AKADÉMIA OZBROJENÝCH SÍL
generála Milana Rastislava Štefánika

AUTOREFERÁT

DIZERTAČNEJ PRÁCE

ADAPTÍVNY SYSTÉM KÓDOVANIA A MODULÁCIE PRE ÚZKOPÁSMOVÉ RÁDIOVÉ KANÁLY

2026

Ing. Rastislav LEDAJ

AKADÉMIA OZBROJENÝCH SÍL
generála Milana Rastislava Štefánika

Ing. Rastislav LEDAJ

Autoreferát dizertačnej práce

ADAPTÍVNY SYSTÉM KÓDOVANIA A MODULÁCIE PRE ÚZKOPÁSMOVÉ RÁDIOVÉ KANÁLY

na získanie akademickej hodnosti philosophiae doctor „PhD.“

v študijnom odbore doktorandského štúdia

Obrana a vojenstvo

v študijnom programe

Elektronické zbraňové systémy

Liptovský Mikuláš, 2026

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Katedre elektroniky Akadémie ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika.

Doktorand: Ing. Rastislav LEDAJ, Katedra elektroniky

Školiteľ: doc. Ing. Marián BABJAK, PhD,

Oponenti: prof. Ing. Marcel HARAKAĽ, PhD.
doc. Ing. Ján PIDANIČ, PhD.
doc. Ing. Marie RICHTEROVÁ, PhD.

Autoreferát bol rozoslaný : .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa: 13.10.2026 o 14:00 hod.

pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce,

ktorej predsedom je: prof. Ing. Ján OCHODNICKÝ, PhD., Katedra elektroniky

na: Akadémii ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika,
Demänová 393, Liptovský Mikuláš

ABSTRAKT

Dizertačná práca sa zaoberá optimalizáciou a adaptívnym riadením modulačno-kódovacích schém v úzkopásmovom komunikačnom systéme s cieľom dosiahnuť maximálnu prenosovú rýchlosť pri zachovaní požadovanej spoľahlivosti. Na základe komparatívnej analýzy bol navrhnutý vhodný prenosový reťazec a množina modulačno-kódovacích schém pre adaptívny systém. Hlavným prínosom práce je návrh asymetrického hysterézneho adaptačného algoritmu založeného na metrikách po dekódovaní bez potreby explicitného odhadu vlastností prenosového kanála. Simulačné overenie v dynamických podmienkach potvrdilo stabilitu adaptácie a priaznivý kompromis medzi spoľahlivosťou a efektívnosťou prenosu. Stanovené ciele práce boli splnené návrhom a verifikáciou adaptívneho systému.

ABSTRACT

The dissertation thesis addresses the optimization and adaptive control of modulation and coding schemes in a narrowband communication system, with the objective of maximizing the data rate while maintaining the required level of reliability. Based on comparative analysis, a suitable transmission chain and a set of modulation and coding schemes were designed for the adaptive system. The main contribution of the dissertation is the development of an asymmetric hysteresis-based adaptation algorithm relying on post-decoding metrics, without the need for explicit estimation of transmission channel characteristics. Simulation-based verification under dynamic conditions confirmed the stability of the adaptation process and a favorable trade-off between transmission reliability and efficiency. The objectives of the dissertation were achieved through the design and verification of the adaptive system.

ÚVOD A FORMULÁCIA VÝSKUMNÉHO PROBLÉMU

Pozemné taktické rádiové systémy predstavujú nezastupiteľnú súčasť velenia a riadenia v operačnom prostredí s obmedzenou alebo neexistujúcou statickou komunikačnou infraštruktúrou. Ich základnou výhodou je nezávislosť od pevných prístupových bodov a schopnosť vytvoriť lokálnu sieť s dynamicky sa meniacou topológiou. Napriek tomu sú tieto systémy obmedzené dostupnou šírkou frekvenčného pásma, čo priamo limituje dosiahnuteľnú prenosovú rýchlosť.

V úzkopásmových VKV/UKV (Veľmi Krátke Vlny/Ultra Krátke Vlny) rádiových systémoch predstavuje kanál so šírkou 25 kHz z pohľadu návrhu fyzickej vrstvy výrazné obmedzenie. Kým dostupná šírka pásma postačuje na realizáciu hlasových služieb a nízko rýchlostného dátového prenosu, rastúce požiadavky aplikácií velenia a riadenia vyžadujú zvyšovanie prenosovej rýchlosti bez rozširovania prideleného frekvenčného pásma. Toto je dosiahnuteľné použitím modulačných schém s väčšou spektrálnou účinnosťou, ktoré však vyžadujú priaznivejšie prenosové podmienky a sú citlivejšie na nelinearity výkonových zosilňovačov a na zmeny kvality kanála.

ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Analýza súčasného stavu hodnotí existujúce implementácie, vojenské a priemyselné štandardy, modulačné schémy, frekvenčné usporiadania a spôsoby kanálového kódovania relevantné pre úzkopásmové rádiové kanály.

Vojenské a priemyselné štandardy

NATO NBWF (STANAG/AComP 5630–5633) definuje fyzickú vrstvu s moduláciou so spojitou fázou (CPM – Continuos Phase Modulation) v siedmich prevádzkových režimoch s prenosovými rýchlosťami 10 až 96 kbit/s, v kanáli so šírkou 25 a 50 kHz. Séria MIL-STD-188 (dokumenty -242, -243A, -220D) pokrýva americký rámec taktickej interoperability s modulačno-kódovacími schémami (MKS) založenými na Golay a BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) kódovaniach pre rýchlosti 7 466 až 16 000 bit/s. Civilné systémy DMR, TETRA, P25 a ETSI PMR reprezentujú profesionálnu úzkopásmovú komunikáciu orientovanú na spoľahlivé hlasové služby. IEEE 802.16t (WirelessMAN-NB, 2025) definuje sedem MKS od štvorstavovej fázovej modulácie (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying) s kódovým pomerom 1/2 po 256 stavovú kvadratúrnu amplitúdovú moduláciu (QAM – Quadrature Amplitude Modulation) s kódovým pomerom 7/8 s teoretickými spektrálnymi účinnosťami 1,0 – 7,0 bit/s/Hz, čím potvrdzuje relevantnosť úzkopásmových kanálov aj mimo vojenských sietí.

Modulačné schémy, frekvenčné usporiadanie a kanálové kódovanie

Ako referencia pre komparatívnu analýzu bola zvolená modulácia s jednou nosnou frekvenciou a QPSK moduláciou. QAM modulácie sú prirodzeným základom adaptívneho systému, keďže počet stavov ich modulačnej schémy M, možno meniť priamočiaro. Z modulácií s viacerými nosnými frekvenciami boli analyzované:

- ortogonálne frekvenčné multiplexovania s cyklickým prefixom CP-OFDM (Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) a F-OFDM (Filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing),
- tri implementačné varianty UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier) a
- FBMC/OQAM (Filter Bank Muliti-Carrier/Offset Quadrature Amplitude Modulation),

Každý systém vykazuje odlišný kompromis medzi spektrálnou lokalizáciou, réžiou cyklického prefixu (CP)/filtrácie, latenciou a výpočtovou zložitosťou.

Pri kanálovom kódovaní pre rámce s dĺžkou 600 informačných bitov, zvolenou ako kompromis medzi dostatočnou blokovou dĺžkou pre dosiahnutie prijateľného kódového zisku a požiadavkou nízkej systémovej latencie, boli z pohľadu riešeného systému analyzované nasledujúce typy kanálových kódov:

- konvolučné kódy s Viterbiho dekódovaním poskytujúce nízku latenciu a nízku zložitosť,

- kódy s nízkou hustotou paritných kontrol LDPC (Low-Density Parity-Check) umožňujúce paralelnú implementáciu a dekódovanie s mäkkým rozhodovaním,
- turbo kódy dosahujúce vysoký kódový zisk za cenu zvýšenej latencie,
- polárne kódy s dekódovaním CRC-SCL (Cyclic Redundancy Check – Successive Cancellation List), ktoré predstavujú modernú alternatívu s dobrou asymptotickou výkonnosťou,
- Reed–Solomonove/BCH kódy poskytujúce ochranu voči zhlukovým chybám.

CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE A VEDECKÉ HYPOTÉZY

Hlavný cieľ

Hlavným cieľom dizertačnej práce je preukázanie funkčnosti a výkonnostných vlastností adaptívneho systému pre úzkopásmový taktický rádiový kanál so šírkou 25 kHz, ktorý dynamicky voľbou modulačno-kódovacej schémy (MKS) maximalizuje prenosovú rýchlosť pri zabezpečení stanovenej bitovej chybovosti (BER – Bit Error Rate) BER $\leq 10^{-5}$ a rámcovej chybovosti (FER – Frame Error Rate) FER $\leq 10^{-3}$.

