

# Analýza chování radiového systému s adaptivním frekvenčním skákáním v podmínkách intenzivního rušení

Ing. Radim Pust

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,  
Ústav telekomunikací, Purkyňova 118, 612 00 Brno, Česká republika  
email: [radim.pust@phd.feec.vutbr.cz](mailto:radim.pust@phd.feec.vutbr.cz)

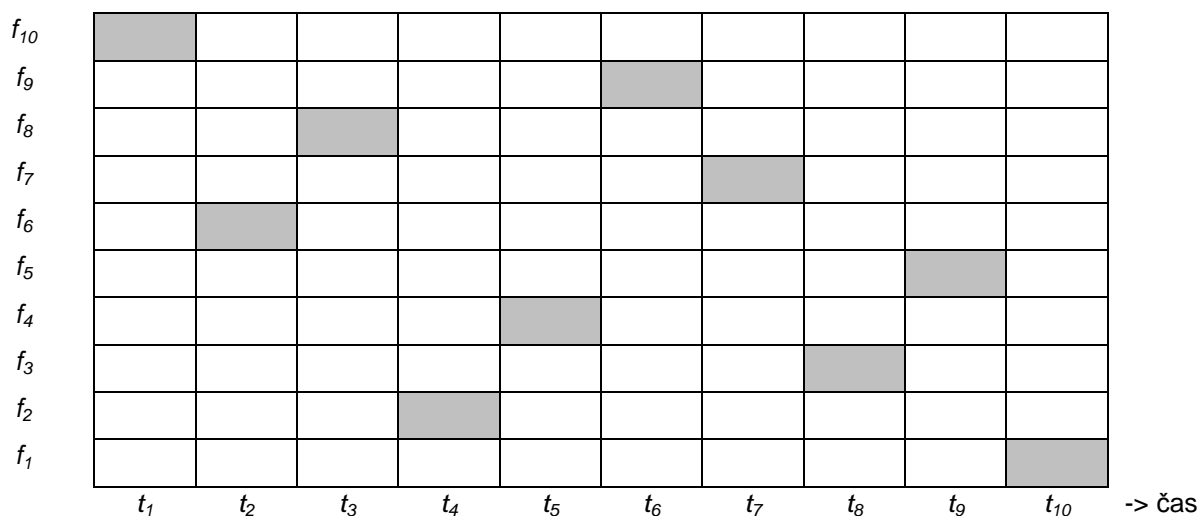
*Technika frekvenčního skákání je v radiové technice již známa řadu let, avšak v dnešní době nachází uplatnění ve stanicích, kde požadujeme vyšší odolnost vůči rušení případně utajení přenosu. Cílem tohoto článku je popsat matematické modely chování systémů s technikou frekvenčního skákání a adaptivního frekvenčního skákání v podmínkách intenzivního rušení a navzájem obě uvedené techniky porovnat.*

## 1. Úvod

Technika frekvenčního skákání (ang. Frequency hopping FH) patří do skupiny modulací s rozprostřeným spektrem. Technika FH je v zásadě úzkopásmovým přenosem v daném časovém okamžiku, nicméně v delším časovém úseku díky mnohonásobné změně nosné frekvence dojde k jejímu rozprostření do přiděleného kmitočtového spektra. Princip této techniky spočívá v rychlém přepínání kmitočtů nosné frekvence v pseudonáhodném pořadí, které je známo jak přijímači, tak vysílači. Fungování techniky FH ilustruje obrázek 1, kde dochází ke změně nosné frekvence v následujícím pořadí:  $f_{10}, f_6, f_8, f_2, f_4, f_9, f_7, f_3, f_5, f_1$ , přičemž  $f_i$  představuje kmitočet a index  $i$  číslo kanálu. Proměnná  $t_y$  představuje časový interval, kde index  $y$  značí pořadové číslo intervalu.

Zdokonalením této techniky je adaptivní frekvenční skákání (AFH), které používá algoritmy k eliminaci vlivu statických rušičů. Typy rušičů a technologie AFH je podrobněji popsána níže.

kmitočet



Obrázek 1: Princip techniky FH

S technikou frekvenčního skákání se v současné době setkáváme v různých licencovaných i nelicencovaných kmitočtových pásmech. Využití nachází v pásmech od několika málo megahertz přes stovky až po gigahertzové kmitočty.

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

## 2. Rušení FH a AFH systémů

Samotné zdroje rušení lze podle typu rozdělit do několika skupin a podskupin. První z nich je tzv. přirozené rušení, jedná se o přírodní zdroje rušení, které nelze nijak ovlivnit. Do druhé kategorie lze zařadit technické rušení patří sem všechna technická zařízení sestavená člověkem jako televizní vysílače, radionavigační majáky, radiostanice, mobilní telefony, rušiče atd.

Technické rušení lze z hlediska techniky FH rozdělit na statické nebo dynamické. Statické rušení se vyznačuje stálým kmitočtem a způsobuje trvalé souvislé rušení. Jako příklad tohoto rušení lze uvést televizní a rozhlasové vysílače. Dynamické rušení mění svůj kmitočet v čase, čili může způsobit ztrátu části přenášených informací. Typickým příkladem jsou právě ostatní systémy nebo stanice s technikou frekvenčního skákání. Podrobněji o rušičích [3].

