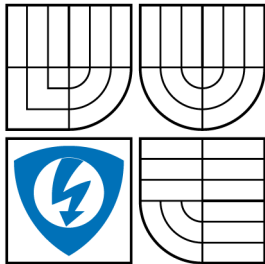


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## SYSTÉMY S TECHNIKOU FREKVENČNÍHO SKÁKÁNÍ SYSTEMS WITH FREQUENCY HOPPING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

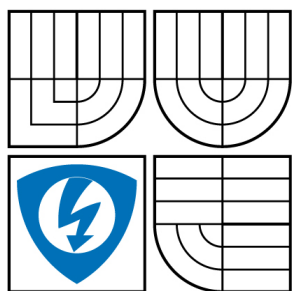
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN JELÍNEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. RADIM PUST

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Teleinformatika

**Student:** Jelínek Martin

**ID:** 78477

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2007/2008

**NÁZEV TÉMATU:**

## Systémy s technikou frekvenčního skákání

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem bakalářské práce je popsat techniku frekvenčního skákání, jaké přináší výhody či nevýhody. Dále vyhledat co největší počet systémů používajících techniku frekvenčního skákání a přehledně uvést jejich základní parametry.

Dále navrhnete techniku adaptivního frekvenčního skákání. Nasimulujte chování takového systému v zarušeném prostředí.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Dobeš, Josef; Žalud, Václav. Moderní radiotechnika. Praha : BEN - technická literatura, 2006 -- 767 s. : ISBN: 80-7300-132-2

[2] Hanus, Stanislav. Bezdrátové a mobilní komunikace. Brno : Vysoké učení technické, 2001 -- 134 s. : ISBN: 80-214-1833-8

**Termín zadání:** 11.2.2008

**Termín odevzdání:** 4.6.2008

**Vedoucí práce:** Ing. Radim Pust

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být 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.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Jelínek  
Bytem: Sládkova 412/2, 46002, Liberec - Liberec II-Nové  
Město  
Narozen/a (datum a místo): 1.12.1985, Prostějov

(dále jen "autor")

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

## Článek 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Systémy s technikou frekvenčního skákání

Vedoucí/školitel VŠKP: Ing. Radim Pust

Ústav: Ústav telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě - počet exemplářů 1
- elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracování díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užívat, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....

Nabyvatel

.....

Autor

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce pojednává o systémech využívajících techniku frekvenčního skákání (Frequency Hopping – FH). Uvedena je stručná historie techniky frekvenčního skákání, její následný vývoj společně s technologií adaptivního frekvenčního skákání (Adaptive Frequency Hopping – AFH). U samotného AFH je popsán obecně princip činnosti, kterým se odlišuje od původní techniky FH. Dále jsou popsány výhody i nevýhody frekvenčního skákání spolu s rozdělením na rychlé (FFH) a pomalé (SFH) skákání.

Popsáno je několik armádních komunikačních systémů (např. SINCGARS, Eritac, MRR, Panther V–EDR a další), ale i komerčních systémů (např. celosvětově rozšířený systém Bluetooth).

Uvedené systémy využívají digitální modulace, v práci jsou znázorněny celkem tři základní digitální modulace (ASK – Amplitude Shift Keying, FSK – Frequency Shift Keying a PSK – Phase Shift Keying).

Dále jsou uvedeny základní typy rozprostření spektra (FHSS, DSSS, OFDM), které se využívají. Podrobněji je popsán typ rozprostření spektra FHSS, jelikož rozprostření signálu je dosaženo technikou frekvenčního skákání. U jednotlivých systémů se také setkáváme se zabezpečením radiového přenosu informace proti chybám, které je často realizováno technikami FEC (Forward Error Correction) a ARQ (Automatic Repeat Query).

Praktická část bakalářské práce, s využitím programového vybavení Matlab, znázorňuje funkci adaptivního frekvenčního skákání (AFH) při komunikaci dvou zařízení Master–Slave v prostředí, kde je v činnosti více systémů představujících pro komunikaci rušení. Tohle rušení je způsobeno statickými i dynamickými rušiči, pracujícími ve stejném pásmu jako zařízení Master–Slave.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Frekvenční skákání, adaptivní frekvenční skákání, digitální modulace, bluetooth, rozprostřené spektrum

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals the systems, which use the Frequency Hopping (FH). The brief history of frequency hopping and its development together with Adaptive Frequency Hopping technology (AFH) is introduced. The general function principle of AFH, which differs AFH from FH, is described. Advantages and disadvantages of frequency hopping and its division into fast (FFH) and slow (SFH) are described next.

Some of military communication systems (e.g. SINCGARS, Eritac, MRR, Panther V-EDR and next) as well as some of commercial systems (e.g. worldwide-spread Bluetooth system) are introduced.

Mentioned systems use digital modulations, three of basic digital modulations are demonstrated (ASK – Amplitude Shift Keying, FSK – Frequency Shift Keying and PSK – Phase Shift Keying).

Basic types of used spectrum spreading (FHSS, DSSS, OFDM) are mentioned next. The FHSS type of spectrum spreading is described in more detail, because the spectrum spreading is done by frequency hopping. Particular systems contain error control of radio transmission of information, which is realized by FEC (Forward Error Correction) and ARQ (Automatic Repeat Query) techniques.

Practical part of the bachelor's thesis demonstrates, with usage of Matlab programme, adaptive frequency hopping function (AFH) during communication of Master-Slave devices, where more systems are active. This causes the interference of the communication. This interference is caused by static and dynamic jammers, that work in the same band as the Master-Slave devices.

## **KEY WORDS**

Frequency hopping, adaptive frequency hopping, digital modulation, bluetooth, spread spectrum

JELÍNEK, M. *Systémy s technikou frekvenčního skákání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2008. 65 s., 15 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Pust.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Systémy s technikou frekvenčního skákání“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a 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.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce za odbornou pomoc a vedení při jejím vypracování. Dále bych rád poděkoval svému bratrovi za poskytnuté konzultace týkající se programování.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Technologie frekvenčního skákání</b>	<b>14</b>
2.1	Frekvenční skákání . . . . .	14
2.2	Adaptivní frekvenční skákání . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Rozprostřené spektrum</b>	<b>16</b>
3.1	Metody rozprostření spektra . . . . .	17
3.1.1	Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) . . . . .	17
3.1.2	Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) . . . . .	17
3.1.3	Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Digitální modulace</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Ochrana přenášených dat radiovým spektrem</b>	<b>23</b>
5.1	FEC (Forward Error Correction) . . . . .	23
5.2	ARQ (Automatic Repeat Query) . . . . .	24
5.3	Hybrid ARQ a FEC . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Systémy využívající technologii FH</b>	<b>25</b>
6.1	Armádní komunikační systémy . . . . .	25
6.2	Veřejné komunikační systémy . . . . .	31
<b>7</b>	<b>Praktická část</b>	<b>37</b>
7.1	Adaptivní frekvenční skákání . . . . .	37
7.1.1	Úvod . . . . .	37
7.1.2	Základní struktura AFH . . . . .	39
7.2	Řešení v matlabu . . . . .	39
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>48</b>
	<b>Literatura</b>	<b>49</b>
	<b>Seznam zkratk</b>	<b>53</b>
<b>A</b>	<b>Příloha</b>	<b>55</b>
A.1	Zdrojový kód programu – <i>Matlab</i> . . . . .	55

# SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Znázornění frekvenčního skákání (FH). . . . .	14
3.1	Blokové schéma vysílače a přijímače s tech. rozp. spektra. . . . .	16
3.2	Příklad multiplexování FHSS [34]. . . . .	18
3.3	Komunikace více zařízení v technologii FHSS [35]. . . . .	19
4.1	Základní rozdělení digitálních modulací. . . . .	20
4.2	Znázornění průběhu FSK.[6] . . . . .	21
4.3	Znázornění průběhu ASK.[6] . . . . .	21
4.4	Znázornění průběhu PSK.[6] . . . . .	22
5.1	Blokové schéma systému s FEC. . . . .	23
5.2	Blokové schéma systému s ARQ. . . . .	24
7.1	Výskyt kolizí (bez AFH). . . . .	38
7.2	Adaptace prostředí využitím mechanismu AFH. . . . .	38
7.3	Bloky systému AFH.[36] . . . . .	39
7.4	Základní blokové schéma řešení programu pro znázornění AFH. . . .	41
7.5	Procentuální výskyt kolizí při komunikaci. . . . .	42
7.6	Schéma adaptace původní skokové sekvence. . . . .	44
7.7	Průběh nadefinované komunikace, využití AFH. . . . .	45
7.8	Grafické prostředí, programu, pro znázornění AFH. . . . .	46

## SEZNAM TABULEK

6.1	Technické parametry MV300/MP300. . . . .	25
6.2	Technické parametry RL424 – version 2. . . . .	27
6.3	Technické parametry ATCS Family of Radio. . . . .	28
6.4	Technické parametry Panther V–EDR (Manpack). . . . .	29
6.5	Technické parametry HF–90. . . . .	30
6.6	Technické parametry DTR2450. . . . .	31
6.7	Technické parametry SATELLINE–1915. . . . .	32
6.8	Rozdělení tříd standardu Bluetooth. . . . .	34
6.9	Technické parametry Bluetooth. . . . .	34
6.10	Shrnutí parametrů výše uvedených armádních systémů. . . . .	36

# 1 ÚVOD

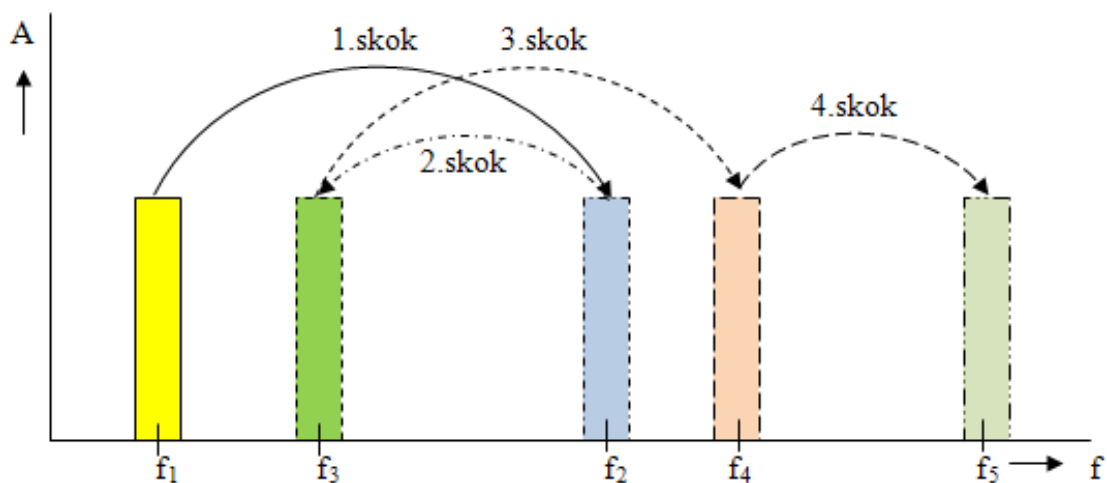
Jedna ze základních myšlenek byla položena již roku 1942 tehdejší hvězdou stříbrného plátva Hedy Lamarr. V průběhu druhé světové války Německo jako první projevilo zájem o řízení námořních torpéd pomocí rádia, ale zároveň se obávali rušení radiového spojení nepřítelem. Hedy Lamarr spolu se svým přítelem G. Antheilem napadlo, jak by šlo zamezit rušení radiového spojení. Nápad spočíval v náhodném měnění frekvence (frekvenční skákání) během vysílání, čímž by nepřítel nedokázal zachytit řídicí radiové signály, a tím zrušit radiové spojení s torpédem. Roku 1942 si nechali tuto techniku patentovat. Do konce války nebyl systém použit, jelikož byl námořnictvem definován jako nepoužitelný. Technologie frekvenčního skákání byla využita např. americkým námořnictvem při námořní blokáde Kuby (Kubánská krize r. 1962) nebo ve válce ve Vietnamu (v letech 1964–1975) při použití bezpilotních pozorovacích letadel, která komunikovala se základnou s využitím frekvenčního skákání. Podrobnějších historických údajů je možno se dočíst v [4], [39].

V dnešní době se technologie frekvenčního skákání využívá v oblasti radiofrekvenčního přenosu dat. Systémy využívající frekvenční skákání se vyznačují vyšší bezpečností přenosu dat a jsou méně náchylné na rušení a odposlech, tudíž se hojně využívají v armádních složkách (letectvo, námořnictvo, pěchota apod.). Frekvenční skákání se využívá v komunikačních systémech. Armádní komunikační systémy (zařízení), které mají implementovanou techniku frekvenčního skákání, jsou vyráběna podle potřeby využití a způsobu nasazení. Mimo armádních systémů je technologie využívána i v komerčních systémech. Pro svou nižší náchylnost na rušivé vlivy a velkou bezpečnost i spolehlivost přenosu dat je využita např. u systému Bluetooth nebo u radiostanic, které se využívají ve velkofiremních podnicích v oblasti obchodu i průmyslu.

## 2 TECHNOLOGIE FREKVENČNÍHO SKÁKÁNÍ

### 2.1 Frekvenční skákání

Frekvenční skákání (*Frequency Hopping FH*) – je to proces u kterého vysílač odvysílá části informace pouze na jediném kanálu a hned po odvysílání přeskočí (změní) kmitočet nosného signálu do jiného kanálu. Aby byla přijímací strana obeznámena s onou změnou nosného kmitočtu a věděla, jak má odeslanou informaci přijmout, musí být proces vysílání i přijímání nějakým způsobem synchronizován. Sesynchronizování vysílací i přijímací strany je provedeno pomocí generátoru pseudonáhodných čísel, kterým je vybaven jak vysílač, tak i přijímač. Synchronizace je provedena tak, že pseudonáhodné generátory ve stejném okamžiku generují stejná náhodná čísla, která určují aktuální kmitočet vysílání (přijímání).



Obr. 2.1: Znázornění frekvenčního skákání (FH).

Obrázek 2.1 znázorňuje, jakým způsobem probíhá změna nosné frekvence použitím techniky FH. Skoky provedené na určité frekvenci nejsou náhodné, nýbrž jsou závislé na generované pseudonáhodné posloupnosti čísel, která určuje nosnou frekvenci, na které bude po určitou dobu probíhat přenos.

Přenos využívající technologii frekvenčního skákání (FH) je vždy úzkopásmový v daném časovém úseku, nicméně v mnohonásobně delším časovém úseku jej lze chápat jako širokopásmový z důvodu mnohonásobné změny nosné frekvence.

### Dva typy frekvenčního skákání:

- Rychlé (*Fast Frequency Hopping – FFH*) – k přeskokům dochází po přenosu jednoho bitu.
- Pomalé (*Slow Frequency Hopping – SFH*) – k přeskoku dojde až po přenesení několika bitů.

Systém využívající metodu frekvenčního skákání:

#### Výhody:

- ✓ zabezpečná komunikace (složitý odposlech).
- ✓ odolnost proti rušení.

#### Nevýhody:

- ✗ závislost na správné činnosti generátorů pseudonáhodných čísel na vysílací i přijímací straně.

## 2.2 Adaptivní frekvenční skákání

Modernější technologie frekvenčního skákání je adaptivní frekvenční skákání, které je označováno zkratkou **AFH**<sup>1</sup> (*Adaptive Frequency Hopping*). AFH nám zlepšuje odolnost proti radio-frekvenční interferenci (rušení). Při průběhu komunikace mezi zařízeními pracujícími s metodou frekvenčního skákání<sup>2</sup>, se objevují nosné frekvence, které mohou být v danou chvíli používány jiným systémem, nebo nějakým způsobem mohou být rušeny. Z tohoto důvodu byla metoda frekvenčního skákání modifikována tak, aby dokázala s co největší možnou efektivností zamezit využití nosných frekvencí ve skokové posloupnosti, které jsou v daném okamžiku rušeny. Systém zjišťuje nevyhovující nosné frekvence a následně je nahrazuje, ve skokové posloupnosti, vyhovujícími nosnými frekvencemi. Zjištění probíhá tak, že pokud je na přijímací straně přijat signál s nedostatečnou (resp. špatnou) kvalitou (např. způsobenou silnou interferencí), tak systém nosnou frekvenci nahradí ve skokové posloupnosti na určitou dobu. Je zřejmé, že nahrazená nosná frekvence je využívána jiným systémem, nebo je rušena jen po určitou dobu, a proto systém AFH po určitém časovém intervalu opět zkusí nahrazenou frekvenci, zda už je vyhovující pro přenos.