Čiastkové ciele

- Je identifikovaná a systematizovaná sústava výkonnostných a prevádzkových požiadaviek kladených na adaptívny modulačno-kódovací systém v úzkopásmovom taktickom rádiovom kanáli so šírkou 25 kHz, vrátane hraničných hodnôt bitovej a rámcovej chybovosti.
- Je vytvorená a overená metodika hodnotenia modulačných schém a kanálových kódovaní pre úzkopásmové systémy, ktorá integruje charakteristiky obsadenej šírky pásma, spektrálnej účinnosti, mimopásmového vyžarovania, bitovej a rámcovej chybovosti, latencie a výpočtovej zložitosti. Táto metodika umožňuje objektívne porovnanie modulačných schém a kanálových kódovaní a ich následný výber pre adaptívny systém.
- Je definovaná množina modulačno-kódovacích schém pre adaptívny systém na základe kvantitatívneho porovnania výkonnostných charakteristík metód frekvenčného usporiadania, modulačných schém a typov kanálového kódovania, v podmienkach úzkopásmového taktického rádiového kanála so šírkou 25 kHz.

Výskumné hypotézy

H1: V úzkopásmovom kanáli s nominálnou šírkou B_{ch} = 25 kHz je možné vytvoriť množinu MKS založenú na QPSK/M-QAM a krátko-blokovom LDPC kódovaní tak, aby umožňovala postupné zvyšovanie prenosovej rýchlosti pri súčasnom splnení kritérií BER $\leq 10^{-5}$ a FER $\leq 10^{-3}$ v AWGN kanáli.

H2: Adaptačný algoritmus riadený filtrovanou spätnou väzbou BER/FER, doplnený o asymetrickú hysteréziu s testovacím a oneskorovacím mechanizmom, dokáže

v dynamických AWGN scenároch udržať chybovosť v oblasti BER ≤ 10^{-5} a FER ≤ 10^{-3}, bez priameho použitia E_b/N_0 v rozhodovacom bloku.

METODIKA RIEŠENIA

Dosiahnutie hlavného cieľa – návrh funkčného adaptívneho modulačno-kódovacieho systému pre 25 kHz taktický kanál, si vyžadovalo postup rozdelený do piatich navzájom nadväzujúcich etáp. Výskum bol realizovaný prostredníctvom matematického modelovania a počítačovej simulácie v prostredí MATLAB (MATrix LABoratory). Každá etapa generovala kvantitatívne výsledky, ktoré priamo podmieňovali vstupné parametre nasledujúcej etapy a tým zabezpečovala konzistenciu celého návrhového reťazca.

Spoločným základom pre všetky simulačné etapy bol jednotný simulačný rámec definovaný v základnom pásme s týmito parametrami: nominálna šírka kanála 25 kHz, prenosový kanál AWGN, rozsah E_b/N_0 = 0 až 30 dB, dĺžka informačného rámca 600 bitov a modulačné rády v rozsahu QPSK až 256-QAM. Tento rámec zabezpečil porovnateľnosť výsledkov naprieč všetkými etapami.

Komparatívna simulačná analýza frekvenčného usporiadania

V prvej etape bolo v jednotnom simulačnom rámci porovnaných sedem systémov frekvenčného usporiadania. Hodnotiace kritériá výberu systému frekvenčného usporiadania sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1 Poradie kritérií pre výber systému frekvenčného usporiadania.

Poradie	Kritérium	Dôvod priority
1	spektrálne obmedzenie	B_{99} nesmie výrazne prekročiť B_{ch}
2	kompatibilita s MKS/adaptáciou	riešenie má podporovať viacero modulácií a kódových pomerov
3	η_{B99}	vyššia efektivita je relevantná až po splnení spektrálnych obmedzení
4	implementačná zložitosť	riešenie musí byť realizovateľné v SDR/DSP/FPGA prostredí
5	Latencia	dôležitá pre hlasový a interaktívny prenos
6	PAPR a požiadavky na výkonový zosilňovač	doplnkové praktické kritérium

Komparatívna simulačná analýza kanálového kódovania

Paralelne bola uskutočnená komparatívna analýza piatich typov kanálového kódovania pre rámce s dĺžkou 600 informačných bitov. Hodnotiace kritériá výberu typu kanálového kódovania sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Poradie kritérií pre výber systému frekvenčného usporiadania.

Poradie	Kritérium	Dôvod priority
1	systémová latencia	rozhodujúca pre hlasové služby
2	FER	zostatková rámcová chybovosť je pre kanálové kódovanie dôležitejšia než samotná BER
3	deterministická zložitosť	praktická implementovateľnosť v SDR/DSP/FPGA
4	spektrálna účinnosť	kanálové kódovanie nesmie neprimerane znížiť prenosovú rýchlosť
5	odstup od Shannonovej hranice	interpretačné kritérium, nie primárny výberový parameter

Výber optimálnej kombinácie frekvenčného usporiadania a kanálového kódovania

Na základe výsledkov predchádzajúcich dvoch etáp bola pre ďalší návrh zvolená dvojica systémov – najvhodnejšie frekvenčné usporiadanie a najvhodnejšie kanálové kódovanie. Táto voľba definovala pevnú fyzickú vrstvu pre všetky ďalšie etapy.

