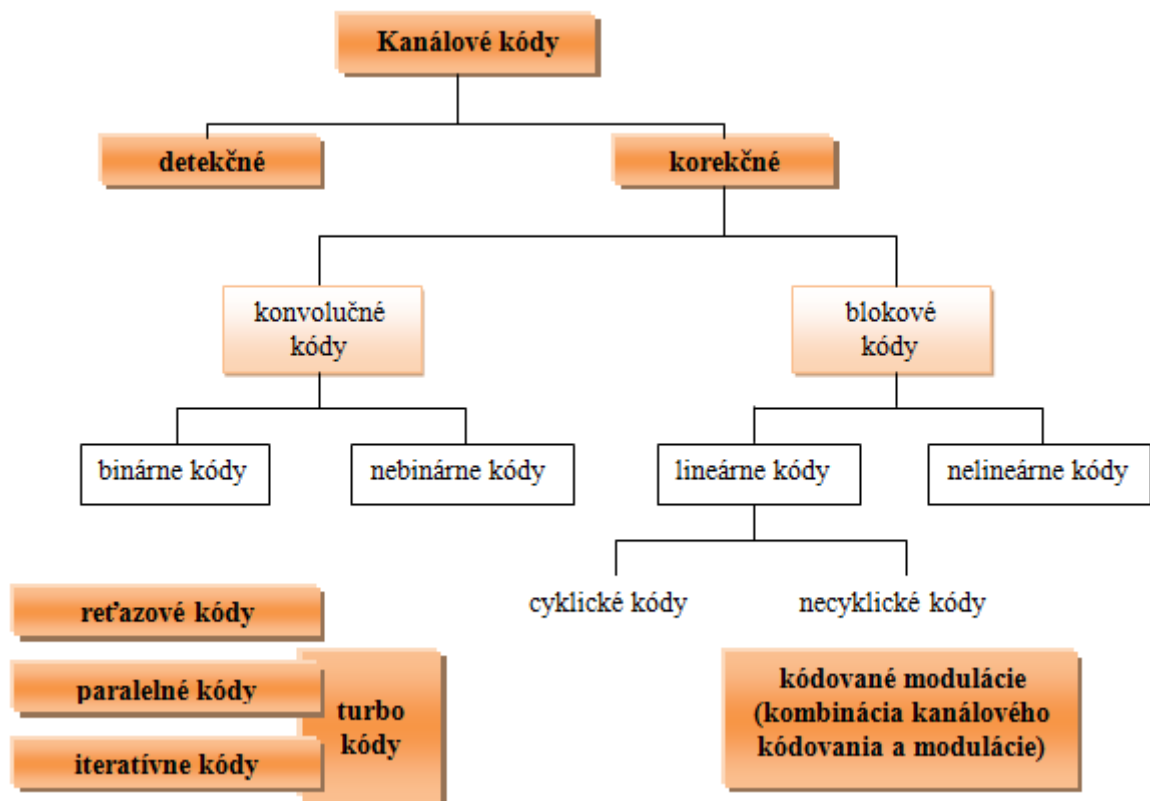
4.1 Klasifikácia kanálových kódov FEC

Základným princípom klasifikácie je zámerné pridávanie redundancie ku prenášanému dátovému signálu. Kanálové kódy sa dajú rozdeliť do dvoch základných skupín.

- **Detekčné kódy** sú potrebnou súčasťou metód FEC aj ARQ, avšak dokážu iba zistiť, ktorý bit v prenose je chybný.
- **Korekčné kódy** dokážu niektoré, alebo dokonca všetky chybné bity automaticky opraviť tak, že umožňujú zistiť pozíciu chybných bitov.

Ako je vidieť na nasledujúcom obrázku *Obr. 4* členenie detekčných a korekčných kódov sa ďalej delí na podskupiny. Toto klasické členenie vyplývajúce z pôvodnej Shannonovej práce z roku 1948 bolo neskôr rozšírené o nové varianty kanálových kódov. Prvé z nich sú reťazové kódy, kde sa kódovanie a dekódovanie realizuje postupným prechádzaním dátového toku niekoľkými sériovo radenými kódovacími schémami. Ďalšou kategóriou sú paralelné kódy, kde sa vstupné dáta prechádzajú v kodére súčasne niekoľkými rôznymi paralelne radenými kódovacími schémami. Iteratívne kódy slúžia skôr ku dekódovaniu, pri ktorých prijaté dáta prechádzajú viackrát jedným dekódovacím obvodom. Zväčšovanie počtu iterácií postupne znižuje chybovosť dekódovaného signálu, ale zároveň zväčšuje procesnú dobu tohoto postupu. Kombináciou paralelných

reťazových kódov a iteratívneho dekódovania vznikajú veľmi účinné turbo kódy. Pri väčšom počte iterácií sa svojim kódovým ziskom veľmi približujú Shannonovmu limitu.

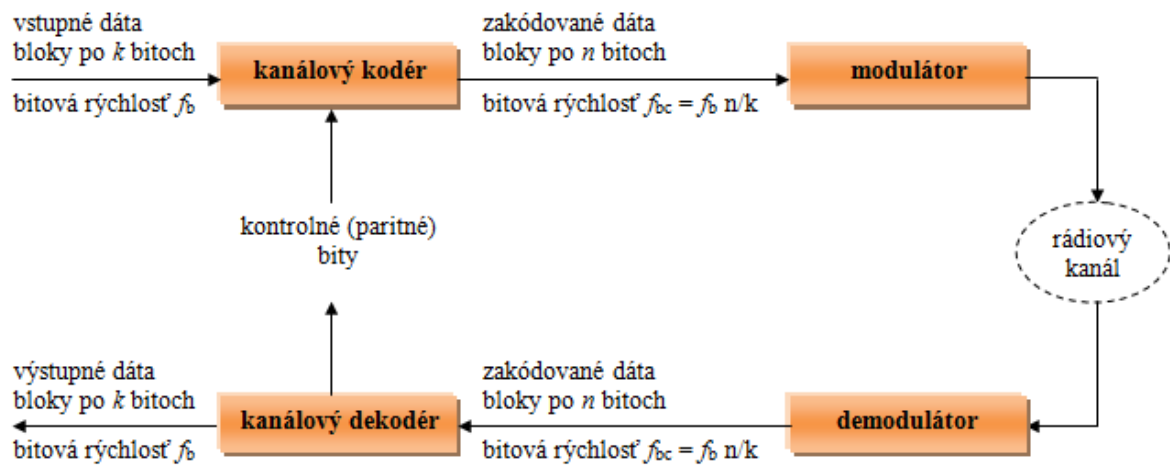


Obr. 4 Klasifikácia ochranných kanálových kódov [1]

4.2 Základné parametre kanálového kódovania

Na obrázku Obr. 5 je naznačená základná koncepcia kanálového kódovania s poprednou korekciou chýb FEC. Všetky bloky od vstupných dát do kanálového kodéra až po výstupné dáta z kanálového dekodéra sa nazývajú diskretný dátový kanál. Dáta vstupujúce do kodéra sú členené na vstupné bloky, obsahujúce k -bitov, ktoré majú rýchlosť f_b . Pomocou vhodných algoritmov sú k týmto bitom v kanálovom kodére pričlenené kontrolné (paritné) bity. Z kanálového kodéra sú už vysielané bitové bloky o n -bitoch, ktoré majú dátovú rýchlosť $f_{bc} = f_b (n/k)$. V modulátore sa na nosnú vlnu namoduluje modulačný signál, ktorý je vysielaný rádiovým kanálom, kde naň pôsobí množstvo rušivých faktorov. Preto sa na demodulátore objavuje signál s chybovosťou BER, pri

rovnakej rýchlosti f_{bc} . V kanálovom dekodére sa chybovosť čiastočne eliminuje, alebo úplne odstráni.



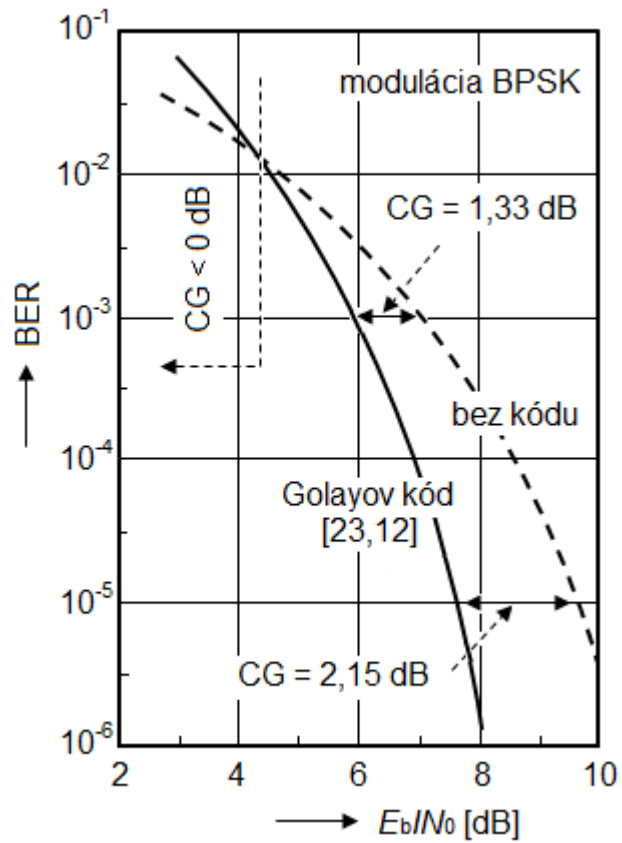
Obr. 5 Základná koncepcia kanálového kódovania (založené na FEC) [1]

V prípade, že rádiokomunikačný systém vykazuje bez kanálového kódovania pri konkrétnej hodnote pomeru E_b/N_0 istú BER, potom po zavedení kanálového kódovania sa pri nezmenenom pomere E_b/N_0 chybovosť zmenší na hodnotu $BER_c < BER$. Za týchto podmienok kódovanie znižuje chybovosť BER. V prípade, že sa po zavedení kódovania vystačí s pôvodnou chybovosťou BER, je možné k jej zaisteniu zmenšiť potrebný pomer E_b / N_0 a jedná sa o prípad kedy kódovanie uvoľňuje energetickú bilanciu rádiového spojenia.

Dôležitým parametrom pri kódovaní kanálu je rýchlosť kódovania r_c , ktorá je daná vzťahom $r_c = k/n$. Táto hodnota sa pohybuje v rozmedzí $0 \leq r_c \leq 1$, ak je rýchlosť kódovania rovná hodnote 1, ide o stav bez ochranného kódovania. Naopak pri najdokonalejšom zabezpečení by bola $r_c = 0$ a znižuje sa spektrálna účinnosť prenosu. Zvýšená bitová rýchlosť f_{bc} si vyžaduje zväčšenú šírku rádiového pásma v pomere $1/r_c$.

Jeden z najdôležitejších parametrov je kódový zisk CG, ktorý vyjadruje uvoľnenie energetickej bilancie v rádiokomunikačnom kanále. Na nasledujúcom obrázku Obr. 6 je znázornená závislosť bitovej chybovosti BER na pomere E_b/N_0 a to pre systém bez kódovania aj s ním. Kódový zisk udáva, o koľko decibelov je možné pri použitom type kódovania zmenšiť pomer E_b/N_0 voči stavu bez kódovania, ak má zostať rovnaká BER a tiež dátová rýchlosť. Kódový zisk sa znižuje pri rastúcej BER, pri vysokej chybovosti môže byť dokonca záporný. V praxi má dosiahnutie čo najväčšieho kódového zisku veľký

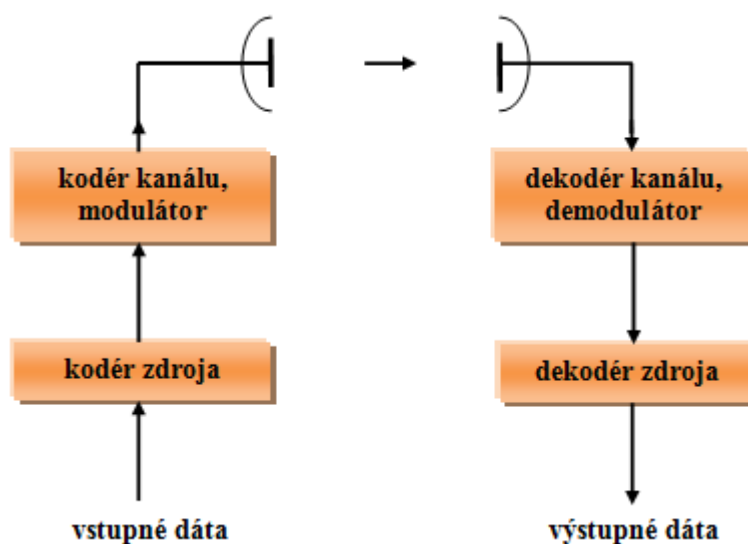
význam. Totižto ak pri pôvodne nekódovanom systéme sa po zavedení kódovania FEC so ziskom 3 dB, je možné pri zachovaní rovnakej chybovosti zmenšiť výstupný výkon vysielacza, či zisk antény o 3 dB, čiže na polovicu.



Obr. 6 Závislosť BER na pomere E_b / N_0 pre systém s moduláciou BPSK [1]

5 KÓDOVANÉ MODULÁCIE

V pôvodnej Shannonovej schéme na obrázku *Obr. 1* sú na vysielacej strane kodér kanálu a modulátor ako dva úplne samostatné bloky. Neskôr sa ukázalo, že v niektorých aplikáciách môže byť výhodné združiť proces kanálového kódovania a modulácie a taktiež združiť proces kanálového dekódovania a demodulácie. Takto vytvorená kódovaná modulácia, začína byť v modernej rádiovkej komunikácii čím ďalej, tým viac využívaná. Hlavná prednosť pri kódovanej modulácii je v tom, že nevyžaduje pri použití ochranného kanálového kódovania rozpoznateľné zväčšenie šírky pásma komunikačného kanálu. Pričom pri stave bez kódovania si vyžaduje izolované kanálové kódovanie [1].

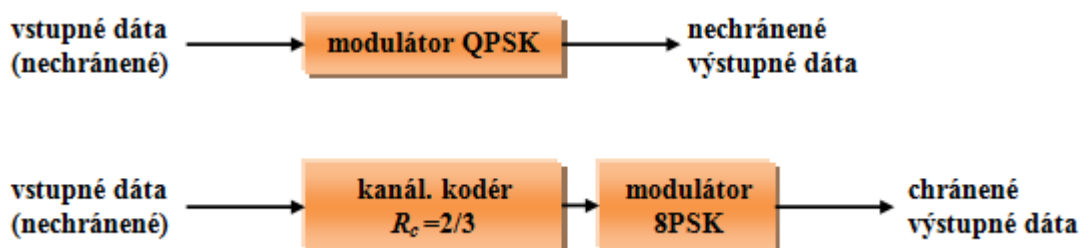


Obr. 7 Základná koncepcia systému s kódovanými moduláciami [1]

Ako je vidieť na obrázku *Obr. 7*, kodér kanálu a modulátor sú združené do jedného subsystému, ktorý priamo mapuje výstupné dáta prichádzajúce z kodéra zdroja do nosnej vlny. Tento subsystém určuje šírku rádiového pásma a taktiež odolnosť voči rôznym rušivým činiteľom. Inverznú operáciu potom robia združený dekodér a demodulátor na strane prijímača.

Na ďalšom obrázku *Obr. 8* je ilustrácia podstaty kódovaných modulácií. Vo vrchnej časti je znázornený systém s moduláciou QPSK, bez kanálového kódovania (ochrany prenosu), ktorý prenáša dva bity na symbol. V spodnej časti obrázku *Obr. 8* je znázornený spektrálne účinnejší modulátor 8PSK, ktorý prenáša tri bity na symbol, doplnený kanálovým kodérom o rýchlosti $R_c = 2/3$. Táto kombinácia môže uskutočňovať

prenos s rýchlosťou dva bity na symbol, čiže nie je potrebné rozšírenie pásma prenášaného signálu a navyše zaisťuje jeho ochranu. Táto kombinácia však nie je ešte ideálna, je možné zlúčiť kanálový kodér a modulátor do jedného funkčného celku.



