

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

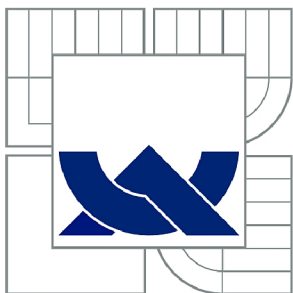
MOŽNOSTI KÓDOVÉHO ZABEZPEČENÍ STANIC S KMITOČTOVÝM
SKÁKÁNÍM

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

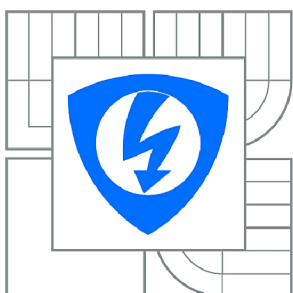
Ing. RADIM PUST

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MOŽNOSTI KÓDOVÉHO ZABEZPEČENÍ STANIC S KMITOČTOVÝM SKÁKÁNÍM

POSSIBILITIES OF ERROR CONTROLS IN FREQUENCY HOPPING STATIONS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. RADIM PUST

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. KAREL BURDA, CSc.

BRNO 2011

ABSTRAKT

Doktorská práce se zabývá problematikou návrhu kódového zabezpečení pro stanice s kmitočtovým skákáním v pásmu s intenzivním rušením. U digitálních modulací dochází vlivem rušení k chybnému určení modulačního stavu na straně přijímače. Důsledkem jsou chybně přenesené symboly zprávy. Vzniklé chyby během přenosu je možné eliminovat za použití zabezpečovacích kódů. Zároveň je také možné těmto chybám předcházet pomocí algoritmů (technik) frekvenčního skákání, které provádí výběr vhodného komunikačního kanálu. Vhodným komunikačním kanálem se rozumí kanál s nižší pravděpodobností vzniku chybných symbolů ve zprávě.

Hlavní přínos této práce spočívá v návrhu nové techniky frekvenčního skákání s předcházením kolizí (FH/CA). Stanice s technikou FH/CA provádí před každým skokem měření úrovně signálu v několika uvažovaných kanálech. Na základě provedených měření je pak vybrán nejvhodnější kanál, tj. kanál s nejnižší naměřenou hodnotou úrovně signálu. S vyšší pravděpodobností tak dochází ke skoku na kanál neobsazený nějakým přenosem. Pomocí matematického modelu byla porovnána výkonnost nově navržené techniky FH/CA se současně užívanými technikami FH a AFH. Porovnávacím kritériem byla pravděpodobnost kolize mezi komunikačním systémem FH/CA a statickými rušiči (zařízení vysílající nepřetržitě na stálém kmitočtu) nebo dynamickými rušiči (tj. jinými FH nebo AFH systémy).

Porovnáním hodnot pravděpodobnosti rušeného přenosu byly zjištěny nesporné teoretické výhody nové techniky FH/CA oproti současně užívaným technikám FH a AFH. Technika FH/CA vždy dosahuje lepších nebo stejných výsledků v porovnání s technikou FH v případě rušení jak statickými tak i dynamickými rušiči. Technika FH/CA je většinou výhodnější než technika AFH v pásmu se statickými a dynamickými rušiči. Významný přínos techniky FH/CA je vidět zejména v oblasti dynamických rušičů. Naopak v oblasti statických rušičů je technika FH/CA oproti technice AFH v určitých situacích horší.

Správnost matematických modelů byla ověřena simulačním modelem, který byl vytvořen v rámci řešení této doktorské práce v prostředí MATLAB. Na základě získaných dat z modelu byl následně proveden návrh kódového zabezpečení pro stanice s kmitočtovým skákáním s novou technikou frekvenčního skákání FH/CA, které jsou určeny pro přenos dat o malém objemu v pásmu s intenzivním rušením.

KLÍČOVÁ SLOVA

frekvenční skákání, adaptivní frekvenční skákání, frekvenční skákání s předcházením kolizí, statický rušič, dynamický rušič, Reed-Solomonovy kódy, kódové zabezpečení, FH, AFH, FH/CA

ABSTRACT

The doctoral thesis deals with design of coding for frequency hopping stations in band with intensive jamming. In digital modulations erroneous determination of the modulation state occurs due to jam at the receiver side. The result is erroneously transferred symbols of the message. Errors created during the transmission can be eliminated by using error control systems. It is also possible to prevent these errors by using algorithms (techniques) of frequency hopping which select the appropriate channel. Appropriate communication channel is a channel with a lower probability of erroneous symbol in the message.

The main contribution of this thesis is to design a new frequency hopping technique with collision avoidance (FH/CA). The station with FH/CA technique measures signal levels in the considered several channels before every jump. Based on the measurements the most appropriate channel with the lowest value of measured signal level is selected. Therefore, it is more probable that a jump to an unoccupied channel with a transmission will occur. Using a mathematical model, the performance of the newly proposed FH/CA technique is compared with the currently used techniques FH and AFH. Comparison criteria are the probability of a collision between an FH/CA communication system and a static (device transmitting continuously at a fixed frequency) or dynamic jammer (i.e. other FH or AFH systems).

By comparing the values of the probability of jammed transmission, indisputable theoretical advantages of the new FH/CA technique were found, compared to the currently used FH and AFH techniques. The FH/CA technique always has better or equal results compared with the FH technique in the case of interference by static and dynamic jammers. The FH/CA technique in a band with static and dynamic jammers usually has better results than the AFH technique. A significant contribution of the FH/CA technique can be seen in the case of dynamic jammers. On the other hand, in the case of static jammers the FH/CA technique is in certain situations worse than the AFH technique.

The accuracy of the mathematical models were successfully verified on a simulation model that was created as a part of this thesis in the MATLAB environment. Based on the obtained data from the model there was designed coding for frequency hopping stations with the new technique of frequency hopping FH/CA which is designed for small-volume data transfer in a band with intensive jamming.

KEYWORDS

Frequency Hopping, Adaptive Frequency Hopping, Frequency Hopping with Collision Avoidance, static jammer, dynamic jammer, Reed-Solomon codes, error control coding, FH, AFH, FH/CA

PUST, Radim *Možnosti kódového zabezpečení stanic s kmitočtovým skákáním*: dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 123 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Karel Burda, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Možnosti kódového zabezpečení stanic s kmitočtovým skákáním“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího doktorské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené doktorské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této doktorské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Karlu Burdovi za odborné rady a vedení při vypracování práce.

V Brně dne 22.8.2011

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	14
1 Dosavadní stav	15
1.1 Princip stanic s technikou frekvenčního skákání	15
1.2 Rušení stanic s technikou frekvenčního skákání	17
1.3 Možnosti kódového zabezpečení stanic s frekvenčním skákáním	18
1.3.1 Reed-Solomonův kód	22
1.3.2 Algoritmy frekvenčního skákání	25
2 Cíle disertace	28
3 Vlastní řešení	29
3.1 Matematické modely rušení provozu stanic s technikami FH a AFH	29
3.1.1 Matematický model rušení provozu stanic s technikou FH	29
3.1.2 Matematický model rušení provozu stanic s technikou AFH	31
3.1.3 Porovnání výkonosti technik FH a AFH	33
3.2 Nová technika frekvenčního skákání pro prostředí s intenzivním rušením	37
3.2.1 Návrh nové techniky frekvenčního skákání FH/CA	37
3.2.2 Matematický model rušení provozu stanic s technikou FH/CA	41
3.2.3 Porovnání výkonosti technik FH/CA a FH	48
3.2.4 Porovnání výkonosti technik FH/CA a AFH	52
3.2.5 Zhodnocení výsledků výkonosti techniky FH/CA	61
3.2.6 Matematický model vzájemného rušení systémů s technikou FH/CA	62
3.2.7 Porovnání vzájemného rušení systémů s technikou FH/CA a FH	65
3.3 Kódové zabezpečení stanic s frekvenčním skákáním pro prostředí s intenzivním rušením	67
3.3.1 Návrh kódového zabezpečení	67
3.3.2 Navržené kódové zabezpečení	72
3.3.3 Analýza navrženého kódového zabezpečení	74
4 Závěr	81
Literatura	84
Seznam symbolů	88

Seznam zkratek	90
Seznam příloh	91
A Návrh simulátoru pro techniky frekvenčního skákání	92
A.1 Popis simulátoru pro techniky frekvenčního skákání	92
A.2 Stanovení metody pro ověření matematických modelů pomocí simu- látoru	99
A.3 Ověření matematického modelu pro techniku FH	100
A.4 Ověření matematického modelu pro techniku AFH	101
A.5 Ověření matematického modelu pro techniku FH/CA	102
A.6 Ověření matematického modelu pro více systémů s technikou FH/CA	104
B Vývojové diagramy simulátoru pro techniku frekvenčního skákání	
	106

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Princip techniky FH.	15
1.2	Blokové schéma FH komunikačního systému.	16
1.3	Princip maticového prokladače.	20
1.4	Princip konvolučního prokladače.	21
1.5	Struktura kódového slova RS kódu.	22
1.6	Proces generování čísel kanálu pro AFH.	26
3.1	Pravděpodobnost kolize systému FH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40.	30
3.2	Pravděpodobnost kolize systému AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 kde parametr $R_{MAX} = 20$	32
3.3	Pravděpodobnost kolize systému AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 kde parametr $R_{MAX} = 30$	32
3.4	Porovnání výkonnosti systému FH s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40).	33
3.5	Porovnání výkonnosti systému FH s AFH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $R = 10$ a $S = 0$ až 100).	34
3.6	Porovnání výkonnosti systému FH s AFH v pásmu se statickými rušiči pro různá R_{MAX} ($N = 100$, $R = 1$ až 100, $S = 0$ a $R_{MAX} = 10, 20, 30, 40$).	35
3.7	Blokové schéma části systému FH/CA sloužící k výběru kanálu pro $G = 3$	38
3.8	Příklad průběhu výběru kanálu systému FH/CA v časové oblasti pro $G = 3$	38
3.9	Možné situace při obsazování kanálu stanicí FH/CA.	43
3.10	Pravděpodobnost kolize systému FH/CA v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 a $G = 3$ kde dynamické rušiče používají výhradně techniku FH.	47
3.11	Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s FH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4, $R = 0$ až 100 a $S = 0$).	48
3.12	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s FH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4, $R = 1$ až 100 a $S = 0$).	49
3.13	Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s FH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4, $R = 0$ a $S = 0$ až 100).	50

3.14	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s FH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 1$ až 100).	50
3.15	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s FH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).	51
3.16	Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ až 100 a $S = 0$).	53
3.17	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 1$ až 100 a $S = 0$).	53
3.18	Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ až 100 a $S = 0$).	54
3.19	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 1$ až 100 a $S = 0$).	55
3.20	Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s AFH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 0$ až 100).	56
3.21	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 1$ až 100).	56
3.22	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 2$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).	57
3.23	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 3$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).	58
3.24	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 2$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).	59
3.25	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 3$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).	59
3.26	Pravděpodobnost kolize systému FH/CA v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 kde parametr $G = 2$.	64
3.27	Pravděpodobnost kolize systému FH/CA v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 kde parametr $G = 3$.	64
3.28	Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s FH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 0$ až 100).	66

3.29	Porovnání výkonnosti systému FH/CA s FH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 1$ až 100).	66
3.30	Závislost efektivní přenosové rychlosti v_{ef} na délce zdrojového slova k_K pro $n_K = 63$, $q_K = 6$, $P_K = 0.4$ a $k_K = 1, 3, 5, \dots, 61$	69
3.31	Blokové schéma kódového zabezpečení FH stanice.	72
3.32	Porovnání pravděpodobnosti chybného dekódování kódového slova navrženým FH komunikačním systémem v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R = 0$ až 100 a $S = 0$).	75
3.33	Efektivní přenosová rychlost FH komunikačního systému v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R = 0$ až 100 a $S = 0$).	76
3.34	Porovnání pravděpodobnosti chybného dekódování kódového slova navrženým FH komunikačním systémem v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $R = 0$ a $S = 0$ až 100).	77
3.35	Efektivní přenosová rychlost FH komunikačního systému v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $R = 0$ a $S = 0$ až 100).	78
3.36	Maximální počet statických a dynamických rušičů při kterém je splněna podmínka $P_W < P_{WMAX}$, platí pro navržený FH komunikační systém ($N = 100$, $R = 1$ až 100 a $S = 1$ až 100).	79
3.37	Efektivní přenosová rychlost FH komunikačního systému v pásmu se statickými a dynamickými rušiči ($N = 100$, $R = 1$ až 100 a $S = 1$ až 100).	80
B.1	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim (1/2).	106
B.2	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim (2/2).	107
B.3	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_param.	108
B.4	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_rg_init.	108
B.5	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_sj_create.	109
B.6	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_create.	110
B.7	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_create.	111
B.8	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_rg_create.	112
B.9	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_sj_load.	113
B.10	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_load.	114
B.11	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_rg_getnum.	115
B.12	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_afh_learn (1/2).	116
B.13	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_afh_learn (2/2).	117
B.14	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_afh_remap.	118
B.15	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_load_part1.	119
B.16	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_load_part2.	120
B.17	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_collision_calc.	121
B.18	Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_collision_calc.	121

B.19 Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_collision_calc_aftersim. .	122
B.20 Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_collision_calc_aftersim.	123

SEZNAM TABULEK

3.1	Maximální počty statických rušičů.	76
3.2	Maximální počty dynamických rušičů.	78
A.1	Vzor vstupních parametrů R a S pro ověření matematického modelu.	99
A.2	Ověření matematického modelu pro techniku FH.	100
A.3	Ověření matematického modelu pro techniku AFH.	101
A.4	Ověření matematického modelu pro techniku FH/CA pro $G = 2$	102
A.5	Ověření matematického modelu pro techniku FH/CA pro $G = 3$	103
A.6	Ověření matematického modelu pro více stanic s technikou FH/CA pro $G = 2$	104
A.7	Ověření matematického modelu pro více stanic s technikou FH/CA pro $G = 3$	105

ÚVOD

Systémy s technikou frekvenčního skákání v dnešní době nacházejí své využití jak v civilní, tak vojenské oblasti. Z vojenských systémů lze zmínit systémy SINCGARS [1], EriTac [2] a Panther [3]. V současné době mezi nejrozšířenější systém s technikou frekvenčního skákání patří civilní systém Bluetooth. Na rozdíl od vojenských systémů je specifikace systému Bluetooth [4] volně dostupná. Specifikace systému Bluetooth je proto jedním z nepostradatelných zdrojů informací při řešení disertační práce.

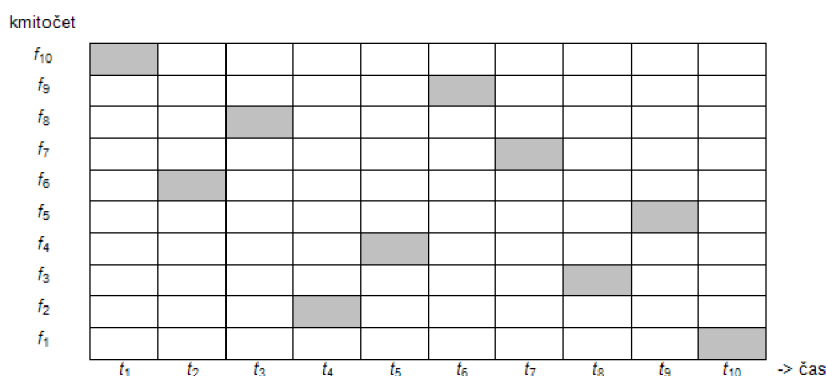
Mezi přednosti systémů s technikou frekvenčního skákání patří především zvýšená odolnost vůči rušení a vyšší bezpečnost. Obě uvedené přednosti plynou ze samotného principu techniky frekvenčního skákání, která je podrobně popsána v kapitole 1.1. Zvýšená odolnost vůči rušení je dána použitím vyššího počtu komunikačních kanálů za předpokladu, že rušiče nejsou schopny obsadit všechny tyto kanály. Bezpečnost této techniky spočívá v tom, že případný útočník neví v jakém pořadí, budou jednotlivé komunikační kanály použity a není schopen všechny kanály sledovat současně.

S technikou frekvenčního skákání se v současné době setkáváme v různých licencovaných i nelicencovaných kmitočtových pásmech. Využití nachází v pásmech VHF-UHF.

1 DOSAVADNÍ STAV

1.1 Princip stanic s technikou frekvenčního skákání

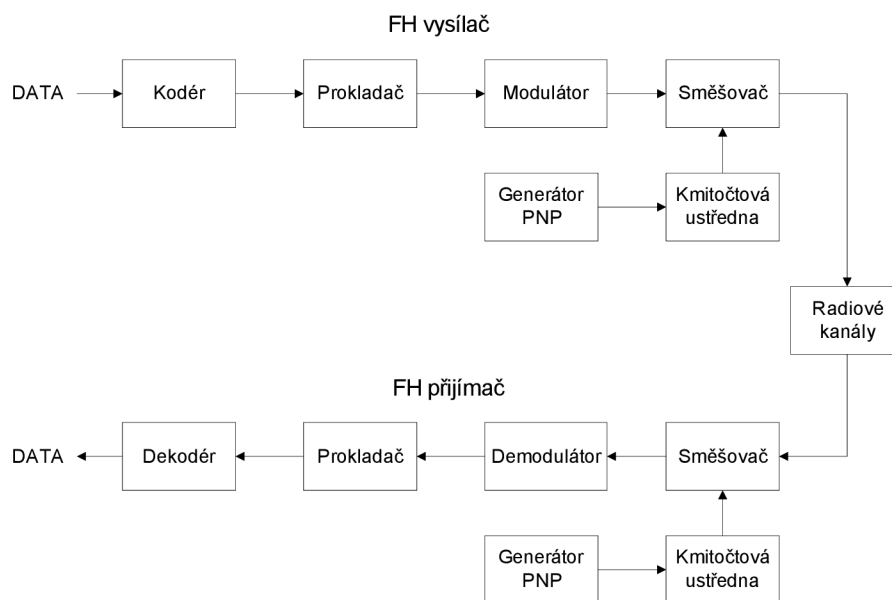
Technika frekvenčního skákání (ang. Frequency Hopping - FH) patří do skupiny modulací s rozprostřeným spektrem [5],[6]. Technika FH je v zásadě úzkopásmovým přenosem v daném časovém okamžiku, nicméně v delším časovém úseku díky mnohonásobné změně nosné frekvence dojde k jejímu rozprostření do přiděleného kmitočtového spektra. Princip této techniky spočívá v rychlém přepínání kmitočtů nosné frekvence v pseudonáhodném pořadí, které je známo jak přijímači, tak vysílači. Fungování techniky FH ilustruje obrázek 1.1, kde dochází ke změně nosné frekvence v následujícím pořadí: $f_{10}, f_6, f_8, f_2, f_4, f_9, f_7, f_3, f_5, f_1$, přičemž f_i představuje kmitočet a index i číslo kanálu. Proměnná t_y představuje časový interval, kde index y značí pořadové číslo intervalu.



Obr. 1.1: Princip techniky FH.

Na obrázku 1.2 je vyobrazeno blokové schéma FH komunikačního systému [7], které se skládá z FH vysílače a FH přijímače. Data jsou nejprve přiváděna do kodéru, který za použití detekčních a korekčních kódů data zabezpečí zvýšením redundance. Z kodéru jsou data přivedena do prokladače, pomocí kterého dochází k rozprostření kódových symbolů. Prokladače díky rozprostření symbolů tak mohou při zpětném skládání kódových symbolů v FH přijímači rozprostřít případné shluky chyb. Nevýhodou prokladačů je zanesení zpoždění do komunikačního systému. Následně je signál upraven modulátorem a pomocí směšovače namodulován na příslušný kmitočet. Uvedený kmitočet je určen pomocí nosného kmitočtu, který je do směšovače přiveden z kmitočtové ústředny. Nosný kmitočet je řízen pseudonáhodným generátorem. Signál po průchodu radiovým spektrem je zpětně demodulován. Pomocí

prokladače je obnoveno správné pořadí kódových symbolů. Následně dekodér za použití korekčního a detekčního kódu je schopen opravit nebo alespoň detekovat chyby vzniklé během přenosu.



Obr. 1.2: Blokové schéma FH komunikačního systému.

1.2 Rušení stanic s technikou frekvenčního skákání

V každém radiovém pásmu je třeba počítat s určitou mírou zarušení, která je dána typem pásma, možností vyhrazení pásma pro danou službu, skutečností zda v daném pásmu a místě současně komunikuje jeden systém nebo více systémů a zda jsou tyto systémy řízeny centrálně nebo zda pracují nezávisle na sobě.

Samotné zdroje rušení lze podle typu rozdělit do několika skupin a podskupin. Do první skupiny patří přírodní zdroje rušení, které jsou zdrojem tzv. přirozeného rušení. Do druhé skupiny patří technické zdroje rušení, kam lze zařadit všechna technická zařízení sestavená člověkem jako televizní vysílače, radionavigační majáky, radiostanice, mobilní telefony, rušiče atd.

Technické rušení lze z hlediska techniky FH rozdělit na statické nebo dynamické [7]. Statické rušiče se vyznačují stálým kmitočtem a způsobují v čase trvalé rušení. Jako příklad tohoto rušení lze uvést televizní a rozhlasové vysílače. Dynamické rušiče mění svůj vysílací kmitočet v čase, čili způsobují na daném kmitočtu ztrátu části přenášených informací. Typickým příkladem těchto rušičů jsou stanice s technikou frekvenčního skákání.

Do kategorie technického rušení lze rovněž zařadit sledující rušič [7],[5]. Uvedený rušič je speciálně určen k rušení FH stanic. Sledující rušič je schopen v čase jednoho radiového rámce FH stanice prohledat větší počet kanálů. V případě nalezení kanálu obsazeného FH stanicí provede zarušení tohoto kanálu. Následně po odladění FH stanice z daného kanálu je popsán proces opakován. S rostoucím celkovým počtem kanálů a rychlostí přeladování FH stanice se zcela logicky zvyšuje požadavek na rychlost prohledávání kanálů sledujícím rušičem. FH stanice s dostatečnou vysokou rychlostí přeladování a dostatečně velkým počtem kanálů tak mohou sledujícímu rušiči uniknout [8]. Sledující rušič dále musí být schopen rozlišit v daném kmitočtovém pásmu nežádoucí FH stanice od žádoucích. Za žádoucí FH stanice lze považovat vlastní FH stanice, za nežádoucí lze považovat protivníkovy FH stanice. K rozlišení žádoucích FH stanic musí sledující rušič znát jejich pseudonáhodné postupnosti a musí být s danými FH sítěmi synchronizován. Pro velký počet žádoucích FH sítí může být synchronizace s těmito FH sítěmi pro sledující rušič problematická [7].

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem nebude rušení sledujícím rušičem v práci dále uvažováno. Rovněž vlivy přírodního rušení považujeme prakticky za zanedbatelné oproti vlivu ostatních typů rušení, z tohoto důvodu není přirozené rušení v práci rovněž dále uvažováno.

Při řešení této disertační práce budou dále jako zdroje rušení pro FH komunikační systém uvažovány statické a dynamické rušiče.

1.3 Možnosti kódového zabezpečení stanic s frekvenčním skákáním

U digitálních modulací dochází vlivem rušení k chybnému určení modulačního stavu na straně přijímače. Důsledkem jsou chybně přenesené symboly zprávy. V závislosti na druhu rušení dochází k osamoceným chybám případně ke shluku chyb [7],[9]. V případě osamocených chyb se chybně přenesené symboly zprávy vyskytují osamoceně a jsou relativně rovnoměrně rozděleny v přijaté zprávě [9]. V případě shluku chyb se chybně přenesené symboly zprávy vyskytují ve shlucích, tj. v okolí chybně přeneseného symbolu se s velkou pravděpodobností budou vyskytovat další chybně přenesené symboly. V určitých úsecích přijaté zprávy bude tak relativní četnost výskytu chybně přenesených symbolů výrazně vyšší oproti zbylým úsekům této zprávy [9].

Vzniklé chyby během přenosu je možné eliminovat za použití zabezpečovacích kódů [9],[10],[11]. Zároveň je také možné těmto chybám předcházet pomocí algoritmů frekvenčního skákání, které provádí výběr vhodného komunikačního kanálu. Vhodným komunikačním kanálem se rozumí kanál s nižší pravděpodobností vzniku chybných symbolů ve zprávě.

Princip zabezpečovacích kódů spočívá v doplnění původní zprávy o redundantní symboly. Redundantní symboly umožňují buď zjistit chybné symboly v přenesené zprávě pomocí detekčního kódu nebo chybné symboly v přenesené zprávě opravit pomocí korekčního kódu. Dle typu použitého zabezpečovacího kódu rozlišujeme tři různé typy zabezpečovacích protokolů [7].

Prvním typem zabezpečovacího protokolu je ARQ (ang. Automatic Request for Retransmission), který využívá detekční kód. Původní zpráva je zabezpečena pomocí detekčního kódu. V případě detekce chybně přenesené zprávy si přijímač automaticky vyžádá opakované vysílání dané zprávy. Protokolů typu ARQ existuje velké množství [11] a výše popsaná funkce je pro všechny jeho varianty společná.

Druhým typem zabezpečovacího protokolu je FEC (ang. Forward Error Control), který využívá korekční kód. Původní zpráva je zabezpečena pomocí korekčního kódu. V případě detekce chybně přenesené zprávy provede přijímač automatickou opravu chyb v dané zprávě pomocí korekčního kódu.

Třetím typem zabezpečovacího protokolu je HARQ typu I (ang. Hybrid ARQ), který využívá detekční a korekční kód současně [12]. Původní zpráva je zabezpečena nejprve pomocí detekčního kódu a následně pomocí korekčního kódu. V přijímači je chybně přenesená zpráva nejprve opravena korekčním kódem a poté zkontrolována její správnost pomocí detekčního kódu. V případě detekce chybně opravené zprávy si přijímač automaticky vyžádá opakované vysílání dané zprávy. Tento typ zabezpečovacího protokolu je technicky nejnáročnější z výše uvedených typů protokolů,

avšak velmi účinný [7].

Pro výběr vhodného detekčního kódu je hlavním kritériem detekční schopnost daného kódu pro osamocené i shlukové chyby. Uvedené podmínce vyhovují cyklické kódy (ang. Cyclic Redundancy Check - CRC) [11], které se kromě velmi dobré detekční schopnosti pro osamocené i shlukové chyby také vyznačují snadnou realizací. Z tohoto důvodu jsou cyklické kódy velmi rozšířeny v oblasti komunikačních systémů včetně stanic s frekvenčním skákáním [7]. CRC kódy označujeme zkráceně CRC- r_C , kde r_C je počet zabezpečovacích bitů (redundance CRC kódu v bitech). Pravděpodobnost se kterou bude CRC kód chybně dekodovanou zprávu považovat za bezchybnou lze vypočítat dle vztahu [13]:

$$P_{CRC} = 2^{-r_C} . \quad (1.1)$$

Vhodný korekční kód a jeho parametry pro stanice s frekvenčním skákáním je třeba volit s přihlédnutím na typ komunikace a podmínky za kterých bude tato komunikace probíhat mezi jednotlivými stanicemi. Přičemž podmínky mohou být v případě intenzivního rušení zvláště nepříznivé.

Korekční kódy rozdělujeme na blokové a konvoluční [11]. Blokové korekční kódy rozdělují zprávu na k_K -tice zdrojových symbolů. Každá k_K -tice zdrojových symbolů (tzv. zdrojové slovo) je následně doplněna o r_K redundantních symbolů čímž je vytvořena n_K -tice kódových symbolů tzv. kódové slovo. Kódové slovo tak obsahuje $r_K = n_K - k_K$ redundantních symbolů. Tyto kódy označujeme zkráceně (n_K, k_K) . Blokové kódy dělíme na binární a nebinární. U binární kódů jsou kódové symboly kódovány pomocí dvojice binárních symbolů. Mezi binární blokové kódy řadíme Hammingovy kódy a BCH kódy, které jsou pojmenovány dle jmen jejich tvůrců Bose, Chaudhru, Hocquenqhem [11]. U nebinární kódů jsou kódové symboly kódovány pomocí nebinárních symbolů. Jedním z nejrozšířenější nebinárních blokových kódů je RS kód (Reed-Solomonův kód) například [11],[12] a [14].

Konvoluční korekční kódy vytváří n_K -tice kódových symbolů na základě aktuální k_K -tice zdrojových symbolů a předchozích $(L_K - 1)$ k_K -tic zdrojových symbolů, kde L_K je omezující délka kódu [7]. Tyto kódy označujeme zkráceně $(k_K/n_K, L_K)$.

Pro FH komunikační systém je technicky výhodnější užití blokového korekčního kódu, protože jednotlivé symboly se vysílají v radiových rámcích tedy po blocích [7].

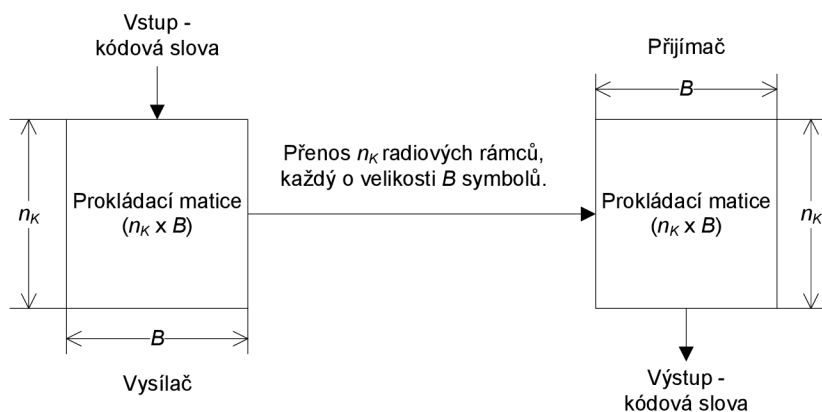
Součástí kódového zabezpečení současných komunikačních systémů jsou prokladače, které se používají k eliminaci vlivu shlukových chyb. Pomocí prokladače ve vysílači dochází k rozprostření symbolů každého kódového slova mezi symboly jiných kódových slov. Následně pomocí prokladače v přijímači je opačným postupem obnoveno uspořádání symbolů do svých kódových slov. Případný shluk chybných

symbolů je tak rozprostřen do více kódových slov. Pomocí prokladače je tak zvýšena pravděpodobnost, že počet chybných symbolů v daném kódovém slově nepřekročí korekční kapacitu daného kódu. Nevýhodou každého prokladače je zanesení zpoždění do komunikačního systému.

Prokladače dělíme na maticové a konvoluční. Dále budeme uvažovat FH komunikační systém, kde délka kódového slova je rovna n_K a v jednom radiovém rámci je přeneseno B kódových symbolů.

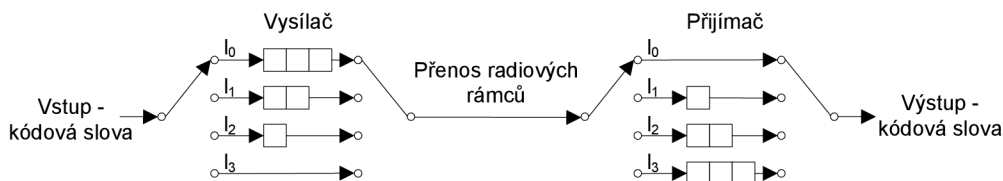
Princip maticového prokladače ilustruje obrázek 1.3 [7]. Prokladač je tvořen na vysílací i přijímací straně FH komunikačního systému pomocí prokládací matice o velikosti $(n_K \times B)$ symbolů. Na vysílací straně se nejprve do matice po sloupcích postupně zapíše B kódových slov o délce n_K symbolů. Po zaplnění prokládací matice na straně vysílače jsou jednotlivé symboly odvysílány vysílačem po řádcích. Na straně přijímače jsou přijaté symboly zapisovány po řádcích do prokládací matice. Po přijetí $n_K \cdot B$ symbolů je prokládací matice na straně přijímače zaplněna. Z této matice je postupně po sloupcích vyčteno B kódových slov o délce n_K symbolů.

Výše popsaný maticový prokladač zajišťuje ideální prokládání, tj. každý kódový symbol daného kódového slova je vždy přenesen v jiném radiovém rámci. Pokud by prokládací matice měla menší počet řádků než je počet symbolů kódového slova, pak by se nejednalo o ideální prokládání, ale o obecné prokládání. Zatímco u ideálního prokládání je v každém radiovém rámci pouze jeden kódový symbol daného kódového slova u obecného prokládání může být v rámci více symbolů daného kódového slova. U obecného prokládání je tak vyšší pravděpodobnost překročení korekční kapacity kódu v důsledku shlukových chyb oproti ideálnímu prokládání.



Obr. 1.3: Princip maticového prokladače.

Princip konvolučního prokladače ilustruje obrázek 1.4 [11], pro délku radiového rámce $B = 4$. Konvoluční prokladač je realizován na straně vysílače i přijímače pomocí dvou přepínačů a B posuvných (zpožďovacích) registrů. Na vysílací i přijímací straně je shodně L linek l_i , které označujeme číslem $i = 0, 1, \dots, L - 1$, přičemž počet linek je shodný s počtem posuvných registrů $L = B$. Na straně vysílače je na lince l_i posuvný registr o délce $L - i - 1$, na straně přijímače o délce i . Všechny čtyři přepínače (na straně vysílače i přijímače) pracují synchronně a přepínají se jednou za dobu trvání přenosu kódového symbolu. Obsah posuvného registru na lince l_i je vždy posunut v okamžiku přepnutí na následující linku, tj. na linku l_{i+1} , přesněji $l_{(i+1)\text{mod}(L)}$, protože po lince l_{L-1} následuje linka l_0 . Vzhledem k odlišnému počtu posuvných registrů na jednotlivých linkách prokladače na straně vysílače se jednotlivé symboly kódového slova dostávají do radiového rámce v jiném pořadí než v jakém jsou uspořádány na vstupu prokladače. V každém radiovém rámci tak mohou být přeneseny symboly z více kódových slov. Na straně přijímače je prokladačem pomocí inverzního uspořádání posuvných registrů obnoveno uspořádání kódových symbolů. Popsaný konvoluční prokladač zajišťuje obecné prokládání. Ideálního prokládání je možné dosáhnout s konvolučním prokladačem při splnění podmínky $B \geq n_K$ [7].



Obr. 1.4: Princip konvolučního prokladače.

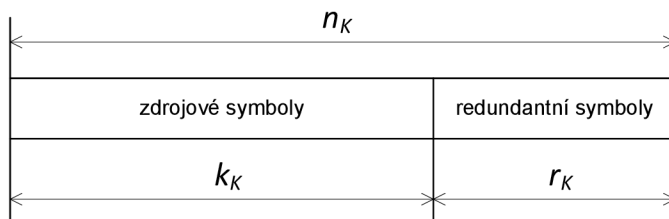
V současné době jsou tak známy dostatečně výkonné zabezpečovací techniky, pomocí kterých je možné zabezpečit data pro přenos v pásmu s intenzivním rušením. Otázkou zůstává, které zabezpečovací techniky a s jakými parametry zvolit pro zabezpečení dat, která budou přenášena v pásmu s intenzivním rušením.

1.3.1 Reed-Solomonův kód

Na základě popisu rušení v kapitole 1.2 je uvažováno, že společně s FH komunikačním systémem se v daném pásmu budou vyskytovat statické a dynamické rušiče. V případě že FH komunikační systém zvolí kanál zarušený statickým rušičem dochází k zarušení celého radiového rámce. V případě že FH komunikační systém zvolí kanál, který je, nebo bude v době přenosu radiového rámce zarušen dynamickým rušičem, dochází k zarušení celého nebo alespoň části radiového rámce.