Simulačná analýza širšej skupiny MKS a výber výslednej množiny

V tretej etape bola realizovaná simulačná analýza štrnástich kombinácií Grayovo mapovanej M-QAM a LDPC kódovania. Kritériami redukcie širšej skupiny na finálnu množinu boli: splnenie oboch kritérií chybovosti; vhodný krok spektrálnej účinnosti medzi susednými schémami a vhodnosť diferenciálnych rozostupov E_b/N_0 prahov pre nastavenie hysteréznych okien adaptačného algoritmu. Vybratá päťprvková finálna množina MKS je uvedená v tabuľke 5.

Návrh adaptačného algoritmu a overenie v scenároch

V záverečnej etape bol navrhnutý adaptačný algoritmus ako riadiaca nadstavba nad finálnou množinou MKS. Kľúčovým koncepčným rozhodnutím pri návrhu bolo použitie filtrovanej spätnej väzby chybovosti (EWMA – Exponentially Weighted Moving Average) namiesto priameho odhadu E_b/N_0. Správnosť tohto prístupu bola overená v piatich dynamických scenároch navrhnutých tak, aby pokryli reprezentatívne prevádzkové situácie.

KOMPARATÍVNA ANALÝZA A VÝBER FREKVENČNÉHO USPORIADANIA

V piatej kapitole práce bolo vykonané porovnanie siedmich systémov frekvenčného usporiadania pre 25 kHz kanál: SCM-QPSK (referencia); CP-OFDM; F-OFDM; UFMC-direct; UFMC-polyphase; UFMC-OLS a FBMC/OQAM. Pri systémoch s viacerými nosnými frekvenciami je odstup subnosných Δf = 1,5625 kHz, čo zodpovedá 16 aktívnym subnosným. Spoločnými hodnotiacimi ukazovateľmi sú výkonová spektrálna hustota (PSD – Power Spectral Density), B_{99}, vyžarovanie mimo pásma (OOBE – Out-Of-Band Emission), spektrálna účinnosť vztiahnutá na šírku prenosového kanála, skutočné trvanie rámca, spracovateľská latencia a analytický odhad výpočtovej zložitosti.

SCM-QPSK s tvarujúcim FIR filtrom dosahuje dobré spektrálne vlastnosti a nízke PAPR, avšak neposkytuje prirodzenú granularitu pre adaptívny systém. CP-OFDM prináša 20 % rámcovú stratu vplyvom cyklického prefixu (N_{CP}/N_{FFT} = 1/4) a výraznejšie bočné spektrálne zložky. F-OFDM zlepšuje OOBE za cenu súbehu CP réžie a prechodových javu filtra. FBMC/OQAM dosahuje najlepšiu spektrálnu lokalizáciu, avšak dlhá odozva prototypového filtra a časový prekryv symbolov ho penalizujú pri krátkych rámcoch s požiadavkou nízku latenciu. Výsledky komparatívnej analýzy systémov frekvenčného usporiadania sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 3 Kvalitatívna Pareto analýza systémov frekvenčného usporiadania.

Systém	**Spektrálna vhodnosť pre 25 kHz**	**Spektrálna účinnosť**	**Implementačná náročnosť**	**Latencia**	**Vhodnosť pre MKS**	**Vyhodnotenie**
SCM-QPSK	dobrá pri FIR tvarovaní	vysoká	stredná	stredná	obmedzená	referenčná SCM alternatíva
CP-OFDM	nízka bez filtrácie	nízka	veľmi nízka	veľmi nízka	veľmi dobrá	základ pre porovnanie
F-OFDM	dobrá	nízka	stredná	stredná	veľmi dobrá	praktická alternatíva
UFMC-direct	dobrá až hraničná	vysoká	vysoká	vysoká	dobrá	spektrálne zaujímavé, implementačne náročné
UFMC-polyphase	dobrá až hraničná	vysoká	stredná/vysoká	stredná/vysoká	dobrá	optimalizovaná UFMC alternatíva
UFMC-OLS	dobrá až hraničná	vysoká	stredná	nízka	dobrá	najpraktickejšia UFMC vetva
FBMC-OQAM	veľmi dobrá, v modeli hraničná	vysoká	vyššia	vyššia	dobrá	teoretická alternatíva pre dlhšie rámce

Na základe porovnania bolo ako najvhodnejšie frekvenčné usporiadanie pre 25 kHz úzkopásmový adaptívny systém identifikované UFMC-OLS. Táto implementácia kombinuje viacnosnú štruktúru so subpásmovou filtráciou, nevyužíva cyklický prefix a realizácia dlhej konvolúcie metódou overlap-save umožňuje výpočtovo efektívnu implementáciu pomocou fourierovej transformácie, čím poskytuje najvhodnejší kompromis medzi spektrálnou lokalizáciou, latenciou a implementačnou náročnosťou.