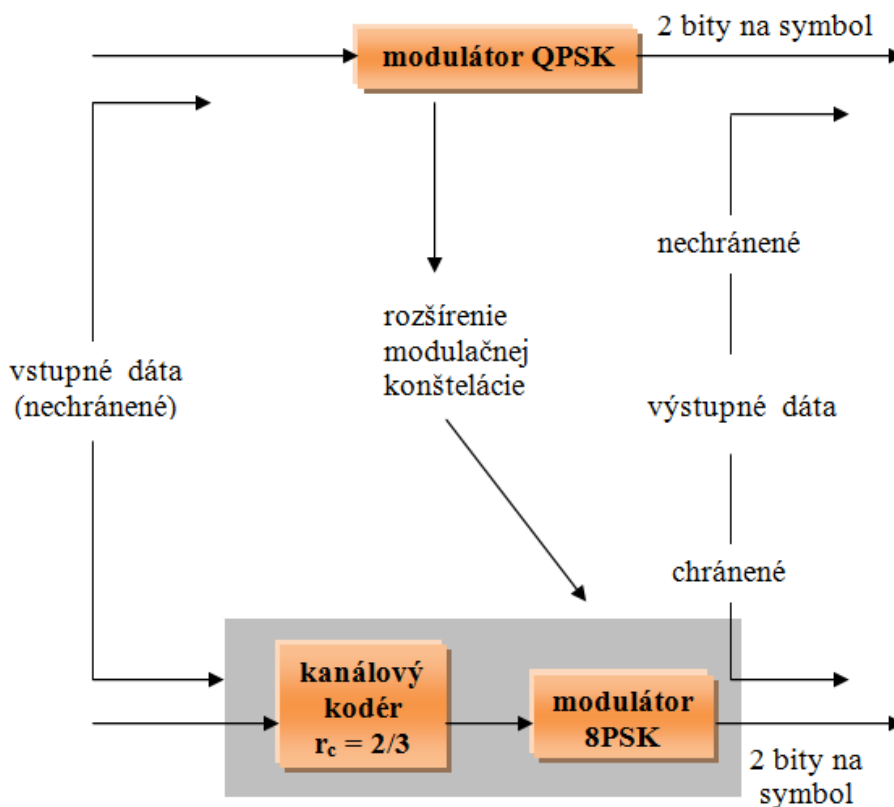
Obr. 8 Systém s moduláciou QPSK (bez kanál. kodéra) a s modulátorom 8PSK (s kanál. kodérom) [1]

Obdobie po roku 2000 môžeme nazývať tiež Post-Shannonovské obdobie a to preto, lebo sa v tomto období začínajú objavovať ďalšie možné modifikácie Shannonovej schémy. Jednou zo základných zmien v rádiokomunikačnej technike môže byť aj výrazné posilnenie úlohy prijímača v komunikačnom procese. V základnej Shannonovej schéme je prijímač braný ako pasívny subjekt, ktorý iba dekoduje dátové a prijaté informácie vložené do prenášaného signálu vysielačom. Vylepšený prijímač sa uplatní hlavne pri ochrane prenosu signálu pred chybovosťou. Jednou z možností ochrany prenosu je samostatná kontrola chýb prijímačom na báze reziduálnej redundancie, ktorá je zámerne ponechávaná vo vysielanom signáli.

5.1 Princípy kódovaných modulácií

Systematicky boli kódované modulácie popísané v roku 1982 Ungerboeckom. Ako už bolo spomínané, vhodnou kombináciou účinnej viacstavovej modulácie a kanálového kódovania sa získava kódový zisk CG, bez toho aby bolo treba zväčšiť šírku pásma, zväčšiť vysielač výkon, či redukovať dátovú rýchlosť. V praxi sa používajú dve základné varianty tohto prenosového formátu, a to mriežkovo kódované modulácie (TCM) s konvolučným kódovaním a blokovo kódované modulácie (BCM). Prvýkrát našla modulácia TCM uplatnenie vo veľmi účinných modemoch pre prenos faxu a rýchlych dát po pomalých telefónnych vedeniach. Obe varianty kódovaných modulácií sa uplatňujú predovšetkým v pásmovo obmedzených kanáloch, využívaných v pozemných aj mobil-

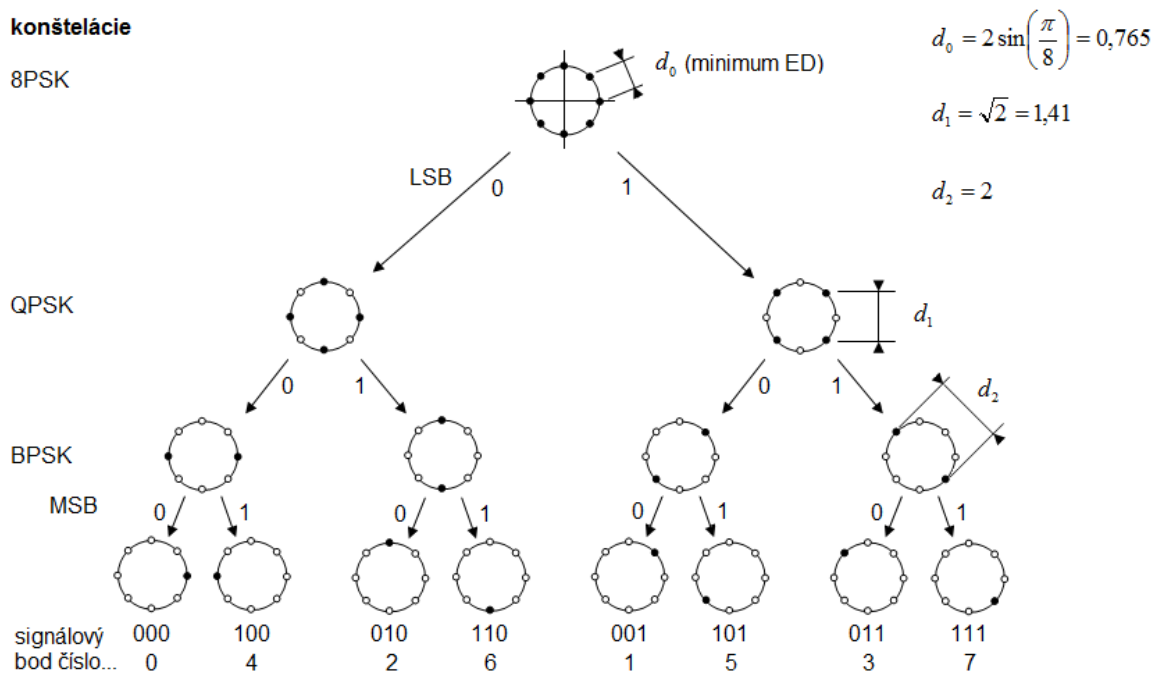
ných spojoch, v družicových spojoch a pod. Pre lepšie pochopenie princípu kódovaných modulácií máme k dispozícii obrázok *Obr. 9*. Vo vrchnej časti je použitý systém s moduláciou QPSK bez ochranného kódovania, ktorý prenáša signál s kapacitou dva bity na symbol. V spodnej časti je potom systém s rovnakou prenosovou kapacitou pri nezmenenej šírke pásma, ale už s moduláciou 8PSK a kanálovým kódérom s rýchlosťou kódu $r_c = 2/3$.



Obr. 9 Nekódovaná modulácia QPSK a modulácia 8-PSK s použitím kanálového kódéra [1]

Systém s moduláciou 8PSK má síce lepší kódový zisk, avšak vykazuje horšiu energetickú účinnosť. Na ďalšom obrázku *Obr. 10* je znázornené, že pri konvenčnej modulácii QPSK minimálna Euklidova vzdialenosť (ED) medzi susednými signálovými bodmi je $d_1 = \sqrt{2} = 1,41$, pričom pri modulácii 8PSK má hodnotu iba $d_0 = \sqrt{2 - \sqrt{2}} = 0,76$. Tento nedostatok sa dá odstrániť tak, že sa ku ochrane prenosu pridá redundantný ochranný bit až v rámci každého signálového prvku priamo v modulátore,

alebo v jeho mapovacom obvode. Mapovanie kódových symbolov do signálových prvkov sa prevádza špecifickým spôsobom, ktorý zaisťuje aby minimálna Euklidova vzdialenosť zostala $\sqrt{2} = 1,41$. To znamená, že energetická účinnosť sa pri kódovanej modulácii oproti QPSK už nezhoršuje. Toto mapovanie je založené na požiadavku minimalizácie Euklidovej vzdialenosti medzi signálovými prvkami v konštelačnom diagrame. Na rozdiel od klasického blokového či konvolučného kódovania, kde je sledovaná minimalizácia Hammingovej vzdialenosti medzi kódovými slovami na výstupe kanálového kodéra.



Obr. 10 Euklidove vzdialenosti modulácií [2]

Ku realizácii priamej aplikácie kódovania na modulačnej konštelácii sa v praxi používa mapovacie pravidlo nazývané delenie množín modulačných systémov. Princíp je v postupnom delení základnej zložitej konštelácie na konštelačné podsúbory. Ako je vidieť na Obr. 10 minimálna Euklidova vzdialenosť narastá.

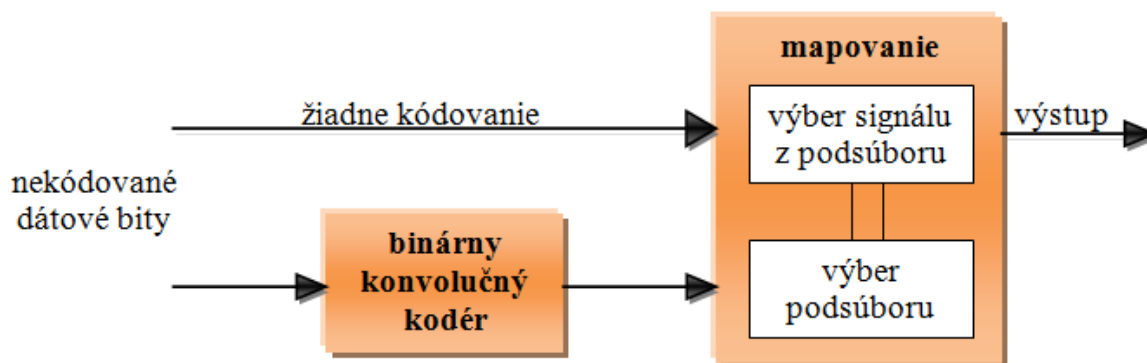
II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 MRIEŽKOVO KÓDOVANÁ MODULÁCIA TCM

Stavový diagram TCM je podobný mriežkovému diagramu konvolučných kódov, preto sa označuje ako mriežkovo kódovaná modulácia. Tvorí sa pomocou už spomínaných konvolučných kódov a niektorej z viacstavovej modulácie PSK alebo QAM. Všetky TCM majú spoločné rysy. Prvou z nich je, že v konštelačnom diagrame je počet použiteľných signálových bodov väčší, ako by vyžadoval klasický typ nekódovanej modulácie. Prídavné body vnášajú do prenosu určitú redundanciu, ktorú je možné využiť na strane prijímača k oprave chýb. Aplikácia konvolučného kódovania vnáša medzi po sebe nadväzujúce signálové body istú závislosť. Čo znamená, že sú prípustné iba niektoré sekvencie týchto bodov, ktoré je možné modelovať vo forme mriežkovej štruktúry. Posledným rysom TCM je, že základnou metrikou pri kódovaní a dekódovaní je minimálna Euklidova vzdialenosť medzi signálovými prvkami konštelačného diagramu, ktorá musí byť maximalizovaná.

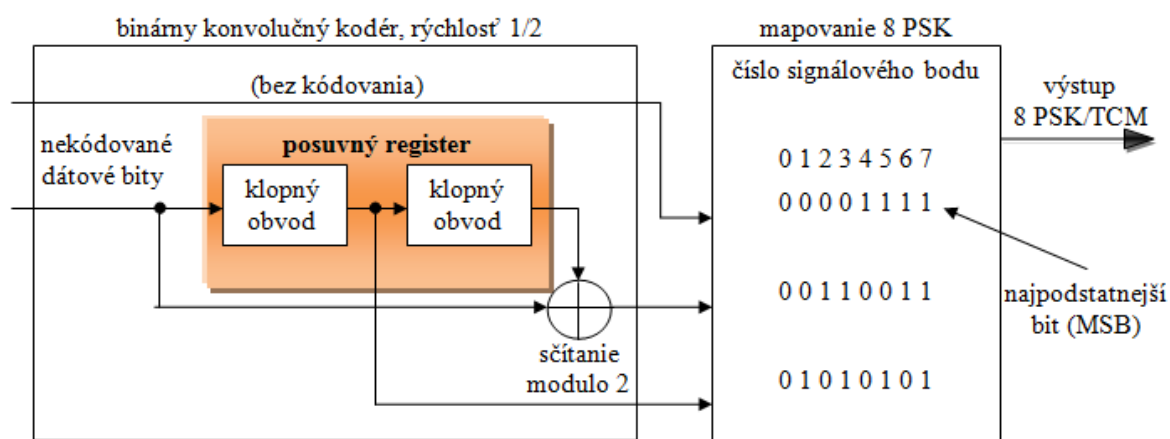
6.1.1 Kodér - modulátor TCM

Ako vyplýva z charakteristických vlastností kódovaných modulácií, je nutné optimálne mapovať signálové prvky modulovaného signálu do vhodných pozícií v konštelačnom diagrame. K tomu slúži postup delenia množín modulačných signálov na podsúbory. Na obrázku *Obr. 11* je znázornený kodér – modulátor TCM, ktorý je možné zostaviť pomocou využitia podsúborov. Ak má byť vyslaný n -bitový symbol vo zvolenom modulačnom formáte, zostaví sa najskôr rozšírená konštelácia obsahujúca 2^{n+1} signálových bodov. Pri moduláciách MPSK a M-AMPM ležia tieto body na kružnici, pri modulácii MQAM vytvárajú pravouhlú mriežku. Táto konštelácia sa rozdelí do 4 alebo 8 podsúborov. Jeden alebo dva prichádzajúce bity daného symbolu vchádzajú do konvolučného kodéra s rýchlosťou $r_c = 1/2$ alebo $r_c = 2/3$. Výsledné dva alebo tri zakódované bity definujú výber určitého podsúboru. Zostávajúce, nekódované dátové bity potom určujú, ktorý bod z vybraného podsúboru bude vysielaný signálovým prvkom. Takto koncipované mriežkové kódy patria medzi Ungerboeckove kódy.

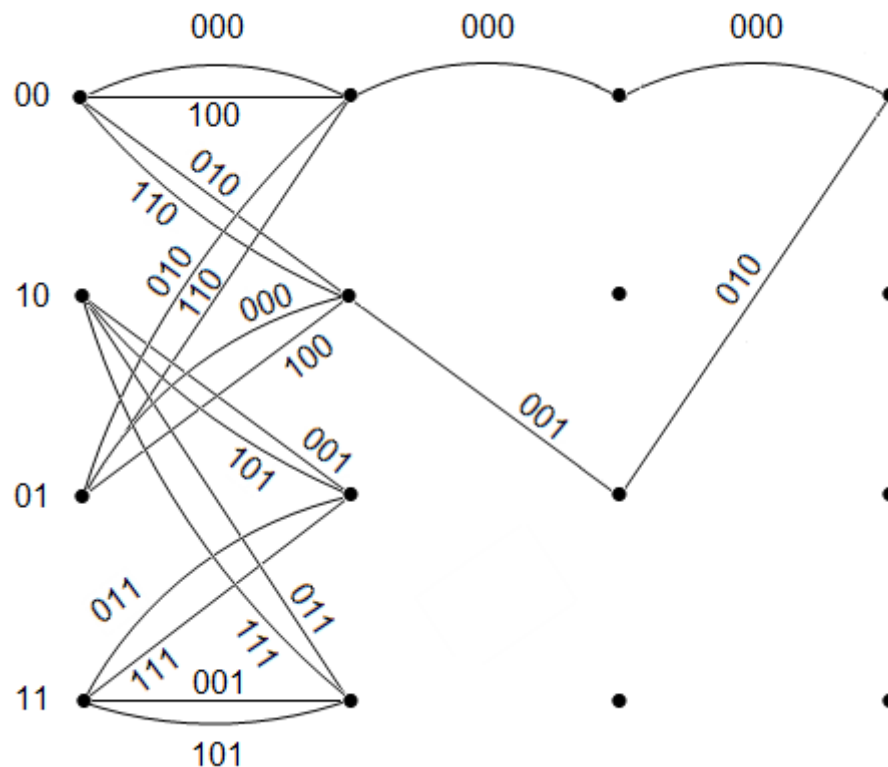


Obr. 11 Obecná koncepcia kodéru – modulátoru pre TCM [1]

Ungerboeckov kodér-modulátor pre formát 8PSK s prenosom dva bity na jeden symbol je znázornený na obrázku Obr. 12. Na ďalšom obrázku Obr. 13 sú znázornené všetky stavy tohto kodéra a obrázok naznačuje cesty s najmenšou vzdialenosťou. Tieto stavy sú definované obsahom dvojstupňového posuvného registra.



Obr. 12 Kodér – modulátor 8PSK/TCM [1]



Obr. 13 Mriežkový diagram formátu 8PSK/TCM [1]

Asymptotický kódový zisk je dôležitým parametrom TCM. Je definovaný, ako v decibeloch vyjadrený pomer kvadrátov voľnej Euklidovej vzdialenosti kódovanej modulácie a minimálnej Euklidovej vzdialenosti nekódovanej referenčnej modulácie, pracujúci s rovnakou energiou užitočného signálu na 1 bit.

6.1.2 Dekodér - demodulátor TCM

Pri použití konvolučného kódovania je využitá pamäť a preto je pri moduláciách TCM rovnako použitá. Proces rozpoznávania prijatého symbolu spočíva vo dvoch krokoch. Prvým pri detekcii je určenie signálového bodu v Euklidovom zmysle. Takto určený signálový bod a jeho umocnená Euklidova vzdialenosť od prijatého bodu, môže byť potom využitá v príslušnej vetve a Viterbiho algoritmus môže postupovať ďalej. Viterbiho algoritmus je používaný ako blok v praktickej časti, pomocou ktorého je v programe MATLAB sprostredkované dekódovanie signálu.