V případě statických a dynamických rušičů, tak vždy dochází k zarušení celého nebo alespoň části radiového rámce FH komunikačního systému, které tak nejčastěji způsobí shluk chyb v daném radiovém rámci. Při výběru vhodného kódového zabezpečení pro FH komunikační systém je třeba volit takový zabezpečovací kód, který je efektivní při výskytu shluků chyb. Korekci shlukových chyb je možné provést buď za pomoci prokladače a následné korekce osamocených chyb, nebo pomocí korekčního kódu, který je efektivní v případě výskytu shlukových chyb. Mezi takové korekční kódy patří právě Reed-Solomonův kód, zkráceně RS kód [11], [12].

RS kód řadíme do blokových nebinárních kódů. Tento kód označujeme zkráceně RS (n_K, k_K) , kde n_K je počet symbolů kódového slova a k_K je počet symbolů zdrojového slova. Kódové slovo tak obsahuje $r_K = n_K - k_K$ redundantních symbolů, viz obrázek 1.5.



Obr. 1.5: Struktura kódového slova RS kódu.

Kódové slovo je složeno z kódových symbolů, které jsou kódovány pomocí abecedy o Q_K znacích. Každý znak abecedy je tvořen pomocí q_K -tice bitů, počet znaků abecedy Q_K lze vypočítat dle vzorce (1.2) [7].

$$Q_K = 2^{q_K}, q_K > 2. \quad (1.2)$$

U RS kódu je počet symbolů n_K v kódovém slově omezen dle vztahu [11]:

$$n_K \leq 2^{q_K} - 1. \quad (1.3)$$

Korekční kapacita RS kódu je [11]:

$$t_K = \frac{n_K - k_K}{2} = \frac{r_K}{2}. \quad (1.4)$$

RS kód je schopen opravit T_K chybných symbolů, pokud platí:

$$T_K \leq t_K . \quad (1.5)$$

RS kód není efektivní pro korekci osamocených chyb, protože v důsledku jednoho chybného bitu z q_K -tice bitů kódového symbolu je chybný celý kódový symbol.

Pravděpodobnost se kterou bude daný kódový symbol chybně dekodován v případě kolize FH komunikačního systému s rušičem lze vypočítat dle vztahu [7],[5]:

$$P_S = \frac{Q_K - 1}{Q_K} \cdot P_K , \quad (1.6)$$

kde P_K je pravděpodobnost kolize FH komunikačního systému s rušičem. Při výpočtu pravděpodobnosti P_S je pesimisticky uvažováno rušení tónem [7],[5]. Počítána je tak pravděpodobnost se kterou nastane situace, kdy tón rušiče bude odlišný od tónu právě přenášeného kódového symbolu. Dále je pesimisticky uvažováno, že výkon rušivého signálu v daném kanálu bude stejný nebo větší než je výkon FH komunikačního systému.

Na základě znalosti pravděpodobnosti chybně dekodovaného symbolu P_S lze vypočítat pravděpodobnost chybně dekodovaného kódového slova P_W [7],[11]:

$$P_W = 1 - \sum_{i=0}^{t_K} \binom{n_K}{i} \cdot P_S^i \cdot (1 - P_S)^{n_K - i} , \quad (1.7)$$

kde výraz $\binom{n_K}{i} \cdot P_S^i \cdot (1 - P_S)^{n_K - i}$ je pravděpodobností, že v bloku n_K symbolů je právě i symbolů chybných. Součet pravděpodobností chybně dekodovaných symbolů o počtu od $i = 0$ do počtu odpovídajícímu korekční kapacitě kódu t_K je pravděpodobností, že kódové slovo bude bezchybně dekodováno. Pro výpočet pravděpodobnosti chybně dekodovaného kódového slova je tak odečtena pravděpodobnost bezchybně dekodovaného kódového slova od jedničky. Uvedený vztah (1.7) platí za předpokladu, že chybné kódové symboly se na vstupu dekodéru vyskytují navzájem nezávisle a tudíž pro jejich modelování lze použít binomické rozdělení [7]. Pro splnění výše uvedené podmínky musí být pomocí prokladače zajištěno ideální prokládání nebo počet symbolů v radiovém rámci musí být roven jedné ($B = 1$) [7].

Pro efektivní přenosovou rychlost v_{ef} platí vztah [7]:

$$v_{ef} = v_B \cdot \frac{k_K}{n_K} \cdot (1 - P_W) , \quad (1.8)$$

kde v_B je přenosová rychlost FH komunikačního systému. Vzorec pro výpočet efektivní přenosové rychlosti (1.8) vyjadřuje skutečnou střední přenosovou rychlost v_{ef} , přenosová rychlost v_B je tak ponížena o redundanci korekčního kódu a přenos chybně dekodovaných kódových slov. Pro zjednodušení není ve výpočtu efektivní

přenosové rychlosti uvažován zpětný kanál a redundance detekčního kódu, za předpokladu že je v FH komunikačním systému detekční kód užíván. Pomocí vzorce (1.8) je možné optimalizovat parametry n_K a k_K korekčního kódu.

Jako vhodný korekční kód pro FH komunikační systém lze považovat RS kód, přičemž parametry tohoto kódu lze zvolit na základě výše uvedených vztahů.

1.3.2 Algoritmy frekvenčního skákání

Vzniku chyb během přenosu je možné předcházet pomocí algoritmů frekvenčního skákání, které provádí výběr vhodného komunikačního kanálu. Vhodným komunikačním kanálem se rozumí kanál s nižší pravděpodobností vzniku chybných prvků ve zprávě. Způsob jakým dochází k výběru jednotlivých komunikačních kanálů u technik s frekvenčním skákáním lze považovat za určitý druh kódování.

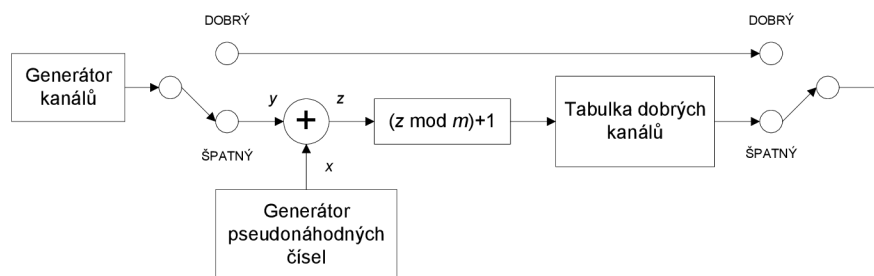
Technologie Bluetooth [4] je schopna předcházet chybám, které jsou způsobeny statickými rušiči pomocí algoritmu adaptivního frekvenčního skákání (ang. Adaptive Frequency Hopping - AFH). Následující popis techniky AFH vychází z techniky AFH u systému Bluetooth, která je popsána ve specifikaci [4]. Technika AFH vyžaduje centrální řízení, proto musí být stanice rozděleny do rolí. Hlavní tj. řídicí roli má stanice Master, ostatní stanice jsou Slave. Stanice Master na základě získaných dat rozděluje kanály na dobré a špatné, neboli na povolené a zakázané. Tato data pocházejí z vyhodnocení příjmu stanice Master. Stanice Slave může volitelně ovlivnit rozhodování stanice Master předáním vlastní tabulky dat získaných ze svého příjmu.

Špatné kanály mohou být v praxi určeny pomocí následujících kritérií, jednak na základě měření úrovně signálů na jednotlivých kanálech pomocí RSSI (ang. Received Signal Strength Indication), dále pomocí paketové chybovosti PLR (ang. Packet Loss Ratio) a nebo také pomocí bitové chybovosti BER (ang. Bit Error Ratio).

Po rozdělení kanálů na dobré a špatné je třeba předat stanici Slave seznam špatných kanálů. Seznam dobrých kanálů lze určit ze seznamu špatných kanálů a naopak na základě pravidla, které říká, že dobrý kanál je ten, který není špatný. Předání je v praxi realizováno pomocí pravidelně vysílaného rámce tzv. broadcastu. Může se stát, že nedojde k doručení broadcastu z důvodů náhlého zarušení kanálu, i z tohoto důvodu je omezen maximální počet kmitočtů, které mohou být nahrazovány tak, aby nedošlo k úplné desynchronizaci stanic. Maximální počet kmitočtů, které mohou být nahrazeny, udává proměnná R_{MAX} . Samotný generátor čísel kanálů systému AFH je shodný s generátorem čísel kanálů systému FH. U systému AFH je však generátor čísel kanálů rozšířen o rozhodovací člen a další bloky, viz obrázek 1.6.

U AFH za generátorem následuje rozhodovací člen, který zjišťuje, zda generátor vygeneroval kanál s označením dobrý, nebo špatný. V případě volby kanálu označeného jako dobrý je výsledkem přímo číslo kanálu z generátoru. V případě, že generátor vygeneruje číslo špatného kanálu je provedena jeho náhrada za některý kanál z tabulky dobrých kmitočtů. Je vhodné nahradit určitý špatný kanál pokaždé jiným dobrým kanálem. Z tohoto důvodu se provádí operace XOR bitů pseudonáhodně získaného čísla x s číslem vygenerovaného kanálu y . Výsledek operace XOR je uložen do proměnné z . Následuje operace z modulo m k získání čísla řádku v

rozsahu tabulky dobrých kmitočtů, kde m je počet řádků tabulky s dobrými kanály. Z příslušného řádku tabulky je vyčteno číslo dobrého kanálu. Popsaná metoda je poměrně efektivní jelikož vyžaduje přenos pouze čísel špatných kanálů. Postačí bitové označení, které lze dále komprimovat a zabezpečit pomocí korekčního kódu. Tím lze zvýšit pravděpodobnost, že stanice Slave dostane včas a v pořádku informace potřebné k eliminaci vlivu statických rušičů.



Obr. 1.6: Proces generování čísel kanálu pro AFH.

Kromě techniky AFH jsou v současné době teoreticky popsány následující techniky frekvenčního skákání. Technika DAFH (ang. Dynamic Adaptive Frequency Hopping) [15] dynamicky mění množinu užívaných kanálů na základě PER (ang. Packet Error Rate). Další technika EAFH (ang. Enhanced Adaptive Frequency Hopping) [16] na základě PER redukuje velikost hopsetu a délku paketů. Kanály s vysokou hodnotou PER technika EAFH vyřazuje z užívání. Techniky UBAFH (ang. Utility Based Adaptive Frequency Hopping) [17] nebo RAFH (ang. Robust Adaptive Frequency Hopping) [18] z PER odvozují mapování kanálů. Kanály s nižším PER jsou užívány častěji, než kanály s vyšším PER.

Žádná z výše uvedených technik není schopna reflektovat aktuální stav radiových kanálů, protože vždy vychází z dříve naměřených údajů. Tyto techniky tak mohou cíleně eliminovat vliv pouze statických rušičů. Dále tyto techniky vyžadují režii pro svoji činnost v podobě předávání nezbytných informací (o stavu jednotlivých kanálů) důležitých pro synchronizaci generátorů kanálů. V prostředí s intenzivním rušením tak mohou mít současně užívané adaptivní techniky problém s předáním nezbytných informací pro synchronizaci.

Přínosem v této oblasti by jistě byl návrh nové techniky frekvenčního skákání, která by přizpůsobovala své chování na základě aktuálně naměřených údajů bez nutnosti předávání informací o stavu jednotlivých kanálů. Díky těmto vlastnostem by nová technika měla být vhodnější pro prostředí s intenzivním rušením než současně užívané techniky. Nově navržená technika by tak mohla částečně eliminovat vliv i dynamického rušení oproti současně užívaným a popsaným technikám. Nově

navrženou techniku můžeme pojmenovat jako techniku frekvenčního skákání s předcházením kolizí (ang. Frequency Hopping with Collision Avoidance - FH/CA). Aby bylo možné posoudit přínos nově navržené techniky bude nezbytné ji porovnat se současně užívanými technikami. Porovnání lze provést pomocí matematických modelů a simulátoru.

V současné době jsou popsány modely popisující koexistenci systému Bluetooth s adaptivním frekvenčním skákáním a systému 802.11b s přímo rozprostřeným spektrem [19], [20]. Případně model porovnávající koexistenci dvou odlišných technik AFH opět se systémem 802.11b [21]. Dále je popsán model zabývající se nezbytnou dobou potřebnou k detekci špatného kanálu a k jeho vyloučení z užívání u systému AFH [22]. Žádný z výše uvedených modelů se nezabývá chováním více systémů s technikou frekvenčního skákání se stejnými parametry v pásmu kde pracují statické rušiče.

V rámci řešení disertační práce tak bude nezbytné sestavit matematické modely rušení pro FH, AFH a FH/CA techniky tak, aby bylo možné porovnat chování více systémů s technikou frekvenčního skákání v pásmu kde pracují statické rušiče.

Ze získaných dat z modelu bude následně možné provést příslušné závěry a navrhnout kódové zabezpečení FH komunikačního systému s novou technikou FH/CA. V současné době jsou publikovány články například [23],[24],[25] a [26] popisující návrh kódového zabezpečení pro FH komunikační systém. Uvedené články při návrhu kódového zabezpečení uvažují modely rušení pouze pro techniku FH. Přínosem v této oblasti by tak měl být i návrh kódového zabezpečení FH komunikačního systému s novou technikou FH/CA.

2 CÍLE DISERTACE

Na základě analýzy současného stavu byly určeny tyto cíle:

- sestavit matematický model rušení pro techniku FH,
- sestavit matematický model rušení pro techniku AFH,
- porovnat výkonnost technik FH a AFH,
- navrhnout novou techniku frekvenčního skákání FH/CA,
- sestavit matematický model pro techniku FH/CA,
- porovnat výkonnost techniky FH/CA oproti FH,
- porovnat výkonnost techniky FH/CA oproti AFH,
- navrhnout a realizovat počítačový simulátor pro techniky FH, AFH a FH/CA,
- ověřit výsledky sestavených matematických modelů pomocí simulátoru,
- navrhnout kódové zabezpečení FH komunikačního systému s technikou FH/CA dle zadání (viz níže),
- analyzovat navržené kódové zabezpečení FH komunikačního systému s technikou FH/CA.

Zadání: Cílem doktorské práce je navrhnout kódové zabezpečení pro stanice s kmitočtovým skákáním v pásmu s intenzivním rušením. V pásmu s intenzivním rušením je reálně možné přenášet data pouze o malém objemu, z tohoto důvodu bude navrženo kódové zabezpečení FH komunikačního systému pro přenos dat o malém objemu (krátké textové zprávy, údaje senzorů, souřadnice polohy).

3 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

3.1 Matematické modely rušení provozu stanic s technikami FH a AFH

V první části řešení disertační práce byly sestaveny matematické modely pro současně užívané techniky FH a AFH, které byly publikovány v [27]. Modely simulují pravděpodobnost kolize mezi komunikačním systémem a statickým nebo dynamickým rušičem v daném komunikačním pásmu. Pro jednoduchost se předpokládá, že šířka pásma každého z rušičů je stejná jako šířka pásma jednoho kanálu systému FH. Tedy jeden rušič dokáže plně zarušit maximálně jeden kanál.

3.1.1 Matematický model rušení provozu stanic s technikou FH

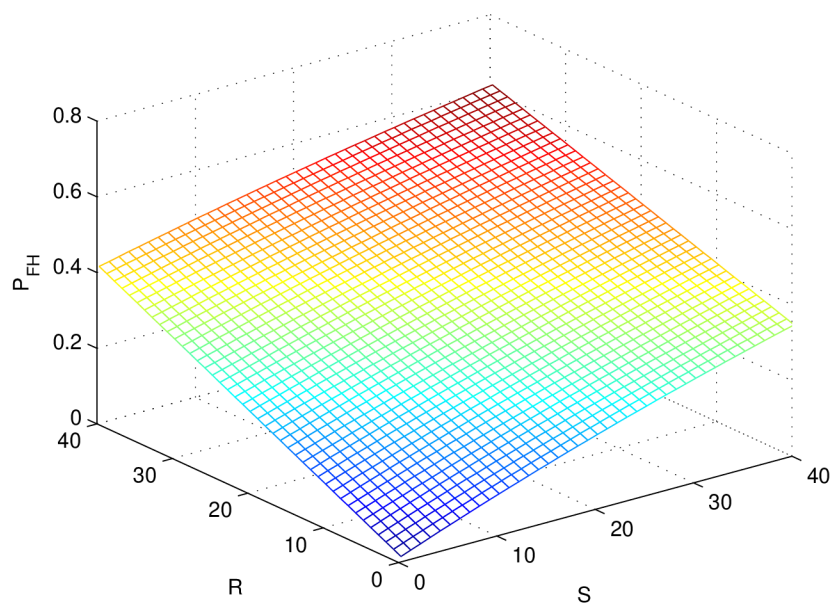
Pro techniku FH byl odvozen následující vztah. Pravděpodobnost kolize resp. skoku FH systému na zarušený kanál je dána vztahem:

$$P_{FH} = 1 - \left(\frac{N - R}{N}\right) \cdot \left(\frac{N - 1}{N}\right)^S, \quad (3.1)$$

kde N je počet komunikačních kanálů, R je počet kanálů zarušených statickými rušiči a S je počet dynamických rušičů. První činitel v (3.1) reprezentuje pravděpodobnost toho, že FH stanice se naladí na kanál, který není rušen statickým rušičem. Druhý činitel reprezentuje pravděpodobnost, že na náhodně vybraném kanálu nevysílá žádný z S dynamických rušičů, tj. všech S rušičů se nachází na některém z $(N - 1)$ jiných kanálů z N možných.

Součin obou pravděpodobností je přirozeně pravděpodobnost, že náhodně zvolený kanál nebude zarušen. My však hledáme jev opačný tj. pravděpodobnost skoku na zarušený kanál, proto vypočtenou pravděpodobnost odečteme od 1 a dostaneme tak výslednou pravděpodobnost P_{FH} . Pravděpodobnost kolize pro systém FH dle (3.1) je pro vybrané hodnoty parametrů vyobrazena na obrázku 3.1.

Správnost modelu byla ověřena simulačním modelem viz příloha A.3.



Obr. 3.1: Pravděpodobnost kolize systému FH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40.

3.1.2 Matematický model rušení provozu stanic s technikou AFH

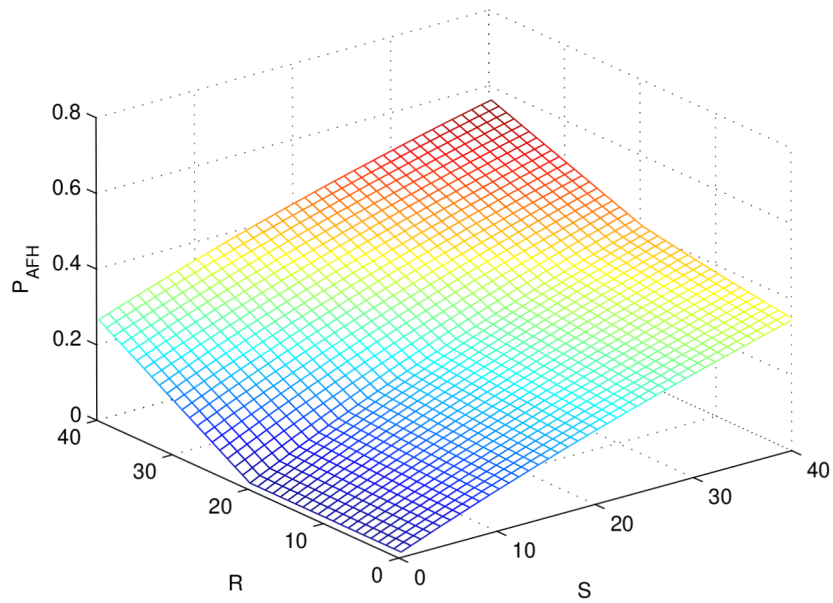
Systém adaptivního frekvenčního skákání je schopen rozeznat statické rušiče v komunikačním pásmu a nahradit zarušené kanály těmito rušiči za kanály nezarušené těmito rušiči. Výpočet pravděpodobnosti kolize pro systém AFH probíhá podobně jako pro FH. Pravděpodobnosti kolize resp. skoku AFH systému na zarušený kanál je dána vztahem:

$$\begin{aligned}
 P_{AFH} &= 1 - \left(\frac{n-r}{n}\right) \cdot \left(\frac{n-1}{n}\right)^S, \\
 n &= \begin{cases} N - R, & R \leq R_{MAX} \\ N - R_{MAX}, & R > R_{MAX} \end{cases}, \\
 r &= \begin{cases} 0, & R \leq R_{MAX} \\ R - R_{MAX}, & R > R_{MAX} \end{cases}, \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

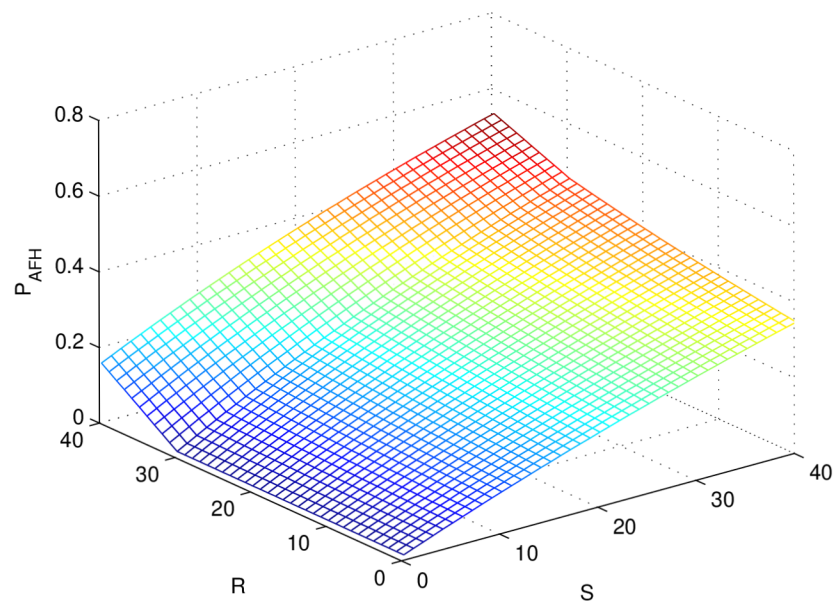
kde R_{MAX} je maximální počet nahrazovaných kanálů systémem AFH. Pomocí systému AFH je možné nahradit kanály zarušené statickými rušiči za nezarušené kanály, proto jsou proměnné N, R nahrazeny n, r . Z principu činnosti systému AFH vyplývá, že snižuje celkový počet používaných kanálů N v závislosti na počtu statických rušičů R , maximálně však o R_{MAX} , tuto skutečnost zohledňuje proměnná n . Dále systém AFH je schopen zcela eliminovat vliv statických rušičů o počtu R , ale maximálně do počtu R_{MAX} , tuto skutečnost zohledňuje proměnná r .

Chování proměnných n, r je tedy třeba rozdělit do dvou intervalů. První interval vymezuje chování proměnných, kdy počet statických rušičů R je nižší nebo roven hranici R_{MAX} . Systém AFH uvedené statické rušiče detekuje a kanály obsazené těmito rušiči přestane užívat. Tím dojde ke snížení celkového počtu využívaných kanálů o celkový počet statických rušičů R na $n = N - R$ kanálů. Současně v pásmu o n kanálech se již nenachází další statické rušiče proto $r = 0$. Druhý interval vymezuje chování proměnných, kdy počet statických rušičů R je vyšší než hranice R_{MAX} . Po překročení korekční schopnosti techniky AFH se nacházíme v druhém intervalu, kde systém AFH vyřadí z užívání maximální počet nahrazovaných kanálů. Tím dojde ke snížení celkového počtu využívaných kanálů na $n = N - R_{MAX}$ kanálů. Současně v pásmu o n kanálech se již nenachází původních R rušičů, ale méně o R_{MAX} , proto počet statických rušičů v pásmu o n kanálech je roven $r = R - R_{MAX}$ rušičů.

Pravděpodobnost kolize pro systém AFH dle (3.2) je pro vybrané hodnoty parametrů vyobrazena na obrázku 3.2 a 3.3. Rozdíl mezi uvedenými obrázky je v nastavení parametru R_{MAX} . Z uvedených obrázků je možné vyzorovat, že tento parametr ovlivňuje především pravděpodobnost kolize v případě statických rušičů. Správnost modelu byla ověřena simulačním modelem viz příloha A.4.



Obr. 3.2: Pravděpodobnost kolize systému AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 kde parametr $R_{MAX} = 20$.



Obr. 3.3: Pravděpodobnost kolize systému AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 kde parametr $R_{MAX} = 30$.

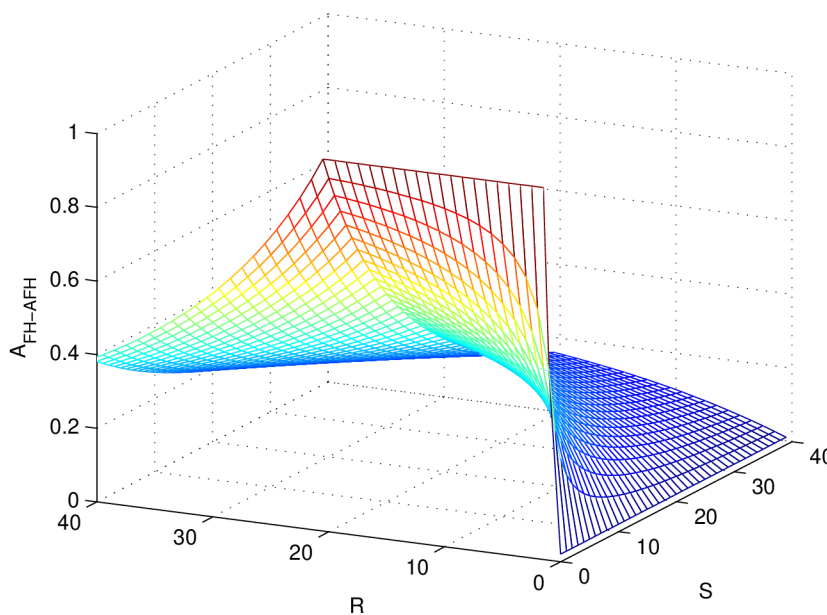
3.1.3 Porovnání výkonnosti technik FH a AFH

Srovnání obou systémů lze provést dle vztahu (3.3), kde odečteme pravděpodobnost kolize u techniky AFH od pravděpodobnosti kolize u techniky FH a výsledek vztáhneme k pravděpodobnosti kolize u techniky FH, čímž získáme výsledný zisk techniky AFH. Kladný výsledek znamená výhodu systému AFH, záporný naopak jeho nevýhodu oproti systému FH.

$$A_{FH-AFH} = \frac{P_{FH} - P_{AFH}}{P_{FH}}, P_{FH} \neq 0. \quad (3.3)$$

Uváděné analýzy byly počítány k ilustraci s konkrétními parametry, dále uvedené závěry však lze považovat za obecné a platné i pro odlišné parametry.

Dle vzorce (3.3) byl proveden výpočet zisku A_{FH-AFH} , který je pro $P_{FH} > 0$ reprezentován grafem na obrázku 3.4. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40. Z grafu kde $A_{FH-AFH} = f(R, S)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému AFH.



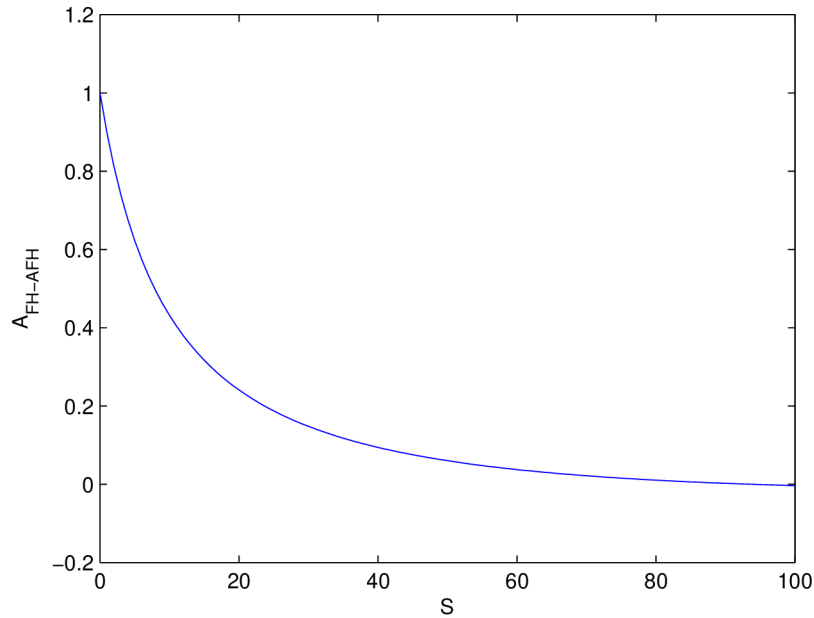
Obr. 3.4: Porovnání výkonnosti systému FH s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40).

Pokud se v komunikačním pásmu vyskytují pouze dynamické rušiče ($R = 0$) je vypočtený zisk A_{FH-AFH} roven nule. V tomto případě je použití systému AFH zcela zbytečné a vzhledem k zjednodušujícím předpokladům (neuvažujeme nutnou režii systému AFH) dokonce v praxi nevhodné.

Systém AFH oproti FH získává výhodu, pokud se v pásmu vyskytují statické rušiče R , takže platí $R > 0$. Uvedená výhoda postupně klesá s narůstajícím se počtem dynamických rušičů S a také s počtem statických rušičů R když $R > R_{MAX}$.

Dále byla provedena analýza zisku v případě dynamických rušičů při konstantním počtu statických rušičů.

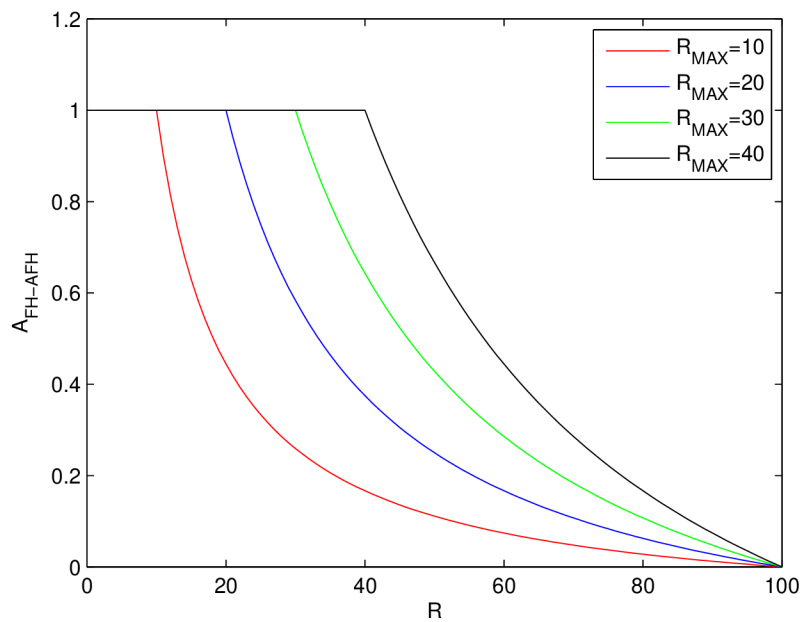
Dle vzorce (3.3) byl proveden výpočet zisku A_{FH-AFH} , který je reprezentován grafem na obrázku 3.5, kde $A_{FH-AFH} = f(S)$. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $R = 10$ a $S = 0$ až 100. V uvedeném případě dokáže systém AFH oproti FH dosáhnout nezanedbatelného zisku i v případě dynamických rušičů S . Například, když $S = 10$ je zisk $A_{FH-AFH} = 0.4$. V případě kdy se počet dynamických rušičů S blíží počtu kanálů N je zisk systému AFH nulový až mírně záporný.



Obr. 3.5: Porovnání výkonnosti systému FH s AFH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $R = 10$ a $S = 0$ až 100).

Dále byla provedena analýza zisku v případě statických rušičů. Pro praxi je velmi důležitý parametr R_{MAX} , protože jej můžeme nastavit. Počet kanálů N je obvykle neměnný. Počet statických R či dynamických S rušičů v pásmu zpravidla neovlivníme. Dle vzorce (3.3) byl proveden výpočet zisku A_{FH-AFH} , který je reprezentován grafem na obrázku 3.6, kde $A_{FH-AFH} = f(R)$. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R = 1$ až 100, $S = 0$ a $R_{MAX} = 10, 20, 30, 40$.

Z obrázku 3.6 je možné vypořozovat, že se zvyšující hodnotou R_{MAX} se snižuje počáteční strmost křivky A_{FH-AFH} . Pro příklad pokud si zvolíme hranici zisku $A_{FH-AFH} = 0.4$ jako dostatečnou zjistíme, že při $R_{MAX} = 10$ může být počet statických rušičů R až 21 a to je o 11 víc než je limit R_{MAX} . Pro $R_{MAX} = 20$ je to pak o 18 víc. Pro $R_{MAX} = 30$ je to o 21 víc a pro $R_{MAX} = 40$ je to o 22 víc. Zvyšování hodnoty parametru R_{MAX} má nevýhody v riziku desynchronizace stanic a zúžení kmitočtového pásma. Jako optimální R_{MAX} pro $N = 100$ vzhledem k uvedeným nevýhodám a počáteční strmosti křivky A_{FH-AFH} bude hodnota mezi 20 a 30. Obecně bude hodnota optimálního R_{MAX} mezi 20% a 30% z N .



Obr. 3.6: Porovnání výkonnosti systému FH s AFH v pásmu se statickými rušiči pro různá R_{MAX} ($N = 100$, $R = 1$ až 100, $S = 0$ a $R_{MAX} = 10, 20, 30, 40$).

Navržené matematické modely umožnily posoudit přínos techniky AFH oproti FH. Největší přínos systému AFH oproti FH je dle očekávání v případě statických rušičů.

Pomocí uvedených modelů je možné optimalizovat parametr R_{MAX} systému AFH pro předpokládaný počet a typ rušičů. Zvyšování hodnoty parametru R_{MAX} vede ke zvyšování odolnosti systému AFH vůči vyšším počtům statických rušičů. Je však třeba mít na paměti, že zvyšování hodnoty tohoto parametru může vést k desynchronizaci stanic a zároveň také k zúžení využívaného kmitočtového spektra. Značně zúžené kmitočtové pásmo může následně vést k zjednodušení odposlechu

AFH systému oproti FH systému. Navýšení celkového počtu kanálů N je možné zabránit případnému zúžení kmitočtového pásma.

Na základě získaných dat z modelu je možné zvolit optimální kódové zabezpečení systémů FH i AFH pro předpokládaný počet a typ rušičů.

Pro potřeby našeho modelu je zavedena idealizace, kdy se předpokládá, že broadcast se seznamem špatných kmitočtů bude vždy doručen a bezchybně dekodován. Dále se předpokládá, že po dostatečně dlouhé době jsou odhaleny všechny statické rušiče. Vzhledem k zavedeným zjednodušujícím předpokladům jsou uvedené výsledky techniky AFH ty nejlepší jakých lze dosáhnout, v praxi žádný systém AFH nemůže být lepší. Uvedená analýza výkonnosti technik FH a AFH, byla publikována v [28].

3.2 Nová technika frekvenčního skákání pro prostředí s intenzivním rušením

Porovnáním systémů FH a AFH v první fázi řešení byly zjištěny nesporné výhody systému AFH oproti FH. Systém AFH je schopen na základě dříve naměřených údajů rozpoznat nevhodné kanály pro komunikaci a na určitou dobu tyto kanály vyřadit z užívání. Systém AFH má však i své nevýhody. Systém AFH není schopen reflektovat aktuální stav radiových kanálů, protože vždy vychází z dříve naměřených údajů. Systém AFH tak může cíleně eliminovat vliv pouze statických rušičů. Dále systém AFH vyžaduje režii pro svoji činnost v podobě předávání nezbytných informací (o stavu jednotlivých kanálů) důležitých pro synchronizaci generátorů kanálů. V prostředí s intenzivním rušením tak může mít problém s předáním nezbytných informací pro synchronizaci.