---

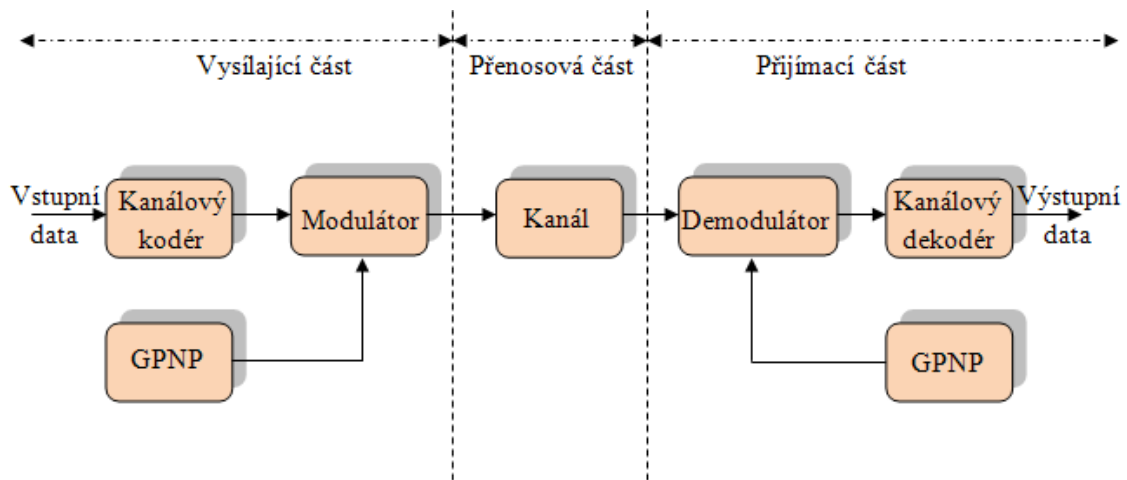
<sup>1</sup>Podrobněji je technologie rozebrána a popsána v sekci 7.1.

<sup>2</sup>Metoda FH je podmíněna vygenerované pseudonáhodné posloupnosti čísel, které určují následné skoky na nosné frekvence.

### 3 ROZPROSTŘENÉ SPEKTRUM

Rozprostřené spektrum (*Spread Spectrum*) – je jedna z možných metod používající se k eliminaci vlivu úzkopásmového rušení [30]. Rozprostření spektra můžeme realizovat např. použitím metod DSSS, OFDM, FHSS, které nám cíleně vytváří z úzkopásmového signálu určitým způsobem širokopásmový. Doplnující informace [7], [5], [34].

Blokové schéma vysílače a přijímače s technologií rozprostřeného spektra:



Obr. 3.1: Blokové schéma vysílače a přijímače s technologií rozprostřeného spektra [34].

- ⇒ *Kanálový kodér* – vstupní data vstupují do kanálového kodéru, kde se generuje analogový signál s úzkou šířkou pásma.
- ⇒ *Modulátor* – zde se analogový signál s úzkou šířkou pásma moduluje pomocí pseudonáhodné posloupnosti číslic generované v GNP. Využitím modulace FH se zvětší šířka pásma vysílaného signálu (modulace – skákání frekvencí).
- ⇒ *GNP* – generátor pseudonáhodné posloupnosti číslic.
- ⇒ *Kanál* – zde probíhá přenos modulovaného signálu.
- ⇒ *Demodulátor* – zde se přijatý modulovaný signál opět demoduluje pomocí posloupnosti číslic generovaných GNP na přijímací straně, který je synchronizován tak, aby generoval přesně stejnou posloupnost číslic jako generátor na vysílající straně.

⇒ *Kanálový dekodér* – zde se obnoví původní vyslaná data z demodulovaného signálu.

⇒ *Náhodná posloupnost čísel* – posloupnost čísel generovaná v bloku GPNP.

## 3.1 Metody rozprostření spektra

### 3.1.1 Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

V české literatuře se vžil název pro danou metodu jako přímá modulace kódovou posloupností. Tato metoda DSSS pracuje tak, že nahradí každý bit určený k přenosu určitou početnější sekvencí bitů (tzv. *chipů*). Tyto nahrazující sekvence jsou nejčastěji pseudonáhodné. Pro jejich vytvoření se využívá např. Barkerových nebo Goldových kódů (jedná se o umělé zavedení nadbytečnosti do přenosu). Vzniklá nahrazující sekvence bitů je pak modulována na nosnou frekvenci. Výsledkem je, že signál je rozprostřen do větší části radiového spektra, je méně náchylný na rušení, z čehož je odvozena větší spolehlivost přenosu. Takto přenášený signál se jeví v přenosovém prostředí jako náhodný šum a pro správné zrekonstruování původního signálu je zapotřebí na přijímací straně znát mechanismus vytváření původní pseudonáhodné sekvence [34], [37], [40]. Princip činnosti je podrobněji vysvětlen v [7].

Tímto způsobem vzniklá modulační technika se využívá např. ve vojenské komunikaci, v bezdrátové technologii Wi-fi nebo u navigačního systému GPS.

### 3.1.2 Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)

V české literatuře se vžil název pro danou metodu jako ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením. Tato metoda OFDM pracuje tak, že potřebný signál je vyslán na větším počtu nezávislých nosných kmitočtů, čímž se dosahuje větší odolnosti proti rušení. Počty těchto nezávislých nosných kmitočtů můžou být stovky až tisíce. Nosné kmitočty jsou dále modulovány dle potřeby různými modulacemi QPSK, 16QAM nebo 64QAM. Jednotlivé nosné kmitočty jsou vzájemně ortogonální, to znamená, že se překrývá maximum každého nosného kmitočtu s minimi ostatních kmitočtů. Datový tok celého kanálu se tímto způsobem rozdělí na stovky dílčích datových toků jednotlivých nosných kmitočtů. Výsledné datové toky na jednotlivých nosných kmitočtech jsou poměrně malé, tudíž je možné vkládat určitý ochranný interval (*Guard Interval* – GI). To je čas, kdy se nevysílá žádná nová informace. Na přijímací straně lze takto nerušeně přijmout v daný okamžik vysílaný symbol, i když se šíří k přijímači více cestami s různým zpožděním. Více informací k nalezení v [7], [40].

Takhle realizovaná modulační technika se využívá např. u nově zavedených variant pozemního televizního a rozhlasového vysílání. Pro televizní vysílání tomu

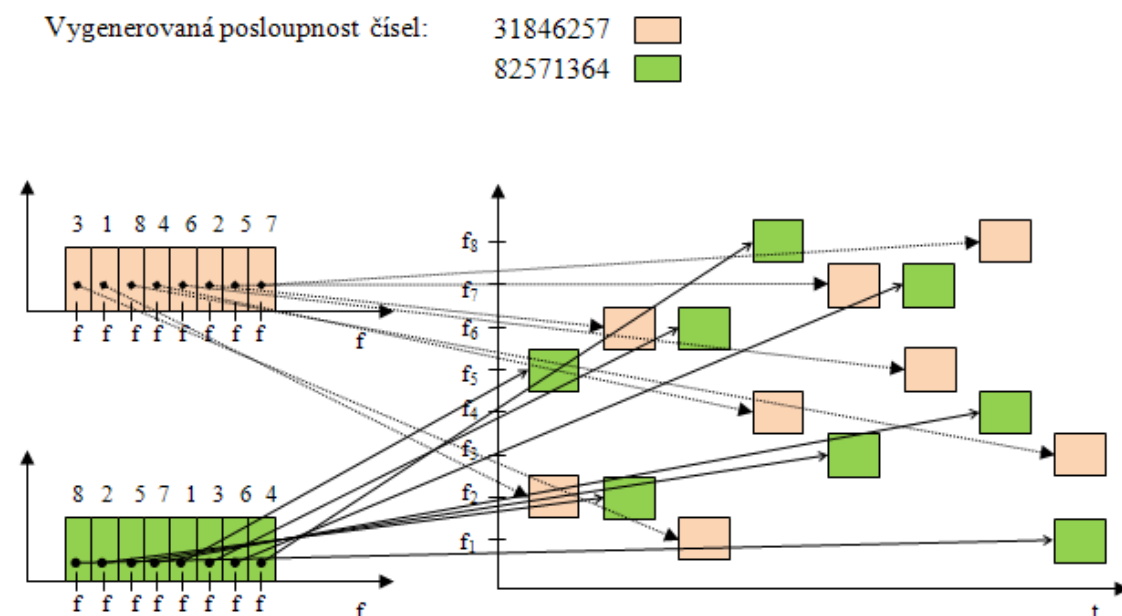
odpovídá DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*) a T-DAB (*Digital Audio Broadcasting Terrestrial*), pro rozhlasové vysílání potom DRM (*Digital Radio Mondiale*). Dále je využit pro přenos signálu u ADSL [20].

### 3.1.3 Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

Potřebného rozprostření spektra je dosaženo frekvenčním skákáním (*Frequency Hopping*) nosné [12], [19]. Frekvence nosné je v čase proměnná. Používané frekvenční skoky jsou určeny rozprostíracím kódem (kódovou sekvencí) generovaným generátorem pseudonáhodné posloupnosti (GPNP). K přenosu je využito až několik stovek různých frekvencí. Šířka pásma signálu na jednotlivých nosných frekvencích je úzká, ale spektrum výsledného FHSS signálu je široké.

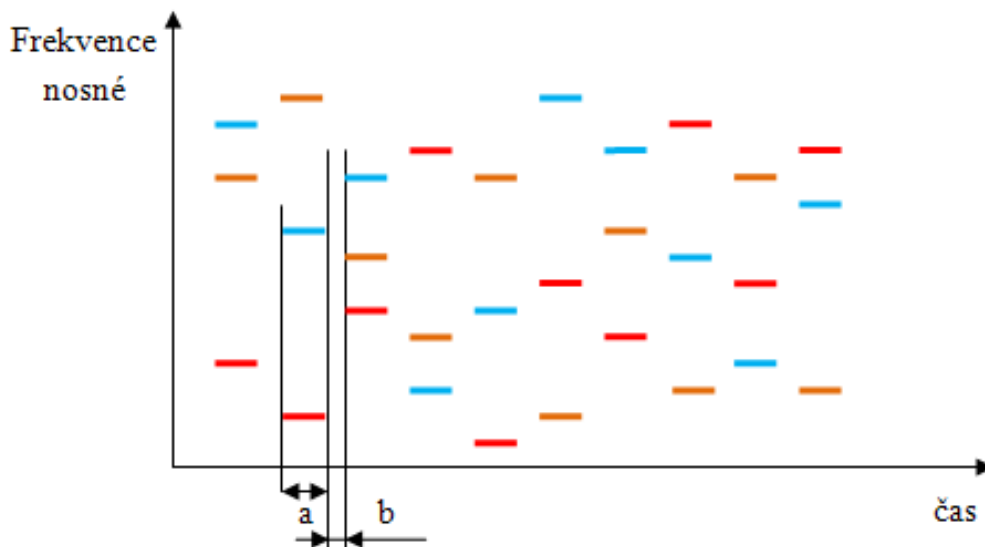
Mezi radio-frekvenčními kanály se skáče po pevných časových intervalech, tudíž musí vysílač s přijímačem pracovat synchronně [38]. Šířka pásma jednotlivých kanálu je stejná jako šířka pásma vstupního signálu [34].

Příklad multiplexování podle náhodné posloupnosti čísel generovaných GPNP:



Obr. 3.2: Příklad multiplexování FHSS [34].

Vlastní přenos informace technologií FHSS je závislý na pseudonáhodné změně nosné frekvence během vysílání.



Obr. 3.3: Komunikace více zařízení v technologii FHSS [35].

**a** = je potřebná doba k přenosu informace na jednom nosném kmitočtu (anglický název „**dwell time**“).

**b** = je potřebná doba k přeladění na další hodnotu nosného kmitočtu (anglický název „**hop time**“).

Obrázek 3.3 nám znázorňuje současnou komunikaci tří zařízení, které jsou zobrazeny různými barvami. Celkem je zobrazeno deset nosných kmitočtů pro každé zařízení.

Pro správnou činnost komunikace mezi vysílačem a přijímačem musí být dodržena synchronizace tzn., že vysílač i přijímač musí využívat stejnou pseudonáhodnou posloupnost určující nosný kmitočet. Dalšími důležitými vlastnostmi, co musí být dodrženy, jsou správné časové intervaly přenosu a doby přechodu z jedné nosné frekvence na druhou [35].

- ❖ Charakteristická hodnota doby přenosy na jedné nosné frekvenci (dwell time) je  $100 \div 200$  ms.
- ❖ Charakteristická hodnota potřebného časového intervalu na přeladění z jedné nosné frekvence na další (hop time) je  $200 \div 300$   $\mu$ s.

Technologie FHSS umožňuje, aby současně komunikovalo více zařízení, a to bez vzájemného rušení. Technologie (FHSS) je také standardizována v bezlicenčním přenosovém pásmu ( $2,4$  GHz  $\div$   $2,4835$  GHz).

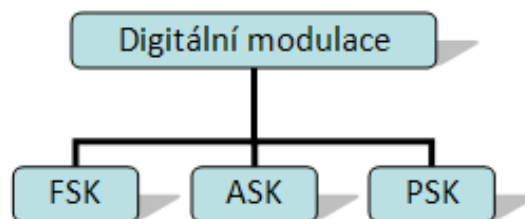
## 4 DIGITÁLNÍ MODULACE

Pojmem „modulace“ rozumíme proces, který působí na některý parametr nosného signálu se závislostí na okamžité hodnotě modulačního signálu.

U radiokomunikačních systémů se jako nosný signál využívá harmonický signál složený ze tří základních parametrů (kmitočet –  $f$ , amplituda –  $A$  a počáteční fáze –  $\varphi$ ).

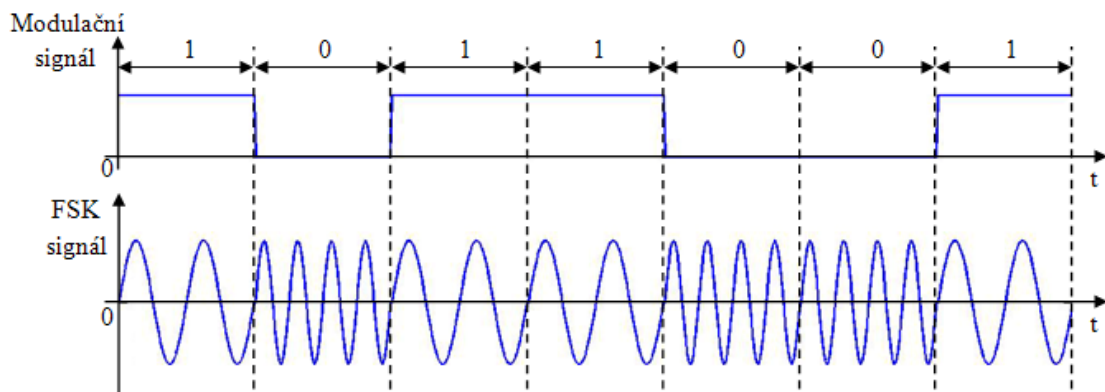
Pokud vezmeme v úvahu digitální systém, tak jako modulační signál je zde využit digitální signál, jehož hodnota může nabývat pouze dvou stavů, a to buď „log 1“ nebo „log 0“. Z uvedených hodnot (stavů) je patrné, že u digitálního modulačního signálu se mění parametry nosné vlny skokovým průběhem. Popsaný proces modulace se nazývá *digitální modulace* [11].

### Tři základní typy digitálních modulací:



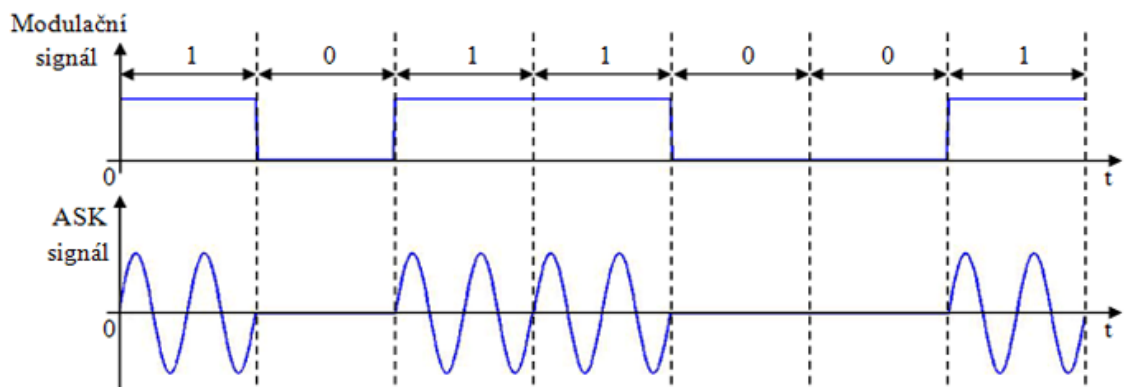
Obr. 4.1: Základní rozdělení digitálních modulací.