7 KONVOLUČNÉ KÓDOVANIE

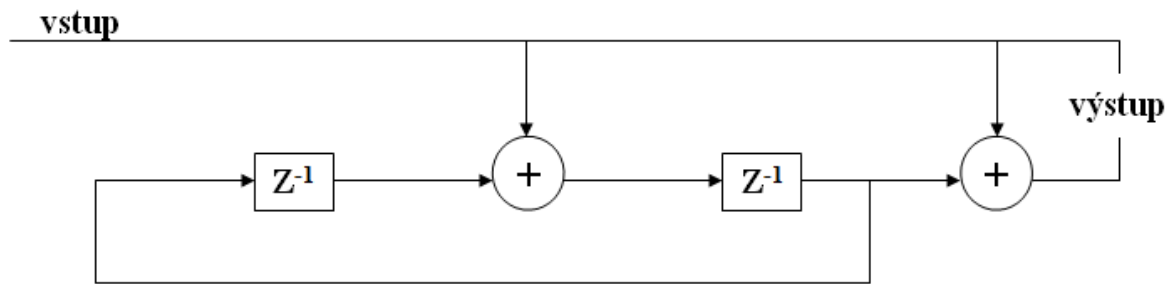
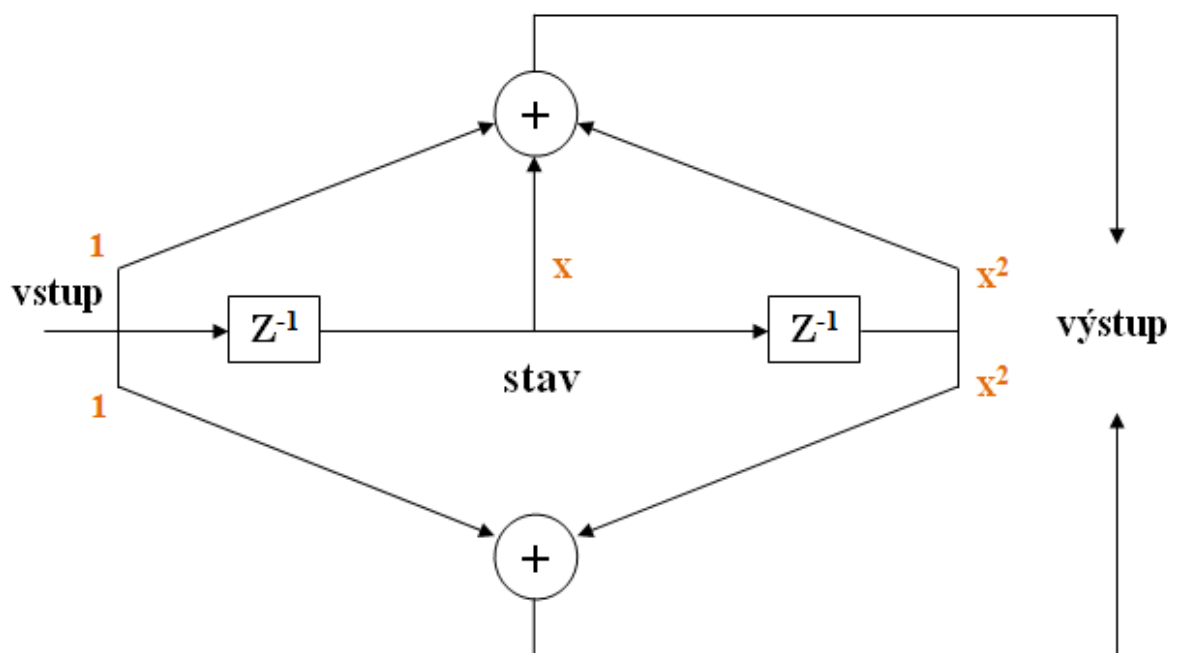
Trellis kódová modulácia používa kódovanie pomocou konvolučných kódov a dekódovanie pomocou Viterbiho algoritmu. Jedná sa o FEC techniku, ktorá je vhodná pre kanál typu AWGN (Additive white Gaussian noise). V programe MATLAB je toto kódovanie, či dekódovanie zahrnuté v blokoch, preto je v tejto časti práce uvedené ako sa samotné kódovanie a dekódovanie v blokoch prevádza [1], [7].

Konvolučné kódy sú dané tromi parametrami, počet výstupných bitov n , počet vstupných bitov k a počet pamäťových registrov m . Vstupné informačné dáta sa delia do blokov o k bitoch a výstupné dáta do blokov o n bitoch. Konvolučné kódovanie nesie tento názov z jednoduchého dôvodu. Vstupná dátová sekvencia je plynulo podrobovaná konvolučnému procesu, ktorý z nej vytvára novú výstupnú sekvenciu bitov. Konvolučný kodér využíva pamäť, keďže súčasný výstupný blok o n bitoch je závislý nielen na k bitoch súčasného vstupného dátového bloku, ale ešte navyše aj na $(n - 1)$ predchádzajúcich vstupných blokov. Celkový počet vstupných blokov n , ktoré ovplyvňujú jediný výstupný blok sa nazývajú obmedzovacia dĺžka kódu K a výraz $n - 1$ je rád pamäti kódu. Konvolučný kodér odovzdáva výstupné bloky s určitým oneskorením. Pri dekódovaní sa najčastejšie využíva Viterbiho algoritmus, ktorého princípom je metóda maximálnej pravdepodobnosti.

7.1 Delenie konvolučných kódov

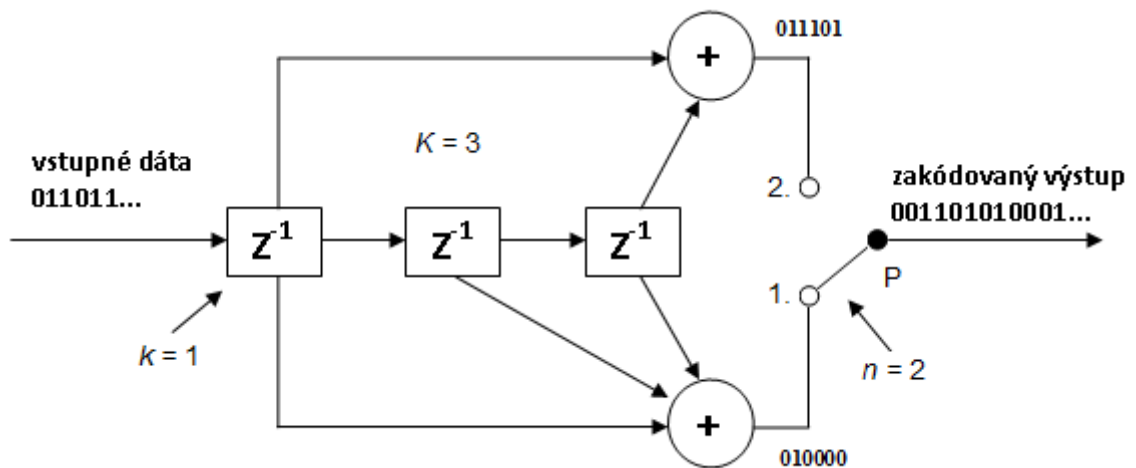
Konvolučné kódy sa delia na dve skupiny systematické a nesystematické. Systematické sa nazývajú také, kde sa vstupná informačná postupnosť bez zmeny prenáša na výstup. Pri nesystematických sa vstupná informačná postupnosť prenáša na výstup v konvolučnom tvare. Oba systémy sú naznačené na nasledujúcich obrázkoch *Obr. 14* a *Obr. 15*, kde bloky Z^{-1} sú klopné obvody a znakom $+$ je označené modulo 2 pre dva a viac vstupov. Na obrázku zapojenie nesystematického konvolučného kodéra sú dva generačné polynómy:

$$\begin{aligned} g_0(x) &= x^2 + x + 1, \\ g_1(x) &= x^2 + 1. \end{aligned} \tag{7.1}$$

Obr. 14 Zapojenie systematického konvolučného kodéra $\frac{1}{2}$ [7]Obr. 15 Zapojenie nesystematického konvolučného kodéra $\frac{1}{2}$ [7]

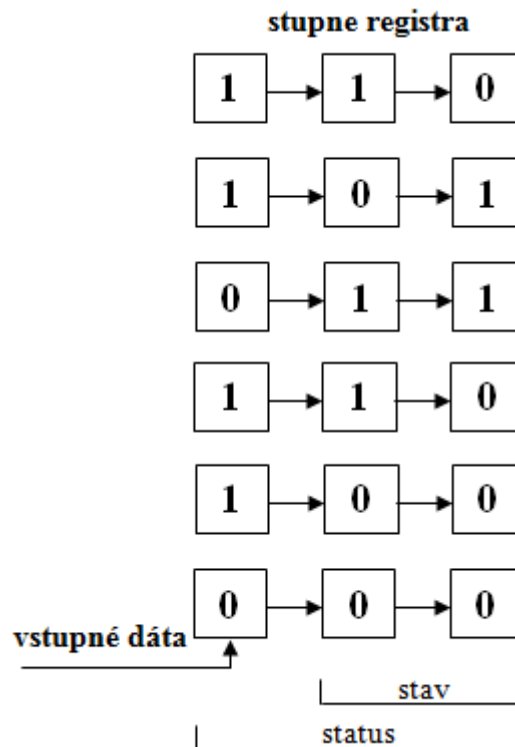
7.2 Kódovanie konvolučnými kódmi

Základom kodéra je posuvný register s obmedzovacou dĺžkou K . Pre lepšie pochopenie je na obrázku Obr. 16 znázornený konkrétny príklad konvolučného kodéra CC (2,1,3) s rýchlosťou $r_c = \frac{1}{2}$. Na vstup prichádzajú jednotlivé symboly 011011, s bitovou rýchlosťou f_b . Na výstupe sú dvojbitové symboly s rýchlosťou $2f_b$.



Obr. 16 Jednoduchý konvolučný kódér $(2,1,3)$ [1]

Pre lepšie pochopenie sú na ďalšom obrázku Obr. 17 znázornené v jednotlivých riadkoch všetky stavy troch binárnych stupňov registra pre 6 vstupných bitov, ktoré sú označované ako status. V prvom stĺpci sú vstupné bity, ďalšie dva stupne registra určujú momentálny stav registra.



Obr. 17 Stupne registra konvolučného kódéra $(2,1,3)$ [1]

Vo vrchnej časti obrázku Obr. 17 je posledný stav registra. Na začiatku je register nastavený na nulovú hodnotu, čiže 000. Na ďalšom riadku je na vstup vložená hodnota 1,

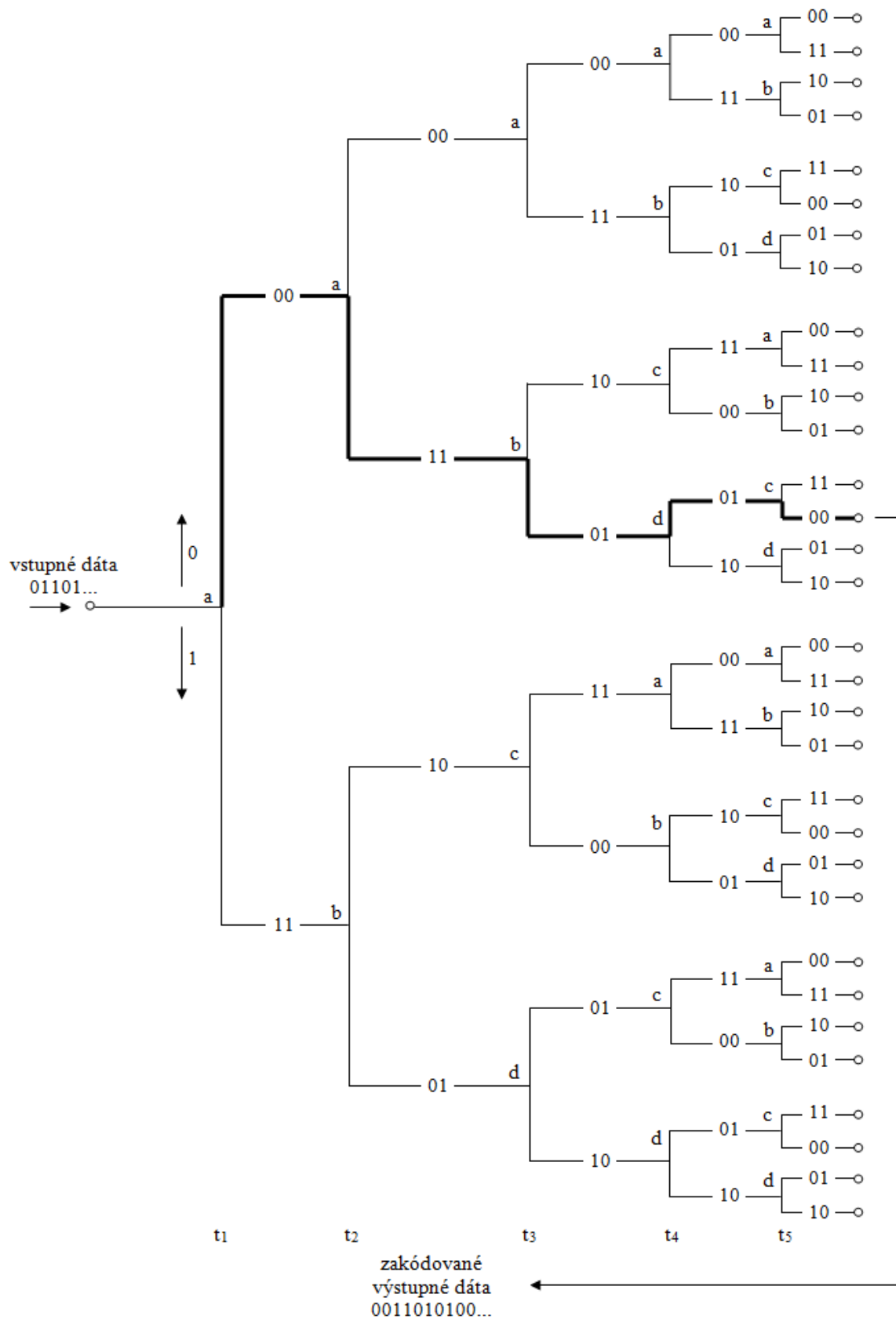
pričom stav posuvného registra sa nemení. Následne vstupuje do registra ďalšia hodnota 1 a stav registra sa mení na hodnotu 10, tak ako je znázornené na obrázku *Obr. 17*. Behom každej bitovej periódy vstupného signálu sa spočítajú pomocou sčítačky modulo-2 okamžité stavy stupňov registra a to podľa generačného polynómu g_0 a g_1 . Výstupy oboch modulo-2 sú následne vzorkované prepínačom P. Takže pre každý vstupný bit je generovaný výstupný zakódovaný dvojbitový symbol.

7.2.1 Kódový strom (Tree diagram)

Celý proces konvolučného kódovania sa dá graficky zobrazit' rôznymi spôsobmi. Jedným z nich je tzv. kódový strom. Názorná ukážka na obrázku *Obr. 18* je pre vyššie uvedený kódér (2,1,3). Kódový strom má dve hlavné vetvy, pričom navrch vstupuje bit 0 a nadol 1. Postupne sa celý strom rozvetvuje a opakuje sa postup ako majú vstupovať bity. Daná vstupná bitová sekvencia určuje ktorým smerom sa bude strom rozvetvovať. Takže, ak je na vstupe sekvencia bitov 01101..., postup bude nasledovný:

- na vstup príde 0, takže cesta kam bude pokračovať strom pôjde nahor,
- na vstup príde 1 čo znamená, že ďalšia vetva v strome bude spodná,
- týmto systémom sa postupuje až pokiaľ nebude bitová sekvencia ukončená.

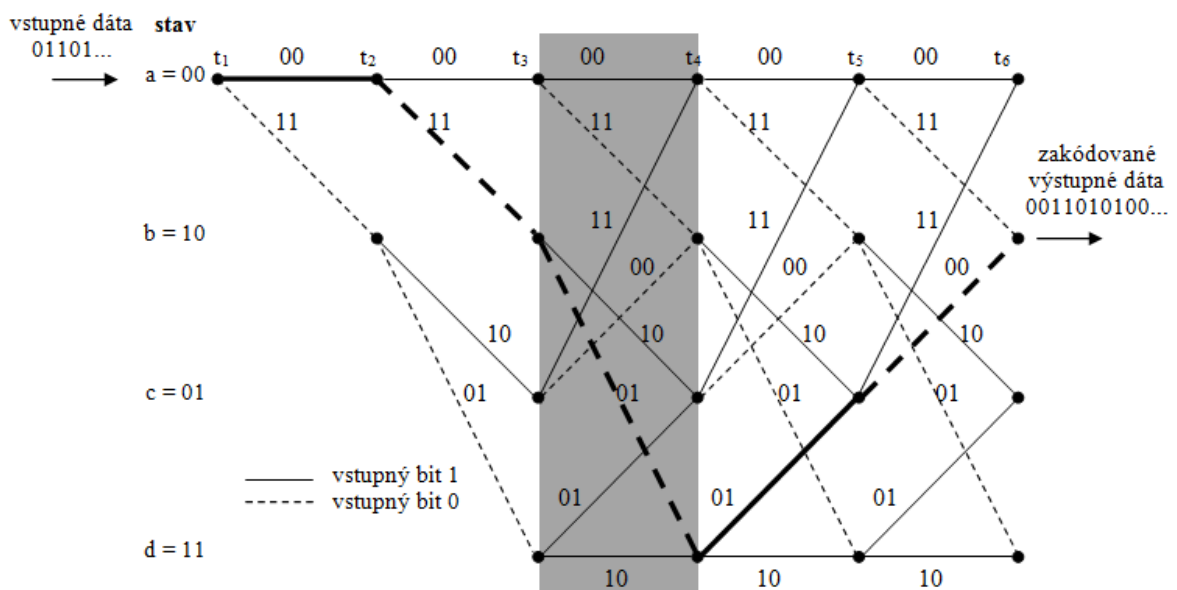
Každý uzol stromu je označený jednou z nasledujúcich bitových dvojíc (00, 01, 10, 11). Tieto dvojice odpovedajú obsahu druhého a tretieho stupňa registra. V tomto prípade sa kódový strom opakuje po prvých troch uzloch, keďže dĺžka kódéra je 3. Opakovaním tohto postupu sa vytvorí mriežkový (trellis) diagram, na čo nadväzuje ďalší odsek.