Z uvedených skutečností lze dále v rámci řešení disertační práce postupovat směrem k návrhu nové techniky frekvenčního skákání, která by přizpůsobovala své chování na základě aktuálně naměřených údajů bez nutnosti předávání informací o stavu jednotlivých kanálů. Díky těmto vlastnostem by nová technika měla být vhodnější pro prostředí s intenzivním rušením než současně užívané techniky. Nově navržená technika by tak mohla částečně eliminovat vliv i dynamického rušení oproti současně užívaným technikám. Nově navrženou techniku můžeme pojmenovat jako techniku frekvenčního skákání s předcházením kolizí (ang. Frequency Hopping with Collision Avoidance - FH/CA). Způsob jakým dochází k výběru jednotlivých komunikačních kanálů u technik s frekvenčním skákáním lze považovat za určitý druh kódování.

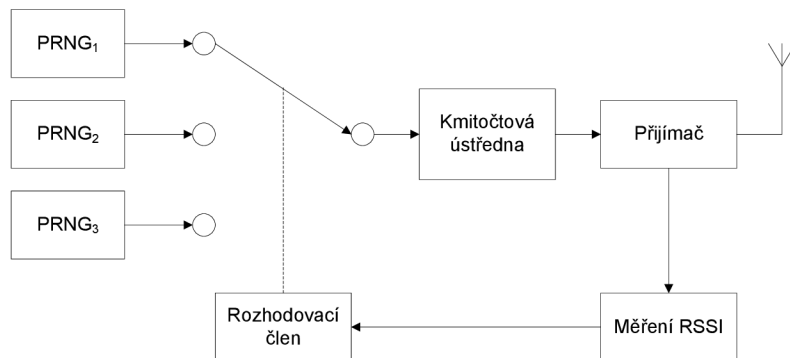
3.2.1 Návrh nové techniky frekvenčního skákání FH/CA

Navržená technika FH/CA (ang. Frequency Hopping with Collision Avoidance) je založena na technice FH a předpokládá, že je možné na základě měření úrovně signálu (RSSI) na jednotlivých kanálech odhalit rušiče. Techniku FH/CA lze definovat jako frekvenční skákání s předcházením kolizí. Stanice FH/CA provádí před každým skokem měření úrovně signálu v G uvažovaných kanálech. Na základě provedených měření je pak vybrán nejvhodnější kanál, tj. kanál s nejnižší naměřenou hodnotou úrovně signálu. S vyšší pravděpodobností tak dochází ke skoku na kanál neobsazený nějakým přenosem.

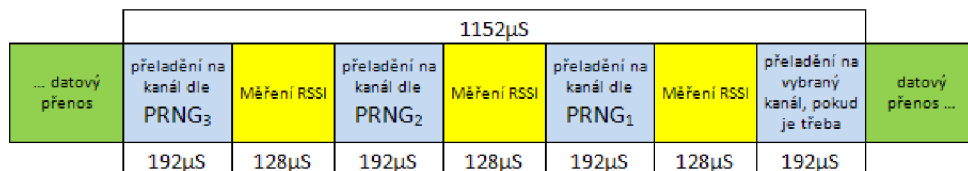
Výběr uvažovaných kanálů je realizován pomocí G pseudonáhodných generátorů. Pseudonáhodné generátory před každým skokem vygenerují sadu čísel uvažovaných kanálů. Vygenerovaná čísla kanálů musí být v dané sadě různá. Pokud by se některá

vygenerovaná čísla shodovala, tak je provedeno nové generování sady čísel, dokud nebudou všechna vygenerovaná čísla v sadě navzájem různá.

Aby bylo možné dosáhnout co nejnižší rezie techniky FH/CA jsou při návrhu uvažovány obvody s rychlým uzamčením smyčky fázového závěsu pomocí kterých bude možné provádět rychlé přeladění mezi uvažovanými kanály. Na obrázku 3.7 je vyobrazeno pro ilustraci blokové schéma části systému FH/CA sloužící k výběru kanálu. Uvedené schéma uvažuje tři (tj. $G = 3$) pseudonáhodné generátory $PRNG_{1-3}$ sloužící ke generování čísel kanálů. Před skokem na další kanál systém FH/CA provede přeladění nejprve na kanál dle pseudonáhodného generátoru $PRNG_3$, kde změří úroveň RSSI. Následuje měření úrovně RSSI na kanálu dle $PRNG_2$ a na závěr na kanálu dle $PRNG_1$. Rozhodovací člen určí kanál s nejnižší naměřenou úrovní RSSI, na který je následně provedeno přeladění, pokud je nutné. Přeladění není nutné v případě, že byl vybrán kanál dle $PRNG_1$, protože systém je na tomto kanálu již naladěný, jelikož poslední měření úrovně RSSI bylo prováděno právě na kanálu dle $PRNG_1$. Pokud se u dvou a více generátorů shoduje naměřená úroveň RSSI, tak je vybrán kanál generátoru $PRNG_i$ s nejnižší hodnotou indexu i . Výše popsané děje probíhají v časové oblasti dle obrázku 3.8. Parametry v obrázku vycházejí z [29].



Obr. 3.7: Blokové schéma části systému FH/CA sloužící k výběru kanálu pro $G = 3$.



Obr. 3.8: Příklad průběhu výběru kanálu systému FH/CA v časové oblasti pro $G = 3$.

Režie systému FH/CA je dána vztahem:

$$T_{FHCA} = (G + 1) \cdot T_{PLL} + G \cdot T_{RSSI} , \quad (3.4)$$

kde proměnná T_{PLL} je doba nutná k přeladění (uzamčení smyčky fázového závěsu) a proměnná T_{RSSI} je doba po kterou bude probíhat měření úrovně RSSI na jednotlivém kanálu. Doba $T_{PLL} = 192\mu\text{S}$ a $T_{RSSI} = 128\mu\text{S}$ byla stanovena na základě katalogového listu obvodu CC2420 společnosti Texas Instruments [29].

Dosazením do vztahu (3.4) vypočteme režii systému FH/CA:

$$\begin{aligned} \text{pro } G = 2, T_{FHCA} &= 832\mu\text{S} , \\ \text{pro } G = 3, T_{FHCA} &= 1152\mu\text{S} . \end{aligned}$$

Pokud budeme uvažovat rychlost přeladování $V = 100$ skoků/s (rychlost přeladování radiostanice PANTHER [3]), pak doba mezi skoky bude rovna:

$$T = \frac{1}{V} = 10^4 \mu\text{S} . \quad (3.5)$$

Po odečtení režie systému, tak zůstane pro přenos dat:

$$T_{pd} = T - T_{FHCA} . \quad (3.6)$$

Dosazením do vztahu (3.6) vypočteme:

$$\begin{aligned} \text{pro } G = 2, T_{pd} &= 9168\mu\text{S} , \\ \text{pro } G = 3, T_{pd} &= 8848\mu\text{S} . \end{aligned}$$

Podíl režie systému je:

$$\begin{aligned} \text{pro } G = 2, \frac{T_{FHCA}}{T_{pd}} &= 9\% \text{ zbývajících } 91\% \text{ je pro přenos} , \\ \text{pro } G = 3, \frac{T_{FHCA}}{T_{pd}} &= 13\% \text{ zbývajících } 87\% \text{ je pro přenos} . \end{aligned}$$

Režii systému FH/CA lze tak v tomto případě považovat za přijatelnou. Režii by bylo možné dále snížit použitím obvodů s ještě rychlejším přeladováním. U systému FH/CA je požadováno, aby všechny stanice při následujícím skoku shodně vybraly i -tý PRNG _{i} generátor. Tohoto požadavku lze dosáhnout tak, že všechny stanice vyhodnotí naměřené hodnoty RSSI shodně a následně tak vyberou shodně i -tý generátor. Stanice vyhodnotí naměřené hodnoty RSSI shodně, pokud zůstane zachováno u všech stanic pořadí možných G kanálů po seřazení dle RSSI od nejvyšší úrovně po nejnižší. Takové situace je možné dosáhnout, například pokud jednotlivé stanice budou od sebe v zanedbatelné vzdálenosti oproti vzdálenosti každé stanice

od rušičů. Hodnoty úrovní RSSI bude nezbytné rozdělit do několika pásem tak, aby výběr kanálu nemohlo ovlivnit přirozené rušení.

Se zvyšujícím se počtem generátorů G se jednak zvyšuje režie systému, ale také se zvyšuje pravděpodobnost, že v případě odlišných podmínek (zcela odlišné hodnoty úrovně signálu RSSI získané měření jednotlivých stanic) dojde k vybrání jiného kanálu každou stanicí.

Pro zjednodušení lze v praxi místo pseudonáhodných generátorů o počtu G použít jeden pseudonáhodný generátor, ze kterého bude při každém skoku vyčteno G různých pseudonáhodných čísel.

Ze samotné podstaty systému FH/CA lze odvodit jeho výhody oproti stávajícím systémům. Oproti systému FH je systém FH/CA schopen se potenciálně vyhnout kanálům, které jsou zarušeny jak statickými, tak i dynamickými rušiči. Oproti systému AFH je systém FH/CA schopen se potenciálně vyhnout i kanálům, které jsou zarušeny dynamickými rušiči.

3.2.2 Matematický model rušení provozu stanic s technikou FH/CA

Cílem této kapitoly je sestavit matematický model simulující pravděpodobnost kolize mezi komunikačním systémem FH/CA a statickými nebo dynamickými rušiči v daném komunikačním pásmu. Při návrhu tohoto modelu budou uvažovány stejné podmínky jako u předchozích návrhů pro modely technik FH a AFH.

Pro úplnost následuje souhrn předpokládaných podmínek. Systém FH/CA má k dispozici N komunikačních kanálů, přičemž při každém skoku vybere jeden kanál z G možných (viz kapitola 3.2.1). V pásmu s N komunikačními kanály se kromě systému FH/CA nachází R statických a S dynamických rušičů. Za dynamické rušiče lze považovat jiné FH respektive AFH systémy, které nejsou mezi sebou synchronizovány a pracují nezávisle na sobě.

Pro jednoduchost se předpokládá, že šířka pásma každého z rušičů je stejná jako šířka pásma jednoho kanálu systému FH/CA. Tedy jeden rušič dokáže plně zarušit maximálně jeden kanál. Dále se předpokládá, že doba mezi dvěma skoky T je pro systém FH/CA shodná s dynamickými rušiči.

Pokud zvolíme libovolný okamžik t , tak pravděpodobnost, že na náhodně zvoleném kanálu nevysílá statický rušič je dána vztahem:

$$P_{VR} = \left(\frac{N - R}{N} \right) . \quad (3.7)$$

Komplementárně lze vypočítat pravděpodobnost, že na daném kanálu vysílá statický rušič dle vztahu:

$$P_{OR} = 1 - P_{VR} = 1 - \left(\frac{N - R}{N} \right) = \left(\frac{R}{N} \right) . \quad (3.8)$$

Přeladování dynamických rušičů v pásmu probíhá náhodně a navzájem nezávisle. Pravděpodobnost že ve sledovaném okamžiku t nebude daný kanál obsazen dynamickým rušičem lze vypočítat dle vztahu (3.9). A komplementárně pravděpodobnost, že v okamžiku t bude daný kanál obsazen dynamickým rušičem dle vztahu (3.10).

$$P_{VS} = \left(\frac{n - 1}{n} \right)^S . \quad (3.9)$$

$$P_{OS} = 1 - P_{VS} = 1 - \left(\frac{n - 1}{n} \right)^S . \quad (3.10)$$

Pokud jsou dynamické rušiče typu FH, tak pro n platí vztah:

$$n = N . \quad (3.11)$$

Pokud jsou dynamické rušiče typu AFH, tak pro n platí vztah:

$$n = \begin{cases} N - R, & R \leq R_{MAX} \\ N - R_{MAX}, & R > R_{MAX} \end{cases} . \quad (3.12)$$

U techniky AFH dochází ke snížení počtu možných kanálů N o R maximálně však o R_{MAX} . Podrobněji viz kapitola 3.1.2.

Ve vztahu (3.9) výraz $(n - 1)/n$ vyjadřuje pravděpodobnost, že se jednotlivý dynamický rušič přeladil na jiný kanál, než na kanál sledovaný v okamžiku t . Exponent S vyjadřuje, že se v čase t nachází na jiných kanálech všech S dynamických rušičů. Komplementárně vzorec (3.10) vyjadřuje pravděpodobnost, že na daném kanále pracuje alespoň jeden z dynamických rušičů.

Rychlost přeladování FH/CA a FH respektive AFH stanic lze vypočítat dle vzorce:

$$V = \frac{1}{T} . \quad (3.13)$$

Časový interval mezi zahájeními vysílání dynamických rušičů na daném kanálu označme jako X , přičemž X je náhodná proměnná. Za dobu x dojde ve skupině S dynamických rušičů průměrně k z přeladění dle vzorce:

$$z = V \cdot S \cdot x . \quad (3.14)$$

Pravděpodobnost $P(X > x)$, že žádný z dynamických rušičů se za dobu x nepřeladí na sledovaný kanál lze vypočítat dle vzorce:

$$P(X > x) = \left(\frac{n - 1}{n} \right)^{V \cdot S \cdot x} . \quad (3.15)$$

Ze vztahu (3.15) lze odvodit distribuční funkci $F(X)$ náhodné proměnné X :

$$F(X) = P(X \leq x) = 1 - P(X > x) = 1 - \left(\frac{n - 1}{n} \right)^{V \cdot S \cdot x} . \quad (3.16)$$

Pokud použijeme substituci:

$$\lambda = -V \cdot S \cdot \ln \left(\frac{n - 1}{n} \right) . \quad (3.17)$$

tak pro uvedenou distribuční funkci platí:

$$F(X) = 1 - \exp(-\lambda \cdot x) . \quad (3.18)$$

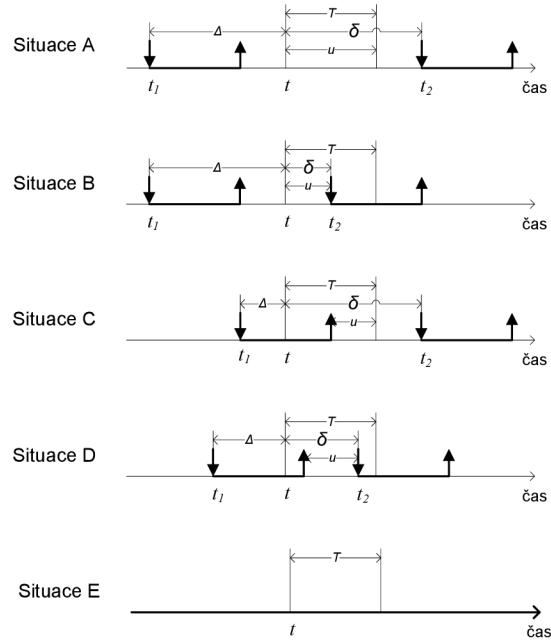
Z tohoto vztahu lze vyvodit, že časový interval X je náhodná proměnná s exponenciálním rozdělením, kde λ je intenzita obsazování přenosového kanálu. Pro hustotu pravděpodobnosti $f(x)$ pak platí:

$$f(x) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x) . \quad (3.19)$$

V důsledku (3.19) je proces obsazování kanálů tzv. Poissonův proces, kde střední vzdálenost mezi po sobě následující obsazeními kanálu je rovna:

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} . \quad (3.20)$$

Okamžik zahájení vysílání nějakého dynamického rušiče na daném kanálu je označen jako t_1 . Okamžik následujícího zahájení vysílání obecně jiného dynamického rušiče na daném kanálu je označen jako t_2 . Předpokládáme že FH/CA stanice testuje kanál v okamžiku $t \in (t_1, t_2)$. Při testování kanálu může dojít k situacím A, B, C, D a E (viz obrázek 3.9). Časové rozdíly $\Delta = t - t_1$ a $\delta = t_2 - t$ jsou náhodné proměnné a mají v důsledku vlastnosti Poissonova rozdělení stejné rozdělení jako proměnná X .



Obr. 3.9: Možné situace při obsazování kanálu stanicí FH/CA.

Situace A je dána podmínkami, že se v kanále nenachází statický rušič a dále podmínkami pro dynamické rušení, že $\Delta \geq T$ a $\delta \geq T$. Uvedená situace nastává s pravděpodobností P_A :

$$P_A = P_{VR} \cdot P(\Delta \geq T) \cdot P(\delta \geq T) = P_{VR} \cdot [1 - F(T)]^2 = P_{VR} \cdot P_{VS}^2 . \quad (3.21)$$

Pro stanici FH/CA to znamená, že její přenos o délce T není rušen a doba nerušeného vysílání je rovna $u = T$. Pro střední dobu nerušeného vysílání stanice FH/CA bude za této situace platit vztah:

$$U_A = T . \quad (3.22)$$

Situace B je dána podmínkami, že se v kanále nenachází statický rušič a dále podmínkami pro dynamické rušení, že $\Delta \geq T$ a $\delta < T$. Pro stanici FH/CA to znamená, že při zahájení přenosu bude kanál volný, avšak v průběhu přenosu dojde

k jeho obsazení dynamickým rušičem. Uvedená situace nastává s pravděpodobností P_B :

$$P_B = P_{VR} \cdot P(\Delta \geq T) \cdot P(\delta < T) = P_{VR} \cdot [1 - F(T)] \cdot F(T) = P_{VR} \cdot P_{VS} \cdot P_{OS} . \quad (3.23)$$

Doba nerušeného vysílání je v tomto případě rovna $u = \delta$. Pro střední dobu nerušeného vysílání stanice FH/CA bude platit vztah z obecné definice střední hodnoty náhodné veličiny:

$$U_B = \frac{1}{P_{OS}} \int_0^T u \cdot f(u) du = \frac{1}{P_{OS}} \int_0^T u \cdot \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot u) du = \frac{1}{\lambda} - T \cdot Q ,$$

kde $Q = \frac{P_{VS}}{P_{OS}} . \quad (3.24)$

Člen $1/P_{OS}$ slouží k normalizaci příslušného rozdělení, tj. aby platilo:

$$\int_0^T f(u) du = 1 . \quad (3.25)$$

Situace C je dána podmínkami, že se v kanále nenachází statický rušič a dále podmínkami pro dynamické rušení, že $\Delta < T$ a $\delta \geq T$. Pro stanici FH/CA to znamená, že při zahájení přenosu bude kanál obsazený dynamickým rušičem, avšak v průběhu přenosu dojde k jeho uvolnění. Uvedená situace nastává s pravděpodobností P_C :

$$P_C = P_{VR} \cdot P(\Delta < T) \cdot P(\delta \geq T) = P_{VR} \cdot F(T) \cdot [1 - F(T)] = P_{VR} \cdot P_{OS} \cdot P_{VS} . \quad (3.26)$$

Doba nerušeného vysílání je rovna $u = \Delta$. Pro střední dobu nerušeného vysílání stanice FH/CA tak bude platit vztah z obecné definice střední hodnoty náhodné veličiny, který bude shodný se situací B:

$$U_C = \frac{1}{P_{OS}} \int_0^T u \cdot f(u) du = \frac{1}{P_{OS}} \int_0^T u \cdot \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot u) du = \frac{1}{\lambda} - T \cdot Q . \quad (3.27)$$

Situace D je dána podmínkami, že se v kanále nenachází statický rušič a dále podmínkami pro dynamické rušení, že $\Delta < T$ a $\delta < T$. Pro stanici FH/CA to znamená, že při zahájení přenosu bude kanál obsazený dynamickým rušičem, přičemž v průběhu přenosu dojde k obsazení tohoto kanálu dalším dynamickým rušičem. Uvedená situace nastává s pravděpodobností P_D :

$$P_D = P_{VR} \cdot P(\Delta < T) \cdot P(\delta < T) = P_{VR} \cdot F(T)^2 = P_{VR} \cdot P_{OS}^2 . \quad (3.28)$$

Doba nerušeného vysílání je rovna $u = \text{Max}\{0, \Delta + \delta - T\}$. Pokud by si stanice FH/CA nevybírala z $G > 1$ kanálů, tak by pro střední dobu nerušeného vysílání stanice FH/CA platilo:

$$U = T \cdot P_{VR} \cdot P_{VS} . \quad (3.29)$$

a zároveň:

$$U = \sum_i P_i \cdot U_i, i = A, B, C, D, E . \quad (3.30)$$

Ze znalosti P_A až P_E a U_A až U_E lze z (3.29) a (3.30) odvodit vztah pro U_D :

$$U_D = T \cdot Q - 2 \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - T \cdot Q \right) . \quad (3.31)$$

Situace E je dána podmínkou, že se v kanále nachází statický rušič. Pro stanici FH/CA to znamená, že po celou dobu přenosu bude kanál obsazený statickým rušičem. Uvedená situace nastává s pravděpodobností P_E :

$$P_E = P_{OR} . \quad (3.32)$$

Pro stanici FH/CA to znamená, že celý její přenos je v daném kanálu rušen a doba nerušeného vysílání $u = 0$. Pro střední dobu nerušeného vysílání stanice FH/CA tak bude platit vztah:

$$U_E = 0 . \quad (3.33)$$

Pro situaci E je zapotřebí dodat, že kromě statického rušiče se v kanálu mohou vyskytovat i dynamické rušiče. To však nic nemění na faktu, že kanál je zarušen.

Na základě výše uvedených vztahů můžeme vypočítat střední dobu Z nerušeného přenosu stanice FH/CA. V době měření kanálu t zjistí stanice FH/CA s pravděpodobností P_{TV} , že testovaný kanál je volný. Uvedený stav označíme TV a prakticky zahrnuje situaci A a B. Pro P_{TV} platí:

$$P_{TV} = P_A + P_B . \quad (3.34)$$

V době měření kanálu t zjistí stanice FH/CA s pravděpodobností P_{TO} , že testovaný kanál je obsazený. Uvedený stav označíme TO a prakticky zahrnuje situaci C, D a E. Pro P_{TO} platí:

$$P_{TO} = P_C + P_D + P_E . \quad (3.35)$$

Stanice FH/CA testuje G kanálů. Stav 1, že alespoň jeden z testovaných kanálů bude volný, nastává s pravděpodobností P_1 .

$$P_1 = 1 - P_{TO}^G . \quad (3.36)$$

Stav 2, že všechny testované kanály budou obsazeny rušiči, nastává s pravděpodobností P_2 .

$$P_2 = P_{TO}^G . \quad (3.37)$$

Nejprve určíme Z_1 tj. střední dobu nerušeného přenosu při stavu 1. Tento stav nastává za situace A nebo B a proto:

$$Z_1 = \frac{1}{P_A + P_B} \cdot (P_A \cdot U_A + P_B \cdot U_B) . \quad (3.38)$$

Veličinu Z_2 tj. střední dobu nerušeného přenosu při stavu 2 vypočteme ze střední doby nerušeného přenosu za situace C, D a E. Střední doba nerušeného přenosu Z_2 je dána:

$$Z_2 = \frac{1}{P_C + P_D + P_E} \cdot (P_C \cdot U_C + P_D \cdot U_D + P_E \cdot U_E) . \quad (3.39)$$

Na základě znalosti (3.33) je možné ze vztahu (3.39) vypustit člen $P_E \cdot U_E$. Pak střední doba nerušeného přenosu Z_2 je dána:

$$Z_2 = \frac{1}{P_C + P_D + P_E} \cdot (P_C \cdot U_C + P_D \cdot U_D) . \quad (3.40)$$

Výsledná střední doba nerušeného přenosu Z systému FH/CA je dána:

$$Z = P_1 \cdot Z_1 + P_2 \cdot Z_2 . \quad (3.41)$$

Pravděpodobnost nerušeného přenosu P_{NFHCA} je dána:

$$P_{NFHCA} = \frac{Z}{T} . \quad (3.42)$$

A komplementárně pravděpodobnost rušeného přenosu (kolize) P_{FHCA} pro systém FH/CA:

$$P_{FHCA} = 1 - P_{NFHCA} . \quad (3.43)$$

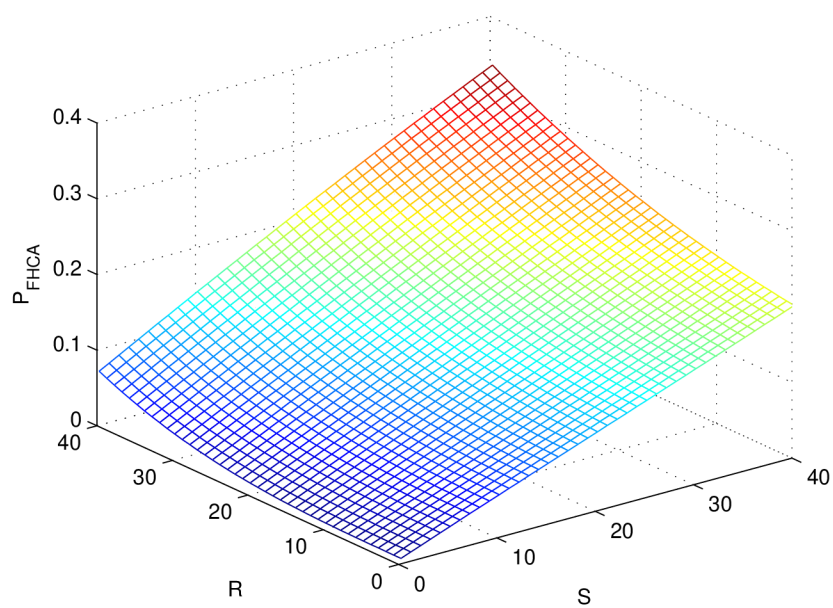
Pro případ, kdy $S = 0$, je možné výše uvedený postup výpočtu nahradit jediným vzorcem:

$$P_{FHCA} = P_{OR}^G, \text{ pro } S = 0 . \quad (3.44)$$

Popsaný model umožňuje zjistit pravděpodobnost rušeného přenosu stanice FH/CA v podmínkách statického i dynamického rušení. Správnost modelu byla ověřena simulačním modelem viz příloha A.5. Popsaný model byl publikován v [30].

Veličinu systému FH/CA tj. P_{FHCA} je následně možné porovnávat s veličinou systému FH tj. P_{FH} respektive s veličinou systému AFH tj. P_{AFH} .

Pravděpodobnost kolize pro systém FH/CA dle (3.43) je pro vybrané hodnoty parametrů vyobrazena na obrázku 3.10.



Obr. 3.10: Pravděpodobnost kolize systému FH/CA v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 a $G = 3$ kde dynamické rušiče používají výhradně techniku FH.

3.2.3 Porovnání výkonnosti technik FH/CA a FH

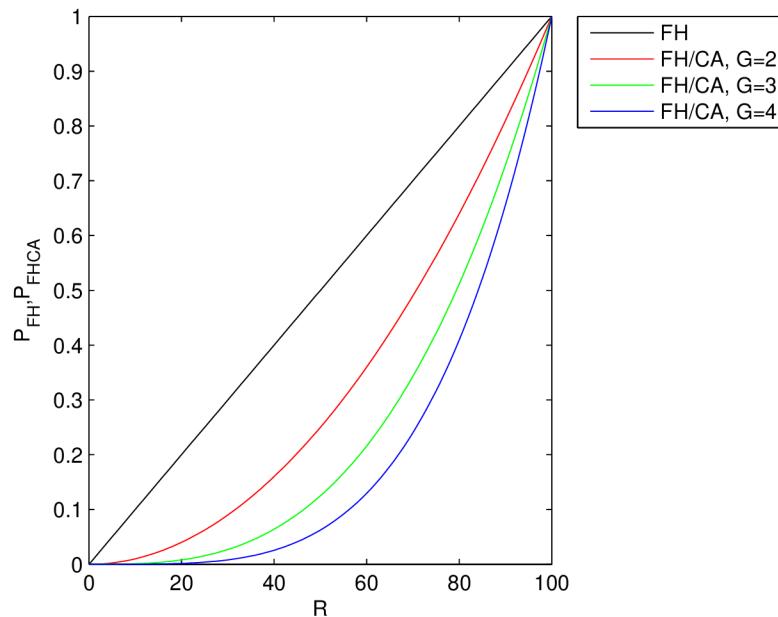
Srovnání obou systémů lze provést dle vztahu (3.45), kde odečteme pravděpodobnost kolize u techniky FH/CA od pravděpodobnosti kolize u techniky FH a výsledek vztáhneme k pravděpodobnosti kolize u techniky FH, čímž získáme výsledný zisk techniky FH/CA. Kladný výsledek znamená výhodu systému FH/CA, záporný naopak jeho nevýhodu oproti systému FH.

$$A_{FH-FHCA} = \frac{P_{FH} - P_{FHCA}}{P_{FH}}, P_{FH} \neq 0. \quad (3.45)$$

U techniky FH/CA bude při porovnávání voleno nastavení $G = 2, 3$ a 4 . Závěr z těchto porovnání bude i doporučení optimální hodnoty G pro techniku FH/CA.

Uváděné analýzy byly počítány k ilustraci s konkrétními parametry, dále uvedené závěry však lze považovat za obecné a platné i pro odlišné parametry.

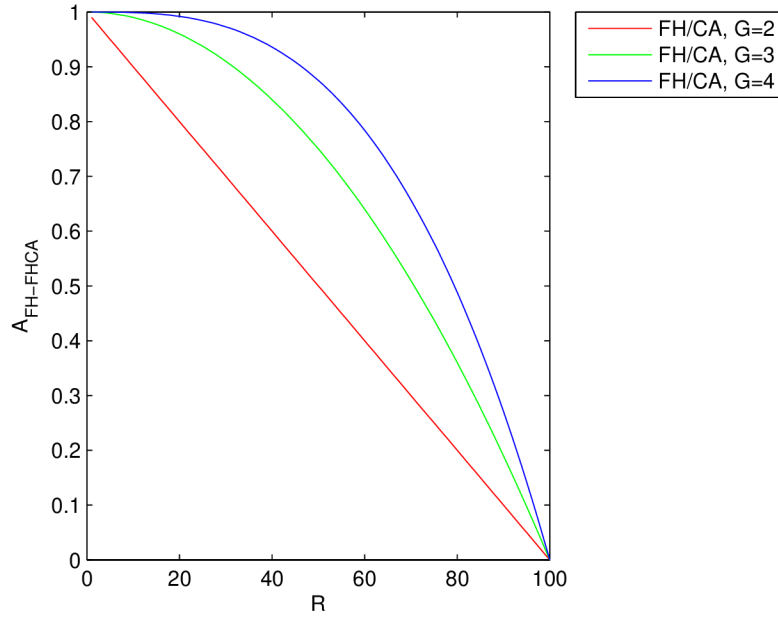
Jako první byla provedena analýza zisku v případě statických rušičů. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ až 100 a $S = 0$. Dle vzorce (3.1) a (3.43) byly provedeny výpočty pravděpodobností kolize P_{FH} a P_{FHCA} , které jsou reprezentovány grafem na obrázku 3.11.



Obr. 3.11: Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s FH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ až 100 a $S = 0$).

Dle vzorce (3.45) byl proveden výpočet zisku $A_{FH-FHCA}$, který je reprezentován grafem pro $P_{FH} > 0$ na obrázku 3.12. Z grafu kde $A_{FH-FHCA} = f(R)$ lze vyčíst

následující vlastnosti systému FH/CA.

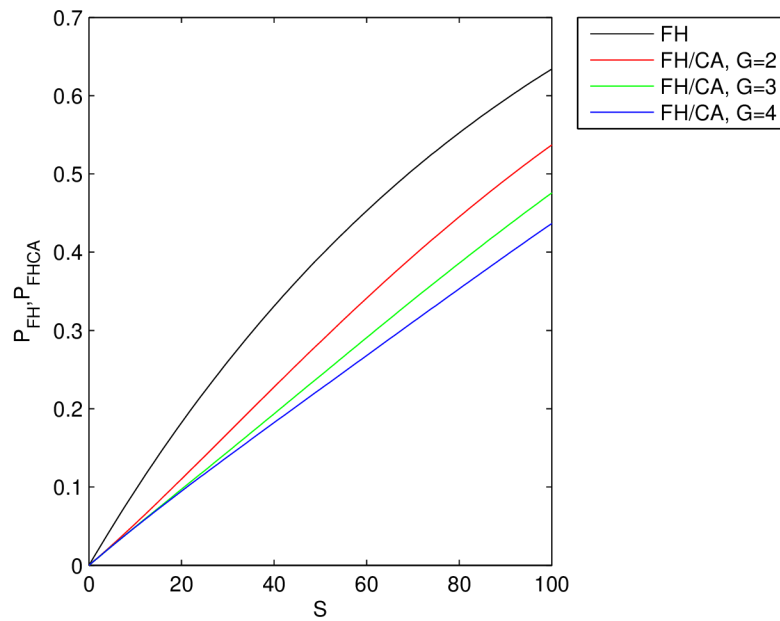


Obr. 3.12: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s FH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 1$ až 100 a $S = 0$).

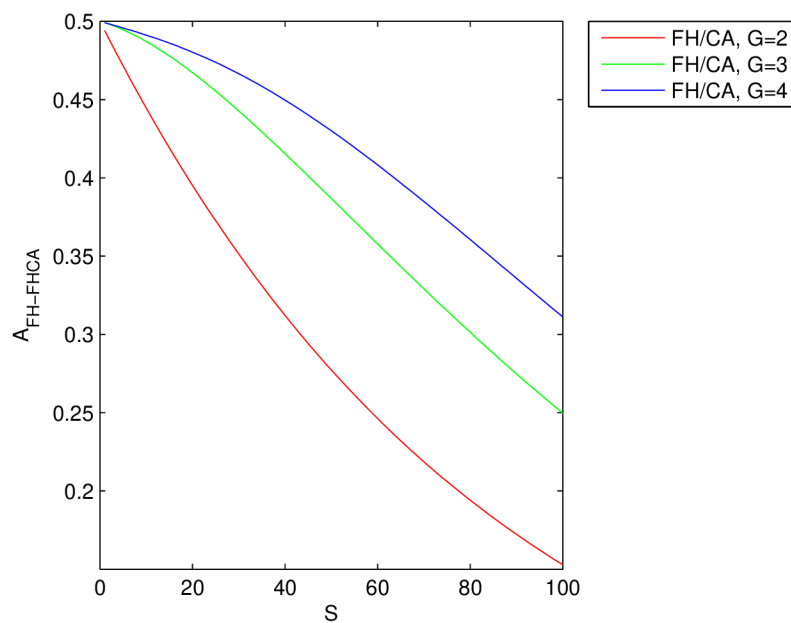
Technika FH/CA v pásmu se statickými rušiči není nikdy horší než technika FH. Technika FH/CA dosahuje významného zisku již při počtu generátorů $G = 2$. Při $R = 20$ a $G = 2$ je pravděpodobnost kolize techniky FH s rušičem rovna $P_{FH} = 0.2$ u techniky FH/CA je pravděpodobnost kolize pro $G = 2$ rovna $P_{FHCA} = 0.04$. Pravděpodobnost kolize při použití techniky FH/CA je tak v tomto případě 5x nižší než u techniky FH. Navýšení počtu generátorů G vede k vyšším ziskům techniky FH/CA.

Dále byla provedena analýza zisku v případě dynamických rušičů. Přičemž dynamické rušiče S používají techniku FH. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 0$ až 100 . Dle vzorce (3.1) a (3.43) byly provedeny výpočty pravděpodobností kolize P_{FH} a P_{FHCA} , které jsou reprezentovány grafem na obrázku 3.13.