- Frequency Shift Keying (**FSK**)
  - Amplitude Shift Keying (**ASK**)
  - Phase Shift Keying (**PSK**)
- Frequency Shift Keying (**FSK**):
- je to modulace s klíčováním kmitočtu (tj. klíčování kmitočtovým posuvem, zdvihem) viz 4.2.



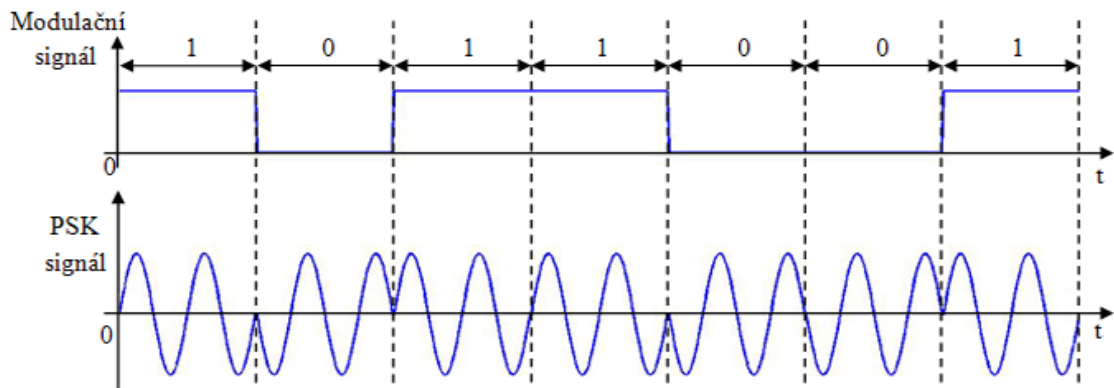
Obr. 4.2: Znázornění průběhu FSK.[6]

- Amplitude Shift Keying (**ASK**):
  - je to modulace s klíčováním amplitudy (tj. klíčování amplitudovým posuvem, zdvihem) viz 4.3.



Obr. 4.3: Znázornění průběhu ASK.[6]

- Phase Shift Keying (**PSK**):
  - je to modulace s klíčováním fáze (tj. klíčování fázovým posuvem, zdvihem) viz 4.4.



Obr. 4.4: Znázornění průběhu PSK.[6]

Výše uvedené a zobrazené digitální modulace jsou v základním provedení dvoustavové. V dnešní době se využívají vícestavové digitální modulace [7], [11] např. 2PSK, 4PSK, 8PSK atd.

## 5 OCHRANA PŘENÁŠENÝCH DAT RADIOVÝM SPEKTRUM

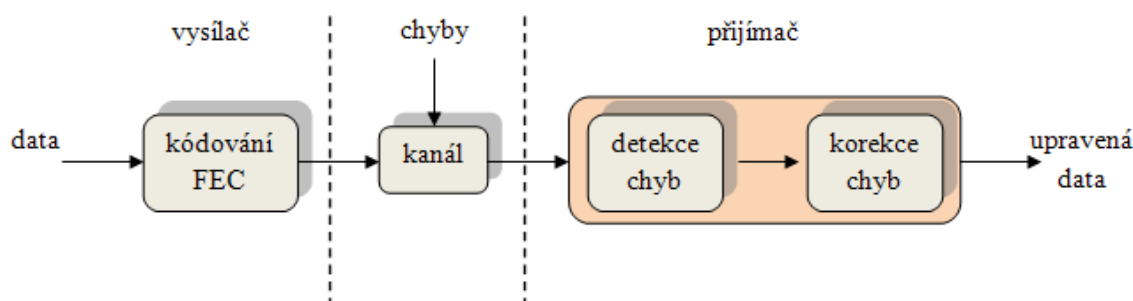
Při přenosu dat radiovým prostředím působí na přenášený signál spousta jevů, které mají charakter rušení pro uskutečňující se přenos tzn. způsobují chyby v přenášeném signálu. Pro zajištění opravy vzniklých chyb při přenosu se využívají následující metody: [7]

- Dopředná korekce chyb **FEC** (*Forward Error Correction*).
- Automatické opakování **ARQ** (*Automatic Repeat Query*).
- Hybridní metody využívající některých principů FEC a ARQ (Hybrid ARQ).

### 5.1 FEC (Forward Error Correction)

Metoda FEC zabezpečuje přenos využitím ochranných paritních bitů, které přidává kódér k datovým bitům. Přidáváním paritních bitů k datovým bitům se u přenášeného signálu zvyšuje nadbytečnost (*redundance*), která potom umožňuje zjištění chyb případně opravu chyb na přijímací straně. Narozdíl od metody ARQ metoda FEC nevyžaduje obousměrný přenos (kanál ve směru přijímač – vysílač). Kódy FEC se označují jako *samoopravné kódy*.

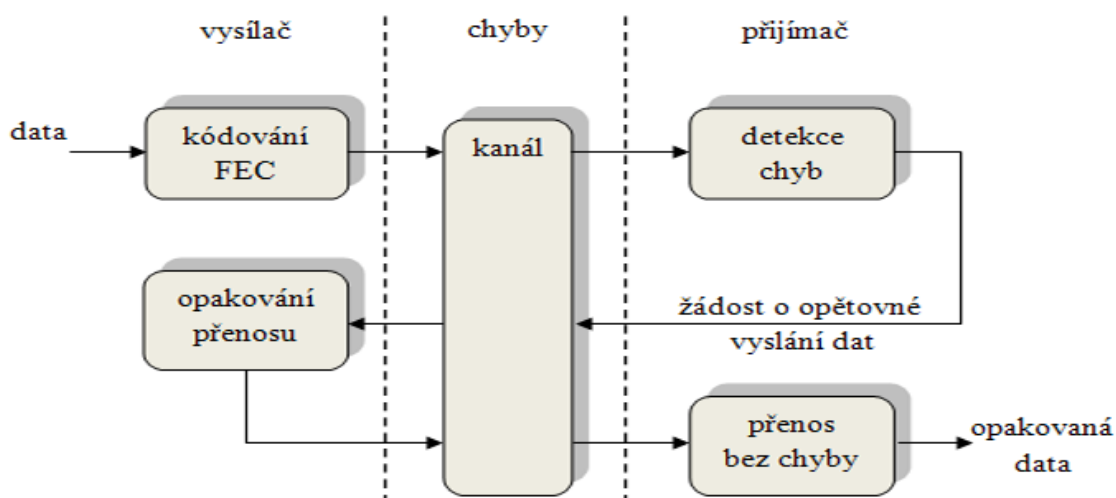
- a) detekční kódy – dokáží pouze zjistit chybný bit nebo vícebitovou kódovou skupinu.
- b) korekční kódy – (opravné kódy) zajišťují, jak detekci chybných bitů, tak jejich částečnou případně úplnou opravu.



Obr. 5.1: Blokové schéma systému s FEC.

## 5.2 ARQ (Automatic Repeat Query)

Využitím metody ARQ se zvyšuje spolehlivost přenosu dat. A to takovým způsobem, že se automaticky opakuje přenos chybných úseků vzniklých při přenosu dat. Základní představa je taková, že přijímač je schopen detekovat vzniklou chybu a v případě, že chybu v přijímání detekuje, tak automaticky vyšle požadavek (žádost) vysílači o znovu vyslání chybně přijaté informace. Ze základní představy lze odvodit, že probíhající přenos (vysílač – přijímač) musí být obousměrný, neboť vysílač vysílá data k přijímači a přijímač při detekci chyby vysílá opět žádost směrem k vysílači o opakování přenosu.



Obr. 5.2: Blokové schéma systému s ARQ.

## 5.3 Hybrid ARQ a FEC

Tato metoda vzniká spojením principů předchozích metod (FEC i ARQ). Hybridní metoda má k dispozici zpětný kanál pro zajištění ARQ a současně využívá i vhodné detekční a korekční kódy FEC.

Hybridní metody nachází uplatnění tehdy, kdy jsou aplikace využívající, buď FEC nebo ARQ, na potřebné snížení chybovosti nedostatečné. Je možné, aby systém, využívající hybridní metody, pracoval bez využití ARQ, ale jen v takovém případě, kdy je užitím vhodného zabezpečovacího kódu zajištěna potřebná korekce chyb FEC. V případě, že se ale chybovost během přenosu zvýší nad možnosti FEC, tak se použije zpětný kanál a vysílač opakuje vysílání chybně přijatých dat. [7]

## 6 SYSTÉMY VYUŽÍVAJÍCÍ TECHNOLOGII FREKVENČNÍHO SKÁKÁNÍ

### 6.1 Armádní komunikační systémy

#### ▣ *MRR*

**MRR** (*Multi Role Radio*) – zařízení MRR je víceúčelový armádní radiokomunikační systém určený pro použití v terénu. Může být součástí komunikačního systému EriTac. Systém byl vyvinut s cílem spolehlivého a hlavně bezpečného přenosu strategických dat a hlasu, stejně tak i pro podporu spolupráce mezi moderními radarovými a zbraňovými systémy. Systém je plně digitálního charakteru. S využitím technologie frekvenčního skákání má systém přednosti, jakými jsou spolehlivost, bezpečnost a odolnost proti odposlechu či rušení. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 6.1.

Typ zařízení: **MV300 / MP300**

Tab. 6.1: Technické parametry MV300/MP300.

Technické parametry		Poznámka
Frekvenční rozsah	30 ÷ 87,975 MHz	VHF
Šířka pásma (celého systému)	57,975 MHz	–
Šířka pásma	45 kHz	–
Odstup kanálů	25 kHz	–
Počet využitelných kanálů	2320	–
Vysílací výkon	10 mW, 0,5 W, 5 W, 50 W	–
Rychlost přenosu dat	0,3 ÷ 16 kb/s	–
Rychlost přenosu hlasu	16 kb/s , 2,4 kb/s	CVSD, MELP
Rychlost skoků	–	–
Pracovní dosah	–	–
Modulace	GMSK	–
EPM módy	FH	–
Zabezpečení proti chybám	FEC	–

- Využívá inteligentní automatickou volbu potřebného vysílacího výkonu tzn. zvolí automaticky vždy minimální potřebný výkon pro vysílání.
- Ochrana proti rušení: automatická změna trasy při rušení nebo při vyřazení článku trasy.

- První operativní nasazení MRR bylo v polovině roku 1995.
- MRR bylo vyvinuto firmou *Kongsberg Defence Communications* a doručeno na kontrakt norským vojenským silám. Radiový set byl využíván speciálními silami a upřednostňován jednotkami jako je *Telemark battalion* (TMBN) [9].
- TMBN je motorizovaná jednotka norské armády, která byla založena v roce 1993 [43].

### ► **EriTac**

**EriTac** – komunikační systém od firmy Ericsson. Jedná se o komunikační systém pro přenos hlasu i dat určený do bojových podmínek. Mezi základní vlastnosti systému patří vysoká odolnost proti rušení a odposlechu. Charakteristickým rysem je otevřená architektura, která umožňuje přizpůsobení dle vlastních potřeb uživatele. Používá se jako součást obranných systémů, u kterých zajišťuje spolehlivý přenos dat mezi radarovými systémy pro odhalení útočící zbraně a obrannými systémy pro její účinnou likvidaci. Plně vybavený systém EriTac obsahuje velké množství vzájemně spolupracujících podsystémů, které se zařazují do celkové komunikační sítě v závislosti na charakteru použití. Zahrnut bývá MRR, polní radioreleové spoje řady RL400, šifrátoři, satelitní komunikační síť, síť pro bezšňůrové a mobilní telefony, připojení na veřejnou či pobočkovou ústřednu, počítačová síť LAN apod. Využitím zahrnutých prvků jsou propojeny radiostanice, počítače, videosystémy, radary, velitelská centra a digitálně řízené zbraňové systémy. Takto sestavená komunikační síť slouží ke spolehlivé a hlavně bezpečné komunikaci mezi veliteli, pěchotou, piloty a dispečery vzdušných sil, počítači, řízenými zbraňovými systémy atd.

Jako příklad součásti komunikačního systému EriTac uvádím radioreleový spoj RL424.

**RL424** radioreleový spoj určený k propojení CPX200 modulů v síti, kde je velmi dobrá ochrana proti rušení a odposlechu. Využívá technologie adaptivního frekvenčního skákání (AFH) a adaptivní řízení vysílacího výkonu, která nám automaticky volí minimální potřebný výkon k vysílání. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 6.2.

**CPX200** je víceúčelový digitální přepojovací a přístupový modul. Využívá se pro datové aplikace včetně multimediálního přenosu obrazu a zvuku v komunikačních sítích, na velitelských stanovištích, v systémech proti-vzdušné obrany.

Typ zařízení: **RL424 – verze 2**

Tab. 6.2: Technické parametry RL424 – version 2.

Technické parametry		Poznámka
Frekvenční rozsah	610 ÷ 960 MHz	UHF
Šířka pásma (celého systému)	350 MHz	–
Šířka pásma	–	–
Odstup kanálů	125 kHz	–
Počet využitelných kanálů	2800	–
Vysílací výkon	0,05 ÷ 10 W	automatický mód
Rychlost přenosu dat	512, 1024, 2048, 8448 kb/s	FEC
Rychlost přenosu hlasu	16 kb/s	ADPCM
Rychlost skoků	–	–
Pracovní dosah	–	–
Modulace	–	–
EPM módy	AFH	–
Zabezpečení proti chybám	FEC	–

### ▣ **SINGARS**

**SINGARS** (*SIN*gle Channel Ground and Airborne Radio System): – spadá do kategorie **CNR** (*Com*bat Net Radio) a je v současné době používána americkou armádou a spojeneckými silami. Rádía jsou navržena tak, aby splňovala požadavky na spolehlivost, bezpečnost dále lehkou údržbu společně s méně složitým ovládáním pro přenos hlasu i dat. Provedení rádií jsou dostupná s modifikacemi pro umístění do všech oblastí armádních jednotek (např. vozidel, letadel, batohové i ruční provedení pro pozemní jednotky). Technické parametry jsou uvedeny v tab. 6.3.

## SINGARS – ATCS *Family of Radio*

Tab. 6.3: Technické parametry ATCS Family of Radio.

Technické parametry		Poznámka
Frekvenční rozsah	30 ÷ 87,975 MHz	VHF
Šířka pásma (celého systému)	57,975 MHz	–
Šířka pásma	–	–
Odstup kanálů	25 kHz	–
Počet využitelných kanálů	2320	–
Vysílací výkon	až 4,5 W	v závislosti na typu
Rychlost přenosu dat	od 75 b/s až do 16 kb/s	–
Rychlost přenosu hlasu	–	–
Rychlost skoků	100 skoků/s	–
Pracovní dosah	0,2 ÷ 10 km	v závislosti na výkonu
Modulace	FSK	–
EPM módy	FH	využito SFH
Zabezpečení proti chybám	FEC	–

- S použitím výkonového zesilovače je možno dosáhnout rozsahu od 10 do 40 km.
- Využití SFH pro ECM v boji proti moderním rušičkám, také poskytuje anti-rušící technologii proti technologicky pokročilým protivníkům.
- Americká armáda započala vývoj SINGARS koncem roku 1974. Roku 1983 vyhrála firma ITT kontrakt na jejich produkci [24].

### ➡ **JASORS**

**JASORS** (*Joint Advanced Special Operations Radio System*) je pokročilejší technologie, která postupem času má nahradit stávající technologii Sincgars. Již v dnešní době je využívána americkými jednotkami pro speciální operace, stejně tak je využívána bezpečnostními agenturami, jako je CIA, NSA a DIA [22].

JASORS:

- Dosah kolem 24 km.
- Využívá technologie frekvenčního skákání FH.
- Další připojitelné zařízení např. klávesnice, videokamera, počítač a množství zesilovačů.

- Součástí je modem s rychlostí 24 kb/s, transpondér a směrová anténa umožňující vysílání a příjem ve tvaru směrové charakteristiky 60° kuželu.

### ► **Jaguar V**

Jako prvním rádiem na světě (pro pásmo VHF), využívající technologie frekvenčního skákání určené pro armádní využití, se stal **Jaguar V**. Za vývojem a následnou produkcí do celého světa stála společnost RACAL group.