Obr. 18 Kódový strom konvolučního kodéra (2,1,3) [8]

7.2.2 Mriežkový diagram (Trellis diagram)

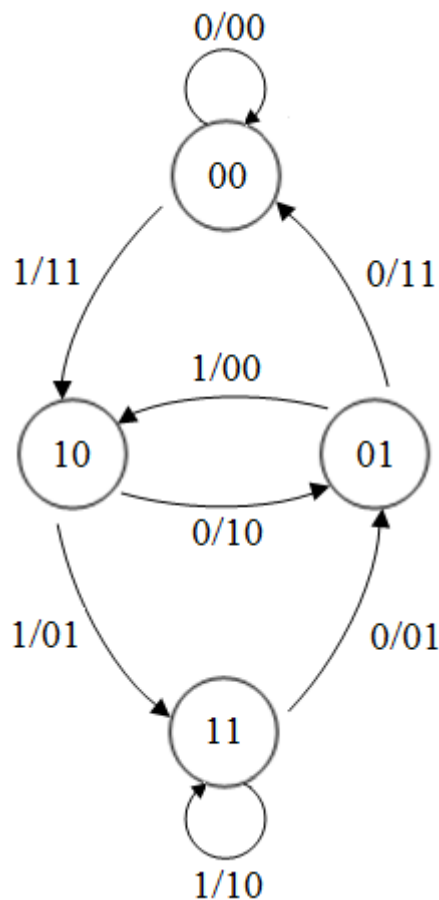
Mriežkový diagram zobrazuje dočasnú reprezentáciu možných stavov kodéra, pre k informačných bitov. Opakujúce sa jadro mriežky je znázornené na obrázku *Obr. 19* šedou farbou. Podobne ako pri stromovom diagrame, aj tu predstavuje jedna cesta vstupný bit 0 a druhá vstupný bit 1. Avšak v tomto prípade je bit 0 zobrazený plnou čiarou a bit 1 čiarou prerušovanou. Každéj vstupnej sekvencii bitov pripadá určitá konkrétna cesta po mriežkach diagramu, takže v každom okamžiku sú zobrazené všetky možné prechody medzi stavmi. Mriežkový diagram na obrázku *Obr. 19* je pre konvolučný kodér CC(2,1,3).



Obr. 19 Mriežkový diagram konvolučného kodéra (2,1,3) [1]

7.2.3 Stavový diagram

Mriežkový diagram je založený na opakujúcej sa štruktúre kódového stromu. Je to vďaka tomu, že konvolučný kodér je vlastne konečný automat (finite-state machine), čo znamená, že má konečný počet stavov. Z toho vyplýva, že konvolučný kodér sa dá popísať tiež pomocou stavového diagramu. Na obrázku *Obr. 20* je možné vidieť, že štyri ľavé uzly a , b , c , d reprezentujú štyri možné stavy kodéra v čase t_3 , štyri pravé uzly potom odpovedajú stavom v čase t_4 . Zlúčením odpovedajúcich si uzlov potom vzniká stavový diagram. Ako už bolo spomenuté, zobrazuje všetky možné stavy kodéra a všetky prechody medzi týmito stavmi. V našom prípade bude zobrazený uvažovaný kodér CC(2,1,3).



Obr. 20 Stavový diagram konvolučného kódéra (2,1,3) [1]

7.3 Dekódovanie konvolučnými kódmi

Vďaka tomu, že konvolučné kódy môžu mať teoreticky na výstupe nekonečne dlhú postupnosť je ich dekódovanie zložité. Konvolučné dekodéry majú základnú funkciu, ktorou je odhad bitovej sekvencie na výstupe demodulátora. Tá je prevádzaná na základe metód vedúcich k minimalizácii počtu chýb voči vysielanej sekvencii. Medzi týmito sekvenciami existuje jednoznačný vzťah, ktorému odpovedá cesta v diagrame kódového stromu, alebo v mriežkovom diagrame. Konvolučné dekodéry odhadujú najpravdepodobnejšiu repliku tejto cesty a po jej identifikácii z nej odvodzujú dátovú sekvenciu prijímaného signálu. Poznáme niekoľko metód pre dekódovanie, ktorými sú sekvenčné dekódovanie, prahové dekódovanie a najčastejšie využívané dekódovanie s maximálnou pravdepodobnosťou nazývané tiež Viterbiho algoritmus. Pre dekódovanie v simulácii je použitý práve Viterbiho algoritmus, ktorý je popísaný v kapitole 7.3.1.

7.3.1 Viterbiho algoritmus

Viterbiho algoritmus je dekodér s maximálnou pravdepodobnosťou – ML. Samotný algoritmus je založený na predpoklade, že kódové slová majú rovnakú pravdepodobnosť, že budú vyslané. Počet všetkých možných ciest v kódovej mriežke pre k -bitovú informačnú sekvenciu je 2^k . Z toho vyplýva, že sa pre dekódovanie využíva mriežkový diagram. Pomocou neho sa vyhľadáva kódové slovo s najmenšou Hammingovou vzdialenosťou od prijatého slova, čo vedie k výraznej redukcii výpočtovej náročnosti.

7.3.2 Proces dekódovania pomocou Viterbiho algoritmu

Proces Viterbiho dekódovania môžeme stručne popísať tak, že pre každú periódu dátového bloku, pre každý konečný stav a pre každú vetvu vedúcu k tomuto uzlu sa vypočítava vzdialenostná metrika prijatej sekvencie. Následne sa ku tejto metrike pričíta kontrolný duplikát, zaznamenaný v počiatočnom uzle. Zvolí sa vetva s najmenšou vzdialenostnou metriku, ktorá sa uloží v zozname tzv. prežívajúcich (survivor) vetvách a uloží sa celková metrika do kontrolného duplikátu v tomto uzle. Je dôležité odstrániť iné cesty zo zoznamu prežívajúcich vetví a ak sa tam ešte vyskytujú vetvy z predchádzajúcich ciest, ktoré zatiaľ nezanikli, je potrebné odstrániť ich tiež. Celý postup končí vtedy, ak zostáva v zozname jediná prežívajúca cesta a je teda cestou hľadanou.

7.3.3 Vhodné použitie Viterbiho algoritmu

Potrebný počet operácií pre k -bitovú informačnú sekvenciu je určený vzťahom $n2^{k(K-1)}$, čo znamená, že sa zväčšuje iba lineárne v závislosti na vzrastajúcej hodnote k . Avšak požiadavky na pamäť dekodéra narastajú exponenciálne s obmedzovacou dĺžkou K , ktorá v praxi preto nepresahuje hodnotu $K \leq 10$. Viterbiho dekodéry sa používajú v kombinácii s tvrdým aj mäkkým rozhodovaním, najčastejšie sú implementované v kanáloch typu AWGN a to hlavne v kombinácii s moduláciami BPSK a QPSK. Avšak jeho použitie je možné iba pri nízkych bitových rýchlostiach, kedy obmedzovacia dĺžka nepresiahne hodnotu $K = 7$ až 11. V prípade, kedy treba zvýšiť bitovú rýchlosť na veľké hodnoty a súčasne zachovať relatívne malú chybovosť kódu BER 10^{-5} , treba zväčšiť aj obmedzovaciu dĺžku kódu K , preto sa v tomto prípade používa algoritmus sekvenčného dekódovania.

8 MATLAB A SIMULINK

MATLAB a Simulink je prostredie spojené z dvoch častí. Prvá z nich sa dá označiť ako programovací jazyk. V tejto práci je používaný hlavne Simulink a preto je popis programového prostredia venovaný práve tomuto programu. Napriek tomu je stručne popísané aj prostredie Matlab.

8.1 MATLAB

MATLAB je vyvinutý firmou MathWorks. Tento názov vznikol spojením a zároveň skrátením slov MATrix a LABoratory. Ako vyplýva z názvu, kľúčovou dátovou štruktúrou pri výpočtoch sú matice. Programovací jazyk prostredia MATLAB vychádza z jazyka Fortran.

Ako bolo už spomínané MATLAB je programové prostredie využívané zväčša na vedecko-technické numerické výpočty, analýzu a prezentáciu dát, merania a spracovania signálov a pod.

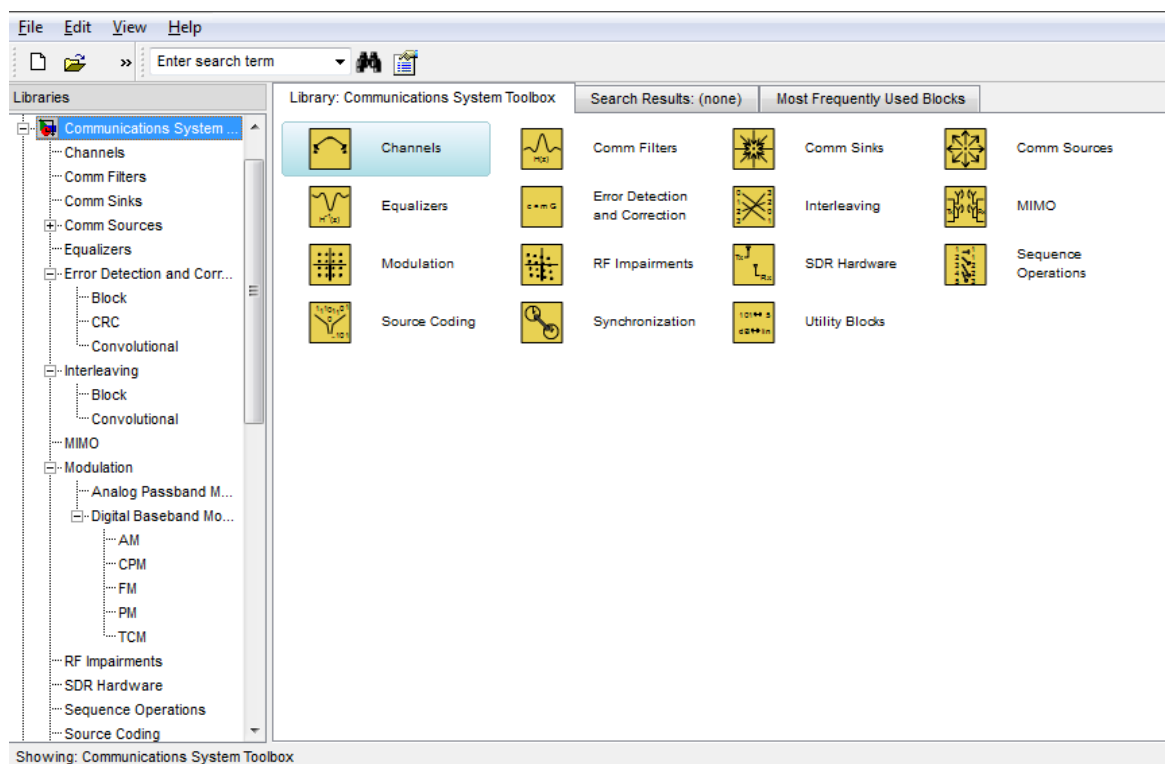
8.2 Simulink

Rovnako ako MATLAB aj Simulink pochádza z rodiny MathWorks. Simulink je dátový, grafický programovací jazyk pre modelovanie, simuláciu a analýzu multi-doménových dynamických systémov. Jeho hlavným rozhraním je grafický blok diagramov nástrojov a prispôsobiteľná sada knižníc blokov. Simulink je priamo prepojený s programom MATLAB, čiže môže byť riadený, alebo písaný priamo z neho. Ďalej je široko používaný v teórii riadenia a v digitálnom spracovaní signálu pre multi-doménové simulácie. Simulink je možné použiť s množstvom hardvéru, či softvéru firmy MathWorks, alebo iných firiem. Kodér Simulinku spoločne s programom vedie automaticky generovať zdrojový kód jazyka C pre implementáciu do real-time systémov. Simulink obsahuje množstvo nástrojov (Toolbox). Pre prácu s prenášaním, modulovaním a kódovaním signálu je dôležitý Communication System Toolbox.

8.2.1 Communication System Toolbox

Táto skupina nástrojov poskytuje algoritmy pre návrh, simuláciu a analýzu komunikačných systémov. Tieto nástroje sú k dispozícii ako funkcie MATLABu.

Communication System Toolbox umožňuje zdrojové kódovanie, kanálové kódovanie, prekladanie, moduláciu, ekvalizáciu, synchronizáciu a kanálové modelovanie. Taktiež je možné jeho pomocou analyzovať BER, či vizualizovať rôzne vlastnosti prenosového kanála. Použitím adaptívnych algoritmov sa dajú modelovať dynamické komunikačné systémy, ktoré používajú OFDM a OFDMA MIMO technológie. Algoritmy podporujú celočíselnú dátovú aritmetiku a generujú C, alebo HDL kód. Na nasledujúcom obrázku Obr. 21 je názorná ukážka ako vyzerá komunikačný toolbox a ktoré komponenty sa v ňom nachádzajú.



Obr. 21 Ukážka komunikačného nástroja Communication System Toolbox

9 TCM SYSTÉM V PROGRAME SIMULINK

Tak ako je spomenuté v kapitole 8, TCM systém je zostavený v programe Simulink, ktorý slúži ku simulácii a modelovaniu dynamických systémov. Pre praktickú realizáciu tejto práce je použité viacero blokov z Communication System Toolbox. Všetky bloky majú vlastnú štruktúru, ktorú navonok nie je vidno. Z toho dôvodu sa venuje nasledujúca časť práce popisu použitých blokov v systéme TCM a ich samotnému nastaveniu.

9.1 Popis blokov schémy

V schéme TCM je použitých celkovo 16 blokov. Každý blok má svoje špecifické nastavenia. Jednotlivo od vysielania až po prijímanie bitov sú použité nasledovné bloky.

9.1.1 Random Integer Generator block

Blok generuje rovnomerne rozložené náhodné celé čísla v rozsahu $[0, M-1]$, kde M je M – rozmerné číslo podľa definície v dialógovom okne. M – rozmerné číslo môže byť buď skalárne, alebo vektorové číslo. Pokiaľ sa jedná o skalárne, všetky výstupné náhodné veličiny sú nezávislé a identicky distribuované. V prípade, že číslo M je vektor, potom je jeho dĺžka rovná počtu počiatočných vstupov. V tomto prípade má každý výstup svoj vlastný rozsah výkonov. V prípade, že parameter počiatočný vstup je konštanta, potom je výstup z bloku možné opakovať.

9.1.2 Scope

V blokovej schéme TCM je použitý blok Scope, iba ako informatívna zložka, pomocou ktorej sa získava tvar a priebeh signálu. Pre túto vlastnosť nie je potrebné v bloku nič nastavovať. Samozrejme je tu možnosť nastaviť množstvo parametrov ako je typ nameraných dát, grafické vlastnosti bloku, typ signálu a pod.

9.1.3 Integer to Bit Converter

Blok Integer to Bit Converter vytvára z bitov na vstupe vektor celých čísiel na výstupe. Číslo M určuje koľko bitov sa má priradiť jednotlivým vektorom na výstupe. V tomto bloku sa dajú nastaviť hodnoty so znamienkom aj bez znamienka. Tento blok prijíma stĺpcový vektor vstupného signálu s celočíselným násobkom, ktorý sa rovná

hodnote, ktorá je zadaná pre počet bitov na celé číslo tohto parametra, ktorý musí byť celé číslo v rozmedzí 1 až 32.

9.1.4 Discrete – Time Scatter Plot Scope

Blok zobrazuje body jednotlivého modulovaného signálu, čiže konštelčné diagramy. Tiež môže zobrazovať skreslenie signálu, či impulznú charakteristiku. Tento blok má jeden vstupný port a akceptuje stĺpcový vektor, či komplexné skalárne čísla vstupného signálu.

9.1.5 AWGN Channel

Kanál AWGN pridáva biely Gaussov šum na vstupný signál. Ak je signál vstupujúci do kanála v reálnej rovine, blok pridáva Gaussov šum a vystupuje z neho reálny signál, v prípade komplexných čísel je to podobné a výstupom je signál v podobe komplexných čísel. Vzorkovacia perióda f_s sa už v samotnom kanále nemení a zostáva rovnaká ako bola prijatá na vstupe. V kanále sa dajú nastaviť hodnoty ako pomer E_b/N_0 , E_s/N_0 , SNR, počet bitov na symbol, silu vstupného signálu udávanú v jednotkách Ω , či rýchlosť prenosu.

9.1.6 Error Rate Calculation

Tento blok porovnáva vstupné dáta z vysielacza s výstupnými dátami prijímača. Priebežne vypočítava chybovosť BER a to pomocou delenia celkového počtu vyslaných bitov s celkovým počtom prijatých bitov v prijímači. Použitím tohto bloku je možné počítat chybovosť symbolov alebo bitov. V TCM systéme sa nastavovali v tomto bloku, hlavne parametre, kedy sa má proces počítania ukončiť. Simulácia sa zastaví v okamžiku kedy bolo odoslaných 40000 vzoriek, alebo bolo prijatých 10000 chýb.

9.1.7 Display

Blok Display zobrazuje iba informatívny počet meranej veličiny, v prípade systéme TCM to je bitová chybovosť BER, počet prenesených vzoriek a počet vzniknutých chýb.

9.1.8 Sink

Tento blok exportuje namerané dáta do súboru v programe MATLAB. Takto namerané dáta sú určené k ďalšiemu spracovaniu.

9.1.9 Convolutional Encoder

Hlavnou úlohou tohto bloku je kódovanie sekvencie binárných vstupov na sekvenciu binárných výstupov, podľa generačného polynómu, ktorý sa zadáva v nastaveniach bloku. Polynóm sa vytvára pomocou funkcie `poly2trellis`, v ktorej čísla sú zadávané v oktálovej podobe. Použitý konvolučný kodér v TCM systéme má tvar `poly2trellis([5 4],[23 35 0; 0 5 13])`, ktorý je bližšie popísaný v kapitole 9.2.