KOMPARATÍVNA ANALÝZA A VÝBER KANÁLOVÉHO KÓDOVANIA

Výber vhodného typu kanálového kódovania bol vykonaný v kapitole 6. Konvolučné kódy s Viterbiho dekódovaním ponúkajú nízku latenciu a priamočiaru implementáciu, ale nižší kódový zisk. Turbo kódy dosahujú vysoký kódový zisk, avšak ich iteračné SISO (Soft-Input Soft-Output) dekódovanie zvyšuje latenciu a výpočtovú náročnosť. Polárne CRC-SCL kódy sú modernou alternatívou, no pri krátkych blokoch môže byť latencia softvérového SCL dekódovania

nepriaznivá. Reed-Solomon/BCH kódy sú vhodné najmä ako ochrana voči zhlukovým chybám, avšak pri AWGN/BICM reťazci nedokážu efektívne využiť informáciu o spoľahlivosti bitov a realizovať dekódovanie s mäkkým rozhodovaním. Výsledky komparatívnej analýzy typov kanálového kódovania sú uvedené v tabuľke 4.

Tabuľka 4 Kvalitatívna Pareto analýza typov kanálového kódovania.

Kanálové kódovanie	FER	Latencia	Implementačná zložitosť	Vyhodnotenie
Conv-soft	stredná	nízka	stredná	vhodné pre robustný alebo veľmi nízkolatenčný režim
LDPC-NMS	stredná	nízka	nízka	najvhodnejšie kanálové kódovanie pre MKS
Turbo-RM	nízka	stredná	vysoká	výkonnostná referencia
Polar-local-CRC-SCL	stredná	vysoká	stredná	výskumná referencia
RS-hard	vysoká	nízka	stredná	doplnková referencia s tvrdým rozhodovaním

LDPC kanálové kódovanie s NMS dekódovaním bolo identifikované ako najvhodnejší základ pre výslednú množinu MKS. Výber vychádza z dosiahnutej zostatkovej FER, nízkej latencie pri obmedzenom počte iterácií, možnosti paralelnej hardvérovej implementácie, natívnej podpory viacerých kódových pomerov a vhodnosti pre uvažované dĺžky rámcov.

NÁVRH MNOŽINY MODULAČNO-KÓDOVACÍCH SCHÉM

Zo štrnástich analyzovaných kombinácií Grayovo mapovaných M-QAM a LDPC kódovania s rôznymi kódovými pomermi bola na základe BER, FER, prenosovej rýchlosti a implementačných vlastností odvodená päťprvková optimalizovaná množina MKS. Kritériom zaradenia do množiny bolo splnenie BER $\leq 10^{-5}$ a FER $\leq 10^{-3}$ v relevantnom rozsahu E_b/N_0, vhodný krok spektrálnej účinnosti medzi susednými schémami a vhodnosť diferenciálnych rozostupov prahov pre hysterézne rozhodovanie.

Tabuľka 5 Finálna množina MKS pre adaptívny systém.

Adapt. MKS	Modulácia	R_{eff}	η [bit/sym]	γ_{BER} [dB]	γ_{FER} [dB]
MKS 1	QPSK	1/2	1,0	3,50	3,80
MKS 2	16-QAM	1/2	2,0	6,34	6,60
MKS 3	64-QAM	1/2	3,0	9,31	9,72
MKS 4	256-QAM	1/2	4,0	12,69	12,98
MKS 5	256-QAM	3/4	6,0	15,38	15,86

Diferenciálne rozostupy spoločného operačného prahu E_b/N_0 medzi susednými MKS sa pohybujú v úzkom a stabilnom intervale: MKS1→MKS2 = 2,80 dB, MKS2→MKS3 = 3,12 dB, MKS3→MKS4 = 3,26 dB, MKS4→MKS5 = 2,87 dB. Skutočnosť, že tieto rozostupy nepresahujú

3,4 dB a neklesajú pod 2,7 dB, definuje limity pre šírky asymetrickej hysterézie a integračných konštánt spätnoväzobných filtrov adaptačného algoritmu.

ADAPTÍVNY ALGORITMUS RIADENÝ CHYBOVOSŤOU

Architektúra systému

Adaptívny algoritmus tvorí riadiacu vrstvu nad fyzickou vrstvou UFMC-OLS/Grayovo kódovanej M-QAM/LDPC-NMS. Prenosový reťazec vychádza z princípu bitovo prekladaného kódovaného modulovania (BICM – Bit-Interleaved Coded Modulation). Supervízor mení výhradne veľkosť konštelácie M-QAM a efektívny kódový pomer LDPC kodéra podľa výsledkov predchádzajúceho prenosu. Na strane prijímača sa po UFMC-OLS demodulácii vykoná mäkké konštelačné rozhodovanie, spätné prekladanie a LDPC-NMS dekódovanie. Odhad BER/FER vytvára spätnú väzbu pre adaptačný supervízor.