### ► **Panther V-EDR**

**Panther V-EDR** (*Enhanced Data Radio*).

Patří do nové generace armádních radií využívající technologii FH. Řadí se do špičky mezi ostatními komunikačními systémy. Komunikační zařízení Panther V-EDR patří do armádních systémů vyráběné v konstrukci pro pěchotní nasazení nebo mobilní pro montáž do vozidel. Konstrukce pro pěchotní využití má výhodu v malé velikosti a lehkosti s výkonem až 20 W při montáži do vozidel s použitím zesilovače je zařízení schopno pracovat s výkonem až 50 W. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 6.4

Typ zařízení: **Panther V-EDR (Manpack – pěchotní vybavení)**

Tab. 6.4: Technické parametry Panther V-EDR (Manpack).

Technické parametry		Poznámka
Frekvenční rozsah	30 ÷ 88 MHz	VHF
Šířka pásma (celého systému)	58 MHz	–
Šířka pásma	–	–
Odstup kanálů	25 kHz	–
Počet využitelných kanálů	3120	–
Vysílací výkon	100 mW, 5 W 100 mW, 5 W, 20 W	pro napájení 12 V DC pro napájení 24 V DC
Rychlost přenosu dat	od 75 b/s až do 16 kb/s	–
Rychlost přenosu hlasu	–	–
Rychlost skoků	100 skoků/s	–
Pracovní dosah	0,2 ÷ 10 km	v závislosti na výkonu
Modulace	FSK	–
EPM módy	FH	využito SFH
Zabezpečení proti chybám	FEC	–

- Poskytuje přenos GPS informací pro udání polohy (má zabudovaný GPS modul). GPS modul může být přímo zabudovaný v zařízení nebo ho lze externě připojit.

### ➡ **HF-90**

**HF-90** patří opět do skupiny komunikačních systémů. Narozdíl od dříve zmíněných systému je HF-90 mimo armádní složky, také dostupný pro komerční účely s jistou úpravou specifikací zařízení. HF-90 může realizovat spojení do vzdálenosti až třech tisíc kilometrů bez použití satelitů. Za vývojem zařízení stojí celosvětově uznávaná firma, na poli komunikačních rádií, Q-MAC Electronics, která jej vyvíjí pro pěchotní nasazení, stejně tak je vyráběna pro montáž do vozidel nebo přímo jako součást základnových stanic. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 6.5.

Typ zařízení: **HF-90**

Tab. 6.5: Technické parametry HF-90.

Technické parametry		Poznámka
Frekvenční rozsah	2 ÷ 30 MHz	HF
Šířka pásma (celého systému)	28 MHz	–
Šířka pásma	256 kHz	–
Odstup kanálů	–	–
Počet využitelných kanálů	–	–
Vysílací výkon	max. 50 W	konstrukce pro vozidla
Rychlost přenosu dat	–	–
Rychlost přenosu hlasu	–	–
Rychlost skoků	5 skoků/s	–
Pracovní dosah	až 3000 km	v závisl. na anténě, prostředí. . .
Modulace	FSK, PSK	–
EPM módy	FH	–
Zabezpečení proti chybám	FEC	–

- Možný počet kombinací čísel, dle kterých se nastavují nosné frekvence je  $7,2 * 10^{16}$ .

V tabulce 6.10 na straně 36 jsou uvedeny parametry jednotlivých armádních systémů společně.

## 6.2 Veřejné komunikační systémy

### ► **Motorola DTR2450**

„Digital On-Site Two-Way Radio“ **DTR2450** je digitální radiostanice určená pro provoz v bezlicenčním pásmu 2,4 ÷ 2,485 GHz (ISM). Využívá technologie rozprostřeného spektra (FHSS), čímž je docíleno bezpečné komunikace (složitý odposlech). DTR2450 vysílačky jsou schopni si mezi sebou posílat krátké textové zprávy (SMS) buď přednastavené nebo je možno připojit externí klávesnici pro vlastní zprávu. Hovory mohou být uskutečněny z vysílačky na vysílačku, ale i pro celou skupinu případně podskupinu uživatelů. DTR2450 poskytuje možnost komunikace: – One To One call / Private Group Call / Public Group Call [21], [33]. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 6.6.

Typ zařízení: **DTR2450**

Tab. 6.6: Technické parametry DTR2450.

Technické parametry		Poznámka
Frekvenční rozsah	2,4 ÷ 2,4835 GHz	ISM
Šířka pásma (celého systému)	83,5 MHz	–
Šířka pásma	–	–
Odstup kanálů	50 kHz	–
Počet využitelných kanálů	50	[21]
Vysílací výkon	100 mW	–
Rychlost přenosu dat	–	–
Rychlost přenosu hlasu	–	–
Rychlost skoků	–	–
Pracovní dosah	až 6 km	–
Modulace	FSK	8-level FSK
EPM módy	–	–
Zabezpečení proti chybám	–	–

### ► **SATELLINE–1915**

**Satellite–1915** vyrobený firmou SATEL je radiový modem určený k přenosu dat. Hlavní využití systému je v uzavřených (vnitřních) prostorech nebo do středně vzdálených oblastí. Modem využívá pro komunikace ISM pásmo, přesněji 902 až 928 MHz. Pro zamezení interferencí (rušení) s jinými radiovými komunikacemi, systém využívá technologie FHSS. Satellite–1915 je vybaven mechanismem pro úsporu energie v době, kdy se nevysílá nebo nepřijímá (tzv. *Sleep mode*). Pro zajištění spolehlivého a bezpečného příjmu vysílaných dat

je využito frekvenčního skákání společně s ARQ (*Automatic Repeat Query*). Možná propojovací vzdálenost se pohybuje kolem 900 m v městské zástavbě a nebo něco přes 20 km ve volném terénu. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 6.7. [31], [32]

Typ zařízení: **Satellite–1915**

Tab. 6.7: Technické parametry SATELLINE–1915.

Technické parametry		Poznámka
Frekvenční rozsah	902 ÷ 928 MHz	–
Šířka pásma (celého systému)	26 MHz	–
Šířka pásma	–	–
Odstup kanálů	–	–
Počet využitelných kanálů	–	–
Vysílací výkon	1, 10, 100, 500, 1000 mW	–
Rychlost přenosu dat	9,6 kb/s 115,2 kb/s	–
Rychlost přenosu hlasu	–	–
Rychlost skoků	–	–
Pracovní dosah	až 900 m přes 20 km	městská zástavba otevřený terén
Modulace	–	–
EPM módy	–	–
Zabezpečení proti chybám	ARQ	–

## ➡ *Bluetooth*

### Úvod

Bluetooth je bezdrátová komunikační technologie s cílem nahradit metalická spojení na krátké vzdálenosti v řádech desítek metrů. Pomocí technologie Bluetooth v dnešní podobě zřizujeme bezdrátové spojení mezi dvěma a více elektronickými zařízeními, jako jsou například mobilní telefony, PDA, osobní počítače, tiskárny, scannery, sluchátka apod. Můžeme konstatovat, že technologií Bluetooth jsou dnes již vybaveny veškeré mobilní telefony v kategorii nad 2 500 Kč tj. střední třídy. Bližší informace jsou k nalezení v [1], [44].

## Historický vývoj

Vývoj technologie Bluetooth započala roku 1998 švédská společnost Ericsson s cílem vytvoření, nebo spíš nahrazení metalického (kabelového) spojení mobilního telefonu se sluchátky (bezdrátové sluchátko). Cíle projektu byly předem stanoveny, a to aby ve výsledku vznikla bezdrátová technologie nenáročná na energii, cenově dostupná, a aby zvládla nahradit kabelové spojení mezi mobilním telefonem a jeho příslušenstvím. Pracovní název projektu byl stanoven jako MC-Link (později Bluetooth). V počátcích projektu stály za vývojem čtyři velké společnosti Nokia, TOSHIBA, IBM a Intel. V roce 1998 bylo založeno konsorcium firem nesoucí název Bluetooth SIG (*Special Interest Group*).

**Bluetooth SIG** – *Bluetooth Special Interest Group* (v počátcích 400 členů a nyní 9000 členů). Organizace zastřešující tvorbu standardu Bluetooth a jeho propagaci. Provádí mimo jiné i certifikační program pro zajištění kompatibility jednotlivých zařízení. Bližší informace je možné nalézt v [3].

## Popis systému

Systém Bluetooth je universální radiokomunikační systém, který umožňuje bezdrátový přenos dat. signálů s přenosovou rychlostí kolem 1 Mbit/s<sup>1</sup>, ale pouze na krátké vzdálenosti (desítky metrů). Technologie pracuje v celosvětově bezlicenčním pásmu (*Industrial, Scientific and Medical band = ISM*) na kmitočtech 2,4 ÷ 2,485 GHz využívající technologii rozprostřeného spektra. Dále využívá pro přenos signálu plného duplexu s nominální rychlostí až 1600 skoků/s. Jedná se o velice bezpečnou a spolehlivou komunikační technologii.

## Popis funkčnosti

Jak již bylo zmíněno v popisu systému, tak Bluetooth pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz ISM, přesněji v rozsahu 2,400 GHz ÷ 2,4835 GHz. Odstup mezi komunikačními kanály je 1 MHz a počet použitelných kanálů je celkem 79. Aby systém dokázal potlačit interferenci s jinými signály, je zde využita metoda rozprostření spektra frekvenčním skákáním (FHSS) s rychlostí 1600 skoků/s tj. po 0,625 milisekundách. Vysílaný signál musí být vhodným způsobem modulován, použitá modulace je **GFSK** (*Gaussian Frequency Shift Keying*) – gaussovské modulace s frekvenčním klíčováním.

---

<sup>1</sup>Viz tabulka 6.9.

## Dosah a výkon

Zařízení Bluetooth jsou podle svého výkonu zařazena do tří tříd (class). Jednotlivé třídy a jejich specifikace jsou uvedeny názorně v tab. 6.8.

Tab. 6.8: Rozdělení tříd standardu Bluetooth.

Třída	Max. výst. výkon	Min. výst. výkon	Dosah
1	100 mW(20 dBm)	1mW (0 dBm)	až 100 m
2	2,5 mW(4 dBm)	0,25 mW(-6 dBm)	až 20 m
3	1 mW(0 dBm)	není stanoveno	až 1 m

## Technické parametry

V následující tabulce jsou přehledně uvedeny parametry systému Bluetooth.

Tab. 6.9: Technické parametry Bluetooth.

Technické parametry		Poznámka
Frekvenční rozsah	2,4 ÷ 2,4835 GHz	ISM
Šířka pásma (celého systému)	83,5 MHz	–
Šířka pásma	–	–
Odstup kanálů	1 MHz	–
Počet využitelných kanálů	79	–
Vysílací výkon	až 100 mW	viz tab. 6.8
Rychlost přenosu dat	kolem 1 Mbit/s	až 3 MB/s pro verzi 2.0 + EDR
Rychlost přenosu hlasu	–	–
Rychlost skoků	až 1600 skoků/s	po 0,625 ms
Pracovní dosah	až 100 m	dle třídy a typu
Modulace	GFSK	–
EPM módy	FH, AFH	–
Zabezpečení proti chybám	FEC, ARQ	ARQ pro datové pakety

## Kódy

Pakliže navazujeme spojení pomocí technologie Bluetooth na větší vzdálenosti, čímž je malá intenzita přijímaného signálu, tak nám vznikají poruchy při přenosu dat. Vzniklé poruchy systém opravuje využitím tzv. samoopravného kódu **FEC** (*Forward Error Correction*). Systém Bluetooth obsahuje dvě verze FEC jednou z nich je 1/3 FEC a druhá je 2/3 FEC.

- 1/3 FEC – 3x zopakuje informační bit.
- 2/3 FEC – kratší verze Hammingova kódu (15,10).

*Hammingovi kódy* jsou to lineární kódy a používají se k zabezpečení údajů ukládaných do operační paměti číslicových počítačů nebo pro kanály s nezávislými chybami. Struktura Hammingova kódu je postavena tak, aby syndrom  $s$  udával svými prvky (souřadnicemi v binární podobě) polohu, kde se vyskytlo chybné místo. Je-li syndrom  $s$  nulový, tak přenos proběhl bezchybně, je-li nenulový, tak během přenosu nastala chyba. Syndrom je dán přijatým kódovým slovem mod2 s kontrolní maticí:

$$s = \bar{f} \otimes H^T \tag{6.1}$$

kde  $s$  je syndrom,  $\bar{f}$  je přijaté kódové slovo a  $H^T$  je vytvořená kontrolní matice. Pro bližší informace týkající se kódování je možné využít publikace [23], [25].

Tab. 6.10: Shrnutí parametrů výše uvedených armádních systémů.

<b>Systémy / Parametry</b>	<b>MV300 (MP300)</b>	<b>Eritac (RL424)</b>	<b>SINCGARS</b>	<b>Panther V-EDR (Manpack)</b>	<b>HF-90</b>
<b>Výrobce</b>	KONGSBERG	KONGSBERG	ITT	THALES	Q-MAC
<b>Frekvenční rozsah</b>	30 ÷ 87,975 MHz	610 ÷ 960 MHz	30 ÷ 87,975 MHz	30 ÷ 88 MHz	2 ÷ 30 MHz
<b>Šířka pásma (celého systému)</b>	57,975 MHz	350 MHz	57,975 MHz	58 MHz	28 MHz
<b>Šířka pásma</b>	45 kHz	–	–	–	256 kHz
<b>Odstup kanálů</b>	25 kHz	125 kHz	25 kHz	25 kHz	–
<b>Počet využitelných kanálů</b>	2320	2800	2320	3120	–
<b>Výsílací výkon</b>	max. 50 W	0,05 ÷ 10 W	až 4,5 W	max. 20 W	max. 50 W
<b>Rychlost přenosu dat</b>	0,3 ÷ 16 kb/s	512 ÷ 8448 kb/s	75 b/s ÷ 16 kb/s	116 kb/s	–
<b>Rychlost přenosu hlasu</b>	16 kb/s a 2,4 kb/s	16 kb/s	–	–	–
<b>Rychlost skoků</b>	–	–	100 skoků/s	1000 skoků/s	5 skoků/s
<b>Pracovní dosah</b>	–	–	0,2 ÷ 10 km	–	až 3000 km
<b>Modulace</b>	GMSK	–	FSK	–	FSK, PSK
<b>EPM módy</b>	FH	AFH	FH	FC, FS, FH, FCS	FH
<b>Zabezpečení proti chybám</b>	FEC	FEC	FEC	FEC	FEC
<b>Poznámka – zdroj informací</b>	[10], [16], [17]	[8], [15], [18]	[14], [42]	[28], [29]	[26], [27], [41]

## 7 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část bakalářské práce se zabývá modifikovanou technologií frekvenčního skákání (**FH** – *Frequency Hopping*) tj. adaptivní frekvenční skákání (**AFH** – *Adaptive Frequency Hopping*). Pro názornou ukázkou technologie AFH a jejího rozdílu od původní technologie FH je vytvořen, s využitím programového prostředí softwaru Matlab (verze 7.4), program, který znázorňuje komunikaci dvou zařízení v pásmu, kde zároveň pracuje nějaký systém představující statické rušení pro uvedenou komunikaci. Při vypracování jsem vycházel podle popisu funkce AFH, která se využívá u zařízení Bluetooth<sup>1</sup>. Podrobnější popis je uveden v [2].

Nejprve několik základních informací o vlastní technologii AFH, mezi něž patří samotný princip této technologie a její rozdíl od frekvenčního skákání. [2], [36]

### 7.1 Adaptivní frekvenční skákání

#### 7.1.1 Úvod

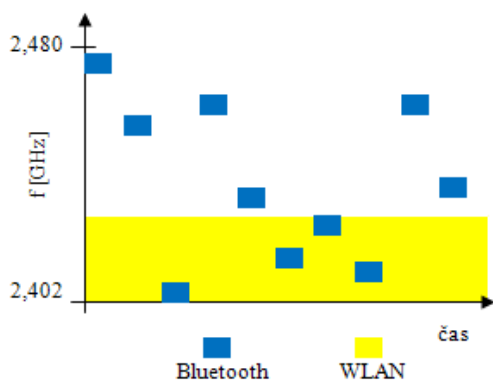
Technologie adaptivního frekvenčního skákání (AFH) nám poskytuje stejně, jako její základ (FH) dobrou odolnost proti úzkopásmovému rušení. Technika AFH byla vyvinuta, aby se dokázala adaptovat na vzniklé podmínky při komunikaci a to tak, že je schopna určitým způsobem „detekovat“ neproměnné neboli statické rušení při komunikaci.