9.1.10 Viterbi Decoder

Tento blok dekoduje prijímané vstupné bloky na výstupné bity. Pre vyšší výkon môže tento blok spracovávať niekoľko symbolov súčasne. Podobne ako konvolučný kodér, je aj Viterbiho dekodér popísaný rovnakým generačným polynómom `poly2trellis([5 4],[23 35 0; 0 5 13])`.

9.1.11 Modulátory/Demodulátory BPSK, QPSK, 8PSK

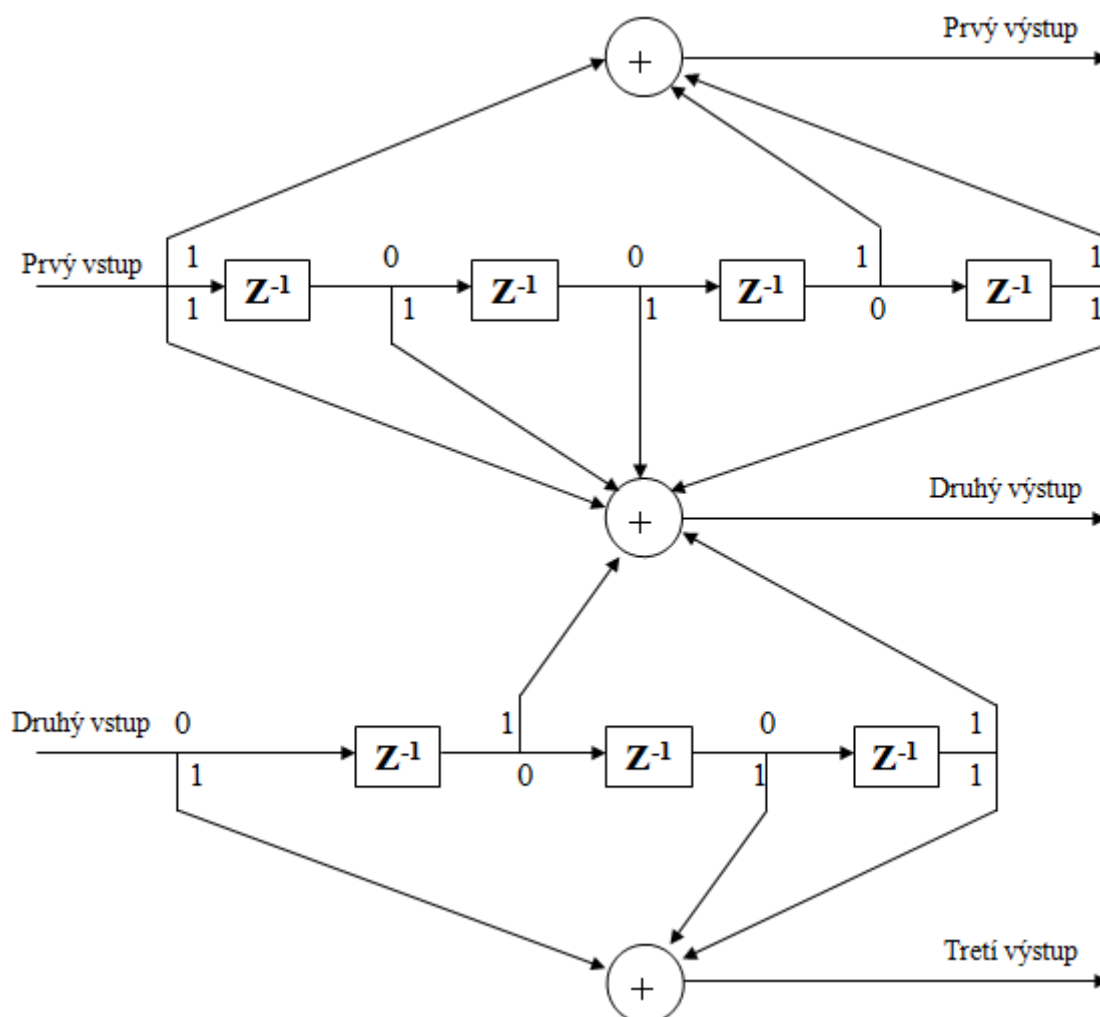
Rozdiel medzi jednotlivými typmi modulátorov, či demodulátorov je v konštelačnom diagrame. Modulovanie signálu je bližšie popísané v teoretickej časti, v kapitole 5. Konštelačné diagrame jednotlivých modulácií sú znázornené na obrázkoch *Obr. 27*, *Obr. 32* a *Obr. 37*.

9.2 Použitý konvolučný kodér pre TCM systém

Konvolučný kodér s funkciou `poly2trellis([5 4],[23 35 0; 0 5 13])`, použitý v TCM systéme je znázornený na nasledujúcom obrázku *Obr. 22*. Výber kodéra bol podmienený podľa schopnosti zabezpečenia pred chybovosťou pre daný systém. Konvolučný kodér používa rýchlosť kódovania $r_c = 2/3$ a jeho obmedzujúca dĺžka je $K = 2$, ktorý vyplýva z dvoch vstupov systému. Jednotlivé prvky tohto vektora uvádzajú počet bitov uložených v každom z dvoch posuvných registrov. Čísla `[5 4]` určujú číslo $K - 1$ pre jednotlivé posuvné registre. Generačné polynómy pre vrchný posuvný register sú:

$$\begin{aligned} g_0 &= 1 + x^3 + x^4, \\ g_1 &= 1 + x + x^2 + x^4. \end{aligned}$$

V binárnom vyjadrení sa dá napísať tiež `[1 0 0 1 1; 1 1 1 0 1]`, čiže v oktálovej sústave vyjadruje tento binárny zápis čísla 23 a 35. Obdobne to je aj v druhom posuvnom registri.



Obr. 22 Schéma konvolučného kodéra pre TCM systém

9.3 TCM systém s moduláciou BPSK

Jeden z overovaných systémov pre chybovosť BER počas zväčšovania pomeru E_b/N_0 je kombinácia vyššie spomínaného konvolučného kodéra a modulácie BPSK. Pre porovnanie je použitý totožný systém, avšak bez kódovania. V nasledujúcich tabuľkách *Tab. 1* a *Tab. 2* sú uvedené namerané hodnoty chybovosti BER pre moduláciu BPSK v rozmedzí 4 – 8 dB a taktiež podrobnejšie v oblasti 4 – 6 dB, ktorá sa javí ako zaujímavá.

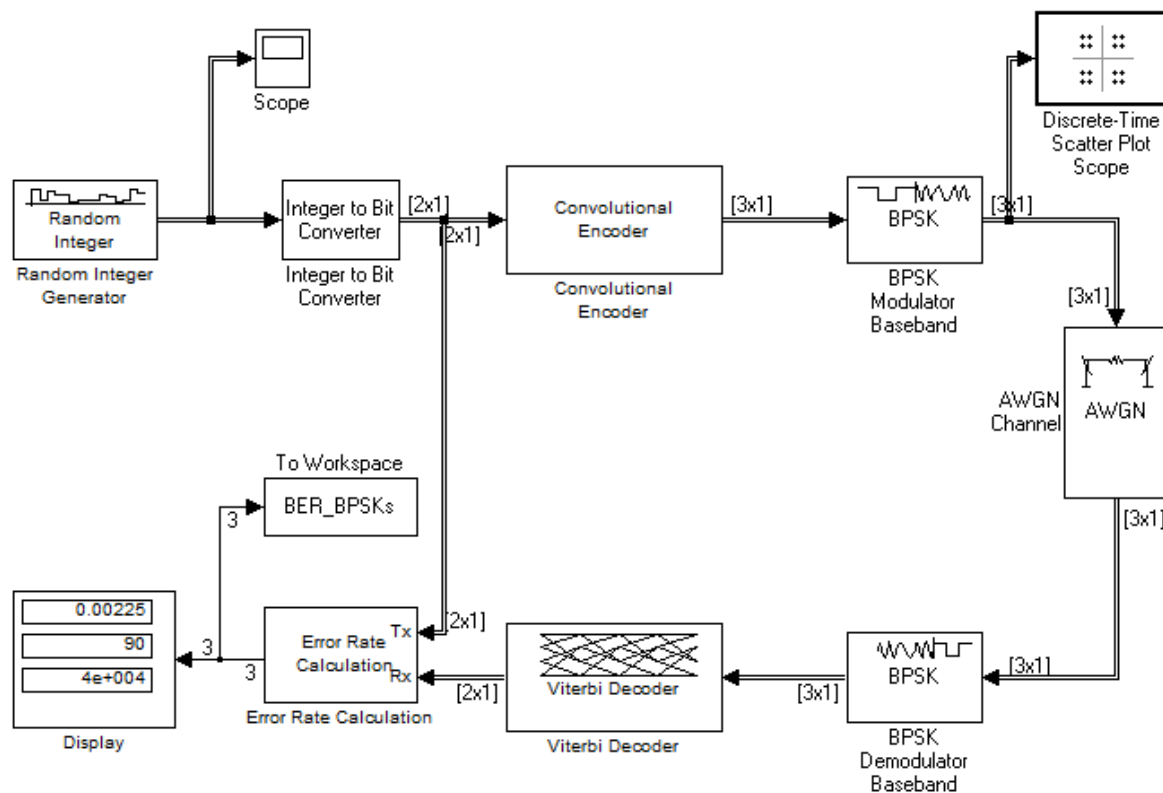
BPSK			
s kódovaním		bez kódovania	
E_b / N_0	BER	E_b / N_0	BER
4	0,09720	4	0,02608
4,5	0,05190	4,5	0,01980
5	0,02450	5	0,01490
5,5	0,00680	5,5	0,01065
6	0,00225	6	0,00760
6,5	0,00023	6,5	0,00478
7	0,00005	7	0,00333
7,5	0,00003	7,5	0,00143
8	0,00001	8	0,00085

Tab. 1 Namerané hodnoty BER pre moduláciu BPSK

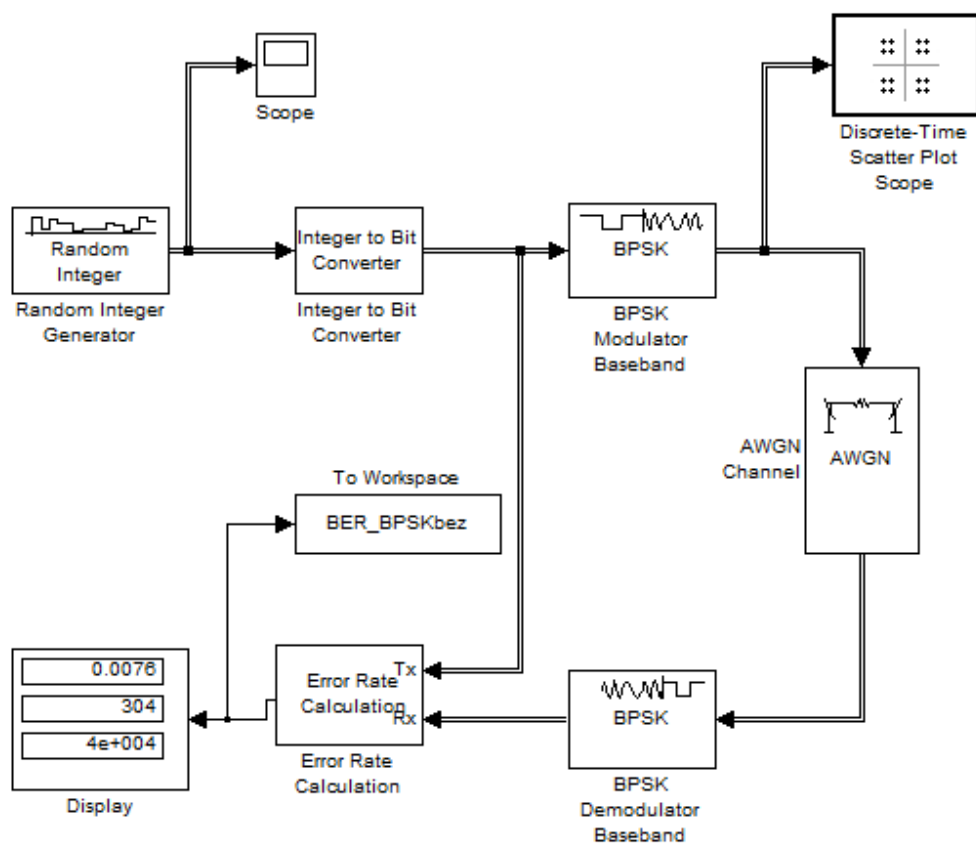
BPSK (oblasť 4-6 dB)			
s kódovaním		bez kódovania	
E_b / N_0	BER	E_b / N_0	BER
4	0,09717	4	0,02608
4,2	0,07512	4,2	0,02340
4,4	0,05693	4,4	0,02073
4,6	0,04325	4,6	0,01885
4,8	0,03513	4,8	0,01675
5	0,02450	5	0,01490
5,2	0,01495	5,2	0,01305
5,4	0,00993	5,4	0,01148
5,6	0,00485	5,6	0,01000
5,8	0,00290	5,8	0,00845
6	0,00225	6	0,00760

Tab. 2 Podrobnejšie meranie modulácie BPSK v oblasti 4 – 6 dB

Na nasledujúcom obrázku Obr. 23 je znázornené blokové schéma zapojenia modulácie BPSK s kódovaním v programe Simulink. Pre porovnanie je uvedená schéma modulácie BPSK bez kódovania znázornená na obrázku Obr. 24.

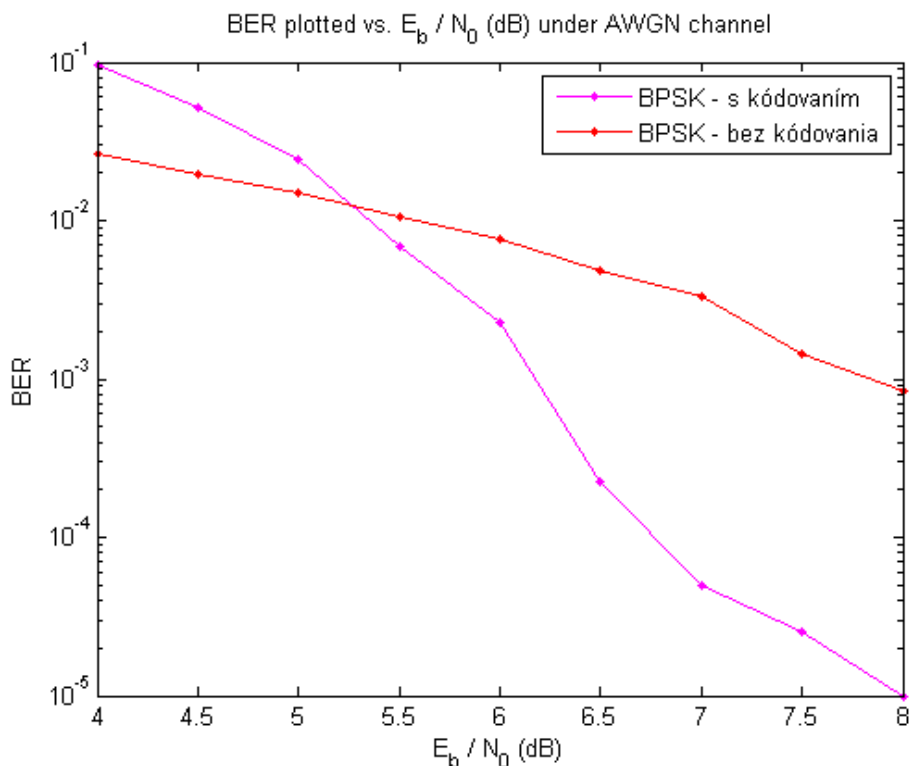


Obr. 23 Blokové schéma zapojenia modulácie BPSK s konvolučným kódrom



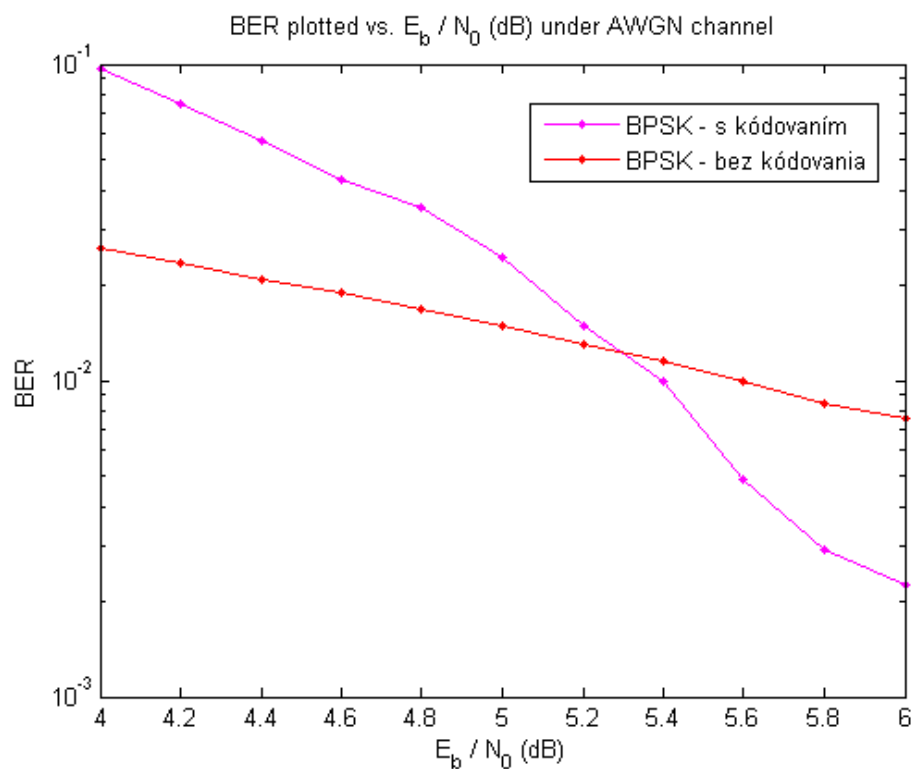
Obr. 24 Blokové schéma zapojenia modulácie BPSK bez kódovania

Pomocou vyššie uvedených blokových schém boli zaznamenané namerané hodnoty BER pri zvyšovaní pomeru E_b/N_0 pre moduláciu BPSK s kódovaním aj bez kódovania. Tieto hodnoty sú zaznamenané pomocou skriptu v programe MATLAB do jedného grafu na obrázku *Obr. 25*, kde sa pomer signálu k šumu E_b/N_0 zvyšuje po 0,5 dB v rozmedzí 4 až 8 dB.