Spätná väzba a EWMA filtrovanie

Okamžité hodnoty BER a FER sú vypočítané z hodnotiacich okien s dĺžkou 5 rámcov. Tieto hodnoty sú EWMA filtrované s asymetrickým nastavením (pri zhoršení sa volí rýchlejšia reakcia $\alpha_{down} = 0{,}35$ a pri zlepšení pomalšia reakcia $\alpha_{up} = 0{,}90$). Asymetria odráža rozdielnu mieru rizika pri rôznych smeroch prechodu. Prechod na robustnejší režim musí byť rýchly, prechod na výkonnejší režim konzervatívny.

Logika zníženia a zvýšenia MKS

Systém implementuje asymetrickú hysteréziu. Zníženie sa aktivuje pri prekročení cieľových limitov BER = 10^{-5} alebo FER = 10^{-3}, prípadne pri výskyte chybného rámca ($N_{down} = 10$ rámcov). Zvýšenie MKS vyžaduje $N_{up} = 150$ bezchybných rámcov a súčasné splnenie BER a FER kritérií. Priamy prechod na vyššiu MKS je nahradený dvojfázovým testovacím algoritmom:

- Testovací interval: 100 hodnotiacich rámcov, tolerancia 1 rámcová chyba.
- Skúšobný stav: 100 hodnotiacich rámcov, tolerancia 2 rámcové chyby. Pri zlyhaní návrat na pôvodnú MKS a ochranný interval 500 rámcov.

Po každej zmene MKS sa pamäť EWMA reinicializuje na cieľové hodnoty, čím sa zabraňuje kaskádovému znižovaniu. Maximálny krok zníženia je obmedzený na 1 MKS, čo zabezpečuje plynulý pokles bez kaskádového prepadu.

VÝSLEDKY DYNAMICKEJ SIMULÁCIE

Testované scenáre

Funkčnosť adaptačného algoritmu bola overená v piatich reprezentatívnych kanálových scenároch AWGN:

- Pomalé zlepšovanie — lineárny nárast E_b/N_0: overenie plynulého zvyšovania cez všetky MKS.
- Pomalé zhoršovanie — lineárny pokles E_b/N_0: overenie rýchleho, ale stabilného znižovania.
- Náhlý pokles — schodovitá zmena E_b/N_0: overenie rýchlosti reakcie algoritmu.
- Oscilácia — E_b/N_0 osciluje okolo rozhodovacích prahov: overenie odolnosti voči opakovaným rýchlym zmenám.
- Pomalá náhodná zmena AWGN kanála — korelovaný náhodný drift: overenie stability pri realistickom scenári.

Kvantitatívne výsledky

Tabuľka 6 Kvantitatívne výsledky dynamickej simulácie adaptívneho systému.

Scenár	FER po ARQ	95 % horná hranica FER	Časovo vážená R_{user} [kbit/s]	ARQ čas [%]
Pomalé zlepšovanie	0	$2{,}70\times10^{-3}$	53,77	0,264
Pomalé zhoršovanie	0	$2{,}70\times10^{-3}$	54,09	0,371
Náhly pokles	$5{,}0\times10^{-3}$	$1{,}03\times10^{-2}$	82,37	0,146
Oscilácia	$1{,}0\times10^{-3}$	$4{,}48\times10^{-3}$	32,41	0,331
Pomalá náhodná zmena AWGN kanála	0	$2{,}70\times10^{-3}$	50,11	0,246

Retransmisie obnovili 134 z 220 neúspešných rámcov (podrobný súčet: 140 neúspešných primárnych rámcov, z toho 134 bolo úspešne prijatých po retransmisii). V troch scenároch bola reziduálna rámcová chybovosť nulová; pri náhlom poklese dosiahla $5{,}0\times10^{-3}$ (95 % horná hranica $1{,}03\times10^{-2}$). Časový podiel retransmisií sa pohyboval od 0,146 % do 0,371 %, takže retransmisie nevytvorili výraznú prevádzkovú réžiu. Počet prepnutí MKS pri oscilačnom scenári bol obmedzený na 15 za 10 000 rámcov, čo potvrdzuje funkčnosť hysteréznych ochranných mechanizmov.