Pro lepší představu by se dala situace nastítnit na probíhající komunikaci dvou (*Master – Slave*) zařízení Bluetooth v prostředí (pásmu), kde zrovna pracuje i některý jiný systém, představující rušení pro vzájemnou komunikaci zařízení Bluetooth, uskutečňující se v bezlicenčním pásmu ISM (*ISM – Industrial, Scientific and Medical band*). Systém pracující ve stejném pásmu, jako pracuje Bluetooth je např. WLAN (*Wireless LAN*).

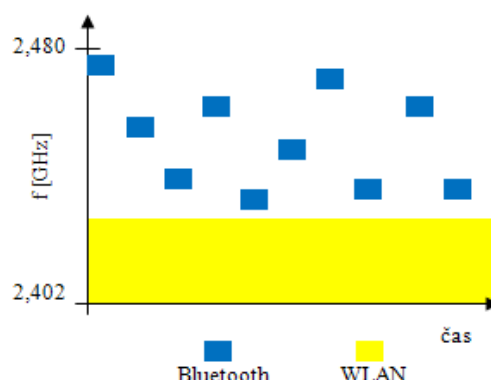
Situace je zjednodušeně znázorněna v obrázcích 7.1 a 7.2, kde modré obdelníčky představují nosné frekvence, na kterých probíhá komunikace dvou zařízení Bluetooth (*Master – Slave*) a žlutý „pruh“ představuje systém WLAN neboli jeho pracovní pásmo.

Na obrázku 7.1 je vidět průběh komunikace zařízení Bluetooth (BT) bez využití techniky AFH. Volba nosných frekvencí, na kterých bude probíhat komunikace, je volena pseudonáhodně, a jak je vidět, tak bez použití tehniky AFH se pro komunikaci využívají i generované kanály, které zasahují do pásma, kde pracuje systém WLAN (žlutý „pruh“). Při využití mechanismu AFH, patrné na obrázku 7.2, je systém schopen pseudonáhodně nahradit frekvence zasahující do pásma WLAN

<sup>1</sup>Bluetooth podporuje techniku *adaptivního frekvenčního skákání* (AFH) od specifikace 1.2.



Obr. 7.1: Výskyt kolizí (bez AFH).



Obr. 7.2: Adaptace prostředí využitím mechanismu AFH.

(s jistým omezením) jinými frekvencemi, mimo toto pásmo rušení, probíhající komunikace. [13]

Základním principem techniky AFH je klasifikace jednotlivých kanálů do dvou kategorií a to na dobré („good“) a špatné („bad“) kanály. Kde dobré kanály jsou ponechány ve skokové sekvenci, podle které probíhá přenos a ony špatné kanály jsou nahrazovány pseudonáhodně dobrými kanály.

Pro lepší představu, jak se mění (upravuje) skoková sekvence, určující posloupnost volby kanálů pro přenos. Uvedme, že zařízení Bluetooth ke své komunikaci využívá pouze 9 kanálů<sup>2</sup> (přesněji 1 až 9). Skoková pseudonáhodná sekvence je volena tedy ve stejném rozsahu a může vypadat následovně:

2	1	3	8	6	4	3	1	6	7	2	4	5	8	1	3	9	4	2	6	5	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Nastane-li při komunikaci nějaké statické rušení, které využívá (pro naši komunikaci zaruší) např. kanály **5, 6, 7**, tak skoková sekvence bude vypadat následovně (x značí zarušené „špatné“ kanály, vlivem statického rušení):

2	1	3	8	x	4	3	1	x	x	2	4	x	8	1	3	9	4	2	x	x	x	8
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

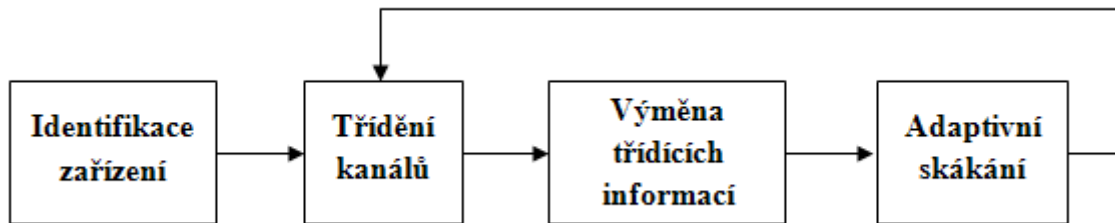
Technika AFH je schopna špatné (zarušené) kanály nahradit pseudonáhodně jinými kanály, které jsou vybírány z dobrých (nezarušených) kanálů. Výsledná skoková sekvence, podle které bude probíhat přenos může vypadat následovně:

2	1	3	8	2	4	3	1	9	8	2	4	3	8	1	3	9	4	2	8	1	4	8
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

<sup>2</sup>Zařízení Bluetooth využívá pro komunikaci celkem 79 kanálů.

## 7.1.2 Základní struktura AFH

Systém AFH je složen z několika částí (bloků). Sled jednotlivých bloků je patrný na obrázku 7.3.[36]



Obr. 7.3: Bloky systému AFH.[36]

### Popis bloků:

- Identifikace zařízení* – je krok, ve kterém zařízení (*Master*) je schopno zjistit, zda zařízení (*Slave*) vůbec podporuje mechanismus AFH a další potřebné parametry.
- Třídění kanálů* – je krok, kde se zjistí kvalita dostupných kanálů. Zjištění kvality těchto kanálů se může odehrávat třemi způsoby: *Packet Loss Ratio*, *RSSI measurements*, *Transmission sensing*.
- Výměna třídících informací* – je krok, kde se vyhodnotí zjištěné informace o kvalitě kanálů a tyto kanály se roztrídí na dobré („good“) a špatné („bad“). Kde dobrý kanál je ve významu, že není zarušen, tedy nespadá do pásma WLAN a naopak k tomu špatný kanál je v oblasti působení WLAN (viz obrázky 7.1, 7.2).
- Adaptivní skákání* – je krok, kde se upravuje (adaptuje) původní skoková sekvence, podle které následně probíhá komunikace zařízení *Master* – *Slave*.

## 7.2 Řešení v matlabu

### Úvod

Navržený program simuluje (znázorňuje) adaptivní frekvenční skákání (AFH) při „komunikaci“ dvou zařízení (podporujících techniku AFH<sup>3</sup>) v prostředí, kde se vyskytuje určitý počet dynamických rušičů, ale zároveň i statický rušič pracující přes

<sup>3</sup>Technika AFH je užitečná převážně proti statickému rušení.

určitou (definovanou) šířku pásma, čímž je schopen výrazně ovlivnit probíhající „komunikaci“.

Zařízení mohou pro svou komunikaci využít celkem 100 kanálů, a to s tím, že několik z nich může (ale nemusí) být zarušeno, buď nějakým statickým rušením samotným nebo i dynamickým rušením. Komunikací se v programu rozumí „přenos“ určitého počtu paketů, pro něž se využívají pseudonáhodně generované posloupnosti určující kanál, přes který bude daný paket procházet. Důležitou podmínkou, aby byla vůbec možná správná komunikace mezi *Master* a *Slave* zařízeními je, aby byly obě zařízení naladěny na stejný kanál (nosný kmitočet). Jednotlivé kmitočty se nastavují, dle pseudonáhodné posloupnosti, která vzniká v příslušných generátorech, jak na vysílací, tak i na přijímací straně. Tyto generátory musí pracovat synchronně, aby byl přijímač (*Slave*) naladěný na správné kanály (kmitočty), na kterých *Master* bude vysílat jednotlivé pakety. V programu se předpokládá, že přijímač „ví“, na kterém kanálu bude právě přijímat příslušný paket.

## Struktura

Nejobecnější struktura, podle níž je možno popsat simulační program, je znázorněna schématem, uvedeném na obrázku 7.4.

Uvedené schéma obsahuje několik bloků. Mezi hlavní bloky programu patří komunikující zařízení (blok *Master* a *Slave*) společně s jednotlivými rušícími prvky (statické a dynamické rušení). Statické rušení je znázorněno obdelníčkem s popisem „St.“ a jednotlivé dynamické rušiče znázorňují prázdná kolečka. Další uvedené bloky již zajišťují programovou realizaci AFH.

## Popis činnosti programu

V základní části programu se definují inicializační proměnné, se kterými je dále počítáno. Mezi tyto proměnné patří:

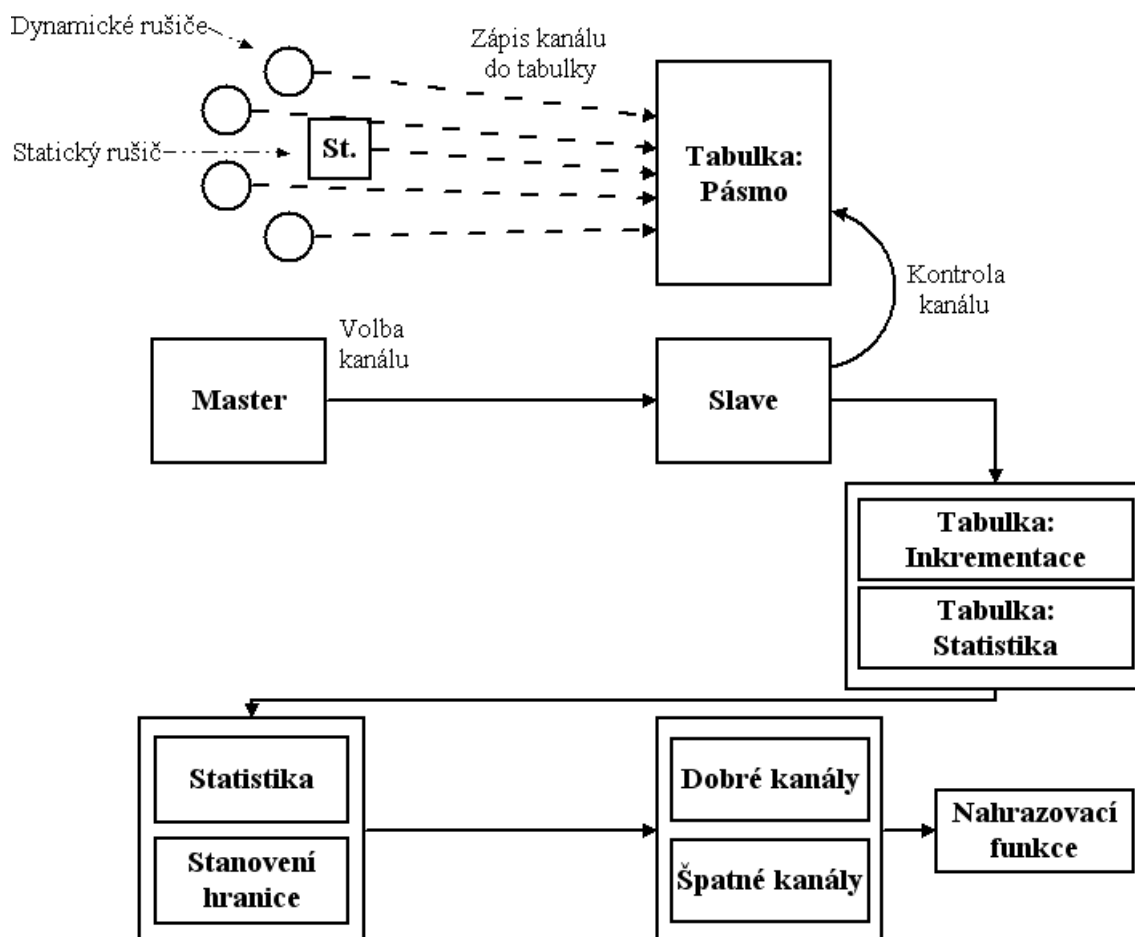
- *Počet paketů* – zadáním této proměnné definujeme počet paketů určených k přenosu.
- *Počet statických rušičů* – nadefinováním dané proměnné určíme, kolik kanálů z celkového množství kanálů, určených pro komunikaci<sup>4</sup>, bude rušeno statickým rušením. Tím je myšlena šířka pásma, přes které bude statický rušič (např. systém WLAN) pracovat. Takto zarušená část pásma je po celou dobu běhu programu neměnná.

---

<sup>4</sup>K vlastní komunikaci je určeno celkem 100 kanálů.

- *Počet dynamických rušičů* – touto proměnnou určíme, kolik kanálů se nám zaruší vlivem dynamických rušičů při přenosu jednoho paketu. Dynamické rušiče mění svoje pracovní kanály při každém dalším paketu určeným k přenosu.

Po nadefinování těchto proměnných se může program spustit (proměnné jsou standardně navoleny: *počet paketů* = 4200, *počet statických rušičů* = 20 a *dynamických* je také 20).



Obr. 7.4: Základní blokové schéma řešení programu pro znázornění AFH.

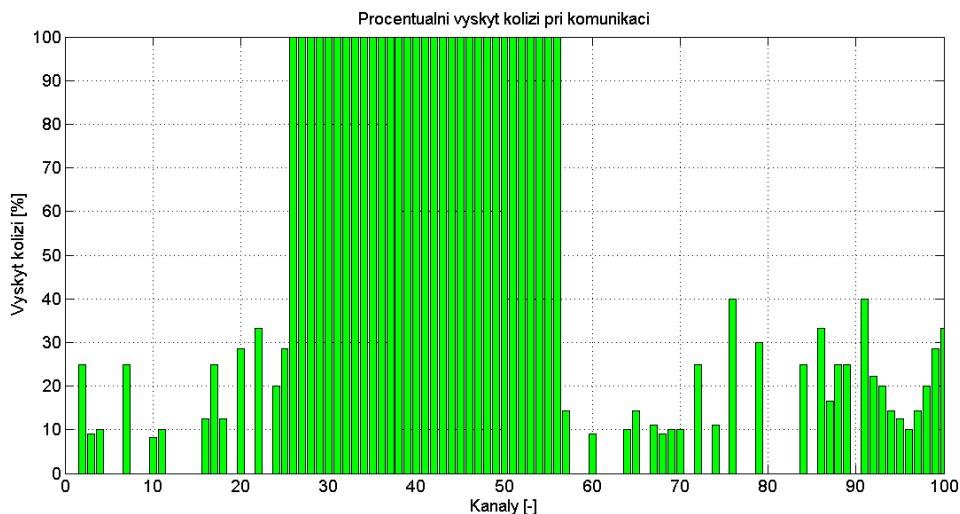
V první fázi simulace se vygenerované kanály pro statický rušič společně s kanály dynamických rušičů zapíše do tabulky „Pásmo“, tato tabulka je ve skutečnosti matice obsahující celkem 100 sloupců (pozic), které v počátečním stavu mají hodnotu **0**. Hodnota **0** se změní na hodnotu **1** a to všude tam, kde pozice v tabulce odpovídá číslu resp. vygenerovaným<sup>5</sup> kanálům pro nadefinované rušiče. Jakmile je tabulka „Pásmo“ upravena podle vzniklých podmínek (zarušení určitého počtu kanálů → zápis hodnoty **1** na příslušné pozice), tak zařízení označené *Master* začne

<sup>5</sup>Pro generování čísel v rozsahu  $1 \div 100$  je možno v matlabu využít příkaz `randint(1,1,100)+1`.

vysílat první paket. Zařízení *Slave* při každém příjmu paketu, zvýší příslušnou pozici v tabulce „Inkrementace“ o +1 a zároveň skontroluje, zda není komunikační kanál zarušen. Kontrolu provede podle tabulky „Pásmo“ a jestliže zjistí, že daný kanál je zarušen (hodnota 1 na příslušné pozici), tak to znamená, že na tomto kanále nastala kolize<sup>6</sup>, a tudíž inkrementuje i danou pozici v tabulce „Statistika“.

Pro další běh programu je potřeba si celkovou komunikaci rozdělit na několik menších částí a to z toho důvodu, abychom byli schopni definovat (programově), kdy se provádí zjištění podmínek v komunikačním prostředí (statistika), a kdy se provádí vlastní náhrada špatných kanálů za dobré. Uvnitř programu je tahle část definována jako „*refreshcyklus*“, jehož délka resp. doba trvání je nastavena na 700 paketů (proměnná *refresh\_cyklus*). Ve výsledku, může graf vypadat podobně, jako obrázek 7.7, tento obrázek je jedním z výsledků po dokončení běhu programu.