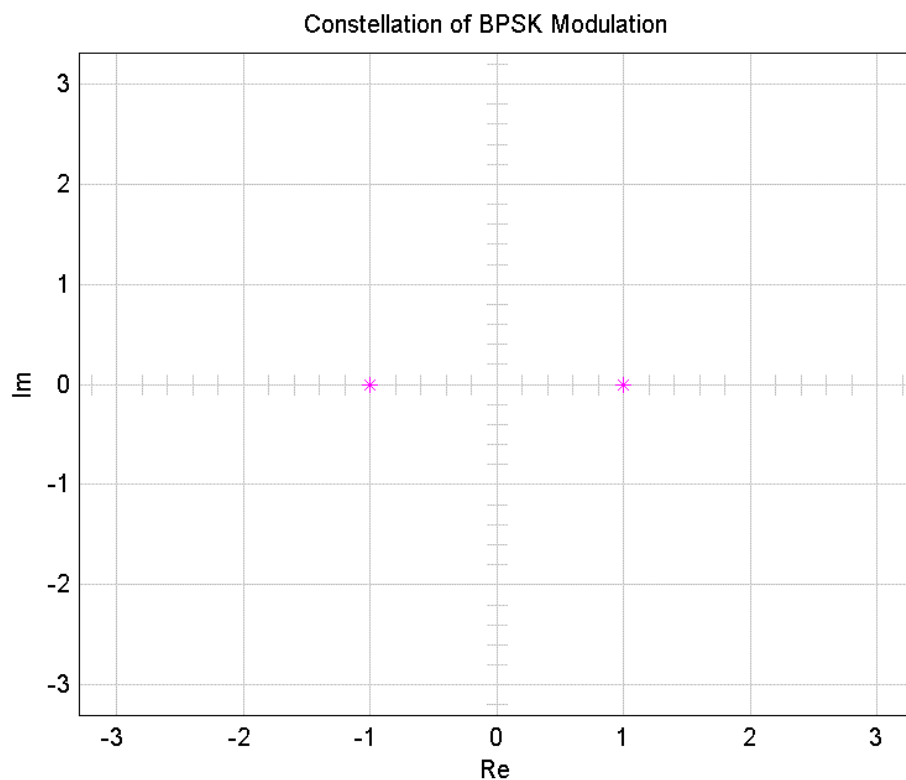


Obr. 25 Chybovosť pre moduláciu BPSK s kódovaním aj bez kódovania

Z grafu vyplýva, že pre nižšie hodnoty pomeru signálu k šumu E_b/N_0 vykazuje modulácia bez kódovania lepšiu chybovosť, avšak čím sa tento pomer zvyšuje, kódovaná modulácia začína byť oveľa výhodnejšia. Na nasledujúcom grafe *Obr. 26* je bližšie sledované rozmedzie 4 – 6 dB. Táto oblasť je vybraná pre lepšie znázornenie momentu, kedy sa krivky pretínajú. Konštelačný diagram je znázornený na obrázku *Obr. 27*.



Obr. 26 Chybovosť BER pre moduláciu BPSK s kódovaním aj bez kódovania pre oblasť 4 – 6 dB



Obr. 27 Konštelačný diagram modulácie BPSK

9.4 TCM systém s moduláciou QPSK

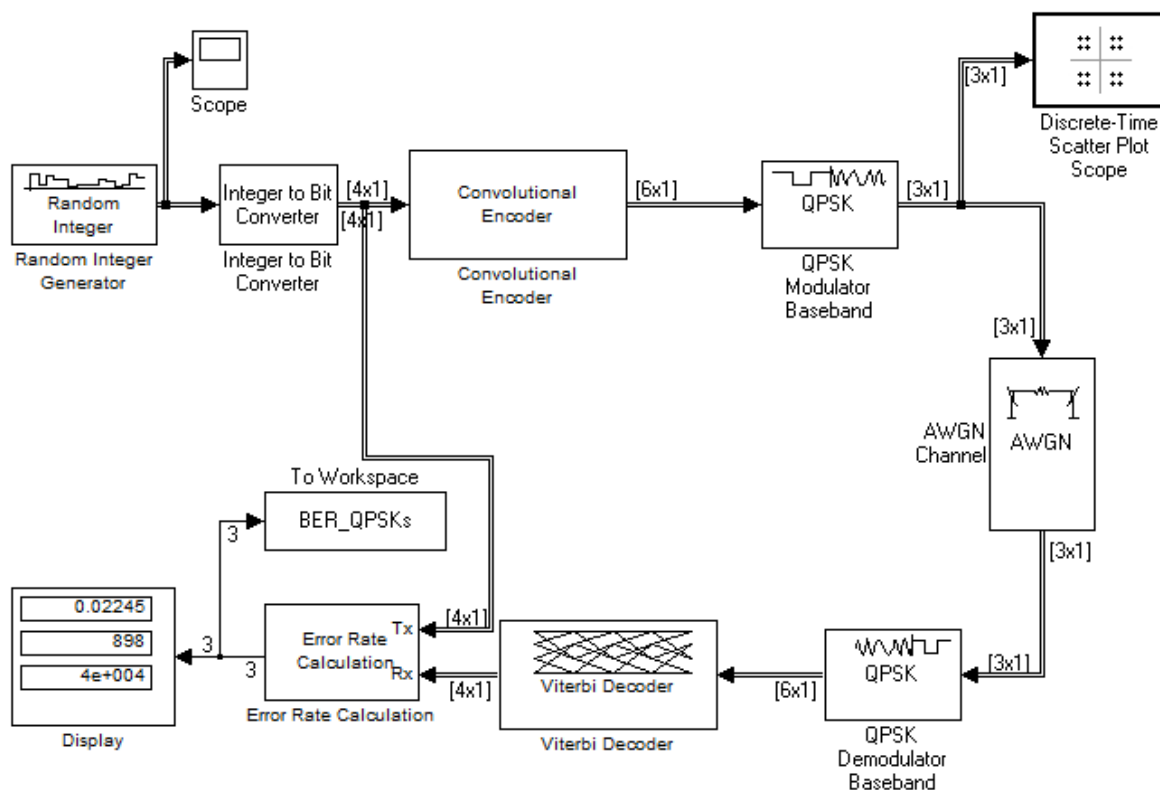
Ďalšia použitá modulácia s konvolučným kódrom v TCM systéme je QPSK. Podobne ako v predchádzajúcom príklade je aj v tomto modeli porovnávaný systém s aj bez kódovania. Okrem zmeny modulácie sa v systéme nič nemení, preto je postup spracovania rovnaký. V nasledujúcich dvoch tabuľkách *Tab. 3* a *Tab. 4* sú namerané hodnoty modulácie QPSK s kódovaním a bez kódovania.

QPSK			
s kódovaním		bez kódovania	
E_b / N_0	BER	E_b / N_0	BER
4	0,21450	4	0,03935
4,5	0,14670	4,5	0,03040
5	0,08740	5	0,02105
5,5	0,04740	5,5	0,01473
6	0,02245	6	0,01025
6,5	0,00720	6,5	0,00775
7	0,00355	7	0,00500
7,5	0,00135	7,5	0,00308
8	0,00010	8	0,00195

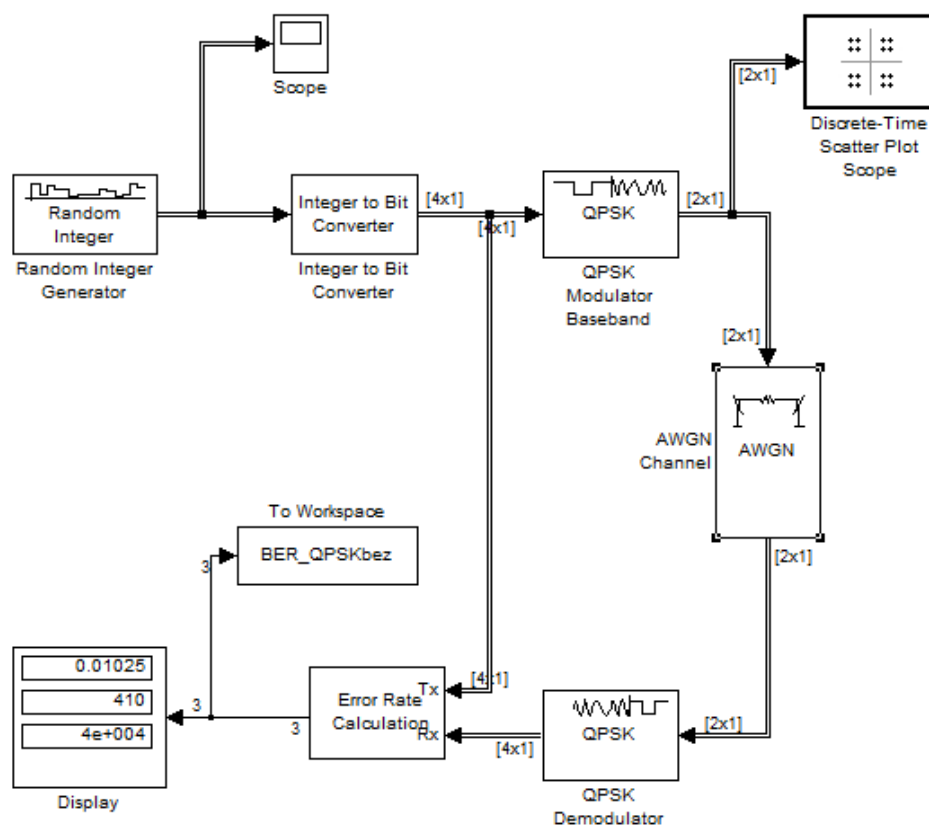
Tab. 3 Namerané hodnoty BER pre moduláciu QPSK

QPSK (oblasť 4-6 dB)			
s kódovaním		bez kódovania	
E_b / N_0	BER	E_b / N_0	BER
4	0,21450	4	0,03760
4,2	0,18580	4,2	0,03461
4,4	0,16010	4,4	0,03058
4,6	0,13030	4,6	0,02801
4,8	0,10490	4,8	0,02438
5	0,08743	5	0,02105
5,2	0,06828	5,2	0,01847
5,4	0,05393	5,4	0,01603
5,6	0,04125	5,6	0,01378
5,8	0,02825	5,8	0,01180
6	0,02245	6	0,01025

Tab. 4 Podrobnejšie meranie modulácie QPSK v oblasti 4 – 6 dB

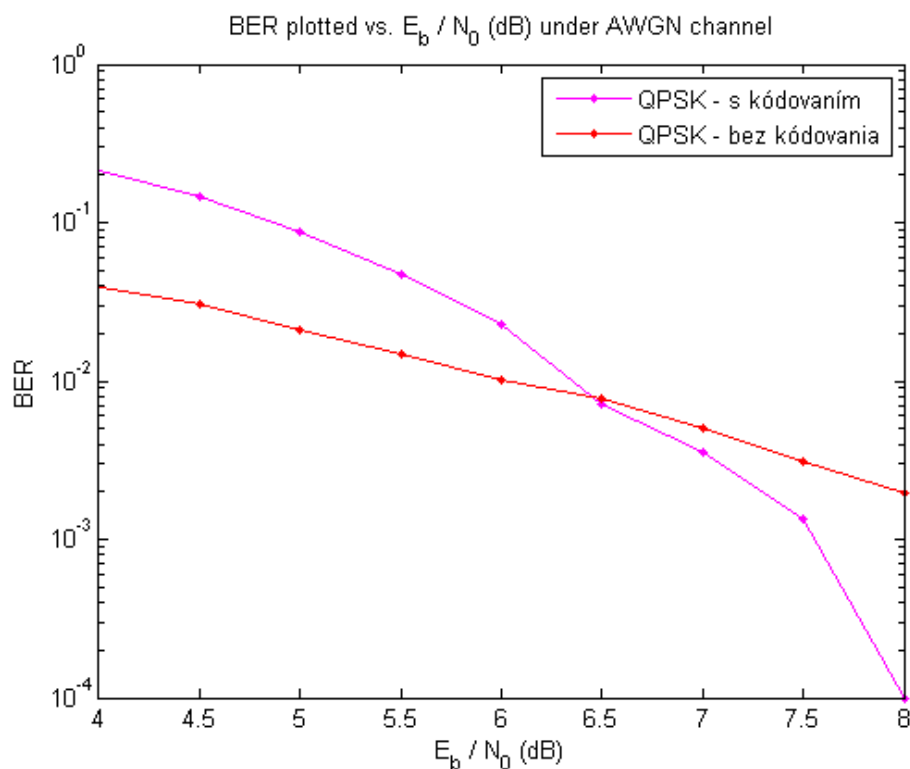


Obr. 28 Blokové schéma pre zapojenie modulácie QPSK s konvolučným kódrom



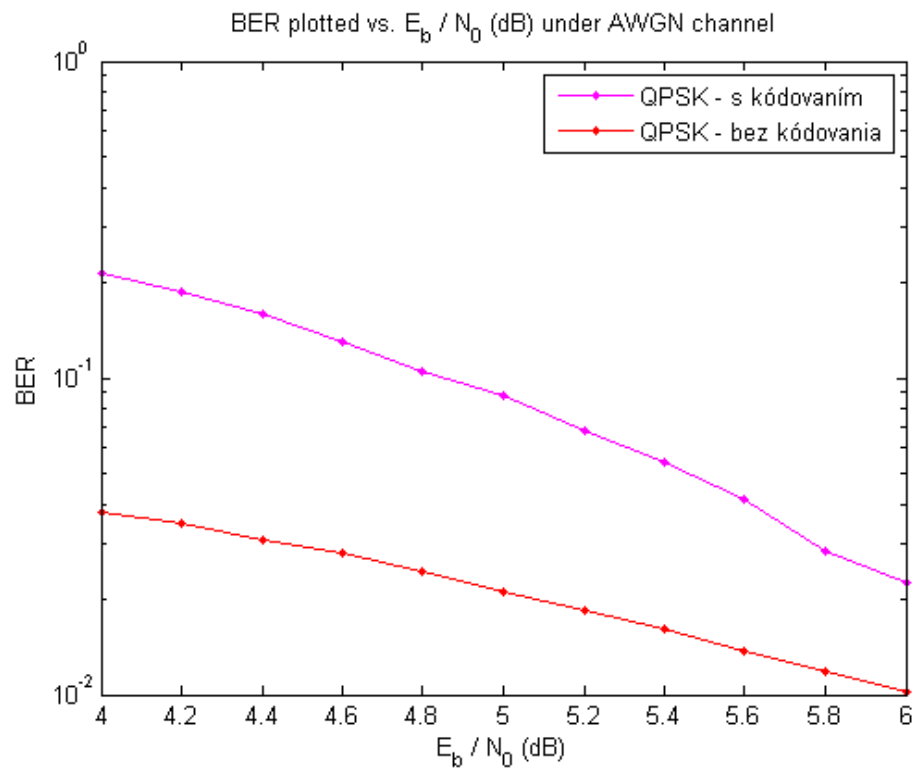
Obr. 29 Blokové schéma pre zapojenie modulácie QPSK bez kódovania

Blokové schémy na predchádzajúcich obrázkoch *Obr. 28* a *Obr. 29* znázorňujú zapojenie pomocou blokov v programe Simulink pre moduláciu QPSK s kódovaním a následne aj pre rovnakú moduláciu, ale bez použitia kódovania. Systém využívajúci QPSK modulácie vykazuje horšie hodnoty chybovosti BER, pretože Euklidova vzdialenosť medzi jednotlivými nosnými frekvenciami je menšia. Pomocou tejto modulácie je možné preniesť väčšie množstvo bitov, pri takmer rovnakej šírke pásma. Rozdiel BER medzi kódovanou a nekódovanou QPSK vyplýva z obrázku *Obr. 30*, ktorý naznačuje, že pri použití kodéra je znázornená závislosť BER na E_b/N_0 obdobná ako pri využití modulácie BPSK.