SPLNENIE CIEĽOV PRÁCE A POTVRDENIE HYPOTÉZ

Hlavný cieľ dizertačnej práce bol splnený. Pre úzkopásmový taktický rádiový kanál so šírkou 25 kHz bol navrhnutý a simulačne overený adaptívny modulačno-kódovací systém, ktorý umožňuje dynamicky meniť prenosovú rýchlosť pri rešpektovaní stanovených požiadaviek na BER a FER. Návrh zahŕňa výber kanálového usporiadania, kanálového kódovania, výber konečnej množiny MKS a ich riadenie pomocou spätnej väzby BER a FER

Splnenie čiastkových cieľov: Prvý čiastkový cieľ – identifikácia a systematizácia výkonnostných a prevádzkových požiadaviek bol splnený formuláciou jednotného simulačného rámca so stanovenými hraničnými hodnotami BER $\leq 10^{-5}$ a FER $\leq 10^{-3}$. Druhý čiastkový cieľ – vytvorenie a overenie metodiky hodnotenia fyzickej vrstvy bol splnený definíciou lexikografického pravidla priority a integrovaného hodnotiaceho rámca kombinujúceho B_{99},

OOBE, spektrálnu účinnosť, BER, FER, latenciu a výpočtovú zložitosť. Tretí čiastkový cieľ – definícia optimalizovanej množiny MKS bol splnený návrhom päťprvkovej množiny MKS s overenými diferenciálnymi rozostupmi prahov vhodnými pre hysterézne riadenie.

Hypotéza H1 bola potvrdená: zo štrnástich analyzovaných kombinácií bola odvodená päťprvková usporiadaná množina MKS umožňujúca postupné zvyšovanie prenosovej rýchlosti (25–150 kbit/s netto) pri splnení BER/FER kritérií v príslušných prevádzkových oblastiach.

Hypotéza H2 bola potvrdená: BER/FER-riadený algoritmus v dynamických AWGN scenároch stabilne menil MKS, udržiaval chybovosť na stanovených limitoch alebo v ich bezprostrednom okolí a v rozhodovacom bloku nepoužíval priamy odhad E_b/N_0.

PÔVODNÉ PRÍNOSY PRÁCE

Prínosy pre vedu a teóriu

- **Návrh BER/FER-riadeného adaptačného algoritmu s asymetrickou hysterézou**: Algoritmus rozhoduje o zmene MKS výhradne na základe filtrovanej spätnej väzby meranej chybovosti bez priameho použitia E_b/N_0 v rozhodovacom bloku. EWMA filtrovanie, asymetrická hysterézia, testovacie rámce a oneskorovacie mechanizmy zabraňujú nežiaducim osciláciám a predčasným prechodom. Tento prístup je pre riešenú úlohu metodicky odôvodnenejší ako okamžité prepínanie podľa SNR, ktoré nezohľadňuje skutočný výsledok kódovaného prenosu.
- **Jednotná metodika hodnotenia fyzickej vrstvy**: Práca kombinuje B_{99}, OOBE, $\eta_{B_{99}}$, BER, FER, latenciu a výpočtovú zložitosť v jednom hodnotiacom rámci s lexikografickým pravidlom priority. Výber riešenia nie je založený iba na nominálnej bitovej rýchlosti alebo izolovanom priebehu BER, ale na systematickom porovnaní všetkých relevantných parametrov fyzickej vrstvy.
- **Komparatívna analýza kanálových usporiadaní pre 25 kHz kanál**: Porovnanie systémov s jednou a viacerými nosnými frekvenciami (SCM, CP-OFDM, F-OFDM, tri varianty UFMC, FBMC/OQAM) pri jednotnom obmedzení šírky kanála na 25 kHz zohľadňuje nielen spektrálne vlastnosti, ale aj rámcovú a časovú réžiu, prechodové javy a implementačnú náročnosť. Výsledkom je identifikácia UFMC-OLS ako najvhodnejšieho frekvenčného usporiadania pre uvažovaný systém.
- **Systémové vyhodnotenie kanálového kódovania pre krátke rámce**: Konvolučné, LDPC, turbo, polárne a RS/BCH kódy boli porovnané podľa BER, FER, latencie, výpočtovej zložitosti a vhodnosti pre rámce s dĺžkou 600 informačných bitov. Na základe výsledkov bolo LDPC kódovanie s normalizovaným min-sum dekódovaním vybrané ako vhodný základ výslednej množiny MKS.