Dle vzorce (3.45) byl proveden výpočet zisku $A_{FH-FHCA}$, který je pro $P_{FH} > 0$ reprezentován grafem na obrázku 3.14. Z grafu kde $A_{FH-FHCA} = f(S)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému FH/CA.



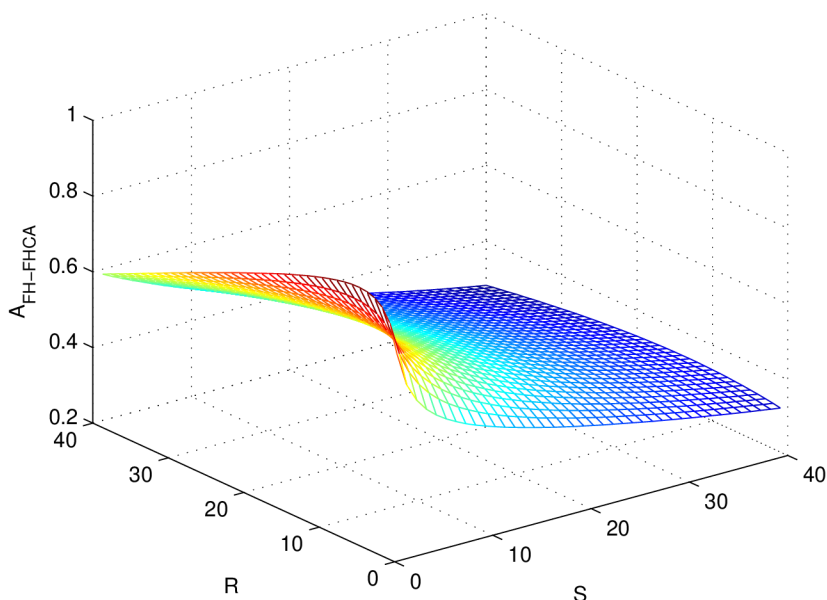
Obr. 3.13: Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s FH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 0$ až 100).



Obr. 3.14: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s FH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 1$ až 100).

Technika FH/CA v pásmu s dynamickými FH rušiči není nikdy horší než technika FH. Technika FH/CA dosahuje významného zisku již při počtu generátorů $G = 2$. Při $S = 20$ a $G = 2$ je pravděpodobnost kolize techniky FH s rušičem rovna $P_{FH} = 0.18$ u techniky FH/CA je pravděpodobnost kolize rovna $P_{FHCA} = 0.11$. Pravděpodobnost kolize při použití techniky FH/CA je tak 1.6x nižší než u techniky FH. Navýšení počtu generátorů G vede k vyšším ziskům techniky FH/CA.

Dále byla provedena analýza zisku v případě statických i dynamických rušičů. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $G = 2$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40. Z grafu kde $A_{FH-FHCA} = f(R, S)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému FH/CA.



Obr. 3.15: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s FH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).

Technika FH/CA v pásmu se statickými i dynamickými rušiči není nikdy horší než technika FH. Technika FH/CA dosahuje významného zisku při počtu generátorů $G = 2$. Při $R = 20$, $S = 20$ a $G = 2$ je pravděpodobnost kolize techniky FH s rušičem rovna $P_{FH} = 0.35$ u techniky FH/CA je pravděpodobnost kolize rovna $P_{FHCA} = 0.19$. Pravděpodobnost kolize při použití techniky FH/CA je tak 1.8x nižší než u techniky FH.

3.2.4 Porovnání výkonnosti technik FH/CA a AFH

Srovnání obou systémů lze provést dle vztahu (3.46), kde odečteme pravděpodobnost kolize u techniky FH/CA od pravděpodobnosti kolize u techniky AFH a výsledek vztáhneme k pravděpodobnosti kolize u techniky AFH, čímž získáme výsledný zisk techniky FH/CA. Kladný výsledek znamená výhodu systému FH/CA, záporný naopak jeho nevýhodu oproti systému AFH.

$$A_{AFH-FHCA} = \frac{P_{AFH} - P_{FHCA}}{P_{AFH}}, P_{AFH} \neq 0. \quad (3.46)$$

U techniky AFH bude při porovnávání voleno nastavení $R_{MAX} = 20$ a 75 . Hodnota $R_{MAX} = 20$ odpovídá doporučení z kapitoly 3.1.3. Hodnota $R_{MAX} = 75$ odpovídá hodnotě 75% z N , přičemž tento poměr je dnes užíván v praxi u systému Bluetooth [4]. U techniky FH/CA bude při porovnávání voleno nastavení $G = 2, 3$ a 4 . Závěr z tohoto porovnání bude i doporučení optimální hodnoty G pro techniku FH/CA.

Uváděné analýzy byly počítány k ilustraci s konkrétními parametry, dále uvedené závěry však lze považovat za obecné a platné i pro odlišné parametry.

Jako první byla provedena analýza zisku v případě statických rušičů při $R_{MAX} = 20$. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ až 100 a $S = 0$. Dle vzorce (3.2) a (3.44) byly provedeny výpočty pravděpodobností kolize P_{AFH} a P_{FHCA} , které jsou reprezentovány grafem na obrázku 3.16.

Dle vzorce (3.46) byl proveden výpočet zisku $A_{AFH-FHCA}$, který je pro $P_{AFH} > 0$ reprezentován grafem na obrázku 3.17. Z grafu kde $A_{AFH-FHCA} = f(R)$ lze vyčíst, že technika FH/CA je pro $R \leq R_{MAX}$ vždy horší než-li AFH. Je to dáno tím, že v tomto případě je pásmo rušeno jen statickými rušiči, kterým se systém AFH dokáže zcela vyhnout.

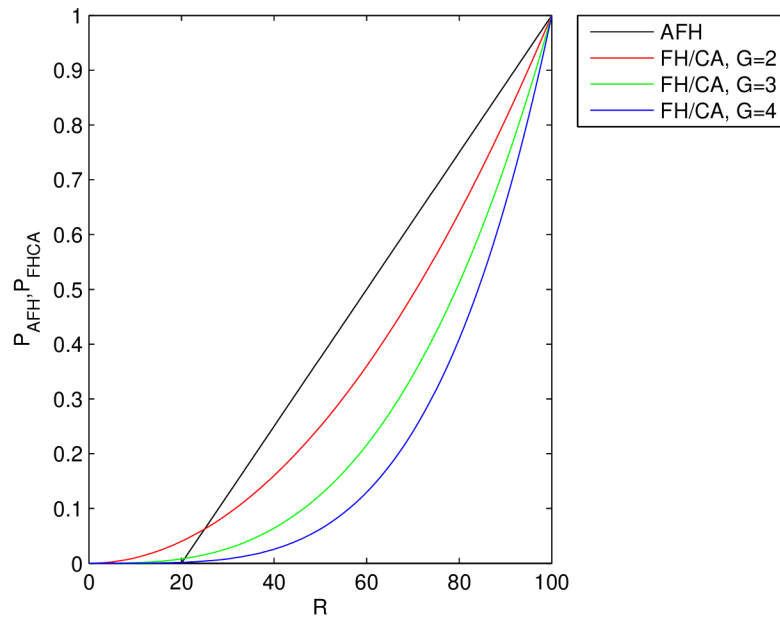
Co se týká případu, kdy $R > R_{MAX}$, je situace komplikovanější. Na základě vztahu (3.2) a (3.44) lze odvodit podmínku (3.47) pro hodnotu prahové hodnoty R_0 , kdy technika FH/CA nebude horší než technika AFH:

$$\left(\frac{R_0}{N}\right)^G = \left(\frac{R_0 - R_{MAX}}{N - R_{MAX}}\right). \quad (3.47)$$

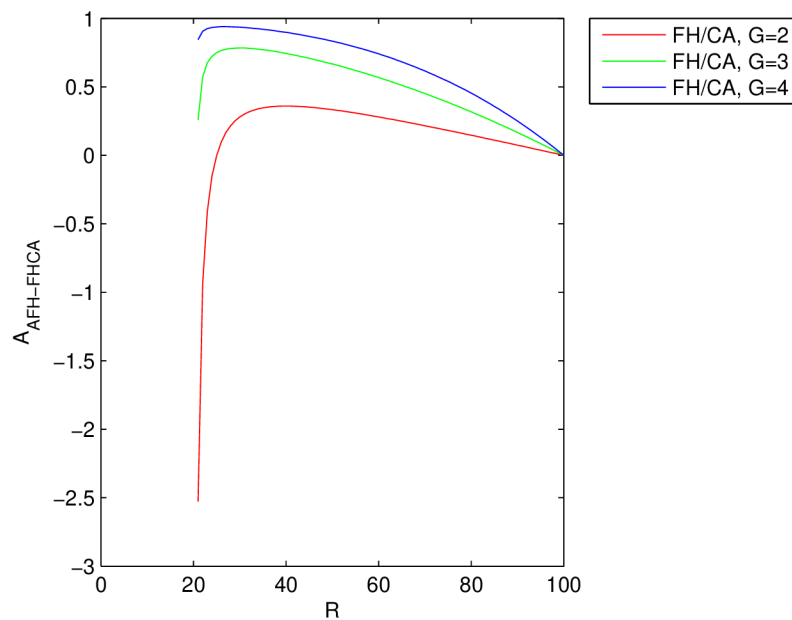
Pro $G = 2$, je možné tuto podmínku upravit na explicitní vztah:

$$R_0 = \frac{N \cdot R_{MAX}}{N - R_{MAX}}. \quad (3.48)$$

Celkově lze konstatovat, že technika FH/CA v pásmu se statickými rušiči není horší než technika AFH pokud $R \geq R_0$. Hodnotu R_0 lze získat výpočtem z podmínky (3.47).



Obr. 3.16: Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ až 100 a $S = 0$).



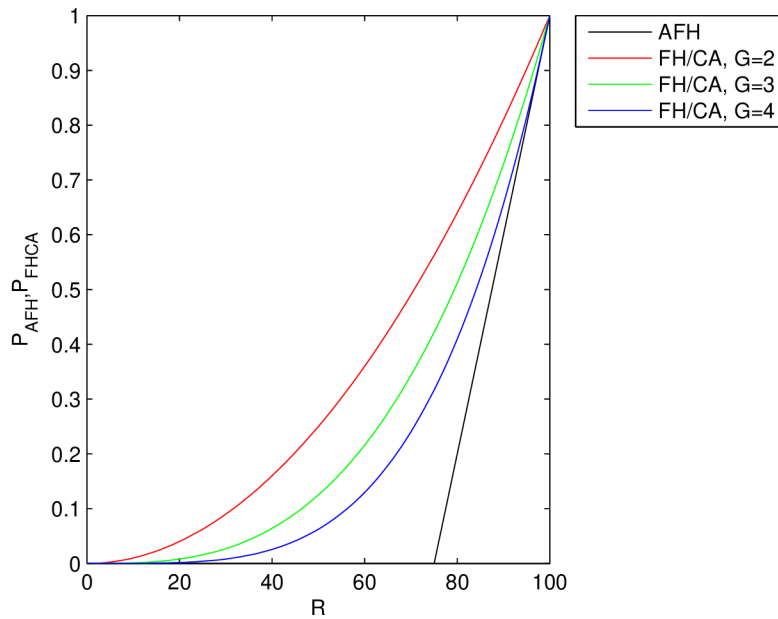
Obr. 3.17: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 1$ až 100 a $S = 0$).

Ztráta techniky FH/CA není však významná. Při $R = 20$ a $G = 2$ je pravděpodobnost kolize techniky AFH s rušičem rovna $P_{AFH} = 0$, u techniky FH/CA je pravděpodobnost kolize rovna $P_{FHCA} = 0.01$. Pravděpodobnost kolize při použití techniky FH/CA je pak o 1% vyšší než u techniky AFH. Při $R = 40$ je pravděpodobnost kolize techniky AFH s rušičem rovna $P_{AFH} = 0.25$, u techniky FH/CA pro $G = 2$ je pravděpodobnost kolize rovna $P_{FHCA} = 0.16$. Pravděpodobnost kolize při použití techniky FH/CA je tak 1.6x nižší než u techniky AFH.

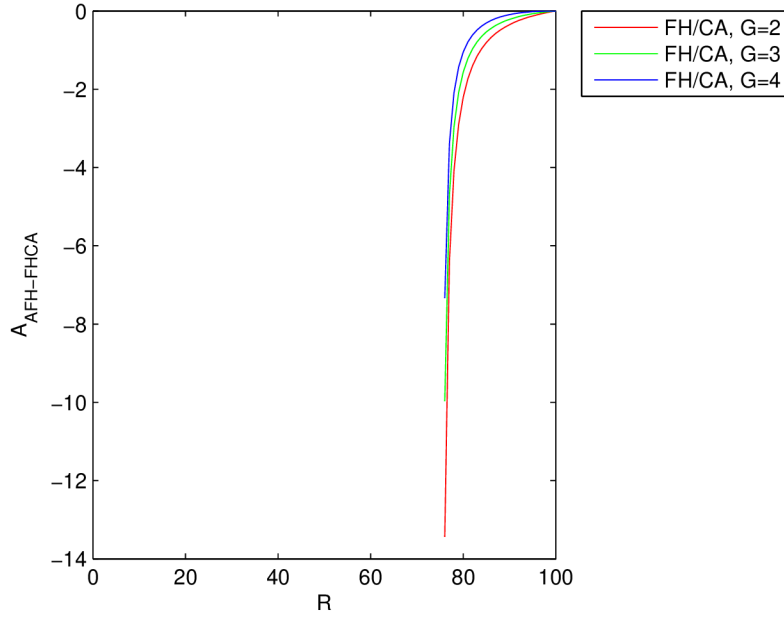
V případě požadavku, aby technika FH/CA dosahovala ve stejné situaci podobných výsledků jako technika AFH je optimální hodnotou $G = 3$.

Dále byla provedena analýza zisku v případě statických rušičů při $R_{MAX} = 75$. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ až 100 a $S = 0$. Dle vzorce (3.2) a (3.44) byly provedeny výpočty pravděpodobností kolize P_{AFH} a P_{FHCA} , které jsou reprezentovány grafem na obrázku 3.18.

Dle vzorce (3.46) byl proveden výpočet zisku $A_{AFH-FHCA}$, který je pro $P_{AFH} > 0$ reprezentován grafem na obrázku 3.19. Z grafu kde $A_{AFH-FHCA} = f(R)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému FH/CA.



Obr. 3.18: Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ až 100 a $S = 0$).



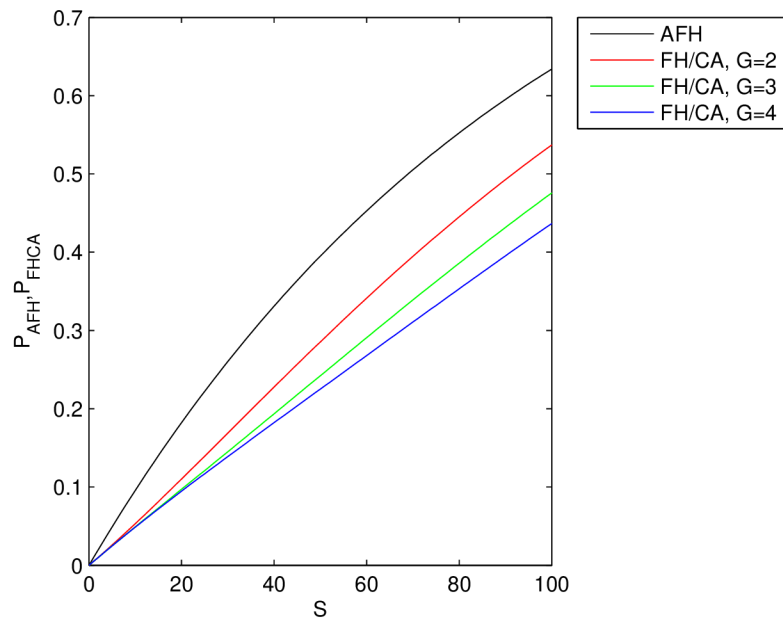
Obr. 3.19: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 1$ až 100 a $S = 0$).

Za daných podmínek technika FH/CA v pásmu se statickými rušiči není nikdy výhodnější než technika AFH.

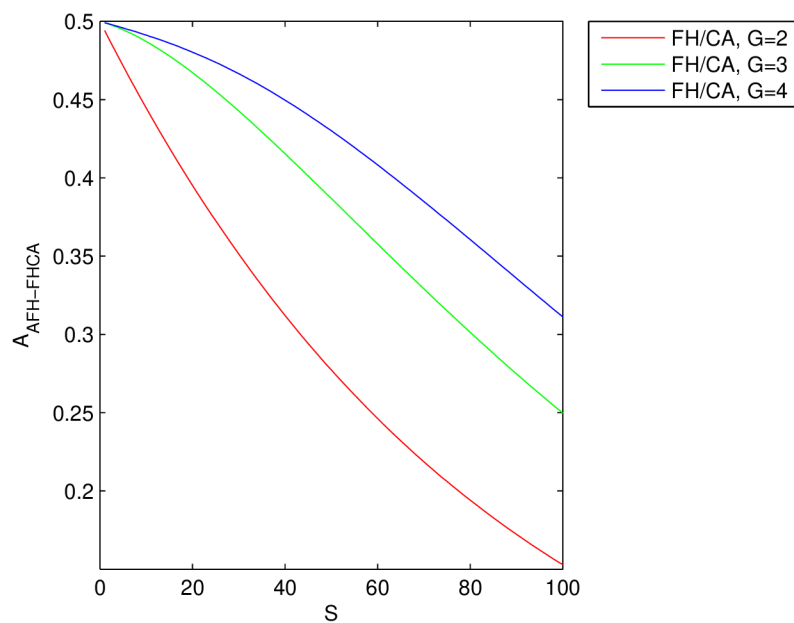
Dále byla provedena analýza zisku v případě dynamických rušičů. Parametr R_{MAX} není třeba v tomto případě uvažovat, jelikož se v pásmu nenacházejí statické rušiče. Dynamické rušiče používají techniku AFH respektive FH vzhledem k tomu, že se v pásmu nenacházejí statické rušiče. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$, $S = 0$ až 100 . Dle vzorce (3.2) a (3.43) byly provedeny výpočty pravděpodobností kolize P_{AFH} a P_{FHCA} , které jsou reprezentovány grafem na obrázku 3.20.

Dle vzorce (3.46) byl proveden výpočet zisku $A_{AFH-FHCA}$, který je pro $P_{AFH} > 0$ reprezentován grafem na obrázku 3.21. Z grafu kde $A_{AFH-FHCA} = f(S)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému FH/CA.

Níže uvedené výsledky jsou shodné s výsledky v kapitole 3.2.3 při porovnání techniky FH s FH/CA v případě dynamických rušičů. Dynamické rušiče v tomto případě používají techniku AFH respektive pouze FH, jelikož se v pásmu nenacházejí žádné statické rušiče.



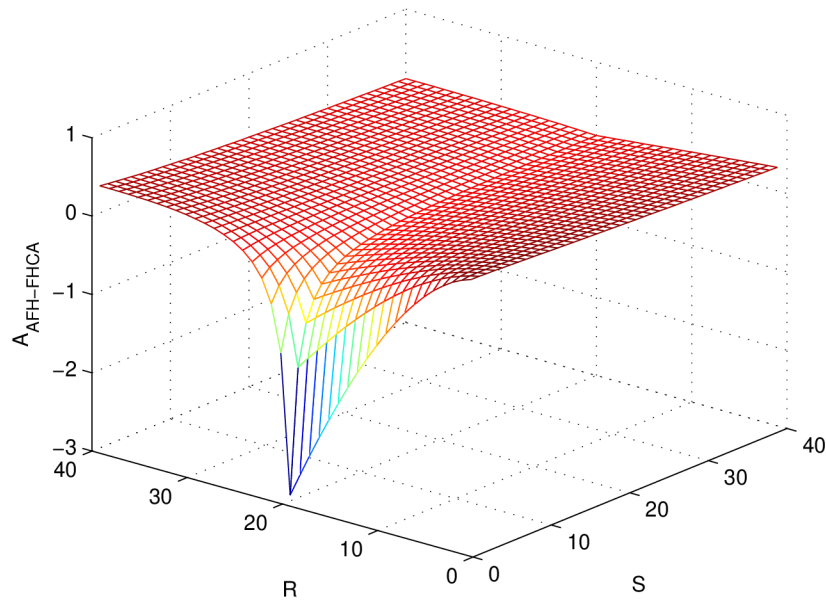
Obr. 3.20: Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s AFH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 0$ až 100).



Obr. 3.21: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 1$ až 100).

Technika FH/CA v pásmu s dynamickými rušiči není nikdy horší než technika AFH. Technika FH/CA dosahuje významného zisku již při počtu generátorů $G = 2$. Při $S = 20$ a $G = 2$ je pravděpodobnost kolize techniky AFH s rušičem rovna $P_{AFH} = 0.18$ u techniky FH/CA je pravděpodobnost kolize rovna $P_{FHCA} = 0.11$. Pravděpodobnost kolize při použití techniky FH/CA je tak 1.6x nižší než u techniky AFH. Navýšení počtu generátorů G vede k vyšším ziskům techniky FH/CA.

Dále byla provedena analýza zisku v případě statických i dynamických rušičů. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 2$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40. Dle vzorce (3.46) byl proveden výpočet zisku $A_{AFH-FHCA}$, který je reprezentován grafem na obrázku 3.22. Z grafu kde $A_{AFH-FHCA} = f(R, S)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému FH/CA.

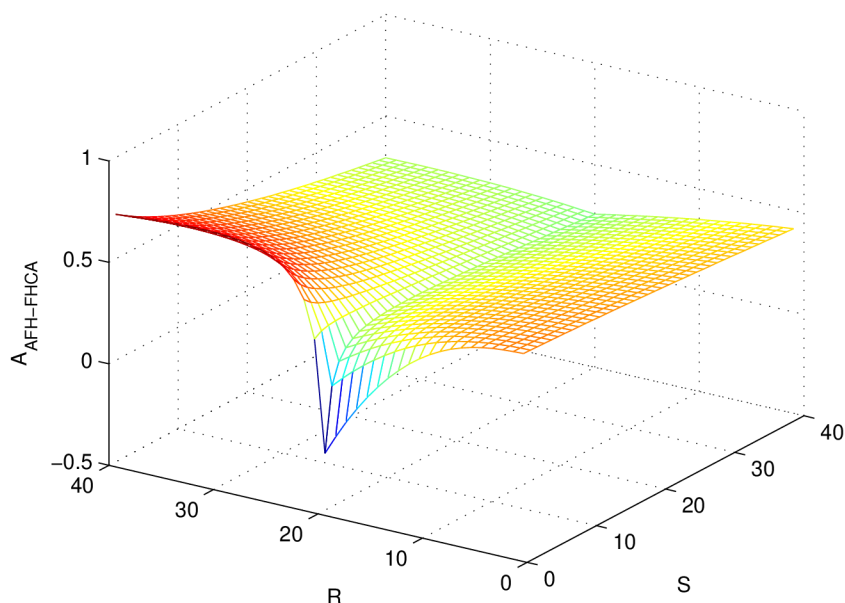


Obr. 3.22: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 2$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).

Technika FH/CA v pásmu se statickými i dynamickými rušiči většinou dosahuje lepších výsledků než technika AFH. Významný přínos techniky FH/CA je vidět v případě dynamických rušičů. Naopak v případě statických rušičů R v počtu do R_0 technika FH/CA ztrácí. Ve zkoumaném případě dosahuje technika FH/CA lepších výsledků než technika AFH v 95% případů.

Dále provedeme analýzu zisku v případě statických i dynamických rušičů s podobnými parametry jako v předchozím případě, přičemž navýšíme G na hodnotu $G = 3$. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$,

$R_{MAX} = 20$, $G = 3$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40 . Dle vzorce (3.46) byl proveden výpočet zisku $A_{AFH-FHCA}$, který je reprezentován grafem na obrázku 3.23. Z grafu kde $A_{AFH-FHCA} = f(R, S)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému FH/CA.

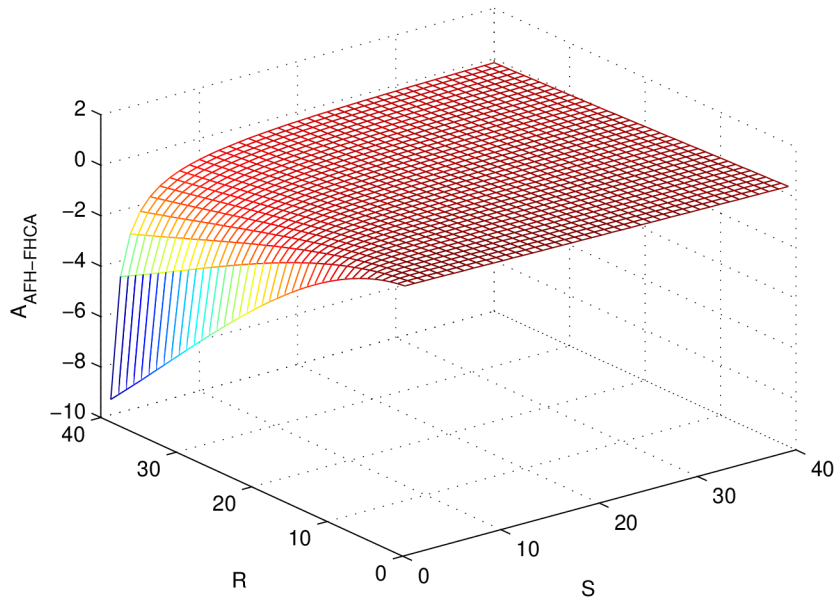


Obr. 3.23: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 20$, $G = 3$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).

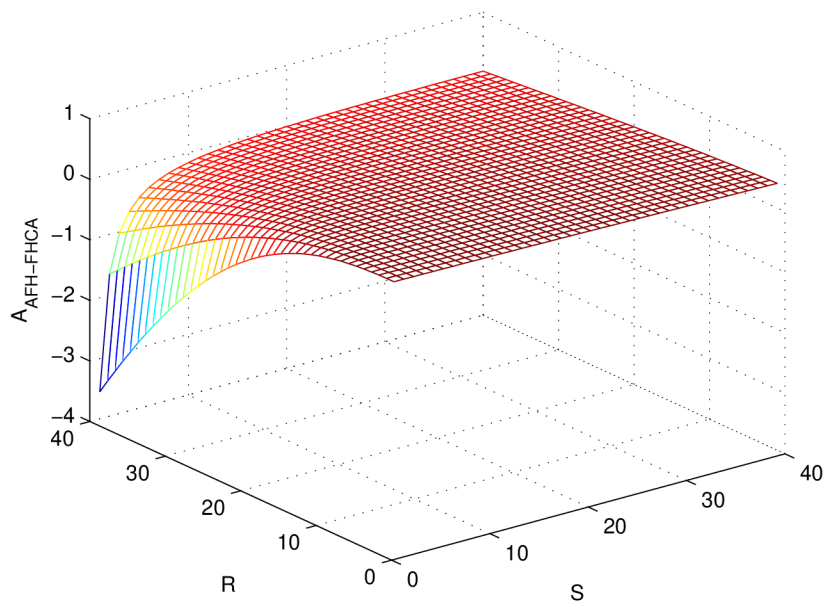
Závěr je zde shodný jako v předchozím případě. Navýšením hodnoty G však došlo ke zvýšení výkonnosti zejména v případě statických rušičů u techniky FH/CA. Ve zkoumaném případě dosahuje technika FH/CA lepších výsledků než technika AFH v 99,8% případů.

Dále provedeme analýzu zisku v případě statických i dynamických rušičů s obdobnými parametry jako v předchozích případech, přičemž navýšíme R_{MAX} na hodnotu $R_{MAX} = 75$. Analýzu provedeme opět pro hodnoty $G = 2$ a 3 .

K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 2$ a 3 , $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40 . Dle vzorce (3.46) byly provedeny výpočty zisku $A_{AFH-FHCA}$, které jsou reprezentovány grafy na obrázku 3.24 a 3.25. Z grafů kde $A_{AFH-FHCA} = f(R, S)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému FH/CA.



Obr. 3.24: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 2$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).



Obr. 3.25: Porovnání výkonnosti systému FH/CA s AFH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči ($N = 100$, $R_{MAX} = 75$, $G = 3$, $R = 1$ až 40 a $S = 1$ až 40).

Závěr je zde shodný jako v předchozích případech. Navýšením hodnoty R_{MAX} však došlo ke zvýšení výkonnosti v případě statických rušičů u techniky AFH. Ve zkoumané oblasti na obrázku 3.24 při $G = 2$ dosahuje technika FH/CA lepších výsledků než AFH v 71% případech. Ve zkoumané oblasti na obrázku 3.25 při $G = 3$ dosahuje technika FH/CA lepších výsledků než AFH v 95% případech.

3.2.5 Zhodnocení výsledků výkonnosti techniky FH/CA

Na základě porovnávání techniky FH/CA s technikami FH a AFH v kapitolách 3.2.3 a 3.2.4 lze učinit následující závěry.

Technika FH/CA není nikdy horší než technika FH v pásmu se statickými a dynamickými rušiči. Významný přínos techniky FH/CA je vidět v oblasti jak statických tak dynamických rušičů. Technika FH/CA dosahuje významného zisku oproti technice FH již při počtu generátorů $G = 2$.

Technika FH/CA je celkově výhodnější než technika AFH v pásmu se statickými a dynamickými rušiči. Významný přínos techniky FH/CA je vidět v oblasti dynamických rušičů. Naopak v oblasti statických rušičů R v počtu do R_0 technika FH/CA ztrácí. V případě požadavku, aby technika FH/CA dosahovala ve stejné situaci podobných výsledků jako technika AFH je optimální hodnotou $G = 3$.

Při porovnávání výkonnosti techniky FH/CA s technikou AFH je třeba vzít v úvahu idealizace techniky AFH popsané v závěru kapitoly 3.1.3. Ve skutečnosti technika AFH není schopna dosáhnout uvedených hodnot.

Navýšením počtu generátorů G u techniky FH/CA lze dosáhnout vyššího výkonu. Ale se zvyšujícím se počtem generátorů G se jednak zvyšuje režie systému (kapitola 3.2.1), ale také se zvyšuje pravděpodobnost, že v případě odlišných podmínek (zcela odlišné hodnoty úrovně signálu RSSI získané měřením jednotlivých stanic) dojde k vybrání jiného kanálu každou stanicí (kapitola 3.2.1). Pomocí matematického modelu je možné optimalizovat parametr G systému FH/CA pro předpokládaný počet a typ rušičů. Na základě porovnání výkonnosti techniky FH/CA oproti technikám FH a AFH a výše popsaným vlastnostem techniky FH/CA lze doporučit počet generátorů $G = 2$ za předpokladu, že se v komunikačním pásmu nebudou vyskytovat pouze statické rušiče.

3.2.6 Matematický model vzájemného rušení systémů s technikou FH/CA

Cílem této kapitoly je sestavit matematický model simulující pravděpodobnost kolize mezi komunikačním systémem FH/CA a statickými nebo dynamickými rušiči v daném komunikačním pásmu. Za dynamické rušiče budou považovány jiné FH/CA systémy, které nejsou mezi sebou synchronizovány a pracují nezávisle na sobě. Při návrhu tohoto modelu budou uvažovány stejné podmínky jako u předchozích návrhů pro modely technik FH a AFH a FH/CA.

Pro úplnost následuje souhrn předpokládaných podmínek. Systém FH/CA má k dispozici N komunikačních kanálů, přičemž při každém skoku vybere jeden kanál z G možných (viz kapitola 3.2.1). V pásmu s N komunikačními kanály se kromě systému FH/CA nachází R statických a S dynamických rušičů. Za dynamické rušiče jsou považovány jiné FH/CA systémy, které nejsou mezi sebou synchronizovány a pracují nezávisle na sobě. Pro potřeby matematického modelu tak bude sledovaný systém $(S + 1)$ -ním FH/CA systémem v pásmu.

Pro jednoduchost se předpokládá, že šířka pásma každého z rušičů je stejná jako šířka pásma jednoho kanálu systému FH/CA. Tedy jeden rušič dokáže plně zarušit maximálně jeden kanál. Dále se předpokládá, že doba mezi dvěma skoky T je pro všechny systémy FH/CA shodná.

Střední počet obsazených kanálů v daném komunikačním pásmu je závislý na počtu aktivních FH/CA systémů a proto jej označíme jako funkci $O(s)$, kde s je počet aktivních FH/CA systémů v komunikačním pásmu. Pokud v daném komunikačním pásmu aktivujeme další FH/CA systém tj. $(s + 1)$, tak s pravděpodobností P_O bude v době měření libovolný kanál z G možných obsazen:

$$P_O(s) = \frac{O(s)}{N} . \quad (3.49)$$

S pravděpodobností $P_{OG}(s)$ bude obsazeno všech G možných kanálů:

$$P_{OG}(s) = P_O(s)^G . \quad (3.50)$$

Aktivovaný $(s + 1)$ systém se tak s pravděpodobností $P_{OG}(s)$ naladí na již obsazený kanál a nezvýší tak počet obsazených kanálů.

Komplementárně s pravděpodobností $P_{VG}(s)$ bude alespoň jeden z G možných kanálů volný:

$$P_{VG}(s) = 1 - P_{OG}(s)^G . \quad (3.51)$$

Aktivovaný $(s + 1)$ systém se tak s pravděpodobností $P_{VG}(s)$ naladí na neobsazený kanál a zvýší tak počet obsazených kanálů o jeden.

Pro střední počet $O(s + 1)$ obsazených kanálů pomocí $(s + 1)$ aktivních FH/CA systémů platí rekurentní vztah:

$$O(s + 1) = O(s) + 1 \cdot P_{VG}(s) = O(s) + \left[1 - \left(\frac{O(s)}{N} \right)^G \right], \quad (3.52)$$

přičemž $O(0) = 0$. V případě že se v pásmu vyskytuje R statických rušičů, které zaruší R kanálů, pak pro výpočet $O(s + 1)$ použijeme $O(0) = R$.