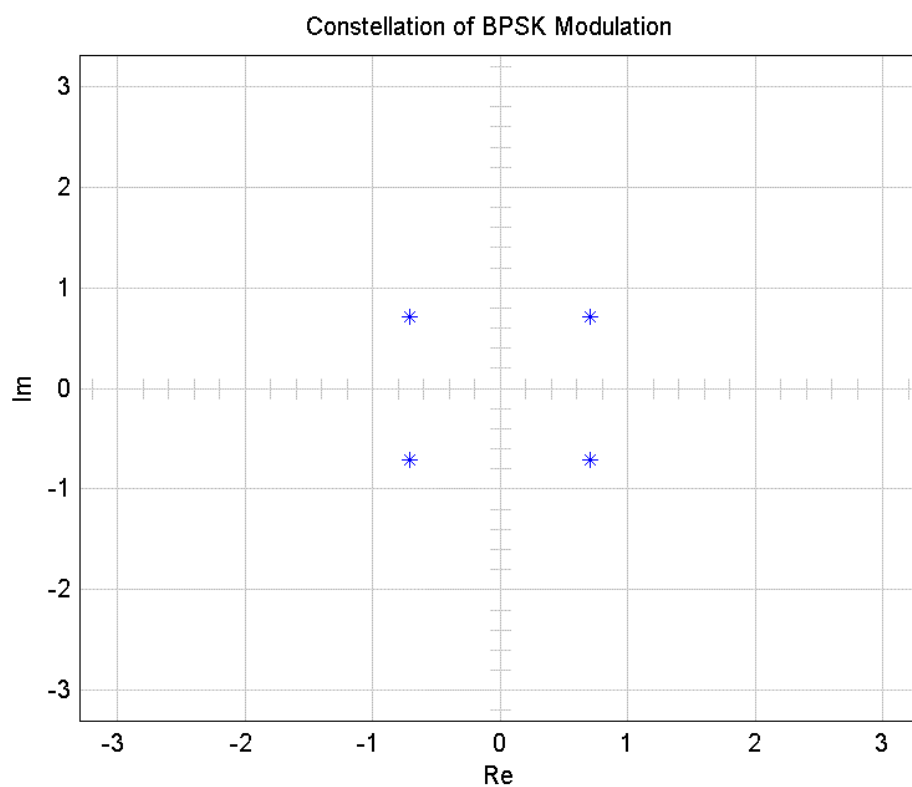


Obr. 30 Chybovosť pre moduláciu QPSK s kódovaním aj bez kódovania

Obdobne ako v predchádzajúcich prípadoch je u modulácie QPSK ďalej podrobne skúmaná oblasť 4 – 6 dB, ktorá je zobrazená v grafe *Obr. 31*. Tiež je možné vidieť, že priesečník kriviek sa posunul približne na hodnotu 6,5 dB, čo znamená, že moduláciu QPSK s použitím konvolučného kódovania je výhodné používať pre signály, kde je odstup signálu od šumu E_b/N_0 väčší ako spomínaná hodnota. Pre túto moduláciu je ďalej spracovaný konštelačný diagram, na ktorom je zobrazené zmenšenie Euklidovej vzdialenosti oproti modulácii BPSK.



Obr. 31 Chybovosť BER pre moduláciu QPSK s kódovaním aj bez kódovania pre oblasť 4 – 6 dB



Obr. 32 Konštelačný diagram modulácie QPSK

9.5 TCM systém s moduláciou 8-PSK

Treťou a zároveň poslednou meranou moduláciou v systéme TCM je 8PSK. Postup spracovávanía je pri tejto modulácii totožný ako pre predchádzajúce modulácie v kapitolách 9.3 a 9.4. Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľkách *Tab. 5* a *Tab. 6*.

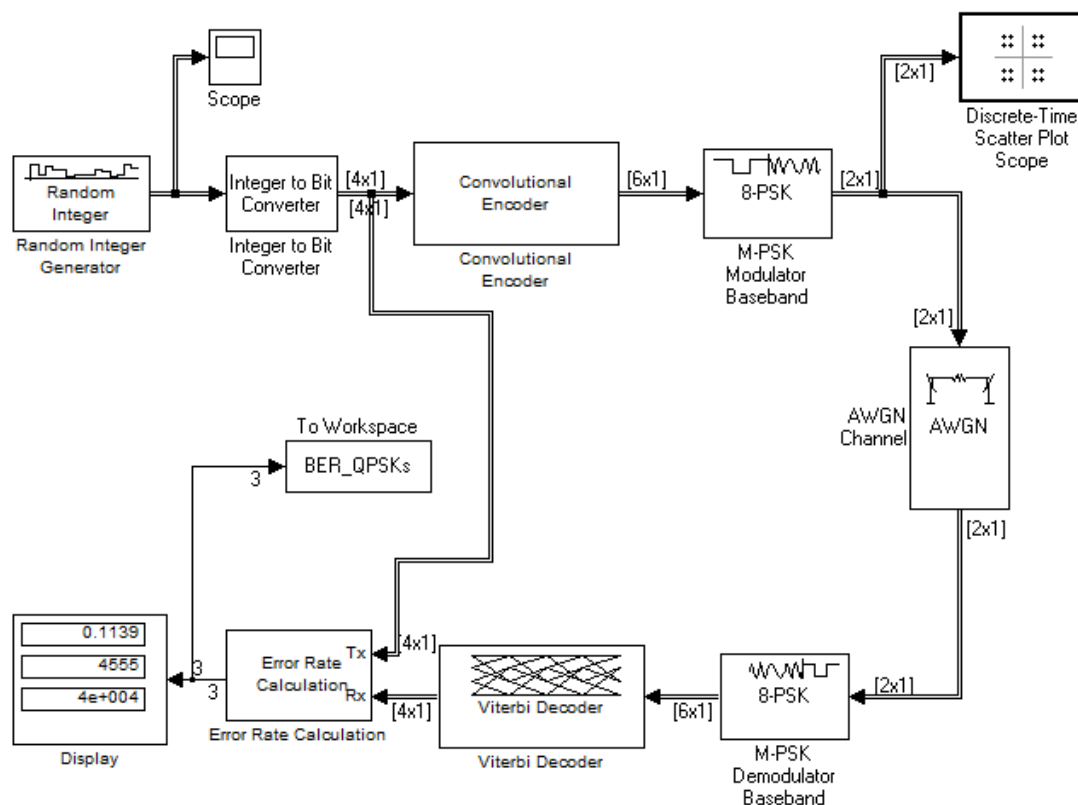
8PSK			
s kódovaním		bez kódovania	
E_b / N_0	BER	E_b / N_0	BER
4	0,29790	4	0,11470
4,5	0,25690	4,5	0,10040
5	0,20490	5	0,08936
5,5	0,15920	5,5	0,07752
6	0,11390	6	0,06551
6,5	0,07848	6,5	0,05483
7	0,04568	7	0,04500
7,5	0,02495	7,5	0,03398
8	0,01365	8	0,02715

Tab. 5 Namerané hodnoty BER pre moduláciu 8PSK

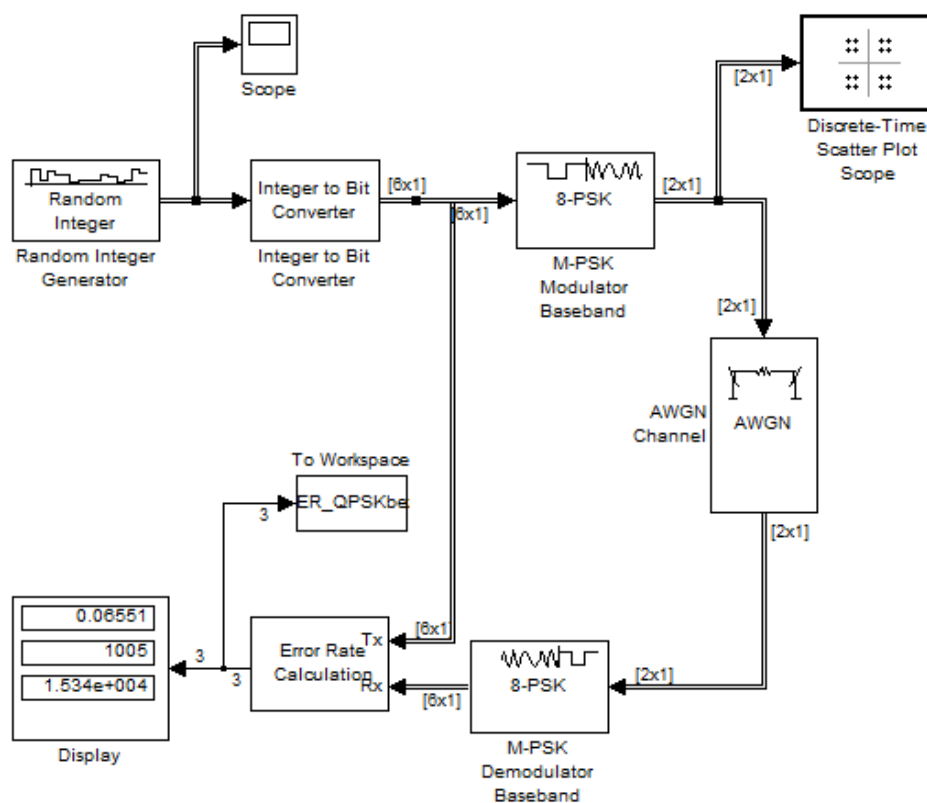
8PSK (oblasť 4-6 dB)			
s kódovaním		bez kódovania	
E_b / N_0	BER	E_b / N_0	BER
4	0,2979	4	0,11470
4,2	0,2815	4,2	0,11110
4,4	0,2670	4,4	0,10480
4,6	0,2507	4,6	0,09711
4,8	0,2240	4,8	0,09363
5	0,2049	5	0,08936
5,2	0,1915	5,2	0,08486
5,4	0,1692	5,4	0,07930
5,6	0,1435	5,6	0,07410
5,8	0,1325	5,8	0,06929
6	0,1139	6	0,06551

Tab. 6 Podrobnejšie meranie modulácie 8PSK v oblasti 4 – 6 dB

V ďalšom odseku sú ukážky blokových schém, viditeľne sa mení iba typ modulácie, ale tiež je potrebné zmeniť typ vysielaného signálu. To znamená, že sa musí

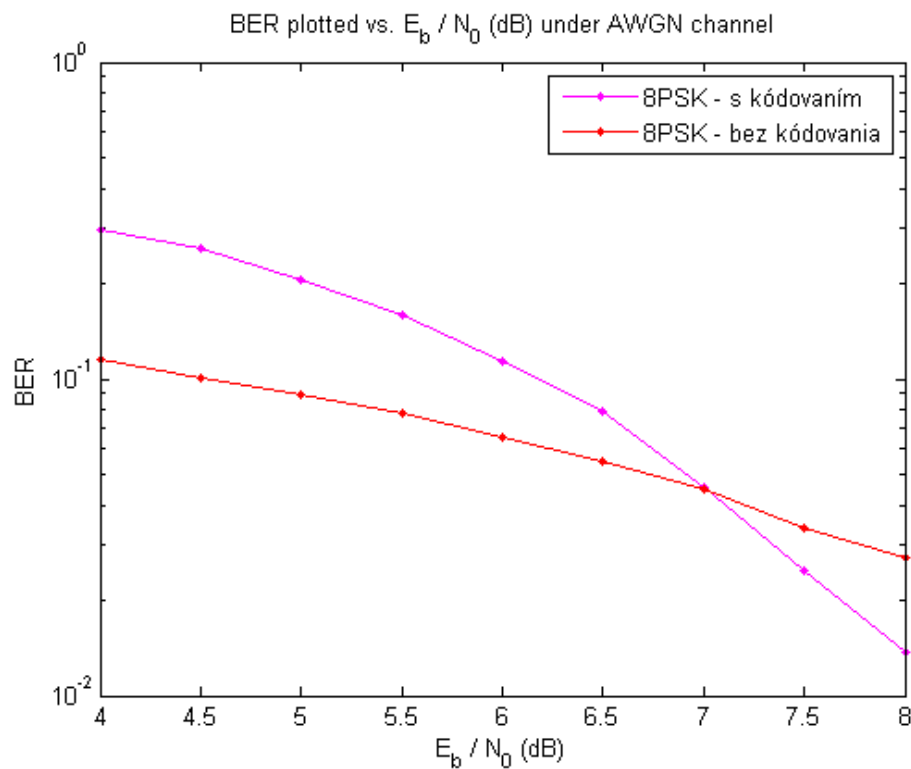


Obr. 33 Blokové schéma pre zapojenie modulácie 8PSK s konvolučným kódrom

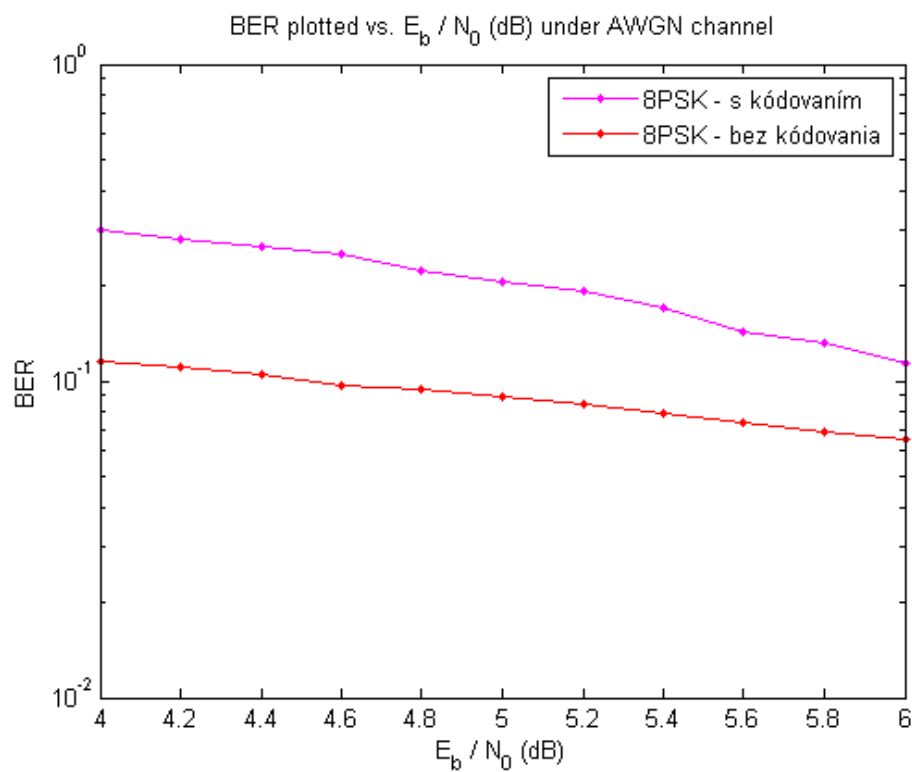


Obr. 34 Blokové schéma pre zapojenie modulácie QPSK bez kódovania

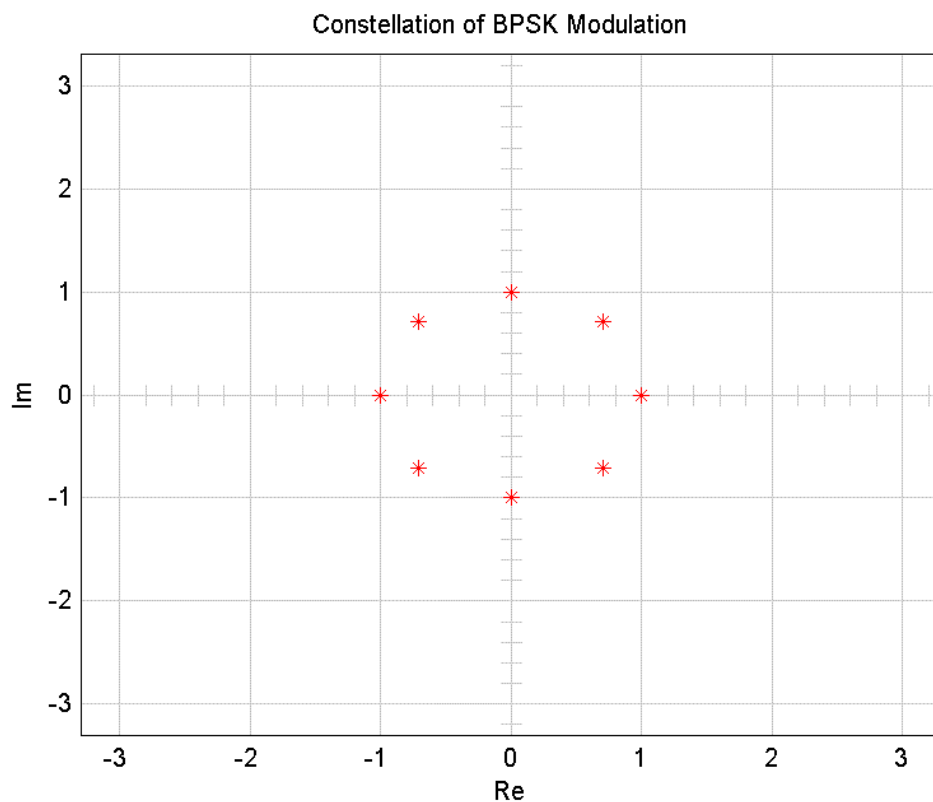
meniť číslo M a to tak, aby bol konvolučný kodér schopný toto číslo prijať. Význam čísla M a jeho nastavenie je popísané v kapitole 9.1.3. Okrem zmeny typu signálu sa mení aj počet bitov na symbol v bloku AWGN. Bližší postup je popísaný v kapitole 9.1.5. Grafy na ďalších obrázkoch *Obr. 35* a *Obr. 36* znázorňujú chybovosť BER pre moduláciu 8PSK s konvolučným kodérom i bez neho. Z grafu *Obr. 35* jasne vyplýva, že nekódovaná modulácia 8PSK zo začiatku síce vykazuje menšiu chybovosť, ale pri väčšom pomere odstupu signálu od šumu E_b/N_0 je kódovaná modulácia 8PSK výhodnejšia. Na obrázku *Obr. 37* je znázornený konštelačný diagram modulácie 8PSK.