Při použití digitálního modulace dochází vlivem rušení k chybnému dekódování přenášené informace na straně přijímače. Důsledkem jsou pozměněné bity tj. chybně přenesené bity. V závislosti na druhu rušení dochází k osamoceným chybám případně ke shluku chyb. Tyto chyby je nutné detekovat a buď sjednat nápravu prostřednictvím korekčních kódů, nebo opakovaným vysláním dat. Opakované přenášení dat není příliš vhodné, jelikož snižuje neúměrně přenosovou kapacitu linky. Proto se snažíme chyby eliminovat pomocí korekčních kódů tak, aby bylo možné na straně přijímače chyby spolehlivě nejen detekovat, ale i korigovat. Proti shlukům chyb lze užít prokládací matice. Použitím detekčních a korekčních kódů zvyšujeme redundanci přenášených dat a proto je třeba vhodně nastavit parametry kodérů. K optimální volbě uvedených parametrů lze využít výsledky získané z níže popsaných modelů.

Pravděpodobnost vzniku chyby v důsledku kolize komunikačního systému s rušičem  $P_{ERR}$  je dána vztahem (1), kde  $M$  je počet stavů modulace. Uvedený vztah platí za předpokladu, že signál rušiče má srovnatelnou úroveň s úrovní žádaného signálu.

$$P_{ERR} = \frac{(M-1)}{M} \quad (1)$$

### 3. Princip systému AFH

Dále vysvětlený algoritmus pro AFH je inspirován algoritmem, který používá technologie Bluetooth, viz [1] a [2]. Zaručené kanály jsou v praxi detekovány dle chybného kontrolního součtu či chybně přijaté hlavičky nebo na základě měření úrovní signálů na jednotlivých kanálech.

Technika AFH vyžaduje centrální řízení, proto musí být stanice rozděleny do rolí. Hlavní tj. řídicí roli má stanice Master, ostatní stanice jsou Slave. Stanice Master na základě získaných dat rozděluje kanály na dobré a špatné neboli na povolené a zakázané. Tato data pocházejí z vyhodnocení příjmu stanice Master. Stanice Slave může volitelně ovlivnit rozhodování stanice Master předáním vlastní tabulky dat získaných ze svého příjmu.

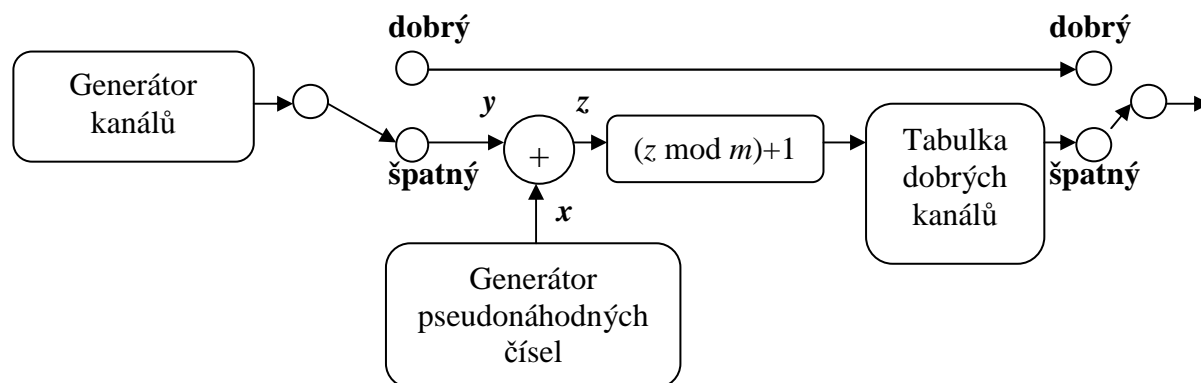
Po rozdělení kanálů na dobré a špatné je třeba předat stanici Slave seznam dobrých kmitočtů. Předání je v praxi realizováno pomocí pravidelně vysílaného rámce tzv. broadcastu. Může se stát, že nedojde k doručení broadcastu z důvodů náhlého zarušení kanálu i z tohoto důvodu je omezen maximální počet kmitočtů, které mohou být nahrazovány, tak aby nedošlo k úplné desynchronizaci stanic. Maximální počet kmitočtů, které mohou být nahrazeny udává proměnná  $R_{MAX}$ .

Pro potřeby našeho modelu je zavedena idealizace, kdy se předpokládá, že broadcast se seznamem špatných kmitočtů bude vždy doručen. Dále se předpokládá, že po dostatečně dlouhé době jsou odhaleny všechny statické rušiče.

Samotný generátor čísel kanálů AFH je shodný s generátorem čísel kanálů FH. U AFH však za generátorem následuje rozhodovací člen, který zjišťuje zda generátor vygeneroval kanál s označením dobrý nebo špatný. V případě volby kanálu označeného jako dobrý je výsledkem přímo číslo kanálu z generátoru.