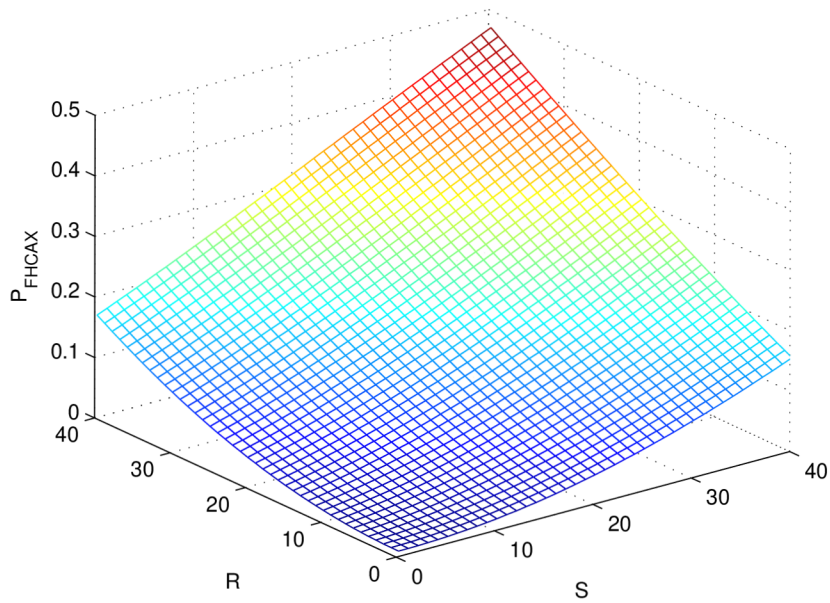
Pro zjednodušení lze pesimisticky předpokládat že pravděpodobnost kolize sledovaného FH/CA systému s rušičem P_{FHCAx} je po aktivaci všech rušičů (jiných FH/CA systémů) kdy $s = S$, rovna pravděpodobnosti přeladění na již obsazený kanál $P_{OG}(S)$:

$$P_{FHCAx} = P_{OG}(S). \quad (3.53)$$

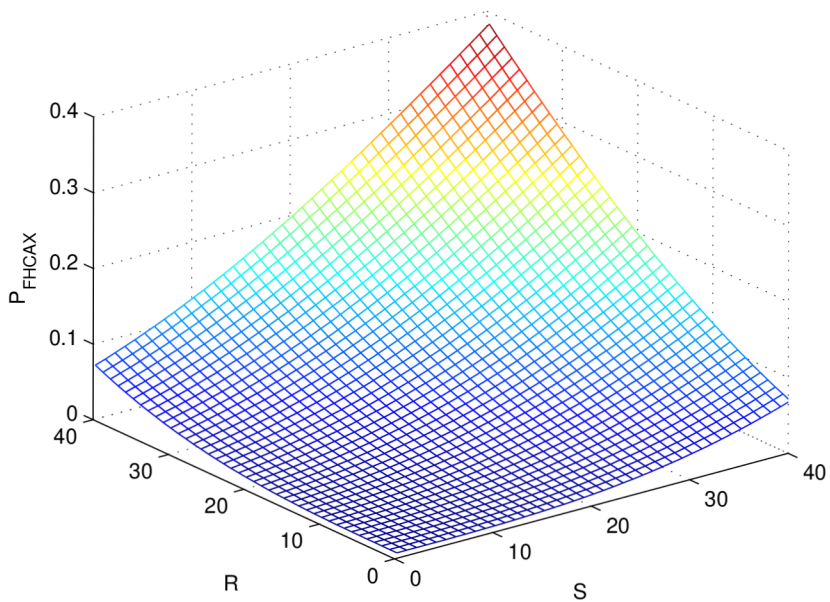
Ve skutečnosti pravděpodobnost P_{FHCAx} kolize sledovaného FH/CA systému s rušičem (jiným FH/CA systémem) je nižší. Výše uvedený vztah pro střední počet obsazených kanálů (3.52) platí při postupném vkládání jednotlivých FH/CA systémů do komunikačního pásma za předpokladu, že žádný z již vložených systémů neprovede přeladění (skok) na jiný kanál. Následně po vložení FH/CA systémů do komunikačního pásma dochází k jejich postupnému přeladování, které vede k určité korekci průměrného počtu obsazených kanálů směrem dolů čímž dochází k následnému snížení pravděpodobnosti P_{FHCAx} . Tato korekce je způsobena ne zcela náhodným výběrem kanálů pomocí FH/CA techniky. Vkládání a následné přeladování jednotlivých FH/CA systémů, tak probíhá za odlišných podmínek (odlišné střední počty obsazených kanálů).

Výše popsaná nepřesnost matematického modelu se zvyšuje s rostoucím počtem generátorů G a rostoucím poměrem počtu dynamických rušičů k počtu kanálů $\frac{S}{N}$. Pro potřeby řešení této disertační práce lze považovat matematický model dle vztahu (3.53) za dostatečný, jelikož výše popsaná nepřesnost má pesimistický charakter a zásadním způsobem se chyba projevuje až při extrémních podmínkách kde počet dynamických rušičů se blíží počtu kanálů.

Pravděpodobnost kolize pro systém FH/CA dle (3.53) je pro vybrané hodnoty parametrů vyobrazena na obrázku 3.26 a 3.27. Správnost modelu byla ověřena simulačním modelem viz příloha A.6.



Obr. 3.26: Pravděpodobnost kolize systému FH/CA v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 kde parametr $G = 2$.



Obr. 3.27: Pravděpodobnost kolize systému FH/CA v pásmu se statickými i dynamickými rušiči pro $N = 100$, $R = 0$ až 40 a $S = 0$ až 40 kde parametr $G = 3$.

3.2.7 Porovnání vzájemného rušení systémů s technikou FH/CA a FH

Srovnání obou systémů lze provést dle vztahu (3.54), kde odečteme pravděpodobnost kolize u techniky FH/CA od pravděpodobnosti kolize u techniky FH a výsledek vztáhneme k pravděpodobnosti kolize u techniky FH, čímž získáme výsledný zisk techniky FH/CA. Kladný výsledek znamená výhodu systému FH/CA, záporný naopak jeho nevýhodu oproti systému FH.

$$A_{FH-FHCAX} = \frac{P_{FH} - P_{FHCAX}}{P_{FH}}, P_{FH} \neq 0. \quad (3.54)$$

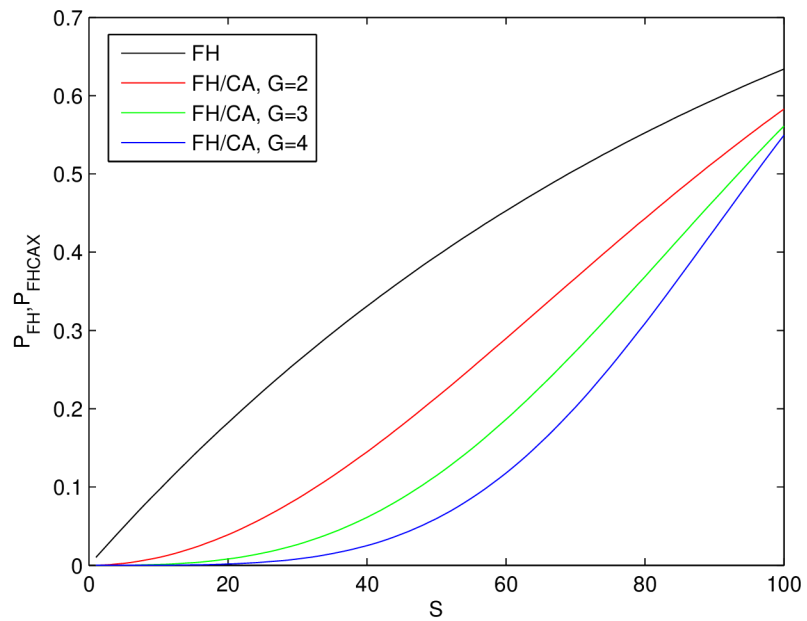
U techniky FH/CA bude při porovnávání voleno nastavení $G = 2, 3$ a 4 .

Uváděná analýza byla počítána k ilustraci s konkrétními parametry, dále uvedený závěr však lze považovat za obecný a platný i pro odlišné parametry.

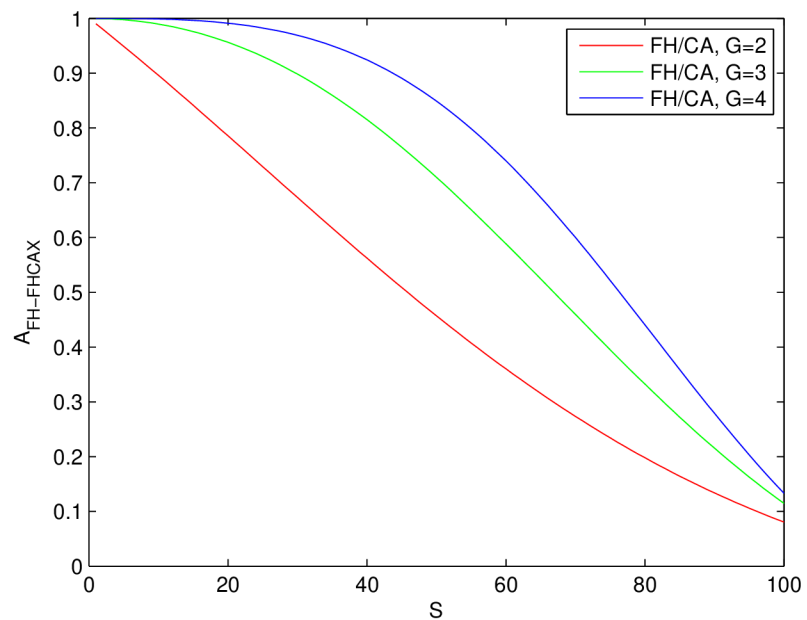
Pro porovnání vzájemného rušení stanic s technikou FH/CA a FH byla provedena analýza zisku v případě dynamických rušičů. Přičemž dynamické rušiče S používají techniku FH při porovnávání systému FH a FH/CA při porovnávání systému FH/CA. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 0$ až 100 . Dle vzorce (3.1) a (3.53) byly provedeny výpočty pravděpodobností kolize P_{FH} a P_{FHCAX} , které jsou reprezentovány grafem na obrázku 3.13.

Dle vzorce (3.54) byl proveden výpočet zisku $A_{FH-FHCAX}$, který je pro $P_{FH} > 0$ reprezentován grafem na obrázku 3.29. Z grafu kde $A_{FH-FHCAX} = f(S)$ lze vyčíst následující vlastnosti systému FH/CA.

Technika FH/CA v pásmu s dynamickými FH/CA rušiči není nikdy horší než technika FH v pásmu s dynamickými FH rušiči. Technika FH/CA dosahuje významného zisku již při počtu generátorů $G = 2$. Při $S = 20$ a $G = 2$ je pravděpodobnost kolize techniky FH s rušičem rovna $P_{FH} = 0.18$ u techniky FH/CA je pravděpodobnost kolize rovna $P_{FHCAX} = 0.0390$. Pravděpodobnost kolize při použití techniky FH/CA je tak 4.6x nižší než u techniky FH. Navýšení počtu generátorů G vede k vyšším ziskům techniky FH/CA.



Obr. 3.28: Porovnání pravděpodobnosti kolize systému FH/CA s FH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 0$ až 100).



Obr. 3.29: Porovnání výkonosti systému FH/CA s FH v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $G = 2, 3$ a 4 , $R = 0$ a $S = 1$ až 100).

3.3 Kódové zabezpečení stanic s frekvenčním ská- káním pro prostředí s intenzivním rušením

3.3.1 Návrh kódového zabezpečení

Navrhovaný FH komunikační systém je určen pro přenos dat v pásmu s intenzivním rušením. V pásmu s intenzivním rušením je reálně možné přenášet data pouze o malém objemu, z tohoto důvodu bude navrženo kódové zabezpečení FH komunikačního systému pro přenos dat o malém objemu (krátké textové zprávy, údaje senzorů, souřadnice polohy). Data budou přenášena pomocí paketového přenosu dat, přičemž paket bude složen z bajtů. K přenosu dat je uvažována modulace dvoustavového nekoherentního kmitočtového klíčování, která byla vybrána pro svoji snadnou realizovatelnost. Dále je uvažována obousměrná komunikace typu half-duplex. Při obousměrné komunikaci typu half-duplex může daná stanice v jednom okamžiku buď data vysílat nebo přijímat. Komunikace typu half-duplex byla zvolena rovněž pro svoji snadnou realizovatelnost.

Rychlost přeladování FH komunikačního systému byla zvolena $V = 100$ skoků za sekundu, dle současných FH komunikačních systémů pracujících v pásmu VHF [3],[7].

Předpokládejme že pro uvažovaný FH komunikační systém je vyčleněno pásmo o šířce W_{FH} , při dvoustavovém nekoherentního kmitočtového klíčování lze do tohoto pásma umístit až N kanálů dle vztahu [7]:

$$N = \frac{W_{FH}}{2 \cdot v_b} . \quad (3.55)$$

Dle vztahu (3.55) snižování rychlosti v_b vede ke zúžení kanálu a zároveň k navýšení celkového počtu kanálů N v pásmu o šířce W_{FH} . Zúžení radiového kanálu umožňuje soustředění stejného výkonu FH stanice do zúženého kanálu čímž dojde k navýšení dosahu stanice nebo snížení chybovosti. Vyšší počet kanálů N zlepší koexistenci více FH komunikačních systémů v daném pásmu. Přenosová rychlost byla zvolena co nejnižší $v_b = 1200$ bitů za sekundu s ohledem na objem přenášených dat, pro který by měla být dostatečná.

Pro zabezpečení FH komunikačního systému byl vybrán protokol HARQ typu I viz kapitola 1.3. Protokol HARQ vyniká mezi ostatními uvedenými protokoly svoji velmi dobrou účinností. Vysoká účinnost protokolu HARQ je dána využitím detekčního a korekčního kódu současně, tento protokol je tak optimální pro nasazení v prostředí s intenzivním rušením.

Jako detekční kód pro FH komunikační systém byl vybrán CRC kód, pro svoji velmi dobrou detekční schopnost pro osamocené i shlukové chyby viz kapitola 1.3.

Počet zabezpečovacích bitů CRC kódu r_C bude stanoven níže na základě délky zdrojového slova k_K RS kódu.

Jako korekční kód pro FH komunikační systém byl vybrán RS kód, pro svoji efektivitu při korekci shlukových chyb viz kapitola 1.3.1. Dále je třeba zvolit následující parametry RS kódu, počet znaků abecedy Q_K respektive bitovou délku kódového symbolu q_K , délku kódového slova n_K a délku zdrojového slova k_K .

Počet bitů v jednom radiovém rámcu lze vypočítat dle vztahu:

$$B_b = \frac{v_B}{V}, \quad (3.56)$$

na jeden radiový rámeček tak připadá $B_b = \frac{1200}{100} = 12$ bitů.

Výběru vhodné bitové délky kódového symbolu q_K je určitým kompromisem mezi pravděpodobností chybného symbolu a délkou kódového slova. Dle vztahu (1.6) a (1.2) snižování bitové délky kódového symbolu q_K vede ke snižování pravděpodobnosti chybně dekódovaného symbolu P_S . Dle vztahu (1.3) zvyšování bitové délky kódového symbolu q_K umožňuje zvyšování délky kódového slova n_K . Přičemž dle vztahu (1.4) zvyšování délky kódového slova n_K vede ke zvyšování korekční kapacity kódu t_K . Bitová délka kódového symbolu musí být také volena s ohledem na počet bitů v jednom radiovém rámcu tak, aby počet symbolů v jednom radiovém rámcu tvořil celé číslo. S ohledem na výše popsané požadavky byla bitová délka kódového symbolu pro FH komunikační systém stanovena na $q_K = 6$.

Počet symbolů v jednom radiovém rámcu lze vypočítat dle vztahu:

$$B = \frac{B_b}{q_K}, \quad (3.57)$$

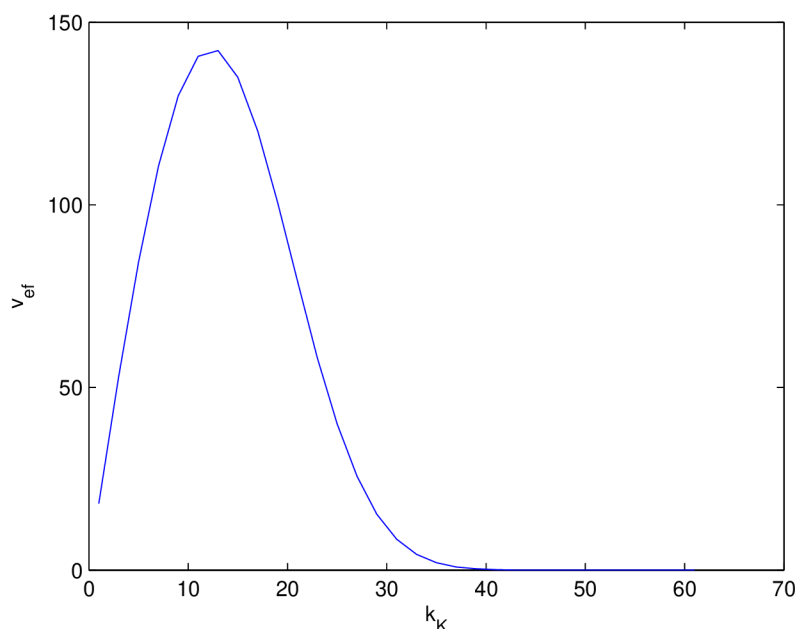
na jeden radiový rámeček tak připadají $B = \frac{12}{6} = 2$ symboly. Délka kódového slova n_K pro FH komunikační systém byla stanovena dosazením do vztahu (1.3) na $n_K = 63$ symbolů respektive $n_K \cdot q_K = 63 \cdot 6 = 378$ bitů. Délka kódového slova n_K byla zvolena nejdelší možná pro zvolenou hodnotu q_K tak, aby bylo možné dosáhnout co možná nejlepší korekční kapacity kódu t_K .

Zvolená hodnota parametru q_K je tedy určitým kompromisem. Vzhledem k velikosti radiového rámečku by nejbližší nižší hodnota parametru mohla být $q_K = 4$, nejdelší možná délka kódového slova by pak mohla být $(2^{q_K} - 1) \cdot q_K = (2^4 - 1) \cdot 4 = 60$ bitů. Vzhledem k tomu, že kódové slovo je složeno ze zdrojových a redundantních symbolů korekčního i detekčního kódu, nelze považovat délku 60 bitů za dostačující. Navýšení hodnoty q_K nelze rovněž doporučit, protože navýšení hodnoty q_K by vedlo ke zvýšení pravděpodobnosti chybně dekódovaného symbolu.

Délku zdrojového slova k_K je třeba volit na základě předpokládané intenzity rušení. Navrhovaný FH komunikační systém má být určen pro prostředí s intenzivním rušením. V dalším za intenzivní rušení považujeme pokud bude zarušeno 40%

komunikačních kanálů. Zarušení 40% komunikačních kanálů odpovídá pravděpodobnosti kolize FH komunikačního systému s rušičem $P_K = 0.4$ za předpokladu, že FH komunikační systém používá pro výběr kanálu techniku FH.

Na základě zvolené pravděpodobnosti P_K a parametru Q_K vypočteného z q_K (dle vztahu (1.2)) lze dle vztahu (1.6) vypočítat pravděpodobnost chybně dekódovaného symbolu P_S . Na základě zvoleného parametru n_K a vypočtené pravděpodobnosti P_S lze dosazením vztahů (1.7) a (1.8) vynést závislost efektivní přenosové rychlosti v_{ef} na délce zdrojového slova k_K viz obrázek 3.30. Při vynášení závislosti efektivní přenosové rychlosti na délce zdrojového slova (obrázek 3.30) byly voleny liché hodnoty k_K , protože délka kódového slova je rovněž lichá, tak aby při výpočtu korekční kapacity kódu dle vztahu (1.4) vycházelo vždy celé číslo.



Obr. 3.30: Závislost efektivní přenosové rychlosti v_{ef} na délce zdrojového slova k_K pro $n_K = 63$, $q_K = 6$, $P_K = 0.4$ a $k_K = 1, 3, 5, \dots, 61$.

Pro dosažení co nejvyšší efektivní přenosové rychlosti je třeba maximalizovat kódový poměr $\frac{k_K}{n_K}$ navyšováním délky zdrojového slova k_K . S navyšováním délky zdrojového slova se však snižuje korekční kapacita kódu, čímž se zvyšuje pravděpodobnost chybně dekódovaného slova P_W . Zvyšující se pravděpodobnost chybně dekódovaného slova P_W však vede ke snižování efektivní přenosové rychlosti. Optimální hodnotu parametru k_K tak volíme na základě vynesené závislosti na obrázku 3.30, kde při maximální efektivní rychlosti je dosaženo optima mezi kódovým poměrem a pravděpodobnosti chybně dekódovaného slova. Optimální délka zdrojového

slova $k_K = 13$ symbolů byla zvolena na základě závislosti vynesené na obrázku 3.30.

Korekční kapacita RS kódu je dle vztahu (1.4) rovna $t_K = \frac{n_K - k_K}{2} = \frac{63 - 13}{2} = 25$ symbolů. Navržený korekční RS kód tak dokáže opravit 25 symbolů z 63 přenesených.

Na základě délky zdrojového slova $k_K = 13$ symbolů respektive $k_K \cdot q_K = 13 \cdot 6 = 78$ bitů, byl zvolen počet zabezpečovacích bitů CRC kódu $r_C = 6$ [31]. Vzhledem k tomu, že paket je složen z bajtů je třeba, aby po odečtení počtu zabezpečovacích bitů CRC kódu r_C od délky zdrojového slova k_K zůstal takový počet bitů, který je dělitelný osmi. Do detekčního kodéru tak bude vstupovat 9 zdrojových bajtů respektive 72 zdrojových bitů, které budou detekčním kodérem doplněny o 6 bitů CRC kódu. Do korekčního kodéru tak následně bude vstupovat požadovaných $72 + 6 = 78$ zdrojových bitů. Dle vztahu (1.1) je pro $r_C = 6$ pravděpodobnost označení chybně přijaté zprávy za bezchybnou CRC-6 kódem rovna $P_{CRC} = 2^{-r_C} = 2^{-6} = 1.56 \cdot 10^{-2}$. Jelikož detekčnímu kódu předchází korekční kód, lze tuto pravděpodobnost považovat za dostatečně nízkou.

Kódové zabezpečení FH komunikačního systému je pro splnění podmínky ideálního prokládání (viz kapitola 1.3) třeba doplnit o prokladač. V tomto případě není možné použít konvoluční prokladač, protože není splněna podmínka $B \geq n_K$ (viz kapitola 1.3) a nelze tak pomocí konvolučního prokladače dosáhnout ideálního prokládání. Pro splnění podmínky ideálního prokládání tak byl zvolen maticový prokladač s maticí o formátu $(n_K \times B) = (63 \times 2)$ (viz kapitola 1.3). Pomocí zvoleného prokladače bude naplněna podmínka ideálního prokládání, tj. každý kódový symbol daného kódového slova bude vždy přenesen v jiném radiovém rámci.

Vzhledem k parametrům korekčního kódu a prokladače je minimální množství zdrojových dat určených k přenosu přivedených na vstup detekčního kodéru $2 \cdot (k_K \cdot q_K - r_C) = 2 \cdot (13 \cdot 6 - 6) = 144$ bitů respektive $144/8 = 18$ bytů. Při menším množství zdrojových dat nedojde k naplnění prokládací matice a dokud není prokládací matice naplněna nedojde k zahájení přenosu dat. Doporučená velikost paketu byla zvolena 144 bitů dle minimálního množství zdrojových dat, které je možné přenést.

Součástí kódového zabezpečení FH komunikačního systému je algoritmus pro výběr vhodných komunikačních kanálů. Pomocí vhodného algoritmu lze snížit pravděpodobnost vzniku chybných prvků ve zprávě. Výběrem vhodného algoritmu lze tak efektivně zvýšit úroveň kódového zabezpečení. Pro kódového zabezpečení FH komunikačního systému byla vybrána technika FH/CA, jejíž algoritmus dosahuje lepších nebo stejných výsledků při porovnání s technikou FH v případě rušení jak statickými tak i dynamickými rušiči, dále technika FH/CA je většinou výhodnější než technika AFH v pásmu se statickými a dynamickými rušiči. Na základě závěru kapitoly 3.2.5 byl stanoven počet generátorů techniky FH/CA na $G = 2$.

Úpravou vztahu (1.8) lze do výpočtu efektivní přenosové rychlosti zahrnout redundanci detekčního kódu, pro efektivní přenosovou rychlost v_{ef2} po úpravě platí vztah:

$$v_{ef2} = v_B \cdot \frac{n_K - (r_C + r_K)}{n_K} \cdot (1 - P_W), \quad (3.58)$$

kde r_C redundance detekčního kódu, $r_K = n_K - k_K$ redundance korekčního kódu, kde je n_K délka kódového slova a k_K délka zdrojového slova dále P_W je pravděpodobnost chybně dekódovaného slova. Pro zjednodušení není ve výpočtu efektivní přenosové rychlosti dle vztahu (3.58) uvažována režie techniky FH/CA a zpětný kanál. Dosazením do vztahu (3.58) lze vypočítat maximální dosažitelnou efektivní přenosovou rychlost FH komunikačního systému:

$$v_{ef2max} = v_{ef2} = 1200 \cdot \frac{378 - (6 + 306)}{378} \cdot (1 - 0) = 209.52 \text{ bitů za sekundu,}$$

při níž optimisticky předpokládáme nulovou pravděpodobnost chybně dekódovaného slova $P_W = 0$.

Následuje krátký přehled navržených parametrů a zabezpečovacích prvků FH komunikačního systému:

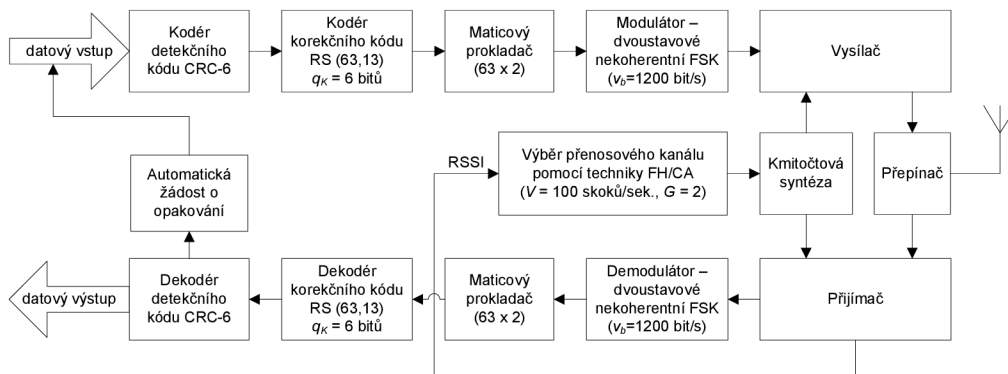
- rychlost přeladování byla zvolena $V = 100$ skoků za sekundu,
- přenosová rychlost byla zvolena $v_b = 1200$ bitů za sekundu,
- pro zabezpečení byl vybrán protokol HARQ typu I,
- jako detekční kód byl vybrán CRC-6 kód,
- jako korekční kód byl vybrán RS kód s parametry RS (63,13) a $q_K = 6$,
- jako prokladač byl vybrán maticový prokladač s maticí o formátu (63 x 2),
- pro výběr komunikačních kanálů byla zvolena technika FH/CA kde $G = 2$,
- doporučená velikost paketu byla stanovena na 144 bitů,
- maximální dosažitelná efektivní přenosová rychlost je $v_{ef2max} = 209.52$ bitů za sekundu.

Pro úplnost je třeba dodat, že v praxi dojde v důsledku režie techniky FH/CA ke snížení rychlosti přeladování V , které následně při konstantním počtu přenesených symbolů B v radiovém rámci povede ke snížení skutečné efektivní přenosové rychlosti.

Blokové schéma stanice FH komunikačního systému včetně všech uvedených zabezpečovacích prvků je vyobrazeno a popsáno v následující podkapitole 3.3.2 na obrázku 3.31.

3.3.2 Navržené kódové zabezpečení

Na obrázku 3.31 je vyobrazeno blokové schéma, kde jsou přehledně zobrazeny zvolené prvky a parametry navrženého kódového zabezpečení stanice FH komunikačního systému.



Obr. 3.31: Blokové schéma kódového zabezpečení FH stanice.

Následuje popis přenosu dat dle blokového schématu na obrázku 3.31. Vstupní data jsou nejprve přiváděna po 9 bytech respektive 72 bitech do kodéru detekčního kódu CRC-6, kde jsou tyto data zabezpečena doplněním o 6 redundantních bitů detekčního kódu.

Blok dat o velikosti $72 + 6 = 78$ bitů z detekčního kodéru je přiveden do korekčního kodéru RS (63,13) a $q_K = 6$ bitů, kde je nejprve převeden na $78/q_K = 78/6 = 13$ symbolů a následně zabezpečení doplněním o 50 redundantních symbolů korekčního kódu. Výstupem z korekčního kodéru je tak kódové slovo o délce 63 symbolů.

Kódové slovo o délce 63 symbolů je z korekčního kodéru přivedeno do maticového prokladače o rozměru (63 x 2) symbolů pomocí něhož je zajištěno ideální prokládání, tj. každý kódový symbol daného kódového slova bude vždy přenesen v jiném radiovém rámci. Pro správnou funkci prokladače je nezbytné prokládací matici zaplnit. K zaplnění prokládací matice dojde po převzetí dvojice kódových slov z korekčního kodéru respektive po předání $2 \cdot 9 = 18$ bytů = 144 bitů na vstup detekčního kodéru. Po zaplnění maticového prokladače jsou předávány kódové symboly do modulátoru za sebou po dvojicích ve formě bitové posloupnosti ($2 \cdot 6 = 12$ bitů).

Pomocí dvoustavového nekoherentního frekvenčního modulátoru je bitová posloupnost převedena na spojitý signál, který je vhodný pro přenos dat prostřednictvím radiových vln.

Technika FH/CA vybere na základě aktuálně naměřených údajů (RSSI) pomocí přijímače nejvhodnější kanál pro přenos dat z $G = 2$ možných. Pomocí kmitočtové syntézy je vygenerován příslušný kmitočet vybraného kanálu. Následně je ve vysílači

spojitý signál z modulátoru pomocí směšovače a signálu z kmitočtového syntetizátoru namodulován na kmitočet vybraného kanálu. Výstup ze směšovače je dále zesílen a pomocí přepínače přiveden na anténní výstup respektive do antény. Tímto způsobem je přenesen jeden radiový rámeček obsahující 12 bitů respektive 2 kódové symboly prostřednictvím radiových vln. Výše popsaný proces je cyklicky opakován až do vyprázdnění maticového prokladače respektive dokud jsou přiváděna data na vstup detekčního kodéru.

Funkcí přepínače je přepínat anténu mezi výstupem vysílače a vstupem přijímače tak, aby nedošlo k poškození přijímače.

Předpokládejme že v dosahu výše popsané stanice se nachází jiná stanice FH komunikačního systému, která přijímá vysílaná data tj. anténní vstup je přepínačem přiveden do přijímače. Tato stanice pomocí techniky FH/CA vybrala shodný kanál. Pomocí kmitočtové syntézy je vygenerován příslušný kmitočet pro příjem vybraného kanálu. Z principu funkce přijímače například s dvojitým směšováním je kmitočet vygenerovaný pomocí kmitočtové syntézy u této stanice ponížěn odečtením mezifrekvence přijímače. Přijatý radiový rámeček je z přijímače ve formě spojitého signálu přiveden do dvoustavového nekoherentního frekvenčního demodulátoru, kde je převeden opět do formy bitové posloupnosti ($2 \cdot 6 = 12$ bitů).

Bitová posloupnost 12 bitů z demodulátoru je převedena na $12/q_K = 12/6 = 2$ symboly a přivedena do maticového prokladače o rozměru (63×2) symbolů pomocí něhož je obnoveno správné pořadí kódových symbolů. Pro správnou funkci prokladače je nezbytné prokládací matici zaplnit. K zaplnění prokládací matice dojde po přijetí 63 radiových rámečků respektive $63 \cdot 2$ kódových symbolů. Po zaplnění maticového prokladače jsou předávány kódové symboly do korekčního dekodéru po slovech.

Pomocí korekčního dekodéru jsou opraveny případné chyby vzniklé během přenosu v kódovém slově dle možnosti (kapacity) korekčního kódu. V tomto případě může být opraveno až $t_K = \frac{n_K - k_K}{2} = \frac{63 - 13}{2} = 25$ chybných symbolů z celkového počtu 63 symbolů ve slově. Výstupem z korekčního dekodéru je 13 zdrojových symbolů respektive $13 \cdot q_K = 13 \cdot 6 = 78$ bitů, které jsou předány do dekodéru detekčního kódu.

V dekodéru detekčního kódu CRC-6 je od 78 bitů odděleno zabezpečovacích 6 bitů, které obsahují CRC kód. Ze zbylých 72 bitů je vypočten nový CRC kód. Vypočtený CRC kód je porovnán s odděleným CRC kódem, v případě shody nedošlo s určitou pravděpodobností k poškození dat během přenosu a data v podobě 72 bitů respektive 9 bytů jsou předána na výstup. V případě neshody CRC kódů je automaticky vyžádán opakovaný přenos. Výše popsaný proces je cyklicky opakován až do vyprázdnění maticového prokladače respektive dokud jsou přijímána data přijímačem.

3.3.3 Analýza navrženého kódového zabezpečení

Cílem této podkapitoly je analyzovat odolnost navrženého kódového zabezpečení FH komunikačního systému vůči statickým a dynamickým rušičům. Následuje krátká rekapitulace parametrů a zabezpečovacích prvků navrženého FH komunikačního systému:

- rychlost přeladování byla zvolena $V = 100$ skoků za sekundu,
- přenosová rychlost byla zvolena $v_b = 1200$ bitů za sekundu,
- pro zabezpečení byl vybrán protokol HARQ typu I,
- jako detekční kód byl vybrán CRC-6 kód,
- jako korekční kód byl vybrán RS kód s parametry RS (63,13) a $q_K = 6$,
- jako prokladač byl vybrán maticový prokladač s maticí o formátu (63 x 2),
- pro výběr komunikačních kanálů byla zvolena technika FH/CA kde $G = 2$,
- doporučená velikost paketu byla stanovena na 144 bitů,
- maximální dosažitelná efektivní přenosová rychlost je $v_{ef2max} = 209.52$ bitů za sekundu.

Kromě navrženého FH komunikačního systému se v pásmu o N kanálech nachází R statických a S dynamických rušičů. Za dynamické rušiče lze považovat jiné FH respektive AFH systémy, které nejsou mezi sebou synchronizovány a pracují nezávisle na sobě.

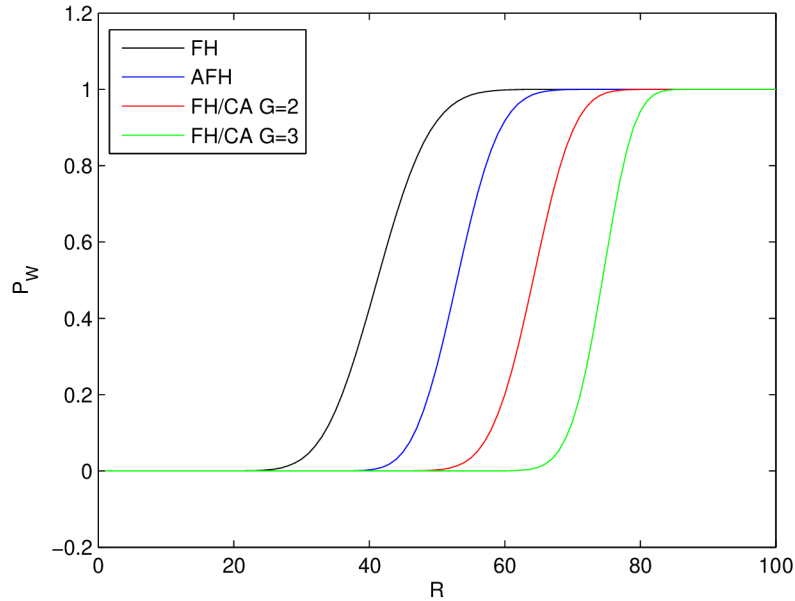
Odolnost navrženého kódového zabezpečení FH komunikačního systému vůči statickým a dynamickým rušičům bude posuzována dle pravděpodobnosti chybně dekodovaného kódového slova P_W za podmínky, že nebude překročena hranice $P_{WMAX} = 1.10^{-3}$. Pravděpodobnost P_W bude počítána dle vztahu (1.7).

V rámci prováděných analýz bude zkoumána odolnost navrženého kódového zabezpečení FH komunikačního systému, který bude provádět výběr komunikačního kanálu pomocí těchto technik: FH, AFH kde $R_{MAX} = 20$ a FH/CA kde $G = 2, 3$. Z provedených analýz bude pro porovnávání techniky stanoven maximální počet statických R_{PWMAX} respektive dynamických S_{PWMAX} rušičů ve zvoleném pásmu při kterém nebude překročena hranice pravděpodobnosti chybně dekodovaného slova P_{WMAX} . Z provedených analýz tak bude možné posoudit přínos zvolené techniky FH/CA kde $G = 2$.