Obr. 35 Chybovosť pre moduláciu 8PSK s kódovaním aj bez kódovania



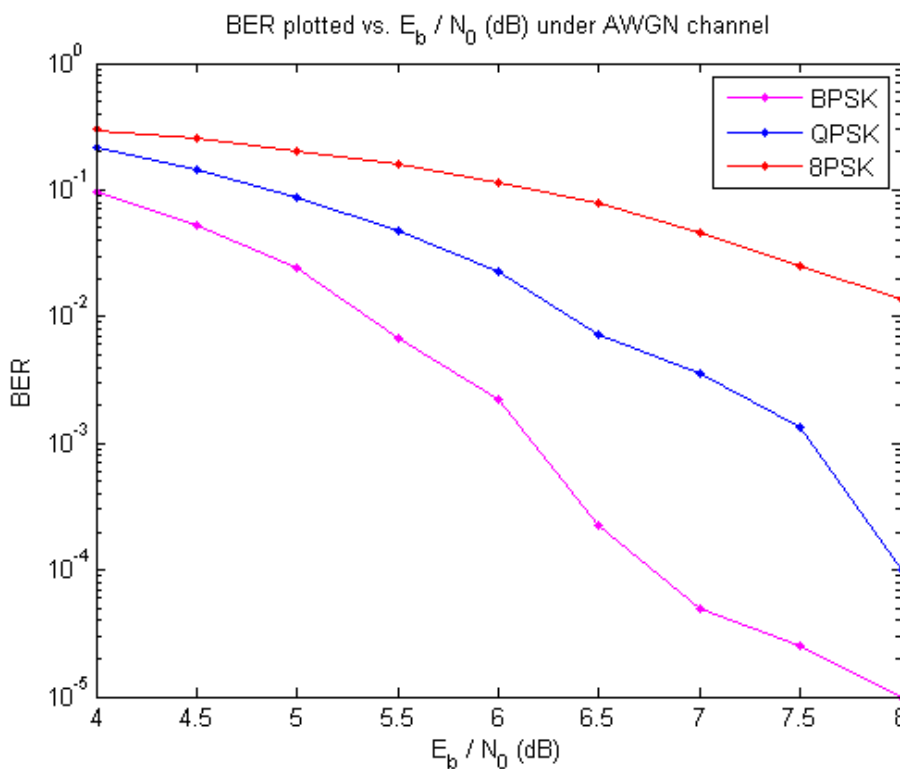
Obr. 36 Chybovosť BER pre moduláciu 8PSK s kódovaním aj bez kódovania pre oblasť 4 – 6 dB



Obr. 37 Konštelačný diagram modulácie 8PSK

9.6 Porovnanie chybovosti BER modulácií BPSK, QPSK a 8PSK

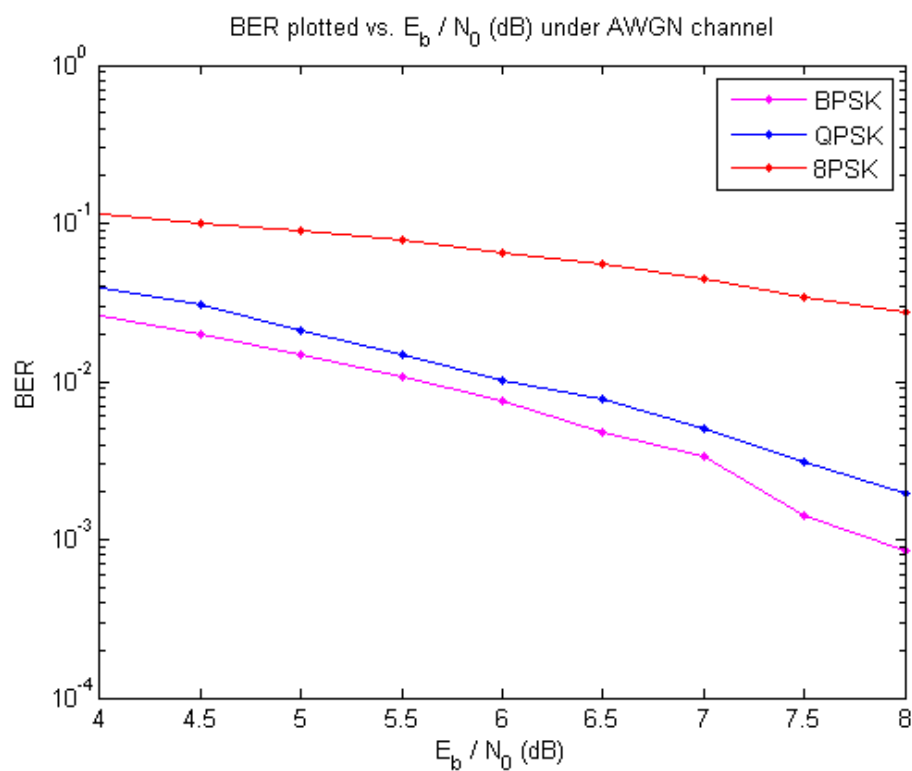
Na nasledujúcom grafe *Obr. 38* sú porovnané výsledky troch typov modulácií BPSK, QPSK a 8PSK, využívajúce konvolučné kanálové kódovanie. Zo získaných výsledkov znázornených v grafe *Obr. 38* vyplýva, že pri zvyšovaní odstup signálu od šumu, chybovosť BER pri modulácii s menším počtom stavov konverguje rýchlejšie.



Obr. 38 Porovnanie chybovosti BER modulácií BPSK, QPSK a 8PSK s použitím konvolučného kodéra

Najmenšiu chybovosť BER vykazuje modulácia BPSK avšak je nutné si uvedomiť, že modulácia 8PSK dokáže pri nezmenenej bitovej rýchlosti preniesť väčšie množstvo bitov za sekundu pri takmer nezmenenej šírke kmitočtového pásma. Z čoho vyplýva, že šírka kmitočtového pásma zostáva nezmenená. Ako je vidieť na ďalšom grafe *Obr. 39*, porovnaním kriviek BPSK a QPSK dochádza iba k nepatrne väčšej chybovosti. Táto závislosť vychádza zo skutočnosti, že Euklidova vzdialenosť medzi jednotlivými bodmi pri modulácii je ešte stále dostatočná, a tak vykazuje porovnateľnú chybovosť. Naopak pri

modulácii 8PSK je chybovosť príliš vysoká, čo zamedzuje použitie tejto modulácie bez ochranného kódovania.



Obr. 39 Porovnanie chybovosti BER modulácií BPSK, QPSK a 8PSK bez použitia konvolučného kódéra

ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo popísať kódované modulácie, zhodnotiť kľúčové parametre Trellis kódovej modulácie (TCM), šírku kmitočtového pásma TCM pre kódové zabezpečenie v kombinácii s niekoľkými konštelačnými diagramami modulácií a navrhnúť TCM systém s následným vyhodnotením kľúčových parametrov TCM.

Teoretická časť práce obsahuje popis obecnej schémy komunikačného kanálu a všetky časti potrebné pre prenos dát. Pre lepšiu prehľad je v tejto časti práce zahrnuté základné rozdelenie modulácií. Ďalej sú v teoretickej časti zahrnuté základné poznatky ohľadom vlastností parametrov modulácií, ktorými sú napríklad šírka pásma, odstup signálu od šumu a chybovosť. Pomocou nich bolo možné previesť hodnotenie komunikačného kanálu. Pre zlepšenie prenosu tohto kanálu bolo používané konvolučné kódovanie a ako modulátory boli vybrané BPSK, QPSK a 8PSK.

V praktickej časti sú zahrnuté štyri kapitoly, ktoré sa postupne zaoberajú témou mriežkovo kódovanej modulácie, konvolučným kódovaním, programom MATLAB Simulink a následne navrhnutím systému TCM. Kapitola mriežkovo kódovaná modulácia TCM vysvetľuje princíp prenosu signálu komunikačným kanálom pomocou tejto modulácie. Na túto kapitolu nadväzujú poznatky z oblasti konvolučného kódovania.

TCM systém bol navrhnutý v programe Simulink. Pre objasnenie práce s blokmi obsiahnutými v skupine nástrojov Communication System Toolbox sú popísané jednotlivé použité časti systému. V Simulinku bolo vytvorených celkovo šesť schém, pomocou ktorých bolo prevedené meranie chybovosti BER v závislosti na meniacom sa pomere odstup signálu od šumu E_b/N_0 . Pomocou nameraných hodnôt bolo možné vyhodnotiť, kedy je výhodnejšie použiť moduláciu s kódovaním, alebo bez kódovania. Z vykreslených grafov vyplýva, že pri vyšších hodnotách pomeru odstup signálu od šumu E_b/N_0 sú výhodnejšie systémy s konvolučným kodérom. Modulácia BPSK vykazovala oproti ostatným moduláciám najmenšiu chybovosť BER, avšak tento jav bol spôsobený dostatočnou Euklidovou vzdialenosťou medzi jej stavmi. Šírka kmitočtového pásma pri meniacich sa moduláciách bola takmer nemenná, čo je najväčšou výhodou pri použití modulácie TCM.

CONCLUSION

The aim of this thesis is to describe the coded modulation, evaluate main parameters of Trellis coded modulation (TCM), bandwidth of TCM for code security combined with several constellation diagrams of modulation.

The theoretical part of this thesis describes the general scheme of the communication channel and all necessary parts for the data transfer. For a better overview of the communication channel is included the basic structure of modulations. The theoretical part also contains knowledge about the properties of modulation, such as bandwidth, signal-to-noise ratio and error rate. To improve the transmission of this channel had been used convolutional coder and modulators BPSK, QPSK and 8PSK.

The practical part includes four chapters which deals with the topic of Trellis coded modulation, convolution coding, program MATLAB Simulink and design of the TCM. The chapter of Trellis coded modulation (TCM) explains the signal transmission through the communication channel with modulation and includes findings of the convolution coding.

TCM system was designed in Simulink program. For clarification work with blocks contained in the group tools Communication System Toolbox, individual parts of the system are described. In Simulink was created six different schemes, by which was made measurements of BER according to the changing of signal to noise ratio E_b/N_0 . Using the measured values can be evaluated when is more convenient to use modulation coding, or no coding. The plotted graphs show that at higher signal to noise ratio E_b/N_0 are preferable systems with convolutional encoder. BPSK modulation over others showed the slightest error rate BER, but this phenomenon was caused sufficient Euclidean distance between its states. BPSK modulation over others showed the slightest error rate BER, but this phenomenon was due, because a Euclidean distance between the states is sufficient. Bandwidth at varying modulations was almost constant, what is the biggest advantage of modulations TCM.

ZOZNAM POUŽITÉJ LITERATURY

- [1] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.
- [2] LANGTON, Charan. Trellis Coded Modulation (TCM). *Trellis Coded Modulation (TCM)* [online]. 2004, no. 1 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://complextoreal.com/wp-content/uploads/2013/01/tcm.pdf>
- [3] PROAKIS, John G. *Digital communications*. 3th ed. New York: McGraw-Hill, 1995, xviii, 1150 s.
- [4] UNGERBOECK, Gottfried. Trellis Coded Modulation, Part 1, Part 2. *Trellis Coded Modulation*. 1987, vol. 25, no. 2.
- [5] VITERBI, A.J., et al.: A Pragmatic Approach to Trellis-Coded Modulation, IEEE Communications Magazine (probably vol. 27, no. 7), July 1989, pp. 12-21.
- [6] ŽALUD, Václav. *Vysokofrekvenční přijímací technika*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986, 419 s.
- [7] *Kódovanie a modulácia: Konvolučné kódy*. Košice, 2006. Dostupné z: ftp://www.kemt.fei.tuke.sk/TeoriaTelekomunikacnychSystemov/_web/old/6_Konvol_kody.pdf
- [8] LANGTON, Charan. Coding and decoding with Convolutional Codes. *Coding and decoding with Convolutional Codes* [online]. 1999, no. 2 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: http://digitus.itk.ppke.hu/~bohan/_infokod/convo%5B1%5D.pdf

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

apod.	a podobne
bit	Binary digit, číslica dvojkovej sústavy
CC	Convolutional Encoder, konvolučný kodér
CG	Code Gain, kódový zisk
dB	deciBel, bezrozmerná jednotka udávajúca pomer medzi dvomi veličinami
Hz	Hertz, jednotka frekvencie
ISB	Independent sideband, s nezávislým postranným pásmom
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing, multiplex s kmitočtovým dělením
s	Sekunda, jednotka času
SSB	Single sideband, s jedným postranným pásmom
VSF	Vestigial sideband, čiastočne potlačené postranné pásmo
tzv.	Takzvaný

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1</i> Obecné Shannonové schéma rádiového komunikačného systému [1].....	11
<i>Obr. 2</i> Prehľad základných spôsobov modulácie v rádiovkej komunikácii [6].....	14
<i>Obr. 3</i> Závislosť maximálnej dosiahnuteľnej spektrálnej účinnosti η_s na pomere E_b/N_0 [1]	20
<i>Obr. 4</i> Klasifikácia ochranných kanálových kódov [1]	22
<i>Obr. 5</i> Základná koncepcia kanálového kódovania (založené na FEC) [1].....	23
<i>Obr. 6</i> Závislosť BER na pomere E_b / N_0 pre systém s moduláciou BPSK [1].....	24
<i>Obr. 7</i> Základná koncepcia systému s kódovanými moduláciami [1].....	25
<i>Obr. 8</i> Systém s moduláciou QPSK (bez kanál. kodéra) a s modulátorom 8PSK (s kanál. kodérom) [1]	26
<i>Obr. 9</i> Nekódovaná modulácia QPSK a modulácia 8-PSK s použitím kanálového kodéra [1]	27
<i>Obr. 10</i> Euklidove vzdialenosti modulácií [2]	28
<i>Obr. 11</i> Obecná koncepcia kodéru – modulátoru pre TCM [1]	31
<i>Obr. 12</i> Kodér – modulátor 8PSK/TCM [1]	31
<i>Obr. 13</i> Mriežkový diagram formátu 8PSK/TCM [1]	32
<i>Obr. 14</i> Zapojenie systematického konvolučného kodéra $\frac{1}{2}$ [7].....	34
<i>Obr. 15</i> Zapojenie nesystematického konvolučného kodéra $\frac{1}{2}$ [7]	34
<i>Obr. 16</i> Jednoduchý konvolučný kodér (2,1,3) [1]	35
<i>Obr. 17</i> Stupne registra konvolučného kodéra (2,1,3) [1].....	35
<i>Obr. 18</i> Kódový strom konvolučného kodéra (2,1,3) [8]	37
<i>Obr. 19</i> Mriežkový diagram konvolučného kodéra (2,1,3) [1]	38
<i>Obr. 20</i> Stavový diagram konvolučného kodéra (2,1,3) [1]	39
<i>Obr. 21</i> Ukážka komunikačného nástroja Communication System Toolbox.....	42
<i>Obr. 22</i> Schéma konvolučného kodéra pre TCM systém	46
<i>Obr. 23</i> Blokové schéma zapojenia modulácie BPSK s konvolučným kodérom.....	48
<i>Obr. 24</i> Blokové schéma zapojenia modulácie BPSK bez kódovania	48
<i>Obr. 25</i> Chybovosť pre moduláciu BPSK s kódovaním aj bez kódovania.....	49
<i>Obr. 26</i> Chybovosť BER pre moduláciu BPSK s kódovaním aj bez kódovania pre oblasť 4 – 6 dB	50
<i>Obr. 27</i> Konštelačný diagram modulácie BPSK	50
<i>Obr. 28</i> Blokové schéma pre zapojenie modulácie QPSK s konvolučným kodérom	52

<i>Obr. 29</i>	<i>Blokové schéma pre zapojenie modulácie QPSK bez kódovania</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 30</i>	<i>Chybovosť pre moduláciu QPSK s kódovaním aj bez kódovania</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 31</i>	<i>Chybovosť BER pre moduláciu QPSK s kódovaním aj bez kódovania pre oblasť 4 – 6 dB</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 32</i>	<i>Konštelačný diagram modulácie QPSK</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 33</i>	<i>Blokové schéma pre zapojenie modulácie 8PSK s konvolučným kodérom</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 34</i>	<i>Blokové schéma pre zapojenie modulácie QPSK bez kódovania</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 35</i>	<i>Chybovosť pre moduláciu 8PSK s kódovaním aj bez kódovania</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 36</i>	<i>Chybovosť BER pre moduláciu 8PSK s kódovaním aj bez kódovania pre oblasť 4 – 6 dB</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 37</i>	<i>Konštelačný diagram modulácie 8PSK</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 38</i>	<i>Porovnanie chybovosti BER modulácií BPSK, QPSK a 8PSK s použitím konvolučného kodéra</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 39</i>	<i>Porovnanie chybovosti BER modulácií BPSK, QPSK a 8PSK bez použitia konvolučného kodéra</i>	<i>60</i>

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 1</i>	<i>Namerané hodnoty BER pre moduláciu BPSK.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 2</i>	<i>Podrobnejšie meranie modulácie BPSK v oblasti 4 – 6 dB</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 3</i>	<i>Namerané hodnoty BER pre moduláciu QPSK</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 4</i>	<i>Podrobnejšie meranie modulácie QPSK v oblasti 4 – 6 dB</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 5</i>	<i>Namerané hodnoty BER pre moduláciu 8PSK</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 6</i>	<i>Podrobnejšie meranie modulácie 8PSK v oblasti 4 – 6 dB</i>	<i>55</i>

ZOZNAM PRÍLOH

Zdrojové kódy z programu MATLAB Simulink a použité obrázky na CD v prílohe.