Prínosy pre prax

- Navrhnutá päťprvková množina MKS (QPSK–256-QAM s LDPC kódovaním, kódové pomery 1/2 a 3/4) pokrýva rozsah prenosových rýchlostí 25–150 kbit/s v 25 kHz kanáli.
- Asymetrický hysterézny regulátor s dvojfázovým testovacím mechanizmom je navrhnutý tak, aby bol implementovateľný v SDR s obmedzenými výpočtovými prostriedkami a jeho rozhodovacia logika nevyžaduje explicitný odhad E_b/N_0.
- Komparatívna analýza UFMC-OLS poskytuje prakticky využiteľné implementačné odporúčanie pre fyzickú vrstvu taktického rádia. UFMC-OLS kombinuje lepšiu spektrálnu lokalizáciu ako CP-OFDM, nižšiu latenciu ako FBMC/OQAM a výpočtovo efektívnu realizáciu.
- Systém je navrhnutý pre 25 kHz VKV/UKV kanál a je teda priamo aplikovateľný v kontexte taktických rádiových sietí pracujúcich podľa štandardov NATO NBWF a MIL-STD-188.

ZÁVER

Na základe vykonaných analýz a simulačných experimentov bolo preukázané, že hlavný cieľ dizertačnej práce aj všetky stanovené čiastkové ciele boli splnené. Bolo preukázané, že v úzkopásmovom 25 kHz kanáli možno vytvoriť usporiadanú množinu MKS umožňujúcu postupné zvyšovanie prenosovej rýchlosti pri splnení stanovených požiadaviek na BER a FER. Zároveň bolo overené, že túto množinu možno stabilne riadiť pomocou filtrovanej spätnej väzby chybovosti bez priameho použitia E_b/N_0 v rozhodovacom bloku.

Pôvodný prínos práce spočíva v systémovom prepojení jednotnej hodnotiacej metodiky, komparatívneho výberu kanálového usporiadania, kanálového kódovania, návrhu redukovanej množiny MKS a jej BER/FER-riadeného adaptívneho riadenia. Jednotlivé časti práce netvoria izolované analýzy, ale nadväzujúci návrhový postup, v ktorom výsledky jednej etapy predstavujú vstup do nasledujúcej etapy.

Platnosť dosiahnutých výsledkov je viazaná na definované simulačné podmienky v AWGN kanáli. Nevyhnutným krokom pre ďalší výskum je implementácia navrhnutého systému na SDR platforme, overenie v reálnom kanálovom prostredí s viaccestným šírením (Rayleigh, Rice fading) a experimentálne rádiové spojenie v reprezentatívnom taktickú prostredí.

VÝBER Z POUŽITEJ LITERATÚRY

[1] BORGSMILLER, J. L. a kol. Narrowband tactical communications. IEEE Communications Magazine. Dostupné online.

[2] HAYKIN, S. Communication Systems. 4. vyd. New York: Wiley, 2001.

[3] PROAKIS, J. G., SALEHI, M. Digital Communications. 5. vyd. New York: McGraw-Hill, 2008.

[4] NATO. STANAG 5630: NarrowBand WaveForm (NBWF) – Physical Layer Specification.

[5] NATO. AComP 5631: NBWF Physical Layer and Propagation Models.

[6] ANDERSON, J. B., AULIN, T., SUNDBERG, C.-E. Digital Phase Modulation. New York: Plenum Press, 1986.

[7] LINDSAY, W. C., SIMON, M. K. Telecommunication Systems Engineering. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1973.

[8] FORNEY, G. D. The Viterbi Algorithm. Proceedings of the IEEE, 1973, roč. 61, č. 3.

[21] IEEE Std 802.16t-2025: IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems – Amendment 2.

[26] NEE, R. van, PRASAD, R. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Boston: Artech House, 2000.

[35] RICHARDSON, T., URBANKE, R. Modern Coding Theory. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

[40] POLYANSKIY, Y., POOR, H. V., VERDÚ, S. Channel Coding Rate in the Finite Blocklength Regime. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, roč. 56, č. 5.

[47] GALLAGER, R. G. Low-Density Parity-Check Codes. Cambridge: MIT Press, 1963.

PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA

V2 - Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka

1. R. Ledaj and M. Babjak, "OFDM and FBMC Spectral Properties Comparison in Narrow-Band Channels," 2025 Communication and Information Technologies (KIT), Vysoke Tatry, Slovakia, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/KIT67756.2025.11205454.
2. M. Marko, R. Ledaj, S. Gažovová and M. Babjak, "Statistical Characteristics of Location and Location Variability Estimation in Ultra Wideband Indoor Positioning System," 2023 Communication and Information Technologies (KIT), Vysoke Tatry, Slovakia, 2023, pp. 1-8, doi: 10.1109/KIT59097.2023.10297057.
3. R. Ledaj and M. Babjak, "Optimization of Loudspeaker Design for Sound Reproduction in Acoustically Non-Treated Environments," 2023 Communication and Information Technologies (KIT), Vysoke Tatry, Slovakia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ KIT59097.2023.10297031.