Dle zvolené techniky pro výběr komunikačního kanálu bude pro pravděpodobnost kolize P_K platit:

$$\begin{aligned} \text{pro techniku FH platí: } P_K &= P_{FH} , \\ \text{pro techniku AFH platí: } P_K &= P_{AFH} , \\ \text{pro techniku FH/CA platí: } P_K &= P_{FHCA} . \end{aligned}$$

Jako první byla provedena analýza pravděpodobnosti chybného dekódování kódového slova v případě statických rušičů. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R = 0$ až 100 a $S = 0$. Dle vzorce (1.7) byly provedeny výpočty pravděpodobností chybného dekódování kódového slova P_W pro vybrané techniky (FH, AFH, FH/CA) FH komunikačního systému, které jsou reprezentovány grafem na obrázku 3.32.



Obr. 3.32: Porovnání pravděpodobnosti chybného dekódování kódového slova navrženým FH komunikačním systémem v pásmu se statickými rušiči ($N = 100$, $R = 0$ až 100 a $S = 0$).

Z grafu 3.32 byly pro porovnávané techniky odečteny počty statických rušičů R_{PWMAX} při kterých není překročena hranice pravděpodobnosti chybně dekódovaného slova P_{WMAX} . Počty statických rušičů R_{PWMAX} jsou pro porovnávané techniky uvedeny v tabulce 3.1.

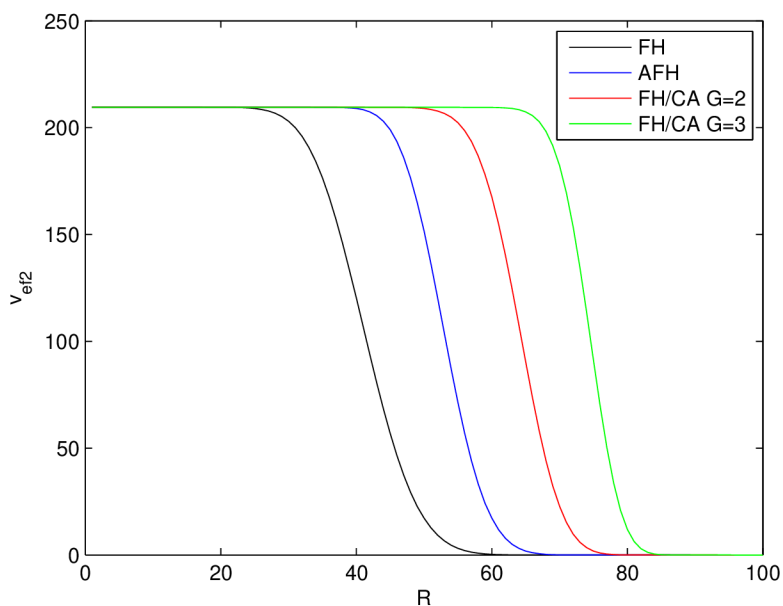
Z tabulky 3.1 lze vyčíst, že navržené kódové zabezpečení FH komunikačního systému s technikou FH/CA ($G = 2$) nepřekročí pravděpodobnost chybně dekódovaného slova $P_{WMAX} = 1 \cdot 10^{-3}$ pokud se v pásmu o $N = 100$ kanálů nebude vyskytovat více než $R_{PWMAX} = 48$ statických rušičů. Pro techniku FH by za shodných podmínek počet statických rušičů nesměl překročit hranici $R_{PWMAX} = 23$ statických rušičů, což je o 52% nižší počet statických rušičů než jaký byl přípustný pro techniku FH/CA kde $G = 2$. Pro techniku AFH by za shodných podmínek počet statických rušičů nesměl překročit hranici $R_{PWMAX} = 38$ statických rušičů, což je o

21% nižší počet statických rušičů než jaký byl přípustný pro techniku FH/CA kde $G = 2$. Naopak pro techniku FH/CA kde $G = 3$ by za shodných podmínek počet statických rušičů nesměl překročit hranici $R_{PWMAX} = 61$ statických rušičů, což je o 27% vyšší počet statických rušičů než jaký byl přípustný pro techniku FH/CA kde $G = 2$.

Technika	R_{PWMAX}
FH	23
AFH $R_{MAX} = 20$	38
FH/CA $G = 2$	48
FH/CA $G = 3$	61

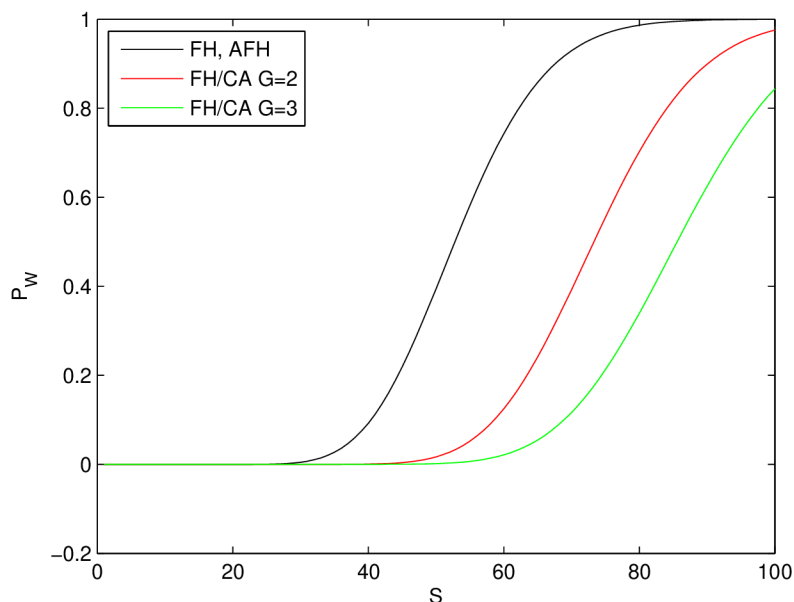
Tab. 3.1: Maximální počty statických rušičů.

Dle vzorce (3.58) byl proveden výpočet efektivní přenosové rychlosti FH komunikačního systému v pásnu se statickými rušiči, který je reprezentován grafem na obrázku 3.33.



Obr. 3.33: Efektivní přenosová rychlost FH komunikačního systému v pásnu se statickými rušiči ($N = 100$, $R = 0$ až 100 a $S = 0$).

Dále byla provedena analýza pravděpodobnosti chybného dekódování kódového slova v případě dynamických rušičů. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R = 0$ a $S = 0$ až 100. Dle vzorce (1.7) byly provedeny výpočty pravděpodobností chybného dekódování kódového slova P_W pro vybrané techniky (FH, AFH, FH/CA) FH komunikačního systému, které jsou reprezentovány grafem na obrázku 3.34. Pokud se v pásmu vyskytují pouze dynamické rušiče, pak pravděpodobnost kolize techniky AFH je shodná s pravděpodobností kolize techniky FH ($P_K = P_{FH} = P_{AFH}$). Technika AFH je schopna dosáhnout nižší pravděpodobnosti kolize oproti technice FH pouze v případě pokud se v pásmu vyskytuje alespoň jeden statický rušič viz kapitola 3.1.3. V grafu na obrázku 3.34 je tak vykreslena společná křivka pro techniky FH a AFH.



Obr. 3.34: Porovnání pravděpodobnosti chybného dekódování kódového slova navrženým FH komunikačním systémem v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $R = 0$ a $S = 0$ až 100).

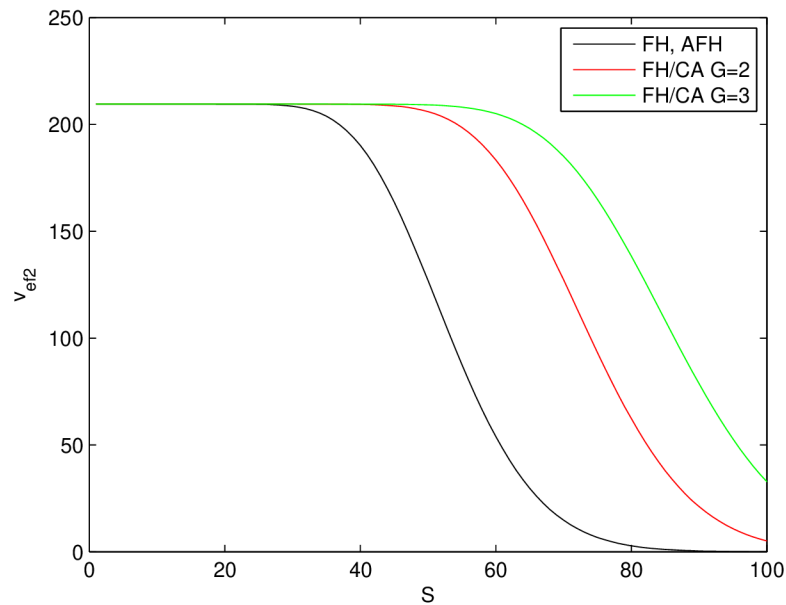
Z grafu 3.32 byly odečteny počty dynamických rušičů S_{PWMAX} pro porovnávané techniky při kterých není ještě překročena hranice pravděpodobnosti chybně dekódovaného slova P_{WMAX} . Počty dynamických rušičů S_{PWMAX} jsou pro porovnávané techniky uvedeny v tabulce 3.2.

Technika	S_{PWMAX}
FH, AFH	26
FH/CA $G = 2$	41
FH/CA $G = 3$	48

Tab. 3.2: Maximální počty dynamických rušičů.

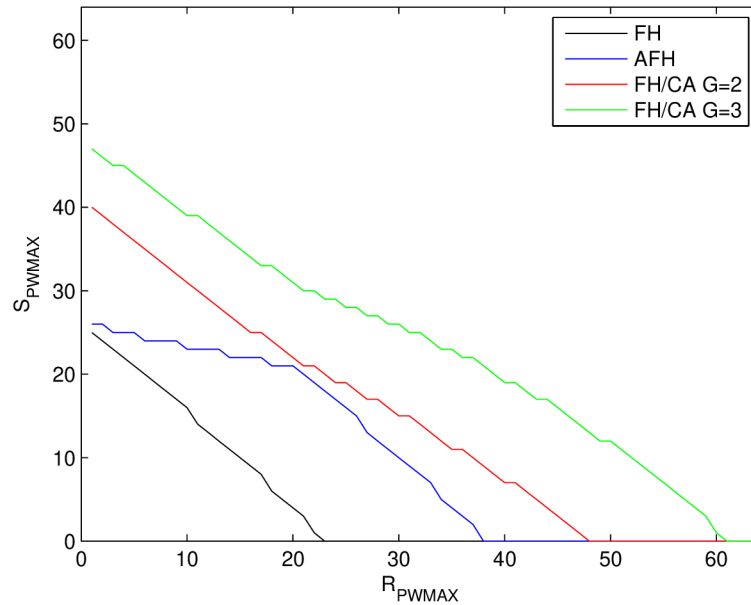
Z tabulky 3.2 lze vyčíst, že navržené kódové zabezpečení FH komunikačního systému s technikou FH/CA ($G = 2$) nepřekročí pravděpodobnost chybně dekodovaného slova $P_{WMAX} = 1 \cdot 10^{-3}$ pokud se v pásmu o $N = 100$ kanálů nebude vyskytovat více než $S_{PWMAX} = 41$ dynamických rušičů. Pro techniku FH respektive AFH by za shodných podmínek počet dynamických rušičů nesměl překročit hranici $S_{PWMAX} = 26$ dynamických rušičů, což je o 37% nižší počet dynamických rušičů než jaký byl přípustný pro techniku FH/CA kde $G = 2$. Naopak pro techniku FH/CA kde $G = 3$ by za shodných podmínek počet statických rušičů nesměl překročit hranici $R_{PWMAX} = 48$ dynamických rušičů, což je o 17% vyšší počet dynamických rušičů než jaký byl přípustný pro techniku FH/CA kde $G = 2$.

Dle vzorce (3.58) byl proveden výpočet efektivní přenosové rychlosti FH komunikačního systému v pásmu s dynamickými rušiči, který je reprezentován grafem na obrázku 3.33.



Obr. 3.35: Efektivní přenosová rychlost FH komunikačního systému v pásmu s dynamickými rušiči ($N = 100$, $R = 0$ a $S = 0$ až 100).

Na závěr byla provedena analýza pravděpodobnosti chybného dekodování kódového slova v případě statických i dynamických rušičů. K ilustraci analýzy byly pro výpočet použity následující parametry: $N = 100$, $R = 1$ až 100 a $S = 1$ až 100. Dle vzorce (1.7) byly provedeny výpočty pravděpodobností chybného dekodování kódového slova P_W pro vybrané techniky (FH, AFH, FH/CA) FH komunikačního systému. Z provedených výpočtů byl pro jednotlivé počty $R_{PWMAX} = 1, 2, \dots, 100$ statických rušičů vyhledán maximální počet dynamických rušičů S_{PWMAX} při kterém je splněna podmínka $P_W < P_{WMAX}$. Takto získané počty statických rušičů R_{PWMAX} a dynamických rušičů S_{PWMAX} byly pro jednotlivé techniky vyneseny do grafu 3.36.



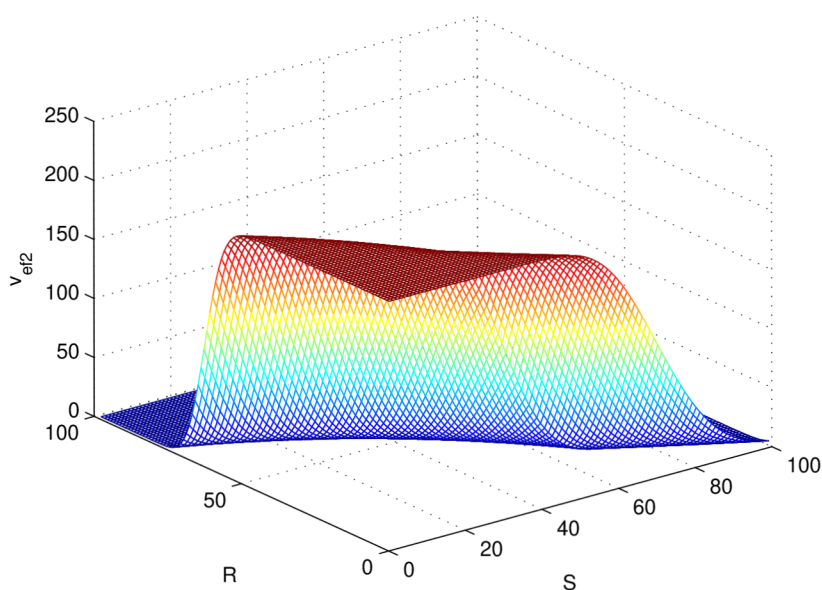
Obr. 3.36: Maximální počet statických a dynamických rušičů při kterém je splněna podmínka $P_W < P_{WMAX}$, platí pro navržený FH komunikační systém ($N = 100$, $R = 1$ až 100 a $S = 1$ až 100).

Z grafu 3.36 lze vyčíst, že navržené kódové zabezpečení FH komunikačního systému s technikou FH/CA kde $G = 2$ pokrývá v pásmu větší rozsah počtu statických a dynamických rušičů než v případě použití technik FH či AFH, při dodržení podmínky $P_W < P_{WMAX}$. Tento rozsah je dále možné rozšířit použitím techniky FH/CA kde $G = 3$.

Z provedených analýz lze konstatovat, že v pásmu jak se statickými tak dynamickými rušiči bylo možné pomocí techniky FH/CA dodržet podmínku $P_W < P_{WMAX}$ při vyšším počtu statických nebo dynamických rušičů než umožňovaly techniky FH

a AFH při shodně zvoleném detekčním a korekčním kódu. Navržené kódové zabezpečení FH komunikačního systému s technikou FH/CA ($G = 2$) nepřekročí pravděpodobnost chybně dekódovaného slova $P_{WMAX} = 1.10^{-3}$ pokud se v pásmu o $N = 100$ kanálů nebude vyskytovat více než $R_{PWMAX} = 48$ statických rušičů nebo více než $S_{PWMAX} = 41$ dynamických rušičů. Maximální počet statických R_{PWMAX} a dynamických S_{PWMAX} rušičů pro případ kdy se v pásmu vyskytují oba uvedené typy rušičů současně je možné odečíst z grafu 3.36.

Pro úplnost byl dle vzorce (3.58) proveden výpočet efektivní přenosové rychlosti FH komunikačního systému v pásmu se statickými a dynamickými rušiči, který je reprezentován grafem na obrázku 3.37.



Obr. 3.37: Efektivní přenosová rychlost FH komunikačního systému v pásmu se statickými a dynamickými rušiči ($N = 100$, $R = 1$ až 100 a $S = 1$ až 100).

4 ZÁVĚR

Systémy s technikou frekvenčního skákání nacházejí v praxi uplatnění jak ve vojenském tak i komerčním sektoru. Klasickým zástupcem techniky frekvenčního skákání v komerčním sektoru je systém Bluetooth, který používá techniku FH respektive AFH dle použité specifikace. Specifikace systému Bluetooth je volně přístupná na rozdíl od systémů z vojenského sektoru, proto byla tato specifikace jedním z důležitých zdrojů informací použitých při řešení disertační práce.

Mezi přednosti systémů s technikou frekvenčního skákání patří především zvýšená odolnost vůči rušení a vyšší bezpečnost. Z tohoto důvodu je výhodné uvedené systémy použít v prostředí s intenzivním rušením. Způsob jakým dochází k výběru jednotlivých komunikačních kanálů u technik s frekvenčním skákáním lze přitom považovat za určitý druh kódování. Změnou způsobu tohoto kódování lze zvýšit odolnost daného systému vůči rušení. V práci jsou popsány současně užívané techniky FH a AFH pro výběr komunikačních kanálů. Dále je navržena nová technika FH/CA vhodná do prostředí s intenzivním rušením.

V první části řešení disertační práce byly sestaveny matematické modely pro současně užívané techniky tj. FH a AFH. Modely simulují pravděpodobnost kolize mezi komunikačním systémem a statickým nebo dynamickým rušičem. Navržené matematické modely umožnily posoudit přínos techniky AFH oproti FH. Nejvyšší přínos techniky AFH oproti FH je dle očekávání v případech statických rušičů. Pomocí uvedených modelů je možné optimalizovat parametr R_{MAX} systému AFH pro předpokládaný počet a typ rušičů.

Porovnáním technik FH a AFH v první fázi řešení byly zjištěny nesporné výhody techniky AFH oproti FH. Systém AFH je schopen na základě dříve naměřených údajů rozpoznat nevhodné kanály pro komunikaci a na určitou dobu tyto kanály vyřadit z užívání. Systém AFH má však i své nevýhody. Systém AFH není schopen reflektovat aktuální stav radiových kanálů, protože vždy vychází z dříve naměřených údajů. Systém AFH tak může cíleně eliminovat vliv pouze statických rušičů. Dále systém AFH vyžaduje režii pro svoji činnost v podobě předávání nezbytných informací (o stavu jednotlivých kanálů) důležitých pro synchronizaci generátorů kanálů.

V druhé části řešení disertační práce byla na základě zjištěných skutečností navržena nová technika frekvenčního skákání (FH/CA). Technika FH/CA přizpůsobuje své chování na základě aktuálně naměřených údajů bez nutnosti předávání informací o stavu jednotlivých kanálů. Technika FH/CA tak odstraňuje některé nevýhody současných technik. Oproti systému FH je systém FH/CA schopen se potenciálně vyhnout kanálům, které jsou zarušeny jak statickými tak i dynamickými rušiči. Oproti systému AFH je systém FH/CA schopen se potenciálně vyhnout i kanálům, které jsou zarušeny dynamickými rušiči.

U techniky FH/CA předpokládáme, že všechny stanice daného FH/CA systému při následujícím skoku shodně zvolí komunikační kanál. Pro splnění tohoto předpokladu je třeba, aby všechny FH/CA stanice byly schopny shodně vyhodnotit úroveň signálů na uvažovaných kanálech (včetně úrovní rušivých signálů způsobených rušiči) v daném komunikačním pásmu.

Následně byl sestaven matematický model pro techniku FH/CA. Navržený matematický model umožnil posoudit přínos techniky FH/CA oproti současným technikám FH a AFH. Porovnáním hodnot pravděpodobnosti rušeného přenosu byly zjištěny nesporné teoretické výhody techniky FH/CA oproti současně užívaným technikám FH a AFH. Pomocí získaných vztahů je možné optimalizovat parametr G systému FH/CA pro předpokládaný počet a typ rušičů.

Technika FH/CA vždy dosahuje lepších nebo stejných výsledků v porovnání s technikou FH v případě rušení jak statickými tak i dynamickými rušiči. Technika FH/CA je většinou výhodnější než technika AFH v pásmu se statickými a dynamickými rušiči. Významný přínos techniky FH/CA je vidět zejména v oblasti dynamických rušičů. Naopak v oblasti statických rušičů je technika FH/CA oproti technice AFH v určitých situacích horší.

Správnost matematických modelů byla ověřena pomocí simulátoru, který byl vytvořen v rámci řešení disertační práce v prostředí programu Matlab. Vytvořený simulátor technik (FH, AFH a FH/CA) je popsán v příloze.

Ve třetí části řešení disertační práce bylo navrženo kódové zabezpečení FH komunikačního systému, který je určen pro přenos dat o malém objemu v pásmu s intenzivním rušením. Následuje krátký přehled navržených parametrů a zabezpečovacích prvků FH komunikačního systému:

- rychlost přeladování byla zvolena $V = 100$ skoků za sekundu,
- přenosová rychlost byla zvolena $v_b = 1200$ bitů za sekundu,
- pro zabezpečení byl vybrán protokol HARQ typu I,
- jako detekční kód byl vybrán CRC-6 kód,
- jako korekční kód byl vybrán RS kód s parametry RS (63,13) a $q_K = 6$,
- jako prokladač byl vybrán maticový prokladač s maticí o formátu (63 x 2),
- pro výběr komunikačních kanálů byla zvolena technika FH/CA kde $G = 2$,
- doporučená velikost paketu byla stanovena na 144 bitů,
- maximální dosažitelná efektivní přenosová rychlost je $v_{ef2max} = 209.52$ bitů za sekundu.

Následně byla provedena analýza odolnosti navrženého kódového zabezpečení FH komunikačního systému vůči statickým a dynamickým rušičům. Z provedených analýz lze konstatovat, že v pásmu jak se statickými tak dynamickými rušiči bylo možné pomocí techniky FH/CA splnit stanovený požadavek maximální přípustné pravděpodobnosti chybně dekódovaného kódového slova při vyšším počtu statických

nebo dynamických rušičů než umožňovaly techniky FH a AFH při shodně zvoleném detekčním a korekčním kódu.

Pomocí nově navržené techniky FH/CA je tak možné zvýšit odolnost daného FH komunikačního systému vůči statickým a dynamickým rušičům nebo zvýšit efektivní přenosovou rychlost. Zvýšení efektivní přenosové rychlosti je možné za předpokladu, že pomocí techniky FH/CA dojde ke snížení pravděpodobnosti kolize což umožní při zachování stejné pravděpodobnosti chybně dekodovaného slova snížení zabezpečení korekčního kódu. Nižší zabezpečení korekčního kódu umožní snížení redundance korekčního kódu, které následně povede ke zvýšení efektivní přenosové rychlosti.

LITERATURA

- [1] *TALK II - SINCGARS*. [online]. Marine Corps, 1996. 77 s. [cit. 26. 12. 2010]. Dostupné z URL: <<http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/docs/sincgars.pdf>>.
- [2] *EriTac Tactical Systems*. [online]. Kongsberg: Kongsberg Gruppen, 2010. [cit. 26. 12. 2010]. Dostupné z URL: <<http://www.kongsberg.com/en/KDS/Products/DefenceCommunications/EriTacTacticalSystems.aspx>>.
- [3] *PANTHER EDR - PANTHER V (BCC 67/VRQ 327) VHF FREQUENCY HOPPING SECURE EPM TRANSCEIVER* [online]. Berkshire: THALES DEFENCE COMMUNICATIONS, 2001. 4 s. [cit. 14. 01. 2011]. Dostupné z URL: <http://www.railce.com/cw/casc/racal/panther_v.pdf>.
- [4] *IEEE Std 802.15.1-2005, Part 15.1: Wireless MAC and PHY specifications for WPANs* [online]. LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Society. 2005. 600 s. [cit. 20. 3. 2008]. Dostupné z URL: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.1-2005.pdf>>.
- [5] TORRIERI, D. *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*. New York: Springer, 2005. 444 s. ISBN 0-387-22782-2.
- [6] SIMON, M., OMURA, J., SCHOLTZ, R., LEVITT, B. *Spread Spectrum Communications Handbook*. McGraw-Hill, 2001. 1248 s. ISBN 0-07-138215-1.
- [7] BURDA, K. *Optimalizace bezpečnostního kódování pro radiové stanice s kmitočtovým skákáním*. Brno, 1999. 69 s. Habilitační práce na Vojenské akademii v Brně.
- [8] BURDA, K. The performance of the follower jammer with a wideband-scanning receiver. [online]. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*. 2004, vol. 55, no. 1-2, pp. 36-38. ISSN 1335-3632. [cit. 6. 9. 2010]. Dostupné z URL: <http://iris.elf.stuba.sk/JEEEC/data/pdf/01-02_104-6.pdf>.
- [9] NĚMEC, K. *Datová komunikace*. Brno: VUTIUUM, 2000. 116 s. ISBN 80-214-1652-1.
- [10] WICKER, S., B. *Error Control Systems for Digital Communication and Storage*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1994. 512 s. ISBN 0-13-200809-2.
- [11] HRDINA, Z., VEJRAŽKA, F. *Digitální radiová komunikace*. Vydavatelství ČVUT, 1995. 243 s. ISBN 80-01-01059-7.

- [12] WICKER, S., B., Bhargava, K., V. *Reed-Solomon Codes and Their Applications* . New York: IEEE Press, 1994. 336 s. ISBN 0-7803-5391-9.
- [13] WELLS, B., R. *Applied Coding and Information Theory for Engineers* . Prentice Hall, 1999. 305 s. ISBN 0-13-961327-7.
- [14] ADÁMEK, J. *Kódování a teorie informace* . Praha: ČVUT, 1991. 209 s. ISBN 80-01-00661-1.
- [15] POPOVSKI, P., YOMO, H., PRASAD, R. Dynamic adaptive frequency hopping for mutually interfering wireless personal area network. [online]. *Mobile Computing, IEEE Transactions*, vol.5, no.8, pp.991-1003, Aug. 2006 doi: 10.1109/TMC.2006.114, [cit. 20. 9. 2010]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1644745&isnumber=34469>>.
- [16] HSU, A.C.-C., WEI, D.S.L., KUO, C.-C.J., SHIRATORI, N., CHUNG-JU CHANG. Enhanced Adaptive Frequency Hopping for Wireless Personal Area Networks in a Coexistence Environment. [online]. *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07*. IEEE, pp.668-672, 26-30 Nov. 2007 doi: 10.1109/GLOCOM.2007.130, [cit. 20. 9. 2010]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4411040&isnumber=4410910>>.
- [17] STABELLINI, L., SHI, L., AL RIFAI, A., ESPINO, J., MAGOULA, V. A new probabilistic approach for adaptive frequency hopping. [online]. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium*, pp.2147-2151, 13-16 Sept. 2009 doi: 10.1109/PIMRC.2009.5450211, [cit. 20. 9. 2010]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5450211&isnumber=5449713>>.
- [18] PARK, K.-J., PARK, T.R., SCHMITZ, C.D., SHA, L. Design of robust adaptive frequency hopping for wireless medical telemetry systems. [online]. *Communications, IET*, vol.4, no.2, pp.178-191, January 22 2010 doi: 10.1049/iet-com.2008.0693, [cit. 20. 9. 2010]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5383645&isnumber=5383639>>.
- [19] BIN, Z., YONGSUK, K., KYUNGHUN, J. The analysis of coexistence mechanisms of Bluetooth. [online]. *Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002*. IEEE 55th , vol.1, no., pp. 419-423 vol.1, 2002 doi: 10.1109/VTC.2002.1002748. [cit.

18. 9. 2009]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1002748&isnumber=21639>>.
- [20] BAMAHDİ, O. A., ZUMMO, S. A. An Adaptive Frequency Hopping Technique With Application to Bluetooth-WLAN Coexistence. [online]. *Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, 2006. ICN/ICONS/MCL 2006. International Conference*, vol., no., pp. 131, 23-29 April 2006 doi: 10.1109/ICNICONSMCL.2006.44 [cit. 30. 9. 2009]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1628377&isnumber=34159>>.
- [21] CHEK, M. C.-H., KWOK, Y.-K. On Adaptive Frequency Hopping to Combat Coexistence Interference between Bluetooth and IEEE 802.11b with Practical Resource Constraints. [online]. *Parallel Architectures, Algorithms and Networks, 2004*. Proceedings. 7th International Symposium on , vol., no., pp. 391-396, 10-12 May 2004 doi: 10.1109/ISPAN.2004.1300511. [cit. 30. 9. 2009]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1300511&isnumber=28881>>.
- [22] SHAOYUAN, Z., FUQIANG, Y., JIANZHONG, C., YONGGUI, L. Analysis and simulation of convergent time of the AFH system. [online]. *Signal Processing, 2004. Proceedings. ICSP '04. 2004 7th International Conference*, vol.3, no., pp. 2704-2707 vol.3, 31 Aug.-4 Sept. 2004 doi: 10.1109/ICOSP.2004.1442340. [cit. 18. 9. 2009]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1442340&isnumber=30995>>.
- [23] STARK, W. Coding for Frequency-Hopped Spread-Spectrum Communication with Partial-Band Interference—Part I: Capacity and Cutoff Rate. [online]. *Communications, IEEE Transactions*, vol.33, no.10, pp. 1036- 1044, Oct 1985 doi: 10.1109/TCOM.1985.1096223. [cit. 2. 2. 2011]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1096223&isnumber=23989>>.
- [24] STARK, W. Coding for Frequency-Hopped Spread-Spectrum Communication with Partial-Band Interference—Part II: Coded Performance. [online]. *Communications, IEEE Transactions*, vol.33, no.10, pp. 1045- 1057, Oct 1985 doi: 10.1109/TCOM.1985.1096224. [cit. 2. 2. 2011]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1096224&isnumber=23989>>.

- [25] KIM, S.W., STARK, W. Optimum rate Reed-Solomon codes for frequency-hopped spread-spectrum multiple-access communication systems. [online]. *Communications, IEEE Transactions*, vol.37, no.2, pp.138-144, Feb 1989 doi: 10.1109/26.20081. [cit. 2. 2. 2011]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=20081&isnumber=795>>.
- [26] WANG, Q., GULLIVER, T.A., BHARGAVA, V.K., FELSTEAD, E.B., Coding for fast frequency hopped noncoherent MFSK spread spectrum communications under worst case jamming. [online]. *Military Communications Conference, 1988. MILCOM 88, Conference record. '21st Century Military Communications - What's Possible?'*, pp.299-305 vol.1, 23-26 Oct. 1988 doi: 10.1109/MILCOM.1988.13408. [cit. 2. 2. 2011]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=13408&isnumber=552>>.
- [27] PUST, R. Analýza chování radiového systému s adaptivním frekvenčním skákáním v podmínkách intenzivního rušení. *ELEKTROREVUE*. 2008, roč. 2008, č. 17, s. 1-10. ISSN 1213-1539.
- [28] PUST, R., BURDA, K. Comparing performance of FH and AFH systems. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2010, roč. 10, č. 2, s. 82-85. ISSN 1738-7906.
- [29] *CC2420* [online]. Dallas: Texas Instruments, 2010. 92 s. [cit. 13. 1. 2011]. Dostupné z URL: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>>.
- [30] PUST, R., BURDA, K. A new technique of frequency hopping with collision avoidance. *Radioengineering*. 2010, roč. 19, č. 4, s. 499-506. ISSN 1210-2512.
- [31] *G.704 : Synchronous frame structures used at 1544, 6312, 2048, 8448 and 44 736 kbit/s hierarchical levels* [online]. Geneva: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 1998. 45 s. [cit. 1. 7. 2011]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.704-199810-I/en>>.

SEZNAM SYMBOLŮ

Poznámka: Níže uvedené symboly platí v rámci celé disertační práce, ostatní symboly mají pouze lokální význam v rámci dané podkapitoly.

- B počet kódových symbolů v radiovém rámci
- G počet uvažovaných kanálů ze kterých je vybrán jeden (s nejnižší intenzitou signálu) při každém skoku FH/CA stanice
- k_K počet zdrojových symbolů v kódovém slově
- n_K počet symbolů v kódovém slově
- n počet využívaných komunikačních kanálů technikou AFH nebo FH/CA
- N počet komunikačních kanálů v pásmu
- O střední počet obsazených kanálů v pásmu s N kanály
- P_{CRC} pravděpodobnost se kterou CRC kód považuje chybnou (chybně dekódovanou) zprávu za bezchybnou
- P_{AFH} pravděpodobnost kolize AFH systému s technickým rušičem
- P_{FH} pravděpodobnost kolize FH systému s technickým rušičem
- P_{FHCA} pravděpodobnost kolize FH/CA systému s technickým rušičem
- P_{FHCAx} pravděpodobnost vzájemné kolize FH/CA systémů
- P_K pravděpodobnost kolize mezi komunikačním systémem a technickým rušičem
- P_S pravděpodobnost se kterou bude rušený symbol chybně dekódován
- P_W pravděpodobnost se kterou bude kódové slovo chybně dekódováno
- q_K bitová délka kódového symbolu nebinárního kódu
- Q_K počet kódových symbolů zabezpečovacího kódu
- r počet kanálů zarušených statickými rušiči v pásmu s n kanály
- r_c redundance detekčního CRC kódu - počet zabezpečovacích bitů CRC kódu
- r_K redundance korekčního kódu - počet zabezpečovacích symbolů v kódovém slově

- R počet kanálů zarušených statickými rušiči v pásmu s N kanály
- R_{MAX} maximální počet nahrazovaných kanálů technikou AFH
- S počet dynamických rušičů nacházejících se v pásmu s N kanály
- T doba mezi skoky FH systému
- t_K korekční kapacita zabezpečovacího kódu
- v_b přenosová rychlost FH komunikačního systému
- v_{ef} efektivní přenosová rychlost uvažující redundanci korekčního kódu
- v_{ef2} efektivní přenosová rychlost uvažující redundanci detekčního a korekčního kódu
- v_{ef2max} maximální dosažitelná efektivní přenosová rychlost uvažující redundanci detekčního a korekčního kódu
- V rychlost přeladování FH systému
- Y počet FH/CA systémů nacházejících se v pásmu s N kanály

SEZNAM ZKRATEK

- AFH ang. Adaptive Frequency Hopping
- ARQ ang. Automatic Request for Retransmission
- BCH Bose, Chaudhru, Hocquenqhem
- BER ang. Bit Error Ratio
- CRC ang. Cyclic Redundancy Check
- DAFH ang. Dynamic Adaptive Frequency Hopping
- EAFH ang. Enhanced Adaptive Frequency Hopping
- FEC ang. Forward Error Control
- FH ang. Frequency Hopping
- FH/CA ang. Frequency Hopping with Collision Avoidance
- HARQ ang. Hybrid ARQ
- PER ang. Packet Error Rate
- PLR ang. Packet Loss Ratio
- RAFH ang. Robust Adaptive Frequency Hopping
- RS Reed-Solomon
- RSSI ang. Received Signal Strength Indication
- UBAFH ang. Utility Based Adaptive Frequency Hopping
- UHF ang. Ultra High Frequency
- VHF ang. Very High Frequency

SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh simulátoru pro techniky frekvenčního skákání	92
A.1	Popis simulátoru pro techniky frekvenčního skákání	92
A.2	Stanovení metody pro ověření matematických modelů pomocí simu- látoru	99
A.3	Ověření matematického modelu pro techniku FH	100
A.4	Ověření matematického modelu pro techniku AFH	101
A.5	Ověření matematického modelu pro techniku FH/CA	102
A.6	Ověření matematického modelu pro více systémů s technikou FH/CA	104
B	Vývojové diagramy simulátoru pro techniku frekvenčního skákání	106

A NÁVRH SIMULÁTORU PRO TECHNIKY FREKVENČNÍHO SKÁKÁNÍ

Účelem simulátoru je umožnit simulaci kolizí technik frekvenčního skákání (FH, AFH a FH/CA) v pásmu se statickými a dynamickými rušiči. Výstupem ze simulátoru tak jsou referenční data, která budou následně porovnána s výsledky matematických modelů jednotlivých technik uvedených v kapitolách 3.1.1, 3.1.2, 3.2.2 a 3.2.6.