Po určité době postačující k tomu, aby se mohla udělat představa o prostředí, ve kterém probíhá komunikace, zařízení *slave* poskytne tabulky (statistika a inkrementace) *masterovi*, který vytvoří statistiku zarušení komunikačního prostředí (statistika zarušení je výsledek porovnání tabulek „statistika“ a „inkrementace“ vyjádřeno v procentech). Doba, za kterou se tento proces uskuteční je stanovena každým 700-stým paketem resp. jedním *refreshcyklem*. Vzniklá statistika je vyjádřena ve sloupcovém grafu (zobrazeno obrázkem 7.5) a tabulky, ze kterých byla vytvořena, se vynulují. Tento proces se provádí hned první a každý další čtvrtý *refreshcyklus*.



Obr. 7.5: Procentuální výskyt kolizí při komunikaci.

<sup>6</sup>Kolizí se rozumí, že na *Masterem* vygenerovaném kanálu pracuje zrovna nějaký jiný systém resp. rušič. Říkáme, že daný kanál je zarušen.

Výsledek porovnání je vyneseno do sloupcové závislosti, kde na x-ové ose jsou jednotlivé kanály  $1 \div 100$  a na y-ové ose je vyneseno procentuální vyjádření kolizí, které nastaly při komunikaci v průběhu přenosu 700 paketů.

Vynesená statistika je velice důležitá, jelikož se podle ní klasifikují jednotlivé kanály na dobré a špatné. Jednotlivá klasifikace kanálů se provádí v závislosti na určité mezní hodnotě neboli hranici. Hranici si můžeme pomyslně představit jako vodorovnou čáru ve sloupcovém grafu, s jejíž pomocí se provádí klasifikace všech kanálů ( $1 \div 100$ ).

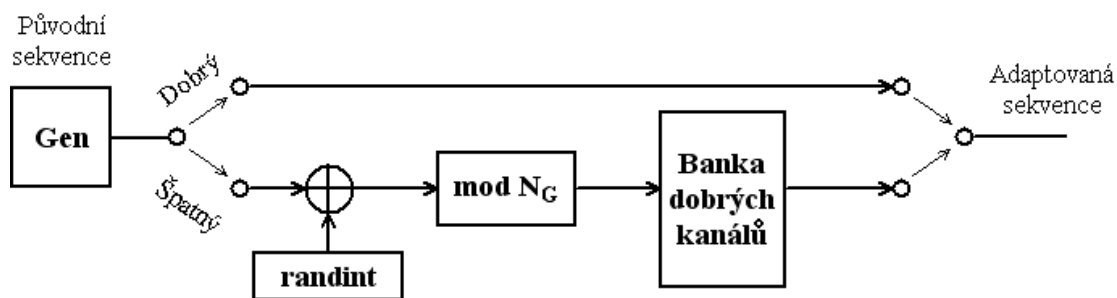
Rozdělení kanálů je dáno takovým způsobem, že všechny kanály, které nepřesahují danou hranici jsou klasifikovány jako dobré, a kanály které danou hranici přesahují jsou vyhodnoceny jako špatné. Situace je ještě o něco složitější a to v tom, že samotná technologi AFH je schopna v celé komunikaci nahradit pouze určitý počet špatných kanálů za dobré. V programu je tento počet stanoven na hodnotu 25 kanálů (tedy dokáže se nahradit maximálně 25 špatných kanálů za dobré). Z tohoto důvodu nelze uvedenou hranici dát napevno. Hranice musí být proměnná, aby byla schopna dosáhnout takové úrovně, při které by byla splněna podmínka náhrady.

Uvnitř programu je hranice nastavena na počáteční hodnotu 3 (tzn. hodnota na y-ové ose 3%). Při této hodnotě se skontroluje počet špatných kanálů (přesahující hranici), a pakliže je tento počet větší než stanovená podmínka náhrady, tak se hranice zvýší o hodnotu +1. Takové zvyšování hranice probíhá tak dlouho, dokud nebude splněna podmínka (max. počtu kanálů, který je schopna technika AFH nahradit). Mohl by nastat případ, kdy by hranice dosáhla 100%, čímž by byly všechny kanály považovány za dobré. Z tohoto důvodu je maximální hodnota pro hranici udána na 80%, tedy na této hodnotě se hranice již nezvyšuje. Nastane-li tento případ, že i na hodnotě 80% nebude splněna podmínka (nahrazení max. 25 kanálů), tak z celkového počtu kanálů přesahující hranici se vybere ucelené pásmo o šířce 25 kanálů a zbytek z těchto kanálů se považuje za kanály dobré.

Výsledkem takové situace, kdy je více špatných kanálů, než je AFH schopno nahradit je, že se může přenos paketu uskutečnit na těchto „špatných“ resp. již dobrých kanálech, na kterých dochází ke kolizi a neprobíhá u nich náhrada, jelikož se považují za dobré.

V této fázi programu jsou kanály rozděleny na dobré a špatné. Jednotlivé kanály se uloží do příslušných tabulek, přesněji *bank*. Banka, obsahující dobré kanály, se využívá k operaci náhrady, nebo-li úpravě (adaptaci) skokové sekvence, podle níž přenos probíhá. Skoková sekvence je upravena takovým způsobem, že pro špatné kanály se vyberou náhradní a to právě z banky dobrých kanálů. Proces náhrady je schématicky znázorněn obrázkem 7.6.

Schématický obrázek 7.6 bych popsal tak, že pokud je v původní sekvenci kanál, který je klasifikován jako dobrý (podle vynesené statistiky a určen danou hranicí),



Obr. 7.6: Schéma adaptace původní skokové sekvence.

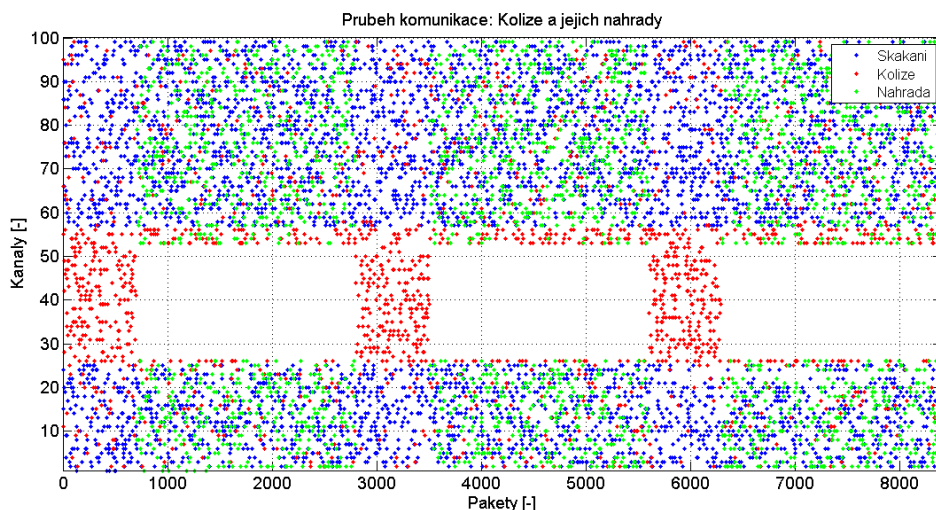
tak na stejném kanálu může být přenesen paket, tudíž bude ve výsledku uchován ve skokové sekvenci. Nastane-li ale případ, kdy je kanál klasifikován jako špatný, tak se dostane ve schématu do spodní větve a je nahrazen jiným kanálem a to takovým, který je vybrán z banky dobrých kanálů. Aby se určitý špatný kanál nenahrazoval stále stejným kanálem, tak je ve spodní větvi provedena operace XOR špatného kanálu (jeho čísla) a čísla získaného z pseudonáhodného generátoru `randint`. Pro určení nahrazujícího kanálu, z rozsahu banky dobrých kanálů, je provedena ještě operace modulo výsledku z operace XOR a celkového počtu dobrých kanálů ( $N_G$ ). Banka dobrých kanálů obsahuje všechny dobré kanály, opět zjištěno s pomocí uvedené hranice ve statistice ( $N_G \dots$  počet dobrých kanálů).

Tímto procesem se získá nová (adaptovaná) skoková sekvence v závislosti na změně podmínek v prostředí, ve kterém probíhá naše komunikace. Tato nová skoková sekvence se využívá po dobu dalších tří „*refreshcyklů*“. Po uplynutí této doby je možné, že se situace v prostředí nějakým způsobem změnila a z tohoto důvodu je potřeba celý proces opakovat (opět se vynesou statistika za 700 přenesených paketů, určí se hranice a jednotlivé kanály se klasifikují, aby mohla být vytvořena nová skoková sekvence, podle které bude probíhat přenos). V programu se takhle celá část provádí po skončení každého „*refreshcyklu*“ jen s tím rozdílem, že se využívají výsledky pouze u každého prvního a následně čtvrtého „*refreshcyklu*“. Tedy při skončení těchto „*refreshcyklů*“ se vytvoří adaptovaná skoková posloupnost, podle které probíhá přenos v době, než nastane takovýto další „*refreshcyklus*“ tzn. v této době probíhá náhrada (zelené tečky viz obrázek 7.7). Při nové analýze prostředí se AFH v daném „*refreshcyklu*“ (první a každý čtvrtý) přepne do běžného FH.

## Výsledek

Po skončení programu je vynesena hlavní grafická závislost, která nám znázorňuje průběh námi navolené komunikace (viz obr. 7.7). Tento výstupní graf byl získán po nadefinování celkového počtu paketů určených k přenosu, který se rovnal 8400, dále

bylo použito celkem 30 kanálů pro statický rušič a počet dynamických rušičů byl 30. Společně s tímto grafem je vynesena i jedna statistika, která znázorňuje pouze poslední „*refreshcyklus*“, u kterého neprobíhala náhrada, ale zjišťovala se u něj zarušenost prostředí (opět vlivem statického a dynamického rušení).



Obr. 7.7: Průběh nadefinované komunikace, využití AFH.

Na uvedeném obrázku (7.7) je názorně vidět, na kterých kanálech nedocházelo ke kolizi (*modrá tečka*), kde ke kolizím docházelo (*červená tečka*) a nakonec vlastní náhrada technikou AFH (*zelená tečka*). Je vidět, že v době, kdy se zjišťovali podmínky uvnitř komunikačního prostředí, nedocházelo k náhradám špatných kanálů za dobré, v tuto dobu (*refreshcyklus*) si systém vyhodnocoval dané prostředí. Následně po vyhodnocení tohoto prostředí již probíhaly jednotlivé náhrady kanálů, ale pouze pro pásmo o velikosti (šířce) 25 kanálů. Zbytek kanálů již technika AFH nedokázala nahradit, a tak na těchto kanálech nemohla probíhat náhrada. Vlastní náhrada se prováděla po dobu, než uplynuly celkem tři *refreshcykly* (nebo-li  $3 * 700$  paketů), po uplynutí této doby se opět zjišťovaly podmínky a neprobíhala žádná náhrada. Ojedinelé „červené tečky“ znázorňují nadefinované dynamické rušiče.

### Grafické uživatelské rozhraní – GUI

Pro snazší „ovládání“ programu, aby pro simulaci (zadávání parametrů) nebylo potřeba zasahovat do vnitřní struktury kódu, jsem zdrojový kód obohatil o vlastní grafické uživatelské rozhraní (GUI – *Graphical User Interfaces*), kde případnému uživateli je umožněno zadat přímo:

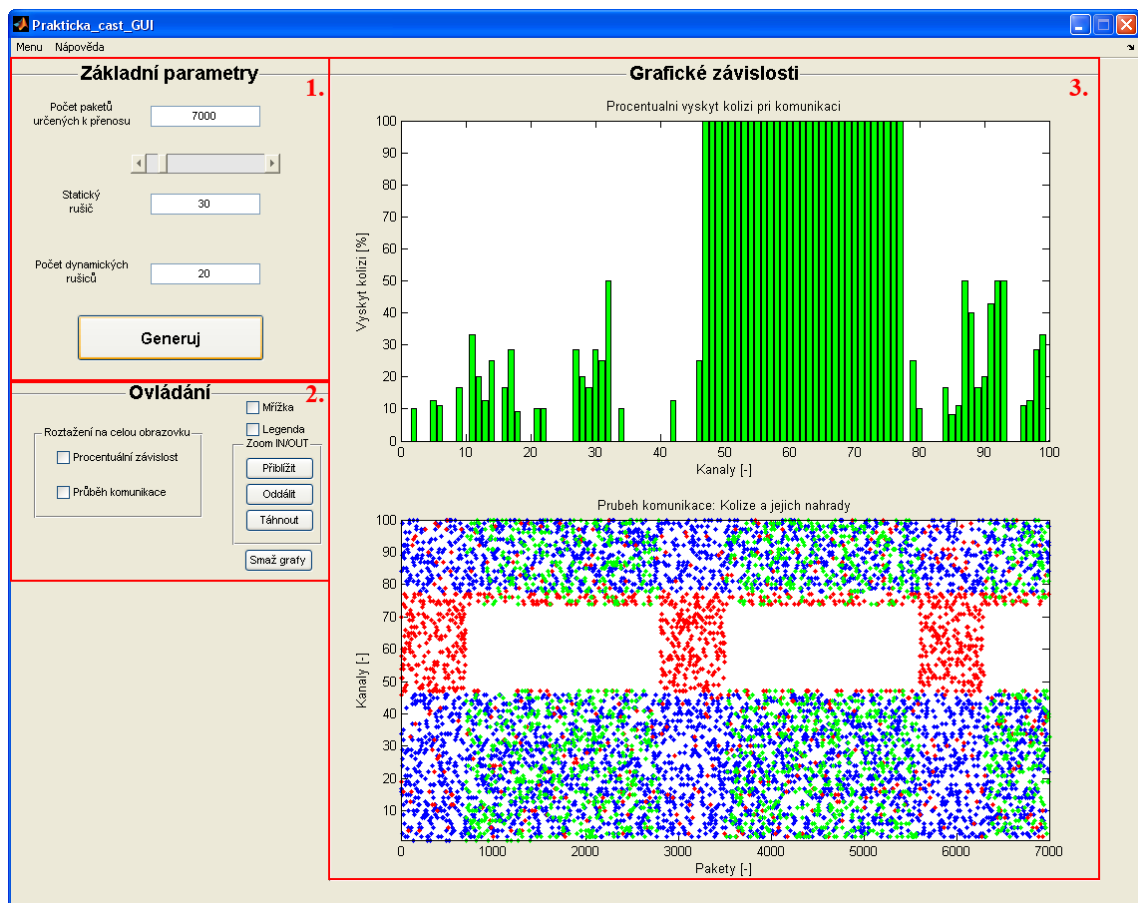
- počet paketů určených k přenosu,

- počet dynamických rušičů,
- šířku pásma statického rušiče.

Grafické uživatelské prostředí (GUI) obsahuje tři části:

1. **Základní parametry** – zde se navolují jednotlivé, již dříve zmíněné parametry, se kterými je po stisknutí tlačítka „**Generuj**“ provedena simulace.
2. **Ovládání** – v této části je možno si např. jednotlivé grafické závislosti zobrazit ve vlastním okně a využít standardní nástroje při práci s grafy v matlabu (tzv. *toolbar*) nebo je možno použít několik základních nástrojů (přiblížení, oddálení, uchycený) na vynesené grafy v prostředí „*Axes*“, případně zapnout–vypnout mřížku i legendu.
3. **Grafické závislosti**

Grafické uživatelské prostředí vypadá následovně:



Obr. 7.8: Grafické prostředí, programu, pro znázornění AFH.

V příloze (A.1) je uveden zdrojový kód programu, který neobsahuje prvky GUI. Je to z toho důvodu, že kód obsahující grafické prvky, mezi něž patří např. tlačítka, lišta s nabídkou, zatrhávací tlačítka apod., se tak stává značně nepřehledný, nicméně je možno tento zdrojový kód naléznout na přiloženém CD.

## 8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s technologií frekvenčního skákání (FH) a popsat systémy využívající tuto technologii s jejich parametry mezi něž patří frekvenční rozsah, šířka pásma, použitá modulace, přenosová rychlost a další. Po nastudování uvedené techniky frekvenčního skákání jsem zjistil, že komunikační zařízení využívající techniku FH se vyznačují vysokou bezpečností komunikace, jelikož je složitý odposlech, zdůvodu přeladování nosných kmitočtů v průběhu komunikace, dále tato zařízení jsou méně náchylná na rušení vznikající ve stejném pásmu, ve kterém probíhá vzájemná komunikace těchto zařízení. Ovšem nevýhodou těchto zařízení využívající techniku FH je, že jsou závislé na správné činnosti generátorů pseudonáhodných čísel, jak na vysílací, tak i na přijímací straně, podle kterých se v kmitočtových syntezátorech nastavují nosné frekvence signálu.