Vlastnosti simulátoru budou většinou shodné s vlastnostmi respektive idealizacemi zavedenými u matematických modelů, tak aby bylo možné výsledky simulátoru porovnávat s matematickými modely. Pro úplnost následuje souhrn těchto vlastností:

- komunikační systém bude mít k dispozici pásmo s N kanály,
- po celou dobu simulace bude v pásmu s N kanály kromě komunikačního systému umístěno R statických rušičů a S dynamických rušičů,
- pro jednoduchost se předpokládá, že šířka pásma každého z rušičů je stejná jako šířka pásma jednoho kanálu komunikačního systému. Jeden rušič dokáže plně zarušit maximálně jeden kanál,
- přičemž za dynamické rušiče lze považovat jiné FH či AFH. Typ systému lze měnit nastavením simulátoru,
- dále se předpokládá, že doba mezi dvěma skoky T pro komunikační systém je shodná s dynamickými rušiči. Poznámka: V případě potřeby simulátor umožňuje nastavit rozdílná T pro jednotlivé systémy či rušiče,
- simulátor žádným způsobem nezohledňuje nezbytnou režii pro techniky AFH a FH/CA.

Jako programové prostředí pro simulátor bylo vybráno prostředí programu Matlab. Výhodou uvedeného prostředí je možnost jednoduchého ladění simulátoru. Další výhodou programu Matlab je bezproblémové vykreslování získaných dat do grafů. Získaná data mohou být následně snadno exportována do tabulkového procesoru. Jako jednotka času je v simulátoru použit bit. Jeden bit v časové oblasti odpovídá době nezbytné k přenosu jednoho bitu komunikačním systémem.

A.1 Popis simulátoru pro techniky frekvenčního skákání

V příloze B jsou vyobrazeny vývojové diagramy simulátoru. Ve vyobrazených vývojových diagramech jsou použita návěští (označena číslem), která mají lokální význam v rámci dané části simulátoru.

Hlavní program simulátoru je označen jako `fhsim` (obrázek B.1 a B.2), jeho úkolem je řízení celé simulace respektive volání potřebných funkcí a podprogramů.

Součástí simulátoru jsou následující podprogramy, jejichž funkce jsou:

- `fhsim_param` (obr. B.3) - zde jsou uloženy vstupní parametry simulace,
- `fhsim_rg_init` (obr. B.4) - slouží k inicializaci náhodného generátoru,
- `fhsim_sj_create` (obr. B.5) - vytváří statické rušiče,
- `fhsim_dj_create` (obr. B.6) - vytváří dynamické rušiče (systémy FH a AFH),
- `fhsim_fhca_create` (obr. B.7) - vytváří systém FH/CA,
- `fhsim_rg_create` (obr. B.8) - počáteční spuštění pseudonáhodného generátoru,
- `fhsim_sj_load` (obr. B.9) - vkládá statické rušiče do pásma,
- `fhsim_dj_load` (obr. B.10) - vkládá dynamické rušiče do pásma (systémy FH a AFH),
- `fhsim_rg_getnum` (obr. B.11) - slouží k získávání pseudonáhodných čísel z pseudonáhodného generátoru,
- `fhsim_dj_afh_learn` (obr. B.12 a B.13) - učicí funkce pro techniku AFH,
- `fhsim_dj_afh_remap` (obr. B.14) - funkce přemapování kanálů pro techniku AFH,
- `fhsim_fhca_load_part1` a `fhsim_fhca_load_part2` (obr. B.15 a obr. B.16) - vkládá systémy FH/CA do pásma,
- `fhsim_dj_collision_calc` (obr. B.17) - provádí výpočet počtu kolizí pro dynamické rušiče (systémy FH a AFH),
- `fhsim_fhca_collision_calc` (obr. B.18) - provádí výpočet počtu kolizí pro systémy FH/CA,
- `fhsim_dj_collision_calc_aftersim` (obr. B.19) - provádí souhrnné výpočty počtu kolizí pro dynamické rušiče za celou dobu simulace (systémy FH a AFH),
- `fhsim_fhca_collision_calc_aftersim` (obr. B.20) - provádí souhrnné výpočty počtu kolizí pro systémy FH/CA za celou dobu simulace.

Následuje krátký popis principu činnosti hlavního programu a jednotlivých podprogramů a funkcí. Prvním krokem hlavního programu je vymazání všech proměnných z paměti. V dalším kroku načte všechny parametry simulace z podprogramu (`fhsim_param`). Následuje inicializace generátoru pseudonáhodných čísel (`fhsim_rg_init`). Dále v závislosti na parametrech simulace vytváří potřebný počet statických rušičů (`fhsim_sj_create`), dynamických rušičů respektive FH či AFH systémů (`fhsim_dj_create`) a FH/CA systémů (`fhsim_fhca_create`).

V dalším kroku probíhá vlastní simulace pomocí cyklu, ve kterém jsou inkrementovány přenesené bity. Cyklus je ukončen po přenesení posledního bitu komunikačním systémem. V cyklu jsou prováděny následující operace, nejprve je vytvořeno čisté pásmo s N kanály. Čisté pásmo znamená, že hodnota obsazenosti každého kanálu je nulová. Následně jsou dle parametrů simulace do pásma postupně vlo-

ženy statické rušiče (`fhsim_sj_load`), dynamické rušiče (`fhsim_dj_load`) a FH/CA systémy (`fhsim_fhca_load`). Následuje kontrola, zda je každý vložený dynamický rušič (`fhsim_dj_collision_calc`) a FH/CA systém (`fhsim_fhca_collision_calc`) na kanálu sám. Pokud je zjištěno, že se na daném kanálu nenachází sám tak je uložena událost kolize pro daný rušič nebo systém na daném kanále. Následuje zobrazení informace o průběhu simulace uživateli, simulace mohou být poměrně časově náročné. Z uvedeného důvodu je uživatel informován o průběhu simulace.

Po ukončení cyklu je provedeno vyhodnocení jednotlivých událostí kolizí pro dynamické rušiče (`fhsim_dj_collision_calc_aftersim`) a FH/CA systém (`fhsim_fhca_collision_calc_aftersim`).

Následuje detailní popis principu činnosti jednotlivých podprogramů a funkcí.

Pomocí podprogramu (`fhsim_param`) jsou nastavovány parametry simulace. Parametry simulace jsou rozděleny do podskupin obecné, statické rušiče, dynamické rušiče, FH/CA systémy a pseudonáhodný generátor.

Mezi obecné parametry patří:

- počet komunikačních kanálů N ,
- délka simulace v bitech.

Mezi parametry statických rušičů patří:

- počet statických rušičů R .

Mezi parametry dynamických rušičů patří:

- počet dynamických rušičů S ,
- minimální a maximální doba obsazení kanálu T . Před zahájením je hodnota T určena pseudonáhodně v definovaném rozmezí pro každý rušič,
- minimální a maximální offset. Před zahájením simulace je hodnota offsetu určena pseudonáhodně v definovaném rozmezí pro každý rušič. Což umožňuje odlišnou dobu spouštění jednotlivých dynamických rušičů, tak aby byla dodržena podmínka nezávislosti rušičů a systémů na sobě,
- typ dynamického rušiče (systém FH nebo AFH),
- dále pro techniku AFH parametr délky učení a maximální počet nahrazovaných kanálů R_{MAX} .

Mezi parametry FH/CA systémů patří:

- počet FH/CA systémů Y ,
- počet generátorů FH/CA systému G ,
- pevná délka doby obsazení kanálu T , která je pro všechny FH/CA systémy shodná,
- minimální a maximální offset. Před zahájením simulace je hodnota offsetu určena pseudonáhodně v definovaném rozmezí pro každý systém FH/CA.

Mezi parametry pseudonáhodného generátoru patří:

- velikost vyrovnávací paměti pro pseudonáhodného generátoru.

Pomocí podprogramu (`fhsim_rg_init`) je provedena inicializace pseudonáhodného generátoru, která spočívá v nastavení inicializačního vektoru tohoto generátoru. Přičemž hodnota inicializačního vektoru je odvozena od systémového času počítače. Takto je zajištěno, že jednotlivé simulace byť se stejnými parametry nebudou probíhat shodně a jejich výsledky tak mohou být odlišné.

Pomocí podprogramu (`fhsim_sj_create`) je vygenerován seznam statických rušičů, přičemž každému rušiči je přiřazeno unikátní číslo kanálu. Počet statických rušičů R tak nemůže být vyšší než počet kanálů N .

Pomocí podprogramu (`fhsim_dj_create`) je vygenerován seznam dynamických rušičů. Každému z rušičů jsou přiděleny jeho parametry pomocí pseudonáhodného generátoru v definovaných mezích, dle nastavení parametrů simulace. Jedná se o tyto parametry: inicializační vektor pseudonáhodného generátoru (jehož funkcí je generování čísel kanálů), doba obsazení kanálu T , offset neboli čas spuštění. Dále jsou inicializovány proměnné pro dynamické rušiče, které budou užity při vlastní simulaci. Tyto proměnné lze rozdělit do tří podskupin provozní proměnné, statistické proměnné a proměnné pro AFH.

Provozní proměnné jsou užity k uložení času příštího skoku, čísla právě užívaného kanálu a počtu provedených skoků. Čas příštího skoku je důležitý pro simulátor, aby věděl kdy provést přeladění daného rušiče. Číslo právě užívaného kanálu se používá při detekci kolizí. A počet provedených skoků určuje pořadí v číselné posloupnosti pseudonáhodného generátoru čísel kanálů.

Statistické proměnné slouží k zápisu události kolize a k zápisu kolikrát který rušič využil který kanál.

Proměnné pro AFH slouží pro provoz techniky AFH. Je zde inicializována tabulka dobrých kanálů, počítadlo dobrých kanálů a počítadlo počtu přemapování kanálů. Dále zde je inicializována proměnná určující režim, ve kterém se nachází daný dynamický AFH rušič ("učící" nebo "aktivní") do stavu "učící".

Pomocí podprogramu (`fhsim_fhca_create`) je vygenerován seznam FH/CA systémů. Každému systému jsou přiděleny jeho parametry pomocí pseudonáhodného generátoru v definovaných mezích, dle nastavení parametrů simulace. Jedná se o tyto parametry: inicializační vektor pseudonáhodných generátorů (jejichž funkcí je generování čísel kanálů), offset neboli čas spuštění. Dále jsou inicializovány proměnné pro FH/CA systém, které budou užity při vlastní simulaci. Tyto proměnné lze rozdělit do dvou podskupin provozní proměnné a statistické proměnné.

Provozní proměnné jsou užity k uložení času příštího skoku, čísla právě užívaného kanálu a počtu provedených skoků. Čas příštího skoku je důležitý pro simulátor, aby věděl kdy provést přeladění daného systému. Číslo právě užívaného kanálu se používá při detekci kolizí. A počet provedených skoků určuje pořadí v číselné posloupnosti pseudonáhodného generátoru čísel kanálů.

Statistické proměnné slouží k zápisu události kolize a k zápisu kolikrát který systém FH/CA využil který kanál.

Pomocí podprogramu (`fhsim_rg_create`) jsou vyčteny inicializační vektory pseudonáhodných generátorů pro dynamické rušiče a FH/CA systémy. Každému generátoru je přiřazen unikátní identifikátor a k němu odpovídající inicializační vektor. Následně je pro každý generátor vygenerována a uložena do paměti pseudonáhodná posloupnost čísel. Délka posloupnosti je přednastavena v `fhsim_param`. Tato posloupnost slouží pro nastavování čísel kanálů pro uvedené rušiče a systémy.

Pomocí tohoto podprogramu se podařilo významně zkrátit dobu celé simulace. Vyčítání pseudonáhodných čísel z paměti je mnohem rychlejší než původní řešení. Původní řešení znamenalo při každém požadavku o náhodné číslo provést opětovné nastavování inicializačního vektoru pseudonáhodného generátoru a jeho následné odkrokování k požadované hodnotě.

Pomocí podprogramu (`fhsim_rg_getnum`) jsou vyčítány pseudonáhodná čísla z paměti. K získání čísla je třeba znalost inicializačního vektoru generátoru a pozice požadovaného čísla. Podprogram nejprve vyhledá identifikátor generátoru na základě inicializačního vektoru. Následně zkontroluje, zda požadovaná pozice se nalézá v paměti. Pokud je požadovaná pozice nalezena v paměti, je okamžitě z ní vyčtena. Pokud se požadovaná pozice v paměti nenalézá, je provedeno nové generování posloupnosti pseudonáhodných čísel tak, aby bylo dosaženo požadované pozice. Následuje uložení nové posloupnosti čísel do paměti a vyčtení požadované hodnoty z paměti.

Pomocí podprogramu (`fhsim_sj_load`) jsou postupně vloženy všechny statické rušiče do pásma. Vložení rušiče do pásma znamená inkrementaci hodnoty obsazenosti na příslušném kanálu.

Pomocí podprogramu (`fhsim_dj_load`) jsou postupně vloženy všechny dynamické rušiče do pásma. Vložení rušiče do pásma znamená inkrementaci hodnoty obsazenosti na příslušném kanálu. Podprogram nejprve ověří, zda nemá dojít ke skoku (přeladění na jiný kanál) dynamického rušiče. U rušičů kde nebude v danou chvíli docházet ke skoku, je provedeno ověření, zda je daný rušič aktivní a dochází k jeho vložení do pásma. Všechny dynamické rušiče jsou na počátku simulace neaktivní. K jejich aktivaci postupně dochází v průběhu simulace jejich prvním skokem, který proběhne v čase startu (`offsetu`) daného rušiče.

U rušičů kde má dojít v danou chvíli ke skoku, jsou provedeny následující úkony. Inkrementuje se počítadlo skoků, které slouží jako ukazatel pozice pro pseudonáhodný generátor čísel kanálů. Nastaví se čas příštího skoku daného rušiče, který je dán součtem aktuálního času a doby T (`dwell time`) daného rušiče. Zjistí se inicializační vektor pseudonáhodného generátoru pro daný rušič a společně s pozicí je zavolán podprogram (`fhsim_rg_getnum`) pomocí něhož je získáno pseudonáhodné číslo

kanálu. Pokud daný rušič používá techniku FH je uvedené číslo přiřazeno rušiči. Pokud daný rušič používá techniku AFH zjišťuje se v jakém z režimů se technika AFH u daného rušiče nachází. Pokud je technika AFH neaktivní (je v režimu "učení") tak je získané číslo kanálu beze změny přiřazeno rušiči tak jak tomu bylo u techniky FH. Následuje volání podprogramu učení (`fhsim_dj_afh_learn`). Pokud je technika AFH aktivní je přiřazení čísla kanálu přenecháno podprogramu (`fhsim_dj_afh_remap`).

Následně je dynamický rušič vložen do pásma na kanál, který mu byl přiřazen.

Pomocí podprogramu (`fhsim_dj_afh_learn`) je prováděna kontrola zda od začátku simulace provedl dynamický rušič potřebný počet skoků k přechodu z režimu "učení" do "aktivní". Po provedení požadovaného počtu skoků dochází k výpočtu pravděpodobnosti kolize pro jednotlivé kanály, na základě dat získaných v "učícím" režimu kdy AFH rušič pracoval shodným způsobem jako FH rušič.

Kanály u nichž vychází pravděpodobnost kolize s rušičem nižší než 1, jsou označeny za kanály dobré. Technika AFH může nahradit pouze R_{MAX} špatných kanálů. Z tohoto důvodu potřebuje pro svoji funkci minimálně $N - R_{MAX}$ dobrých kanálů. Pokud počet dobrých kanálů nesplňuje uvedenou podmínku, dochází k umělému snižování pravděpodobnosti kolize na náhodně vybraných kanálech, dokud počet dobrých kanálů neodpovídá požadovanému počtu.

Následně je sestavena tabulka dobrých kanálů, která obsahuje čísla kanálů, u nichž nenastala v "učícím" režimu kolize, případně jsou do tabulky zařazeny i špatné kanály (opak dobrých kanálů, na těchto kanálech došlo ke kolizi v průběhu "učícího" režimu) pokud nebyl dostatečný počet kanálů označených za dobré. Následuje změna režimu techniky AFH z "učícího" do aktivního. Počet kolizí a využití jednotlivých kanálů v učícím režimu u techniky AFH nebude ve výsledku simulace uvažován (v souladu s matematickým modelem), proto jsou uvedené výsledky simulace při změně režimu vymazány.

Pomocí podprogramu (`fhsim_dj_afh_remap`) je prováděna kontrola zda je vybraný kanál dobrý nebo špatný. Dobrý kanál se pozná tak, že se nachází v tabulce dobrých kanálů, ostatní kanály jsou špatné. Pokud je vybraný kanál dobrý dojde k přiřazení tohoto kanálu rušiči. Pokud je vybraný kanál špatný, dochází k vygenerování pseudonáhodného čísla, které bude použito jako ukazatel do tabulky dobrých kanálů. Z tabulky dobrých kanálů z pozice kam ukazuje ukazatel je vyčteno číslo kanálu, které je přiřazeno rušiči.

Pomocí podprogramů (`fhsim_fhca_load_part1` a `fhsim_fhca_load_part2`) jsou postupně vkládány FH/CA systémy do pásma. Podprogram (`fhsim_fhca_load_part1`) nejprve vloží aktivní FH/CA systémy do pásma. Vložení systému do pásma znamená inkrementaci hodnoty obsazenosti na příslušném kanálu. FH/CA systémy jsou na počátku simulace neaktivní. K jejich aktivaci postupně dochází v průběhu simulace jejich prvním skokem, který proběhne v čase startu systému (offsetu). Dále pod-

program (`fhsim_fhca_load_part2`) ověří, zda nemá dojít ke skoku (přeladění na jiný kanál) u jednotlivých systémů. U systému kde má dojít v danou chvíli ke skoku, jsou provedeny následující úkony. Vyjmutí daného FH/CA systému z pásma. Inkrementuje se počítadlo skoků, které slouží jako ukazatel pozice pro pseudonáhodné generátory čísel kanálů. Nastaví se čas příštího skoku daného systému, který je dán součtem aktuálního času a doby T (dwell time) daného systému. Zjistí se G inicializačních vektorů pseudonáhodných generátorů a pozice generátoru pro daný systém. Voláním podprogramu (`fhsim_rg_getnum`) je získáno G možných kanálů. Následuje kontrola zda jsou jednotlivá čísla možných kanálů navzájem různá. V případě kdy nejsou jednotlivá čísla možných kanálů navzájem různá je inkrementována pozice generátorů a vygenerována nová sada G možných kanálů, tento proces je opakován dokud čísla možných kanálů nebudou navzájem různá. Následuje načtení hodnot obsazenosti pro G možných kanálů z tabulky pásma a výběr kanálu s nejnižší obsazeností. Pokud nejnižší hodnotu obsazenosti splňují dva a více kanálů je upřednostněn generátor s nejnižším indexem i (viz kapitola 3.2.1). Následuje přiřazení kanálu příslušnému systému a vložení daného systému do pásma. Ze statistických důvodů se v tomto podprogramu sleduje četnost využití jednotlivých pseudonáhodných generátorů.

Pomocí podprogramu (`fhsim_dj_collision_calc`) jsou postupně procházeny kanály jednotlivých dynamických rušičů v pásmu. Pokud rušič není na kanálu sám, tj. pokud obsazenost tohoto kanálu je větší než 1, dojde k zaznamenání kolize daného rušiče na daném kanálu.

Pomocí podprogramu (`fhsim_fhca_collision_calc`) jsou postupně procházeny kanály jednotlivých FH/CA systémů v pásmu. Pokud systém není na kanálu sám, tj. pokud obsazenost tohoto kanálu je větší než 1, dojde k zaznamenání kolize daného systému na daném kanálu.

Pomocí podprogramu (`fhsim_dj_collision_calc_aftersim`) jsou provedeny statistické výpočty z hodnot uložených pomocí podprogramu (`fhsim_dj_collision_calc`). Je tak zjištěn celkový počet kolizních bitů (bitů při jejichž přenosu došlo ke kolizi s jiným rušičem nebo systémem) pro daný dynamický rušič. Dále je zjištěn celkový počet přenesených bitů. Na základě těchto údajů je proveden výpočet pravděpodobnosti kolize bitu pro daný rušič. Následně jsou uvedené pravděpodobnosti rušičů zprůměrovány. Dále je sestavena matice pravděpodobností kolize pro jednotlivé rušiče a kanály.

Pomocí podprogramu (`fhsim_fhca_collision_calc_aftersim`) jsou provedeny statistické výpočty z hodnot uložených pomocí podprogramu (`fhsim_fhca_collision_calc`). Je tak zjištěn celkový počet kolizních bitů (bitů při jejichž přenosu došlo ke kolizi s rušičem nebo jiným systémem) pro daný systém. Dále je zjištěn celkový počet přenesených bitů. Na základě těchto údajů je proveden výpočet pravděpodobnosti kolize

bitu pro daný systém. Následně jsou uvedené pravděpodobnosti systémů zprůměrovány. Dále je sestavena matice pravděpodobností kolize pro jednotlivé systémy a kanály.

Simulátor mohl být napsán v jiném programovacím jazyce, například C++ a mohl být v některých ohledech řešen optimálněji. Při jeho vývoji byl preferován co nejjednodušší způsob řešení, vhodné prostředí pro ladění simulátoru, dostupné funkce pro vykreslování grafů a možnost exportu dat. Pro potřeby této práce je tak provedení simulátoru v prostředí Matlab optimální.

A.2 Stanovení metody pro ověření matematických modelů pomocí simulátoru

K ověření matematických modelů popsaných v kapitolách 3.1.1, 3.1.2, 3.2.2 a 3.2.6 bude použit simulátor. Pro ověření matematického modelu bude provedeno 12 simulací. Jednotlivé simulace se budou od sebe lišit v nastavení počtu R statických a S dynamických rušičů, dle tabulky A.1. Následně bude provedeno 12 výpočtů pomocí matematických modelů. Pro jednotlivé výpočty budou použity jako vstupní parametry hodnoty R a S dle tabulky A.1, kde i je pořadí testu.

i	R	S
1	5	5
2	5	10
3	10	5
4	10	10
5	10	20
6	20	10
7	20	20
8	20	40
9	40	20
10	40	40
11	5	40
12	40	5

Tab. A.1: Vzor vstupních parametrů R a S pro ověření matematického modelu.

Nasimulované a vypočtené hodnoty budou mezi sebou porovnány dle vzorce:

$$\delta_{MOD} = \frac{|P_{MOD} - P_{SIM}|}{P_{SIM}} \cdot 100, \quad (\text{A.1})$$

kde P_{MOD} je pravděpodobnost kolize vypočtená pomocí matematického modelu a P_{SIM} je pravděpodobnost kolize získaná jako výsledek simulace. Relativní chybu matematického modelu k simulátoru pak v procentech udává δ_{MOD} . Vypočtené hodnoty δ_{MOD} jsou následně zprůměrovány a je tak získána průměrná relativní chyba matematického modelu k simulátoru pro danou techniku.

Jednotlivé simulace budou prováděny s následujícími parametry. Počet komunikačních kanálů N bude nastaven na $N = 100$. Doba obsazení kanálu bude pro systémy FH, AFH a FH/CA shodná tj. $T = 100$ bitů. Čas spuštění jednotlivých systémů bude určen pseudonáhodně z intervalu $< 1, T >$.

Jednotlivé simulace budou spouštěny opakovaně (celkem 10x), přičemž do tabulky bude zapsána nejlepší hodnota (hodnota nejbliže k vypočtené hodnotě), které se podařilo pomocí simulátoru dosáhnout. Pokud se podaří dosáhnout průměrné relativní chyby matematického modelu k simulátoru (z 12 simulací) menší, než 5% lze považovat navržený matematický model za ověřený pro danou techniku.

A.3 Ověření matematického modelu pro techniku FH

Pro ověření techniky FH bylo provedeno 12 simulací dle metodiky popsané v kapitole A.2. Délka simulace byla stanovena na 15^5 bitů. Přičemž dynamické rušiče S používají techniku FH. Výsledek ověření simulátoru je uveden v tabulce A.2.

i	R	S	P_{MOD}	P_{SIM}	$ P_{MOD} - P_{SIM} $	$\delta_{MOD}[\%]$
1	5	5	0.0966	0.0996	0.0030	3.01
2	5	10	0.1408	0.1421	0.0013	0.91
3	10	5	0.1441	0.1449	0.0008	0.55
4	10	10	0.1861	0.1879	0.0018	0.96
5	10	20	0.2639	0.2674	0.0035	1.31
6	20	10	0.2765	0.2791	0.0026	0.93
7	20	20	0.3457	0.3490	0.0033	0.95
8	20	40	0.4648	0.4654	0.0006	0.13
9	40	20	0.5093	0.5124	0.0031	0.60
10	40	40	0.5986	0.6005	0.0019	0.32
11	5	40	0.3645	0.3657	0.0012	0.33
12	40	5	0.4394	0.4330	0.0064	1.48
průměr						0.96

Tab. A.2: Ověření matematického modelu pro techniku FH.

Průměrná relativní chyba matematického modelu k simulátoru pro techniku FH byla 0.96%. Na základě tohoto výsledku lze konstatovat, že navržený matematický model byl úspěšně ověřen pro techniku FH.

A.4 Ověření matematického modelu pro techniku AFH

Pro ověření techniky AFH bylo provedeno 12 simulací dle metodiky popsané v kapitole A.2. Délka simulace byla stanovena na 15^5 bitů. Přičemž dynamické rušiče S používají techniku AFH. Počet skoků k učení techniky AFH byl stanoven na 600 skoků. Maximální počet nahrazovaných kanálů byl stanoven na $R_{MAX} = 20$. Výsledek ověření simulátoru je uveden v tabulce A.3.

i	R	S	P_{MOD}	P_{SIM}	$ P_{MOD} - P_{SIM} $	$\delta_{MOD}[\%]$
1	5	5	0.0515	0.0520	0.0005	0.96
2	5	10	0.1004	0.1000	0.0004	0.40
3	10	5	0.0543	0.0558	0.0015	2.69
4	10	10	0.1057	0.1056	0.0001	0.09
5	10	20	0.2003	0.2014	0.0011	0.55
6	20	10	0.1182	0.1185	0.0003	0.25
7	20	20	0.2224	0.2244	0.0020	0.89
8	20	40	0.3954	0.3968	0.0014	0.35
9	40	20	0.4168	0.4176	0.0008	0.19
10	40	40	0.5465	0.5496	0.0031	0.56
11	5	40	0.3451	0.3466	0.0015	0.43
12	40	5	0.2957	0.2985	0.0028	0.94
průměr						0.69

Tab. A.3: Ověření matematického modelu pro techniku AFH.

Průměrná relativní chyba matematického modelu k simulátoru pro techniku AFH byla 0.69%. Na základě tohoto výsledku lze konstatovat, že navržený matematický model byl úspěšně ověřen pro techniku AFH.

A.5 Ověření matematického modelu pro techniku FH/CA

Pro ověření techniky FH/CA bylo provedeno 2x12 simulací dle metodiky popsané v kapitole A.2 pro $G = 2$ a 3. Počet systémů FH/CA je $Y = 1$. Délka simulace byla stanovena na 10^6 bitů. Přičemž dynamické rušiče S používají techniku AFH. Počet skoků k učení techniky AFH byl stanoven na 600 skoků. Maximální počet nahrazovaných kanálů byl stanoven na $R_{MAX} = 20$. Výsledky ověření simulátoru jsou uvedeny v tabulkách A.4 a A.5.

Při ověřování techniky FH/CA byla délka simulace prodloužena, což vedlo k zpřesnění výsledků simulace. U techniky AFH je požadováno, aby učící režim byl co nejkratší vzhledem k celkové délce simulace. Technika AFH v učícím režimu pracuje jako technika FH, čímž ovlivňuje i výsledky systému FH/CA. Průměrná relativní chyba matematického modelu k simulátoru pro techniku FH/CA byla 3.98% pro $G = 2$ a 3.97% pro $G = 3$. Na základě tohoto výsledku lze konstatovat, že navržený matematický model byl úspěšně ověřen pro techniku FH/CA.

i	R	S	P_{MOD}	P_{SIM}	$ P_{MOD} - P_{SIM} $	$\delta_{MOD}[\%]$
1	5	5	0.0332	0.0314	0.0018	5.73
2	5	10	0.0648	0.0602	0.0046	7.64
3	10	5	0.0455	0.0416	0.0039	9.38
4	10	10	0.0814	0.0853	0.0039	4.57
5	10	20	0.1533	0.1551	0.0018	1.16
6	20	10	0.1293	0.1289	0.0004	0.31
7	20	20	0.2149	0.2107	0.0042	1.99
8	20	40	0.3702	0.3769	0.0067	1.78
9	40	20	0.3386	0.3376	0.0010	0.30
10	40	40	0.4838	0.4717	0.0121	2.57
11	5	40	0.2577	0.2345	0.0232	9.89
12	40	5	0.2079	0.2132	0.0053	2.49
průměr						3.98

Tab. A.4: Ověření matematického modelu pro techniku FH/CA pro $G = 2$.

i	R	S	P_{MOD}	P_{SIM}	$ P_{MOD} - P_{SIM} $	$\delta_{MOD}[\%]$
1	5	5	0.0267	0.0257	0.0010	3.89
2	5	10	0.0531	0.0484	0.0047	9.71
3	10	5	0.0301	0.0311	0.0010	3.22
4	10	10	0.0592	0.0603	0.0011	1.82
5	10	20	0.1177	0.1087	0.0090	8.28
6	20	10	0.0807	0.0814	0.0007	0.86
7	20	20	0.1533	0.1570	0.0037	2.36
8	20	40	0.2947	0.2809	0.0138	4.91
9	40	20	0.2347	0.2272	0.0075	3.30
10	40	40	0.3860	0.3799	0.0061	1.61
11	5	40	0.2123	0.2139	0.0016	0.75
12	40	5	0.1081	0.1011	0.0070	6.92
průměr						3.97

Tab. A.5: Ověření matematického modelu pro techniku FH/CA pro $G = 3$.

A.6 Ověření matematického modelu pro více systémů s technikou FH/CA

Pro ověření techniky FH/CA bylo provedeno 2x12 simulací dle metodiky popsané v kapitole A.2 pro $G = 2$ a 3. Počet systémů FH/CA v komunikačním pásmu o N kanálech je $Y = 1+S$, přičemž dynamické rušiče S používají techniku FH/CA. Délka simulace byla stanovena na 10^5 bitů. Výsledky ověření simulátoru jsou uvedeny v tabulkách A.6 a A.7.

Průměrná relativní chyba matematického modelu k simulátoru pro techniku FH/CA byla 2.87% pro $G = 2$ a 4.07% pro $G = 3$. Na základě tohoto výsledku lze konstatovat, že navržený matematický model byl i přes pesimistický charakter (viz kapitola 3.2.6) úspěšně ověřen pro více stanic s technikou FH/CA.

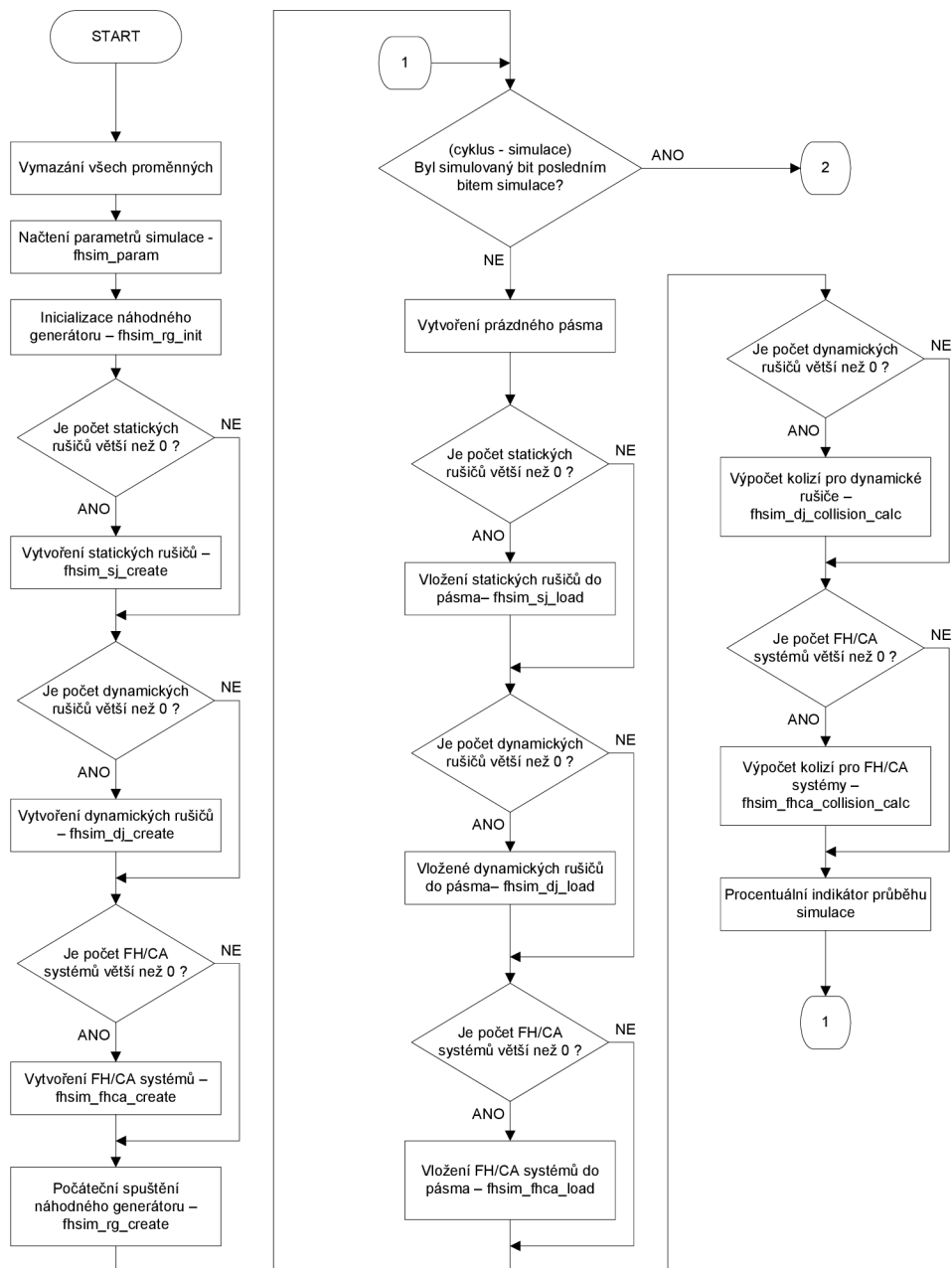
i	R	S	P_{MOD}	P_{SIM}	$ P_{MOD} - P_{SIM} $	$\delta_{MOD}[\%]$
1	5	5	0.0099	0.0100	0.0001	1.00
2	5	10	0.0222	0.0218	0.0004	1.83
3	10	5	0.0223	0.0220	0.0003	1.36
4	10	10	0.0391	0.0383	0.0008	2.09
5	10	20	0.0853	0.0831	0.0022	2.65
6	20	10	0.0865	0.0850	0.0015	1.76
7	20	20	0.1465	0.1410	0.0055	3.90
8	20	40	0.2917	0.2763	0.0154	5.57
9	40	20	0.3073	0.2979	0.0094	3.16
10	40	40	0.4600	0.4382	0.0218	4.97
11	5	40	0.1787	0.1702	0.0085	4.99
12	40	5	0.1948	0.1927	0.0021	1.09
průměr						2.87

Tab. A.6: Ověření matematického modelu pro více stanic s technikou FH/CA pro $G = 2$.

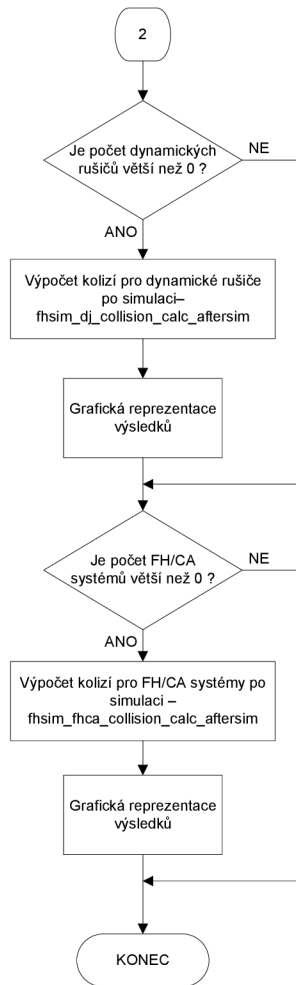
i	R	S	P_{MOD}	P_{SIM}	$ P_{MOD} - P_{SIM} $	$\delta_{MOD}[\%]$
1	5	5	0.0010	0.0010	0.0000	0.00
2	5	10	0.0034	0.0033	0.0001	3.03
3	10	5	0.0034	0.0034	0.0000	0.00
4	10	10	0.0080	0.0078	0.0002	2.56
5	10	20	0.0265	0.0257	0.0008	3.11
6	20	10	0.0266	0.0258	0.0008	3.10
7	20	20	0.0614	0.0590	0.0024	4.07
8	20	40	0.1866	0.1716	0.0150	8.74
9	40	20	0.1914	0.1837	0.0077	4.19
10	40	40	0.3751	0.3379	0.0372	11.01
11	5	40	0.0855	0.0789	0.0066	8.37
12	40	5	0.0889	0.0883	0.0006	0.68
průměr						4.07

Tab. A.7: Ověření matematického modelu pro více stanic s technikou FH/CA pro $G = 3$.

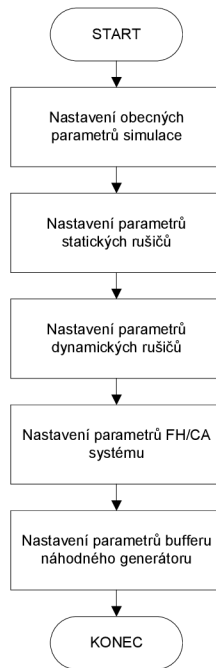
B VÝVOJOVÉ DIAGRAMY SIMULÁTORU PRO TECHNIKU FREKVENČNÍHO SKÁKÁNÍ



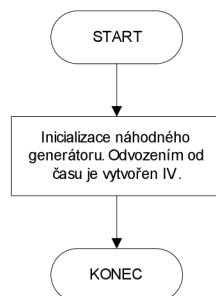
Obr. B.1: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim (1/2).



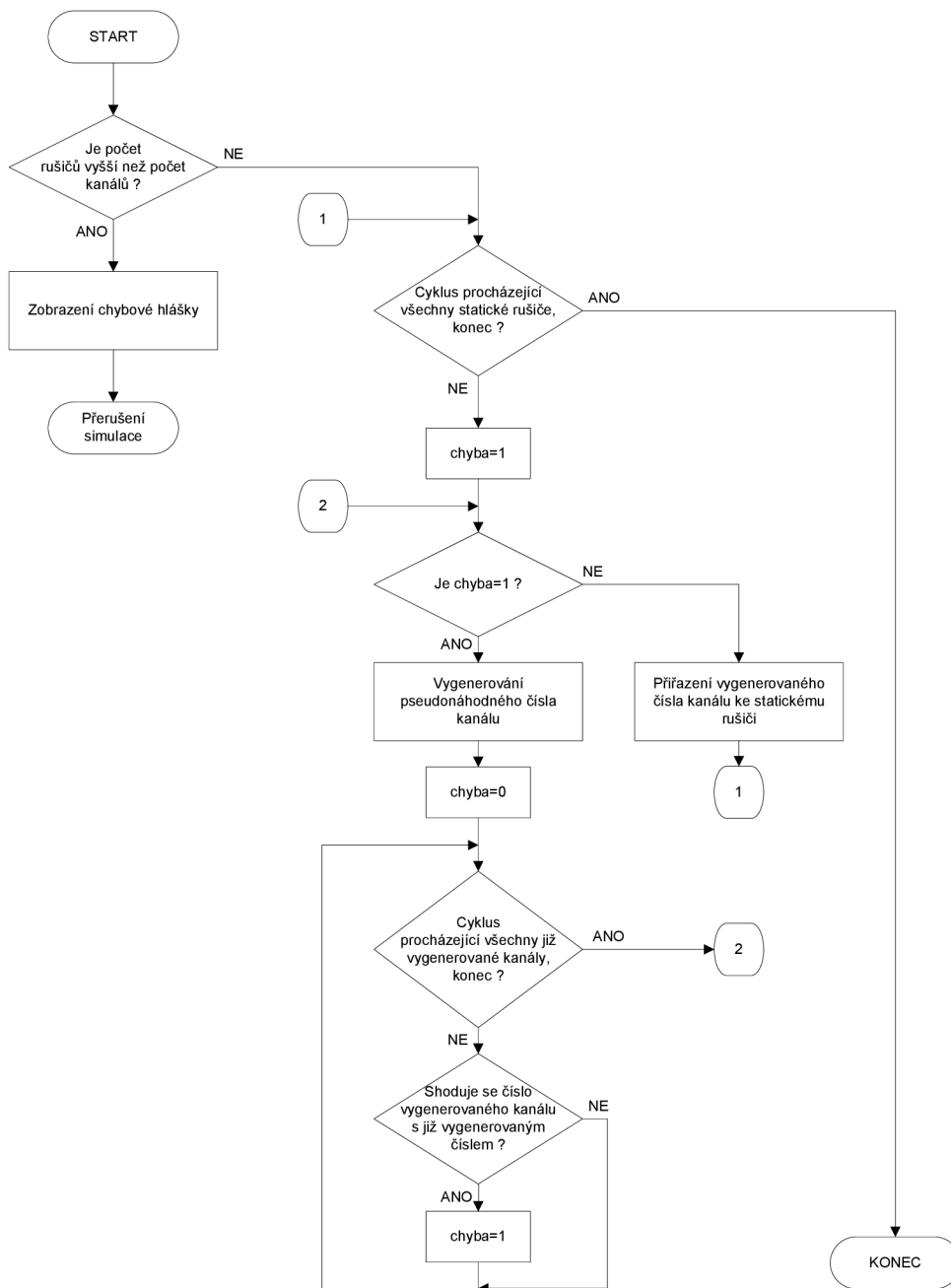
Obr. B.2: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim (2/2).



Obr. B.3: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_param.



Obr. B.4: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_rg_init.



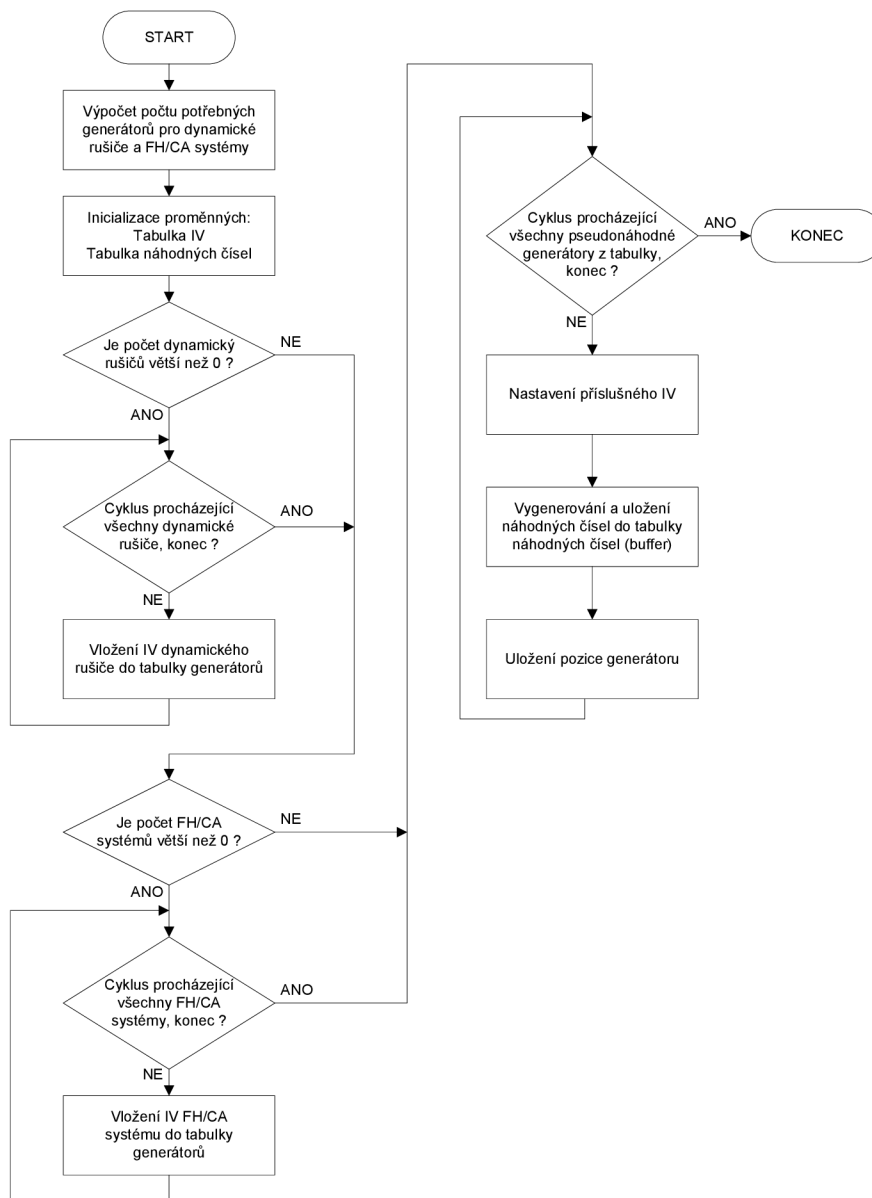
Obr. B.5: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_sj_create.



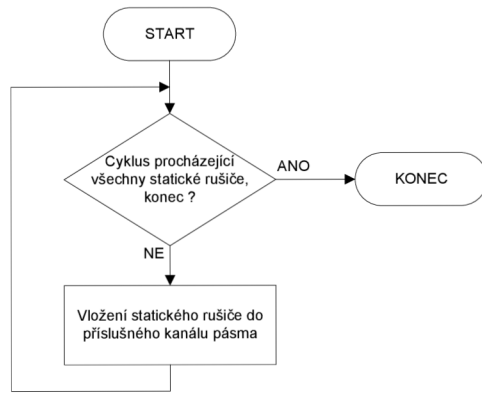
Obr. B.6: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_create.



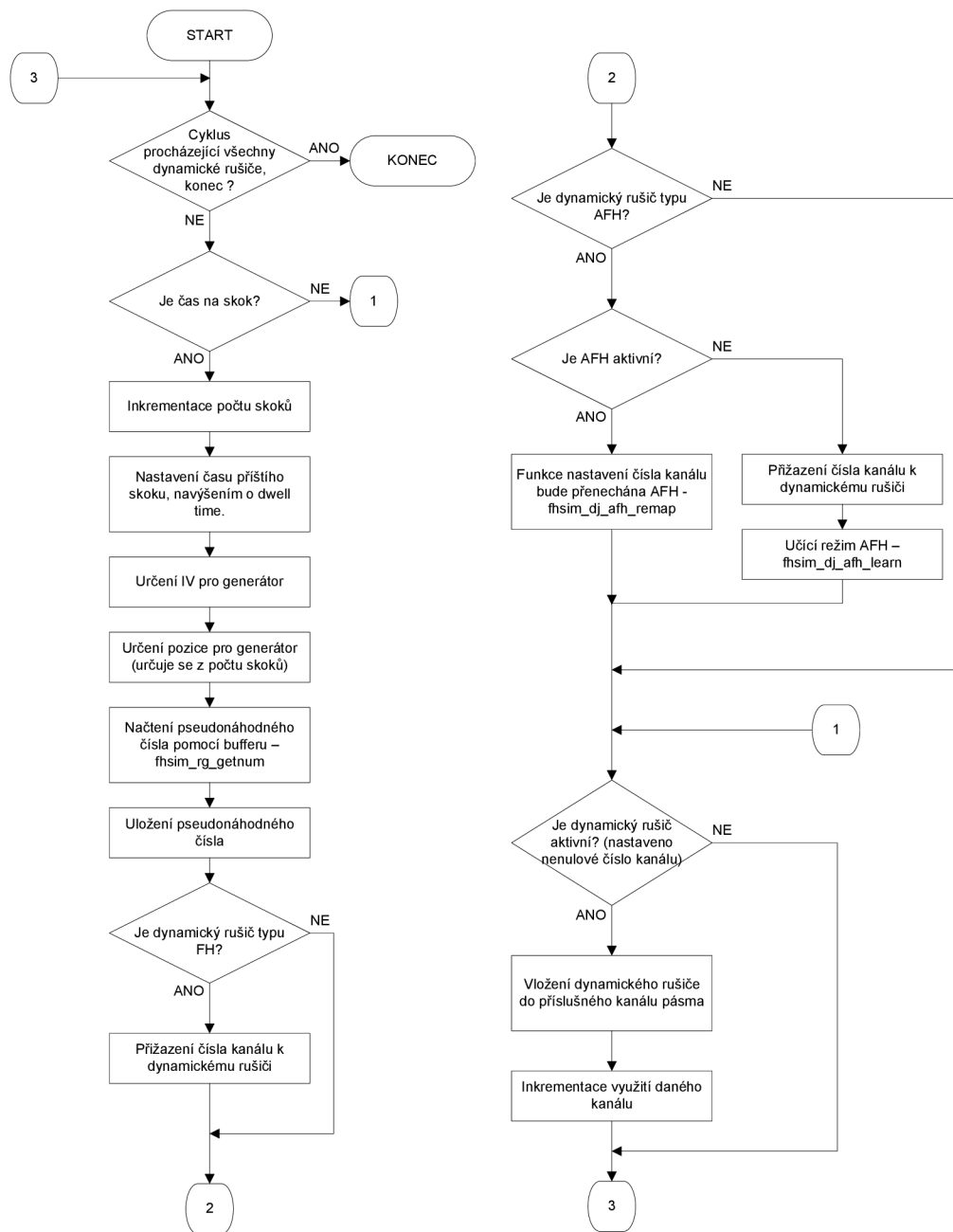
Obr. B.7: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_create.



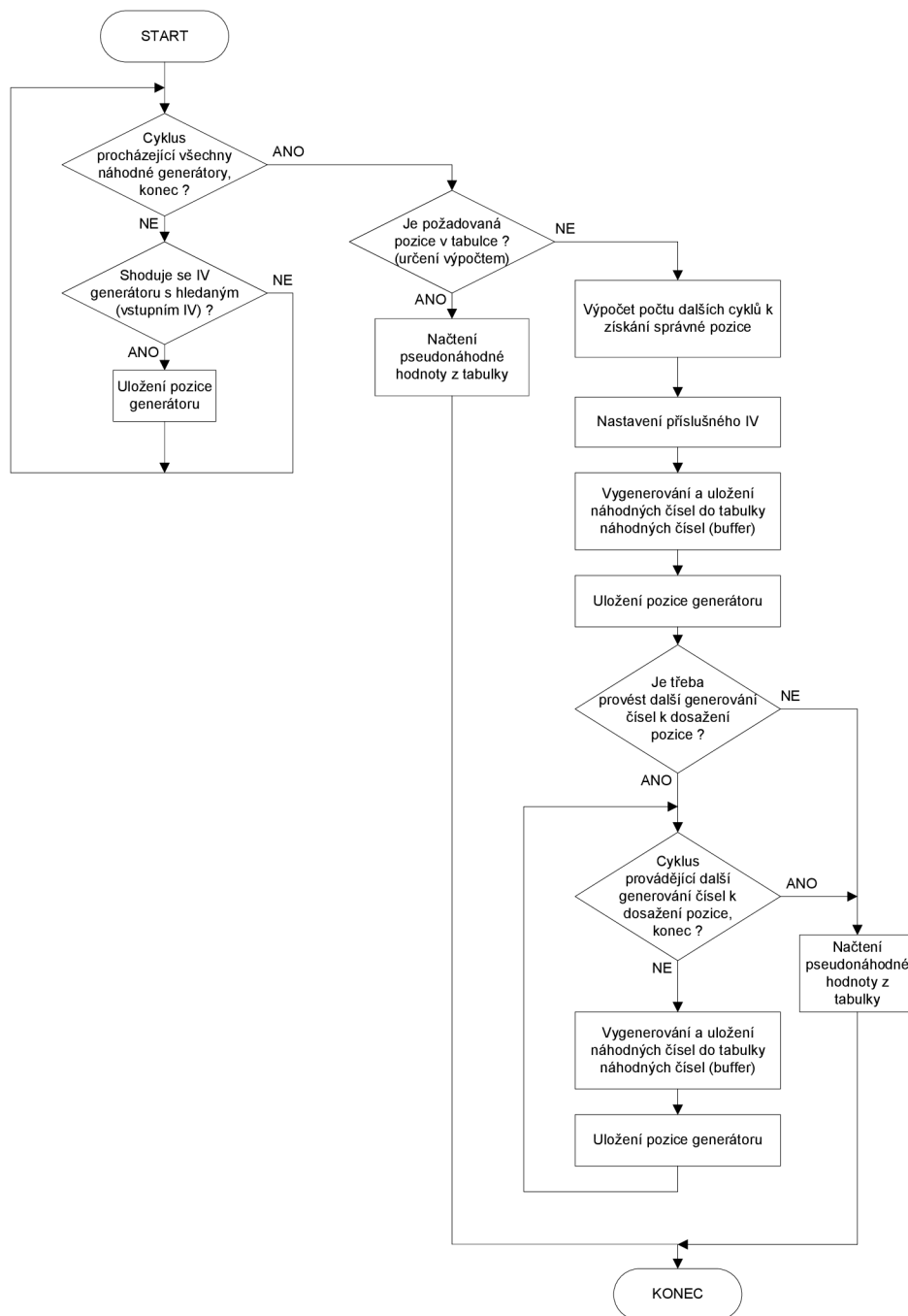
Obr. B.8: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_rg_create.



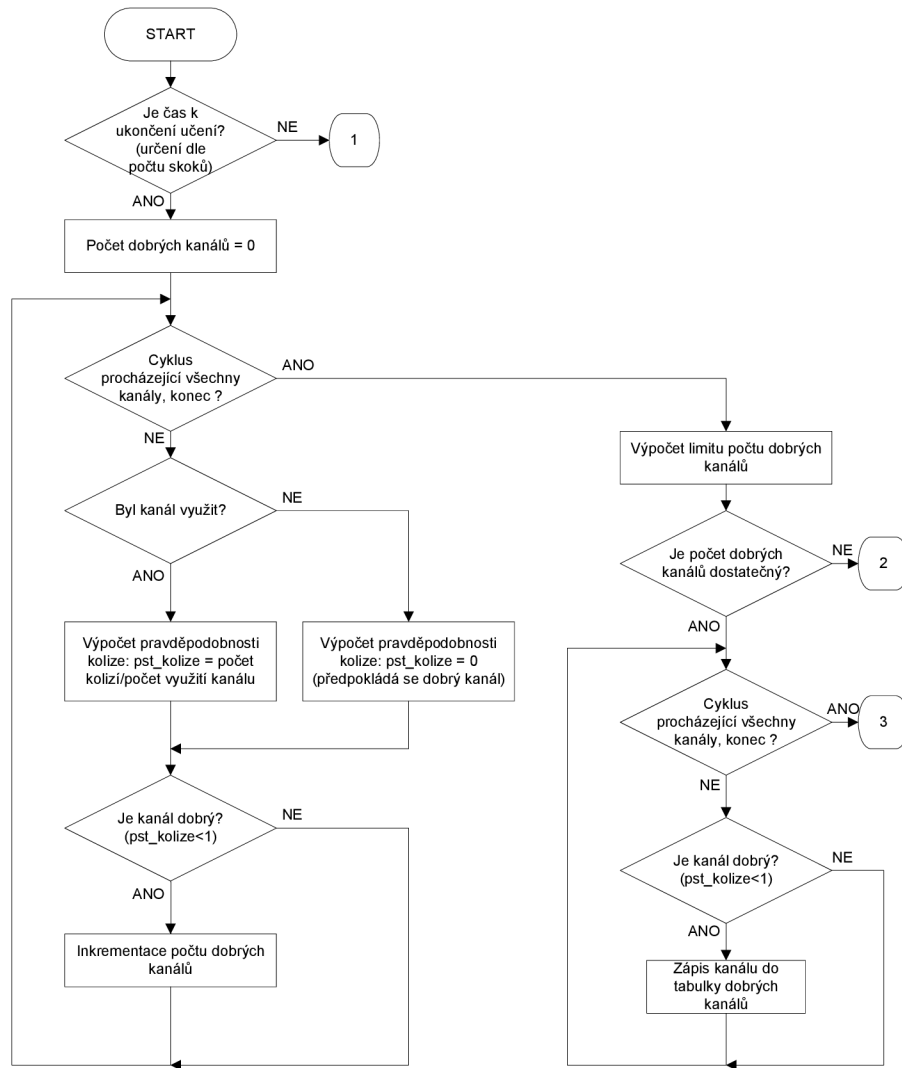
Obr. B.9: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_sj_load.



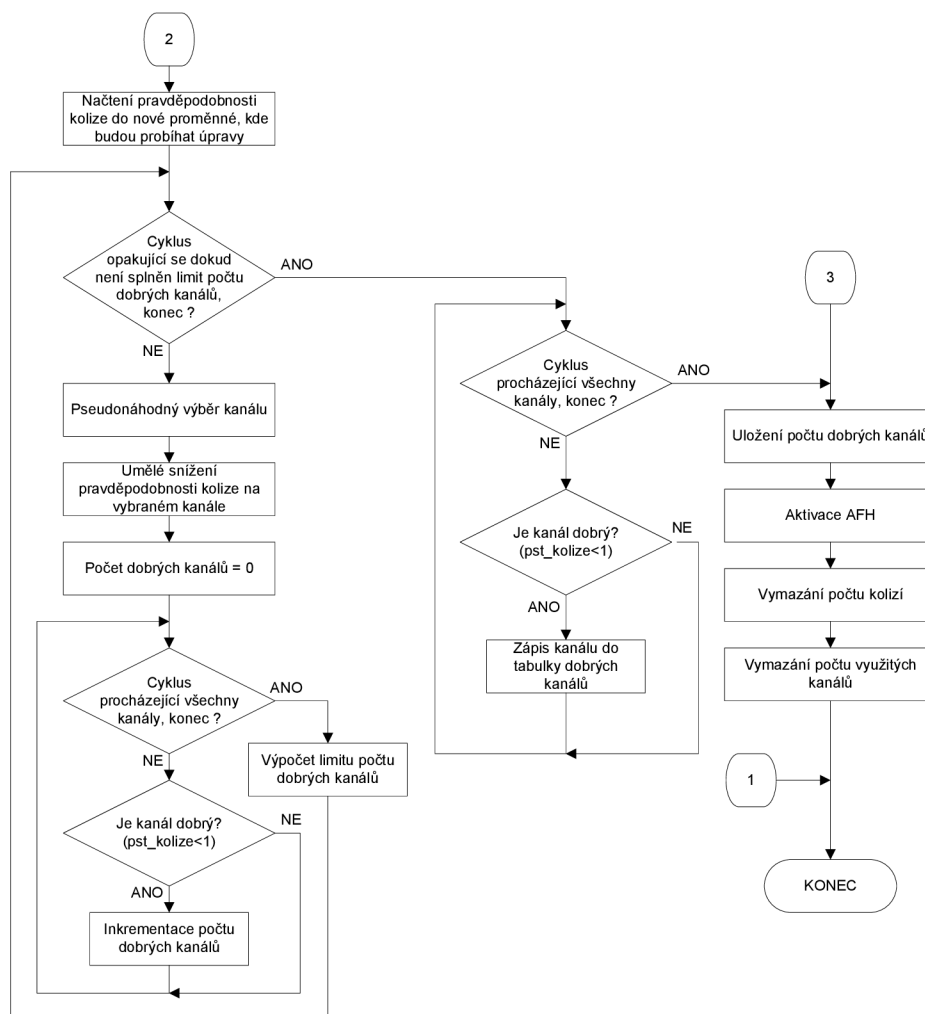
Obr. B.10: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_load.



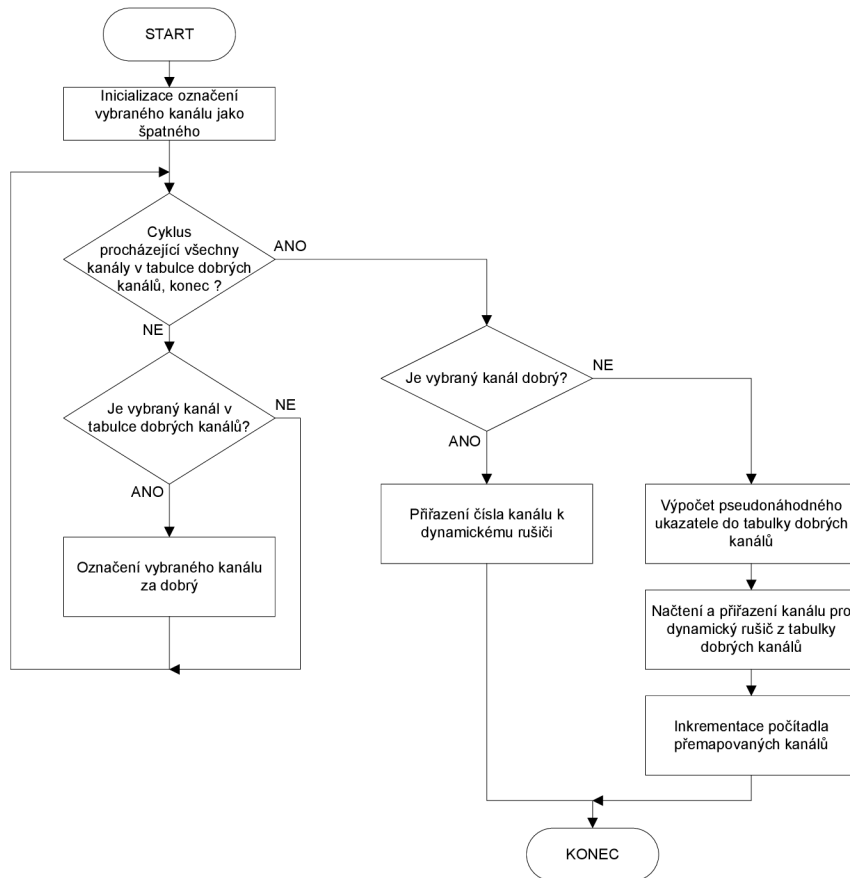
Obr. B.11: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_rg_getnum.



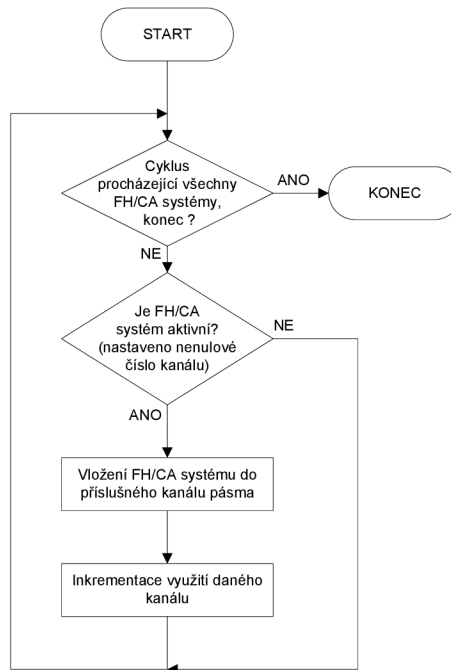
Obr. B.12: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_afh_learn (1/2).



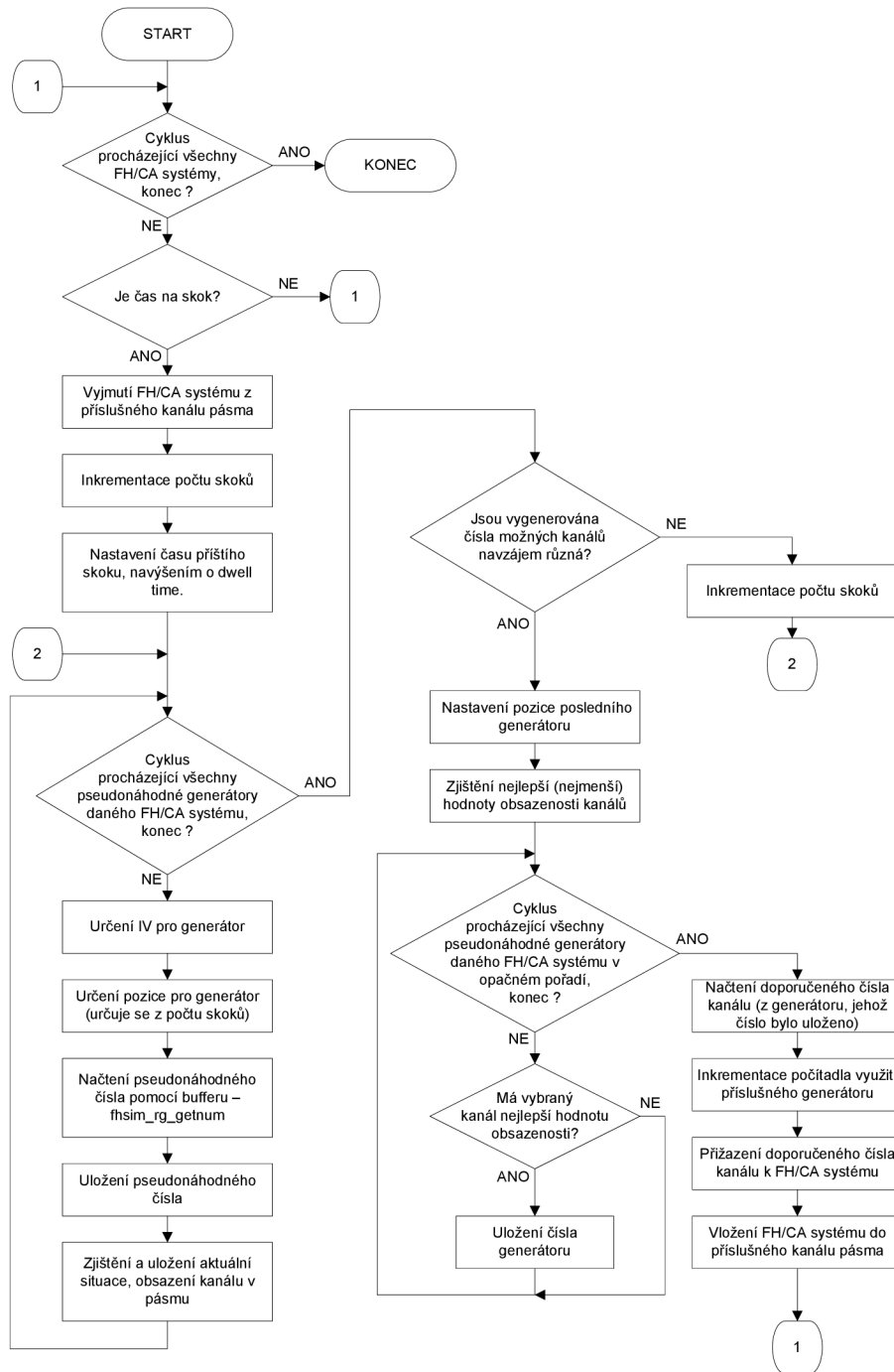
Obr. B.13: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim.dj_afh_learn (2/2).



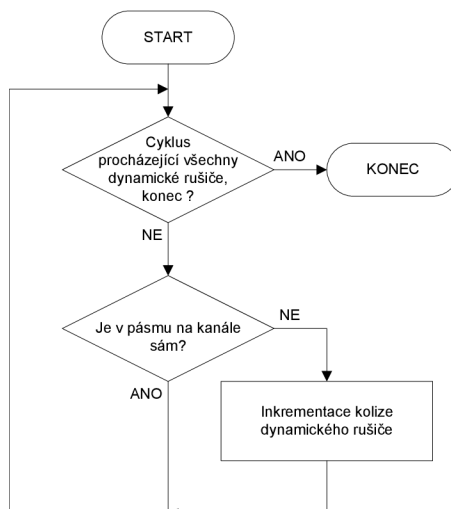
Obr. B.14: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim.dj_afh_remap.



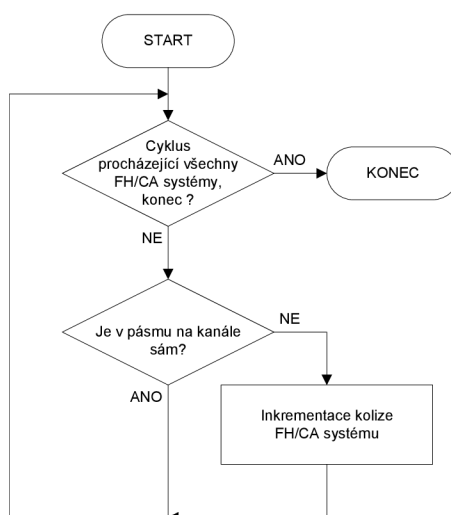
Obr. B.15: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_load_part1.



Obr. B.16: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_load_part2.



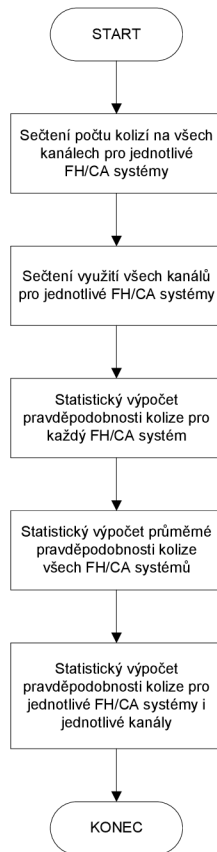
Obr. B.17: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_collision_calc.



Obr. B.18: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_collision_calc.



Obr. B.19: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_dj_collision_calc_afterstim.



Obr. B.20: Vývojový diagram simulátoru, část fhsim_fhca_collision_calc_aftersim.