Technika frekvenčního skákání je využívána v systémech určených pro armádní, ale i komerční použití. Ve vojenské sféře se využívá v komunikačních systémech. Mezi tyto komunikační systémy využívající techniku frekvenčního skákání patří systémy MRR, EriTac, SINCGARS, JASORS, Panther V-EDR a HF-90. Do komerční sféry patří celosvětově rozšířený systém Bluetooth, umožňující bezdrátové spojení na kratší vzdálenosti. Takové bezdrátové spojení se využívá pro spojení mobilního telefonu s náhlavní soupravou nebo přenos dat s počítačem a podobně. Dále bych uvedl DTR2450 využívající FHSS, tento systém je určen pro vzájemnou komunikaci ve velkofiremních podnicích, výrobních halách průmyslu a dalších podobných odvětvích. Pro každý z těchto systémů jsem vyhledal jejich základní parametry a přehledně je uvedl v příslušných tabulkách.

V praktické části bakalářské práce jsem s využitím softwaru Matlab naprogramoval program, který znázorňuje techniku adaptivního frekvenčního skákání. Z určité části jsem při sestavování programu vycházel z AFH, které je využíváno u zařízení s technologií Bluetooth, přesněji od její specifikace 1.2, která již podporuje tuto techniku.

Cílem tohoto programu je znázornění funkce AFH u komunikace, která probíhá v zarušeném prostředí vlivem statického a dynamického rušení. Výsledkem simulace jsou grafické závislosti, na kterých je možno vidět, kde nastalo statické a dynamické rušení při komunikaci, a jakým způsobem se komunikace upravila (adaptovala), na vzniklé podmínky v prostředí.

## LITERATURA

- [1] BLANKENBECKLER, David. *An Introduction to Bluetooth. Wireless Developer Network* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-11-08]. Dostupné z URL: <<http://www.wirelessdevnet.com/channels/bluetooth/features/bluetooth.html>>.
- [2] BLUETOOTH. *Specification of the bluetooth system* [online]. Červenec 2007 [cit. 2008-01-14]. Dostupné z URL: <[http://bluetooth.com/NR/rdonlyres/F8E8276A-3898-4EC6-B7DA-E5535258B056/6545/Core\\_V21\\_EDR.zip](http://bluetooth.com/NR/rdonlyres/F8E8276A-3898-4EC6-B7DA-E5535258B056/6545/Core_V21_EDR.zip)>.
- [3] Bluetooth SIG. *About Bluetooth SIG* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-11-08]. Dostupné z URL: <<http://www.bluetooth.com/Bluetooth/SIG/>>.
- [4] BROWN, Richard. *Frequency Hopping Over Wireless Networks ... Why Not?* [online]. Březen 2003 [cit. 2007-12-05]. Dostupné z URL: <[http://www.cistp.gatech.edu/cistp/publications/CALLAHAN\\_AWARD\\_Brown.pdf](http://www.cistp.gatech.edu/cistp/publications/CALLAHAN_AWARD_Brown.pdf)>.
- [5] ČÍŽ, Radim. *Teorie sdělování* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-11-10]. Dostupné z URL: <<http://www.utko.feec.vutbr.cz/cizr/tsd/pr/Pr6.pdf>>.
- [6] Diego Barragán Guerrero. *ASK, OOK, FSK, BPSK, QPSK, 8PSK modulations* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-12-12]. Dostupné z URL: <<http://www.mathworks.co.uk/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=14410&objectType=FILE>>.
- [7] Dobeš, Josef; Žalud, Václav. *Moderní radiotechnika* Praha : BEN - technická literatura, 2006 – 767 s. : ISBN: 80-7300-132-2.
- [8] ERICSSON. *EriTac - Taktický komunikační systém* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-11-18]. Dostupné z URL: <<http://www.ericsson.com/cz/eritac.shtml>>.
- [9] ERICSSON. *MRR in a Nutshell* [online]. Duben 2004 [cit. 2008-03-19]. Dostupné z URL: <<http://www.ericsson.com/hr/enterprise/special/mrr.pdf>>.
- [10] ERICSSON. *MRR-Polní radiokomunikační systém* [online]. Prosinec 2007 [cit. 2007-11-18]. Dostupné z URL: <<http://www.ericsson.com/cz/mrr.shtml>>.
- [11] Hanus, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace* Brno : Vysoké učení technické, 2001 – 134 s. : ISBN: 80-214-1833-8.
- [12] Hanus, Stanislav; Fencl, Josef; Štencel, Vít. *Bezdrátové a mobilní komunikace II*, 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické, 2005 – 171 s. : ISBN: 80-214-2817-1.

- [13] HODGDON Charles. *Adaptive Frequency Hopping for Reduced Interference between Bluetooth® and Wireless LAN* [online]. Květen 2003 [cit. 2008-03-19]. Dostupné z URL: <<http://www.us.design-reuse.com/articles/5715/adaptive-frequency-hopping-for-reduced-interference-between-bluetooth-and-wireless-lan.html>>.
- [14] ITT. *SINGARS Advanced Tactical Communications System (ATCS) Radio Configurations* [online]. Zář 2007 [cit. 2007-11-19]. Dostupné z URL: <<http://www.acd.itt.com/pdf/domestic/ATCS%20family%20data%20sheet.pdf>>.
- [15] KONGSBERG. *Eri-Tac Tactical systems* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-11-18]. Dostupné z URL: <<http://www.kongsberg.com/eng/kda/kdc/Products/EriTacTacticalSystems/Default.asp?Id=32904>>.
- [16] KONGSBERG. *Multi Role Radio–MV300/MP300* [online]. Červen 2006 [cit. 2007-11-18]. Dostupné z URL: <[http://www.kongsberg.com/dokumenter/kdcxdataark/kdc/mrr\\_mv\\_mp\\_300\\_web.pdf](http://www.kongsberg.com/dokumenter/kdcxdataark/kdc/mrr_mv_mp_300_web.pdf)>.
- [17] KONGSBERG. *Multi Role Radio – MV300/MP300* [online]. Květen 2007 [cit. 2007-11-18]. Dostupné z URL: <[http://www.kongsberg.com/dokumenter/kdcxdataark/kda/english/kdc/mv\\_mp300%20brochure%20rev%20g\\_%20for%20web.pdf](http://www.kongsberg.com/dokumenter/kdcxdataark/kda/english/kdc/mv_mp300%20brochure%20rev%20g_%20for%20web.pdf)>.
- [18] KONGSBERG. *RL424A Tactical Radio Relay (Band II)* [online]. Leden 2007 [cit. 2007-11-18]. Dostupné z URL: <<http://www.kongsberg.com/dokumenter/kdcxdataark/kda/english/kdc/rl424%20radio%20relay%20rev%20c%20reduced%20%20for%20web.pdf>>.
- [19] MEEL, J. *Spread Spectrum (SS) SSS Online* [online]. Listopad 1999 [cit. 2007-10-15]. Dostupné z URL: <[http://www.sss-mag.com/pdf/Ss\\_jme\\_denayer\\_appl\\_print.pdf](http://www.sss-mag.com/pdf/Ss_jme_denayer_appl_print.pdf)>.
- [20] MIKULÁŠTÍK, Karel. *Pozemní digitální vysílání - princip OFDM radioTV* [online]. Říjen 2004 [cit. 2007-10-15]. Dostupné z URL: <<http://www.radiotv.cz/clanky/2831/pozemni-digitalni-vysilani—princip-ofdm.html>>.
- [21] MOTOROLA. *DTR Series–FAQs* [online]. Duben 2008 [cit. 2008-03-19]. Dostupné z URL: <[http://www.motorola.com/emea/dtr/en/faqs.aspx?WT.mc\\_id=dtr\\_emea\\_en&WT.mc\\_n=dtr\\_emea\\_en&WT.mc\\_t=Home&WT.mc\\_r=120#03](http://www.motorola.com/emea/dtr/en/faqs.aspx?WT.mc_id=dtr_emea_en&WT.mc_n=dtr_emea_en&WT.mc_t=Home&WT.mc_r=120#03)>.

- [22] Mulcahy, Paul. *Radios and communications equipment* [online]. Prosinec 2003 [cit. 2007-12-02]. Dostupné z URL: <[http://www.pmulcahy.com/equipment/radios\\_and\\_communications\\_equipment.html](http://www.pmulcahy.com/equipment/radios_and_communications_equipment.html)>.
- [23] NĚMEC, Karel. *Datová komunikace* 1. vyd. Brno : VUTIUM, 2000. 116 s. ISBN 80-214-1652-1.
- [24] Olive-Drab. *SINCGARS Military Radios* [online]. Duben 2008 [cit. 2008-03-19]. Dostupné z URL: <[http://www.olive-drab.com/od\\_electronics\\_sincgars.php](http://www.olive-drab.com/od_electronics_sincgars.php)>.
- [25] OŠMERA, Pavel. *Kódy a kódování* [online]. Listopad 2005 [cit. 2007-11-10]. Dostupné z URL: <[http://www.zam.fme.vutbr.cz/~osmera/IS\\_pdf/F\\_kap3.pdf](http://www.zam.fme.vutbr.cz/~osmera/IS_pdf/F_kap3.pdf)>.
- [26] QMAC. *HF-90 Compact Transceiver* [online]. Srpen 2006 [cit. 2007-11-25]. Dostupné z URL: <[http://www.qmac.com/downloads/HF90\\_Compact\\_Transceiver\\_Aug04.pdf](http://www.qmac.com/downloads/HF90_Compact_Transceiver_Aug04.pdf)>.
- [27] QMAC. *Q-MAC HF-90 Frequency Hopping Option* [online]. Srpen 2006 [cit. 2007-11-25]. Dostupné z URL: <[http://www.qmac.com/downloads/HF90\\_Frequency\\_Hopping.pdf](http://www.qmac.com/downloads/HF90_Frequency_Hopping.pdf)>.
- [28] RAILCE. *Panther EDR* [online]. Prosinec 2004 [cit. 2007-11-25]. Dostupné z URL: <[http://www.railce.com/cw/casc/racal/panther\\_v.pdf](http://www.railce.com/cw/casc/racal/panther_v.pdf)>.
- [29] RAILCE. *Panther/Syncal* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-11-25]. Dostupné z URL: <<http://www.railce.com/cw/casc/racal/panther-h.htm>>.
- [30] ROBERTS, Randy. *The ABCs of Spread Spectrum - A Tutorial* SSS Online [online]. Srpen 2007 [cit. 2007-10-15]. Dostupné z URL: <<http://www.sss-mag.com/ss.html>>.
- [31] SATEL. *SATELLINE-1915* [online]. Březen 2008 [cit. 2008-04-09]. Dostupné z URL: <<http://www.satel.com/brochure/1915.pdf>>.
- [32] SATEL. *SATELLINE-1915* [online]. Prosinec 2007 [cit. 2008-04-09]. Dostupné z URL: <<http://www.p4w.ee/broschyre/satellite-1915.pdf>>.
- [33] SATEL. *SATELLINE-1915. Compact, Multi-Purpose Radio Modem* [online]. Srpen 2006 [cit. 2008-04-09]. Dostupné z URL: <[http://www.motorola.com/governmentandenterprise/contentdir/en\\_GB/Files/ProductInformation/DTR2430\\_DTR2450.pdf](http://www.motorola.com/governmentandenterprise/contentdir/en_GB/Files/ProductInformation/DTR2430_DTR2450.pdf)>.
- [34] Staudek, Jan. *Rozprostřování spektra* [online]. Července 2007 [cit. 2007-10-23]. Dostupné z URL: <[http://www.fi.muni.cz/usr/staudek/vyuka/commsys/09\\_spreadspectrum.pdf](http://www.fi.muni.cz/usr/staudek/vyuka/commsys/09_spreadspectrum.pdf)>.

- [35] Šilhavý, Pavel. *Systémy bezdrátového přenosu dat* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-10-23]. Dostupné z URL: <[http://www.utko.feec.vutbr.cz/~silhavy/MVDP/index\\_soubory/6\\_MVDP.pdf](http://www.utko.feec.vutbr.cz/~silhavy/MVDP/index_soubory/6_MVDP.pdf)>.
- [36] TREISTER B., GAN H., SKAFIDAS E. *Adaptive Frequency Hopping* [online]. Srpen 2001 [cit. 2008-05-03]. Dostupné z URL: <[http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2001/Sep01/01386r0P802-15\\_TG2-Clause-14-3-Adaptive-Frequency-Hopping-Update1.doc](http://grouper.ieee.org/groups/802/15/pub/2001/Sep01/01386r0P802-15_TG2-Clause-14-3-Adaptive-Frequency-Hopping-Update1.doc)>.
- [37] Wikipedie. *Direct Sequence Spread Spectrum* [online]. Září 2007 [cit. 2007-10-15]. Dostupné z URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/DSSS>>.
- [38] Wikipedia. *Frequency-hopping spread spectrum* [online]. Září 2007 [cit. 2007-10-15]. Dostupné z URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Frequency\\_hopping](http://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_hopping)>.
- [39] Wikipedia. *Hedy Lamarr* [online]. Říjen 2007 [cit. 2007-10-14]. Dostupné z URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Hedy\\_Lamar](http://en.wikipedia.org/wiki/Hedy_Lamar)>.
- [40] Wikipedie. *OFDM* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-10-15]. Dostupné z URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/OFDM>>.
- [41] Wikipedia. *Radio frequency* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-12-12]. Dostupné z URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Radio\\_spectrum](http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum)>.
- [42] Wikipedia. *SINCGARS* [online]. Listopad 2007 [cit. 2007-11-19]. Dostupné z URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Single\\_Channel\\_Ground\\_and\\_Airborne\\_Radio\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Single_Channel_Ground_and_Airborne_Radio_System)>.
- [43] Wikipedia. *Telemark Battalion* [online]. Březen 2008 [cit. 2008-04-07]. Dostupné z URL: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Telemark\\_Battalion](http://en.wikipedia.org/wiki/Telemark_Battalion)>.
- [44] ZLÁMAL, Petr. *Technologie Bluetooth* [online]. Květen 2006 [cit. 2007-10-08]. Dostupné z URL: <[http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/tks/zlmal\\_technologie%20bluetooth.pdf?PHPSESSID=cb36137616993962904c97fa95cb3728](http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/tks/zlmal_technologie%20bluetooth.pdf?PHPSESSID=cb36137616993962904c97fa95cb3728)>.

## **SEZNAM ZKRATEK**

- ADPCM** – Adaptive Differential Pulse Code Modulation
- ADSL** – Asymmetric Digital Subscriber Line
- AFH** – Adaptive Frequency Hopping
- ARQ** – Automatic Repeat Query
- ASK** – Amplitude Shift Keying
- ATCS** – Advanced Tactical Communication System
- CNR** – Combat Net Radio
- CVSD** – Continuously Variable Slope Delta modulation
- DRM** – Digital Radio Mondiale
- DSSS** – Direct Sequence Spread Spectrum
- DVB-T** – Digital Video Broadcasting – Terrestrial
- ECM** – Electronic Counter Measures
- EDR** – Enhanced Data Radio
- EPM** – Electronic Protective Measures
- FCS** – Free Channel Search
- FEC** – Forward Error Correction
- FFH** – Fast Frequency Hopping
- FH** – Frequency Hopping
- FHSS** – Frequency Hopping Spread Spectrum
- FS** – Fixed Secure
- FSK** – Frequency Shift Keying
- GFSK** – Gaussian Frequency Shift Keying
- GI** – Guard Interval
- GMSK** – Gaussian Minimum Shift Keying

<b>GPS</b>	– Global Positioning System
<b>GUI</b>	– Graphical User Interfaces
<b>HF</b>	– High Frequency
<b>ISM</b>	– Industrial, Scientific and Medical radio band
<b>MELP</b>	– Mixed Excitation Linear Prediction
<b>OFDM</b>	– Orthogonal Frequency Division Multiplex
<b>PDA</b>	– Personal Digital Assistant
<b>PSK</b>	– Phase Shift Keying
<b>QAM</b>	– Quadrature amplitude modulation
<b>QPSK</b>	– Quadrature Phase Shift Keying
<b>RSSI</b>	– Received Signal Strength Indication
<b>SFH</b>	– Slow Frequency Hopping
<b>SIG</b>	– Special Interest Group
<b>T-DAB</b>	– Terrestrial Digital Audio Broadcasting
<b>UHF</b>	– Ultra High Frequency
<b>VHF</b>	– Very High Frequency
<b>WLAN</b>	– Wireless Local Area Network

# A PŘÍLOHA

## A.1 Zdrojový kód programu – *Matlab*

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Prakticka cast bakalarske prace%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Adaptivni frekvencni skakani%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear all;  
close all;  
clc;  
  
% Deklarace zakladnich "promenych":  
  
pocet_paketu = 4200; % Pocet paketu urcenyh k prenosu.  
max_dynamickyh = 20; % Pocet dynamickyh rusicu.  
% Pocet statickyh rusicu (pasmo ruseni--Wifi).  
pocet_staticke_rusice = 30;  
% Definice po kolika cykleh se bude zнову delat statistika.  
refresh_cyklus = 700;  
hranice_max = 80; % V procentech  
max_nahraditelných = 25;  
kolik_odstranit = 0;  
  
% Inicializace pro generatory "randint".  
rand('seed',sum(clock) * 10000);  
  
% Nadefinovani matice urcujici kanaly pro staticke rusice.  
staticke_rusice = zeros(1, pocet_staticke_rusice);  
  
% Matice pro ulozeni cesty paketu (ktery kanal byl pro,  
% jaky paket vyuzit)  
% Matice, kde se uklada kanal, který byl pouzit pro prenos paketu -->  
% cesta paketu.  
pruchod_paketu_PRED_ReMapping = zeros(1, pocet_paketu);  
% Matice, kde je zahrnuta nahrada za spatne kanaly --> cesta paketu  
% po aplikace Re-Mapping function.  
pruchod_paketu_ReMapping = zeros(1, pocet_paketu);
```

```

% Matice pro ulozeni kolizi se statickym rusicem.
pruchod_paketu_PredReMapping_RND = zeros(1, pocet_paketu);
% Matice pro ulozeni kolizi s dynamcikym rusicem.
pruchod_paketu_PredReMapping_Static = zeros(1, pocet_paketu);
% Matice nesouci veskere kolize.
pruchod_paketu_KOLIZE_StaticDynamic = zeros(1, pocet_paketu);
bank_delete_channels = zeros(1,100); % Banka spatnych kanalu.

% Nadefinovani tabulky, kolizi na komunikacnim kanale urceny pro
% prenos s nejakym zarusenim <-- Statisticka tabulka, probiha zde
% inkrementace.

statistika = zeros(1, 100);
inkrementace = zeros(1, 100);

% Nadefinovani statickeho ruseni vetsiho pasma <-- WIFI (pres 20
% kanalu):

% Vygenerovani kanalu 1az80, kde je první kanal WIFI (celkem 20
% kanalu).
wifi = randint(1,1, 100 - pocet_staticke_rusice);
for i = 1 : 1 : pocet_staticke_rusice
    staticke_rusice(i) = wifi + i; % Zapis do matice pro cele pasmo
    %WIFI resp. pro "pocet_staticke_rusice" kanalu.
end

% Prenos vsehch paketu urcenyh k prenosu:
rand('seed', sum(clock) * 10000); %Inicializace pro gen. "randint".
for paket = 1 : 1 : pocet_paketu
    tabulka_Pasmo = zeros(1, 100); % Vytvoreni tabulky "Pasmo", kde
    %se v kazdem cyklu inicializuji zarusene kanaly rusici
    %(dynamickymi i statickymi).

% Reset. "statistiky" pro nove inkrementace v dalsim refresh-cyklu.
if((mod(paket - 1, refresh_cyklus) == 0) && (paket > 1))
    statistika = zeros(1, 100);
    inkrementace = zeros(1, 100);
end

```

```

% Ruseni statickymi rusici --> zapis do tabulky "Pasma".
for i = 1 : 1 : pocet_staticke_rusice
    tabulka_Pasma(staticke_rusice(i)) = 1; % Na misto v tabulce
    %"Pasma", se zapise "log 1" tam, kde je staticke ruseni.
end

% Ruseni dynamickymi (nahodnymi) rusici --> zapis do tabulky "Pasma".
% Vygeneruje kanaly pro dynamicke rusice v rozmezi 1-max_dynamickych.
for i = 1 : 1 : max_dynamickych
% Zapise do tabulky "Pasma", "log 1" vsude tam, kde pracuje nejaky
% dynamicky rusic.
    tabulka_Pasma(randint(1,1,100) + 1) = 1;
end

% Naplneni banky dobrych kanalu pro prvni refresh-cyklus (prvnich
% 700set), odkud se vybiraji nahrazujici kanaly AFH, dle prvniho
% paketu.

if (paket == 1)
    left_hranice_novych_good = wifi;
    cnt = 0; % Urceni nulove pozice v bank_good_channels.
    clear bank_good_channels;
    for i = 1 : 1 : 100
% Naplneni banky dobrych kanalu, pri spusteni samyma nulama,
% tzn. ze vsechny kanaly jsou good.
        cnt = cnt + 1; % Prvni pozice v bank_good_channels.
        bank_good_channels(cnt) = i; % Zapis do bank_good_channels.
    end
% Leva hranice, resp. prvni kanal spadajici do statickeho ruseni.
    static_left = wifi;
    if pocet_staticke_rusice < max_nahraditelnych
        static_right = wifi + pocet_staticke_rusice;
    else
        static_right = wifi + max_nahraditelnych;
    end
end
end

```

```

% Pro dalsi refresh-cykly se jiz banka dobrych kanalu plni dle
% statistiky vynasene kazdym refresh-cyklem a prislusnou hranici.
if((mod(paket, refresh_cyklus) == 0) && (paket > 1))
    clear bank_good_channels;
    statistika_ruseni_procent = zeros(1, 100);
    cnt_good = 0; % Poloha v bance je na 0.
    cnt_bad = 0; % Ma v sobe pocet spatnych kanalu.

    %Prevod na procenta z tabulek "inkrementace" a "statistika"
    %<-- ulozi se do tabulky "statistika_ruseni_procent".

for i = 1 : 1 : 100
    statistika_ruseni_procent(i) = statistika(i) * 100 /...
    inkrementace(i);
end

%Uchova si pro vykresleni BAR grafu hodnoty z behu, kdy se muze
%vybirat z pasma statickeho rusice.
if mod(floor(paket / refresh_cyklus), 4) == 1
    statistika_ruseni_procent_SHOW = zeros (1, 100);
    statistika_ruseni_procent_SHOW = statistika_ruseni_procent;
end

% Vyplneni banky dobrych kanalu (bank_good_channels) dle statistiky
% Vse, co lezi pod hranici jsou dobre (good) kanaly a vse co je nad
% hranici jsou spatne (bad) kanaly.

% HRANICE...dle maximalniho poctu, co dokaze technologie AFH
%nahradit (viz max_nahraditelných) --> narust.
% Na zacatku je hranice na 3% a pokud neni splnena podminka
% max_nahraditelných, tak se hranice zvysi.
    hranice = 3;

    % Algoritmus pro urceni a posouvani HRANICE, dle max. poctu
    %nahraditelných kanalu.
    while(1)
        for i = 1 : 1 : 100
            % Pri dane hranici si zjistim kolik je "good" a "bad" a

```

```

% kdyz nebude splena podminka, tak zvysuj(dalsi cast-nize).
% Hodnota pod hranici udava "good" kanal.
    if (statistika_ruseni_procent(i) < hranice)
        cnt_good = cnt_good + 1; % Poloha v bance.
        bank_good_channels(cnt_good) = i;
    else
        % Pocet spatnych kanalu.
        cnt_bad = cnt_bad + 1;
    end
end

% Programove nalezeni hranic vymezujujicich staticky rusic
%(pasma ruseni).
    ukazatel_left = 0; % Pomocna promenna pro hledani hranic pasma.
    ukazatel_right = 0; % Pomocna promenna pro hledani hranic pasma.
    static_left = 0; % Promenna pro ulozeni leve hranice pasma.
    static_right = 0; % Promenna pro ulozeni prave hranice pasma.
    delka_predchoziho_intervalu = 0;
    for i = 1 : 1 :100
        x = find(bank_good_channels == i);
        % Znamena, ze kanal 'i' nepatri do banky dobry kanal.
        if isempty(x)
            ukazatel_left = i;
            for j = (ukazatel_left + 1) : 1 : 100
                y = find (bank_good_channels == j);
                % Znamena, ze kanal 'j' nepatri do banky dobry
                % kanalu.
                if isempty(y)
                    ukazatel_right = j;
                else
                    break;
                end
            end
        end
    end
    if (ukazatel_right - ukazatel_left) > ...
        delka_predchoziho_intervalu
        static_left = ukazatel_left;
        static_right = ukazatel_right;
    end
end

```

```

        delka_predchoziho_intervalu = ...
            static_right - static_left;
end

% Nahodne vybere z intervalu statickeho rusice interval,
% který se bude brát jako dobré kanály (platí pouze v
% případě, že:
% počet statických rusic > max počet nahraditelných)

%Možnost, vybírání šířky 25 kanálu ze statického rusení.
%Zakomentovaná možnost znamená, že se bude vždy vybírat
%nahodně jinde totéž pásmo 25kanálu, když i odkomentujeme,
%tak musíme zakomentovat hned ten další if. Ten právě
%nastavený if znamená, že se vybírá vždy stejné pásmo
%25kanálu.
%if mod(floor(paket / refresh_cyklus), 4) == 1

    if (mod(floor(paket / refresh_cyklus), 4) == 1) && ...
        (paket <= refresh_cyklus)
        left_hranice_novych_good = 0;
        while(1)
            pocet_novych_good = pocet_staticke_rusice - ...
                max_nahraditelných;
            % Najdu interval ve statickém rusici, který označím
            % jako good channels.
            if pocet_novych_good > 0
                left_interval = randint(1,1,(static_right - ...
                    static_left) + 1) + static_left;
                if left_interval + max_nahraditelných < static_right
                    % Nášel jsem takovou levou hranici kde lze v
                    % rámci statického rusice označit interval jako good
                    % channels.
                    left_hranice_novych_good = left_interval;
                    break;
                end
            else
                break;
            end
        end
    end
end

```

```

end
if left_hranice_novych_good ~= 0
    for i = static_left : 1 : static_right
        if (i < left_hranice_novych_good) || ...
            (i > left_hranice_novych_good + ...
                max_nahraditelných)
            cnt_good = cnt_good + 1;
            cnt_bad = cnt_bad - 1;
            bank_good_channels(cnt_good) = i;
        end
    end
end

end

end

% Je potreba zvyšit hranici, pro splnění podmínky.
if(cnt_bad > max_nahraditelných)
    % Dojezd na fixní hranici (def. 80%).
    if hranice == hranice_max

        kolik_odstranit = cnt_bad - max_nahraditelných;
        bank_delete_channels = zeros(1,100);
        for i = 1 : kolik_odstranit
            while(1)
                rand_delete_kanal = randint(1,1,100) + 1;
                x = find(bank_good_channels == rand_delete_kanal);
                % Pokud je "x" empty tedy délka = 0, tak náhodně vybraný kanál není
                % v bance dobrých kanálů, tedy patří mezi špatné kanály.
                if isempty(x)
                    % Zde mám kanál, který patří mezi špatné, ale může se přidat pouze
                    % tehdy pokud, už nebyl do banky delete_channels přidán někdy předtím
                    if (bank_delete_channels(rand_delete_kanal) == 0)
                        break;
                    end
                end
                bank_delete_channels(rand_delete_kanal) = 1;
            end
            break;
        end
    else
        hranice = hranice + 1;
    end
end

```

```

        cnt_good = 0;
        cnt_bad = 0;
        clear bank_good_channels;
    end

    else
        break;
    end
end

% %      % Zobrazeni prubehu programu do "Command Window" v Matlabu.
% %      paket
% %      hranice
% %      cnt_bad
% %      kolik_odstranit
% %      max_nahraditelnych

end

% Master si vybere kanal, na kterem bude posílat paket
% (rozsah 1 az 100).
while(1)
    kanal_Master = randint(1, 1, 100) + 1; % Vyber kanalu 1az100

    % Podivam se jestli byl kanal vybrany z wifi
    jewifi = 0;
    if kanal_Master >= static_left && kanal_Master <= static_right
        jewifi = 1;
        break;
    end

    % "find" se podiva, zda kanal_Master je uvnitr bank_delete
    % _channels. (pokud neni uvnitr tak "x" je empty)
    x = find (bank_delete_channels == kanal_Master);
    if mod(floor(paket / refresh_cyklus), 4) ~= 0
        % Jednou za 4 cykly je mozne vybirat random cislo i z
        % "bad_channels".
        y = find (bank_good_channels == kanal_Master);

```

```

else
    y = 1;
end
% Pokud se y~=0, tak kanal_Master patril mezi good_channels.
if (isempty(x)) && (length(y) ~= 0)
    break;
end
end

inkrementace(kanal_Master) = inkrementace(kanal_Master) + 1;

% Ulozeni zvoleneho kanalu pro prislusny paket(pro graf cesta paketu)
if jwifi ~= 1
    pruchod_paketu_PRED_ReMapping(paket) = kanal_Master;
end

% Aplikace Re-Mapping function, kdyz se vybere obsazeny (spatny)
% kanal), vyber jako nahrada za zvoleny je z bank_good_channels.
if (tabulka_Pasmo(kanal_Master) == 1) || (jwifi == 1)
    % Inkrementace v tab. statistika pokud Master vybere zaruseny
    % kanal.
    statistika(kanal_Master) = statistika(kanal_Master) + 1;
    %Jelikoz je vybrany kanal spatny, tak se nahodne vybere
    %nahrada za nej z bank_good_channels:

    % "rnd_num" nahodne vybere pozici z banky, kde je ulozen
    % volny kanal.
    rnd_num = randint(1,1, length(bank_good_channels));
    % Osetreni,aby se nevzala nulta pozice v bance, pokud randint
    % vybere 0, tak se "rnd_num" prepise na 1.
    if rnd_num == 0
        rnd_num = 1;
    end

% Vyber kanalu Masterem, a zjisteni zvoleneho kanalu, kam patri.
if kanal_Master > wifi && kanal_Master < wifi + pocet_staticke_rusice
    pruchod_paketu_PredReMapping_Static(paket) = kanal_Master;
else
    pruchod_paketu_PredReMapping_RND(paket) = kanal_Master;
end

```

```

end

if max_nahraditelných < pocet_staticke_rusice
    if (kanal_Master < left_hranice_novych_good) || (kanal_Master >...
        left_hranice_novych_good + max_nahraditelných) ||...
        mod(floor(paket / refresh_cyklus), 4) == 0
        % Tahle promena obsahuje vsechny kanaly, kde nastala kolize.
        pruchod_paketu_KOLIZE_StaticDynamic(paket) = kanal_Master;
    end
    else
    if mod(floor(paket / refresh_cyklus), 4) == 0
        pruchod_paketu_KOLIZE_StaticDynamic(paket) = kanal_Master;
    end
end
% Kanal Mastera je zmenen na jiny - nahodny vyber z banky dobrych
% kanalu.
    kanal_Master = bank_good_channels(rnd_num);

    if mod(floor(paket / refresh_cyklus), 4) ~= 0
        pruchod_paketu_ReMapping(paket) = kanal_Master;
    end

end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Cast, kde se vykresluji graficke zavislosti:%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Vykresleni grafu, který znazornuje procentualni vyskyt kolizi pri
% prubehu komunikace (prenosu paketu)
%(Inkrementace tabulky "statistika").

figure (1)
% Vykresleni grafu typu BAR.
bar(1:100, statistika_ruseni_procent_SHOW, 'g')
title('Procentualni vyskyt kolizi pri komunikaci'); %Nazev grafu.
xlabel('Kanaly [-]'); % Popisek osy x.
ylabel('Vyskyt kolizi [%]'); % Popisek osy y.
xlim([0, 100]); % Rozsah osy x.

```

```

ylim([0, 100]); % Rozsah osy y.
grid on

% Prubeh komunikace - znazorneni FH (modre tecky), dale kanalu, kde
% nastala kolize (cervene tecky) a zobrazeni AFH neboli nahrady
% zelene tecky).

figure (2)
% plot (x,y,'parametry')
% Vykresleni dvou grafu do jednoho.
plot(1:pocet_paketu, pruchod_paketu_PRED_ReMapping, '.b',...
     1:pocet_paketu, pruchod_paketu_KOLIZE_StaticDynamic, '.r',...
     1:pocet_paketu, pruchod_paketu_ReMapping, '.g')
% Nazev grafu.
title('Prubeh komunikace: Kolize a jejich nahrady');
xlabel('Pakety [-]'); % Popisek osy x.
ylabel('Kanaly [-]'); % Popisek osy y.
legend('Skakani', 'Kolize', 'Nahrada')
xlim([0, pocet_paketu]); % Rozsah osy x.
ylim([1, 100]); % Rozsah osy y.
grid on

```