V případě, že generátor vygeneruje číslo špatného kanálu je provedena jeho náhrada za kanál z tabulky dobrých kmitočtů. Je vhodné nahradit určitý špatný kanál pokaždé jiným dobrým kanálem. Z tohoto důvodu se provádí operace XOR bitů pseudonáhodně získaného čísla  $x$  s číslem vygenerovaného kanálu  $y$ . Následuje operace modulo  $k$  získání čísla řádku v rozsahu tabulky dobrých kmitočtů. Z příslušného řádku tabulky je vyčteno číslo dobrého kanálu. Celý proces generování čísla kanálu je uveden na obrázku 2, kde  $m$  je počet řádků tabulky s dobrými kanály.

Popsaná metoda je poměrně efektivní jelikož vyžaduje přenos pouze čísel špatných kanálů. Postačí bitové označení, které lze doplnit o některou z kompresních metod. Tím je zvýšena šance, že stanice Slave dostane včas a v pořádku informace potřebné k eliminaci vlivu rušičů.



Obrázek 2: Proces generování čísel kanálu pro AFH

Příklad:

Stanice Master vyhodnotila příjem a sestavila tabulku kanálů s rozdělením na dobré a špatné, z této tabulky sestavila tabulku dobrých kanálů.

Číslo kanálu	status kanálu
1	špatný
2	dobry
3	dobry
4	dobry
5	špatný
6	špatný
7	dobry
8	dobry
9	špatný
10	dobry

Řádek	Číslo kanálu
1	2
2	3
3	4
4	7
5	8
6	10

Generátor čísel kanálů techniky AFH vygeneruje číslo kanálu  $y = 8$ , tento kanál je dle tabulky kanálů označen jako dobrý a proto bude použit kanál 8.

Následně generátor vygeneruje číslo kanálu  $y = 5$ , který je označen jako špatný, pro rozhodování o číslu kanálu se tedy použije druhá větev generátoru AFH ve které je vygenerováno pseudonáhodné číslo  $x = 9$ . Provede se binární operace XOR s vygenerovaným číslem kanálu z generátoru kanálů a číslem z pseudonáhodného generátoru, tj.  $5 \text{ XOR } 9 = 12$ . Výsledná hodnota je přizpůsobena operací  $(z \text{ mod } m) + 1$  na počet řádků tabulky dobrých kanálů. Takže  $(12 \text{ mod } 6) + 1 = 1$ , výsledkem je číslo řádku v tomto případě 1. Z tabulky dobrých kanálů je vyčteno číslo kanálu z řádku 1 tedy 2 a tento kanál je použit pro komunikaci jako náhrada za špatný kanál 5.

## 4. Matematický model

Pro zjednodušení modelů pesimisticky předpokládáme, že rušiče ovlivňují přenos dat u všech stanic podle vztahu (1).

V modelu budeme sledovat spojení mezi dvěma stanicemi. Lze předpokládat, že stanice jsou součástí centrálně řízeného systému a jejich komunikaci nebudou tedy rušit ostatní stanice pracující pod stejným systémem. Vlivy přírodního rušení budeme považovat prakticky za zanedbatelné oproti vlivu ostatních typů rušení a proto nebudou v dále uváděných modelech uvažovány.

Pro jednoduchost se předpokládá, že šířka pásma každého z rušičů je stejná jako šířka pásma jednoho kanálu systému FH. Tedy jeden rušič dokáže plně zarušit maximálně jeden kanál. Dále předpokládáme, že doba změny kmitočtu je téměř zanedbatelná vůči periodě skoku. Tedy neuvažujeme čas nutný pro změnu kmitočtu.

Chování systému FH resp. AFH lze za těchto předpokladů popsat následujícím matematickým modelem. Předpokládáme, že v pracovním pásmu  $N$  kanálů je statickými rušiči obsazeno  $R$  kanálů a v tomtéž pásmu nezávisle pracuje dalších  $S$  dynamických rušičů tj. systémů pracujících v případě FH systému technikou FH resp. v případě AFH systému technikou AFH. Žádné další rušiče (např. sledující) nepředpokládáme.

Pravděpodobnosti kolize resp. skoku FH systému na zarušený kanál je dána vztahem:

$$P_{FH} = 1 - \left( \frac{N-R}{N} \right) \left( \frac{N-1}{N} \right)^S \quad (2)$$

První činitel součinu v (2) reprezentuje pravděpodobnost toho, že FH stanice se naladí na kanál, který není rušen statickým rušičem. Například pokud v pásmu o  $N = 100$  kanálech je staticky rušeno  $R = 20$  kanálů, tak pravděpodobnost, že náhodně vybraný kanál nebude zarušen uvedeným typem rušiče je 0,80.

Druhý činitel reprezentuje pravděpodobnost, že na náhodně vybraném kanálu nevysílá žádný z  $S$  dynamických rušičů, tj. všech  $S$  rušičů se nachází na některém z  $(N-1)$  jiných kanálů z  $N$  možných. Například pokud se v pásmu o  $N = 100$  kanálech vyskytuje  $S = 20$  dynamických rušičů, tak pravděpodobnost, že náhodně vybraný kanál nebude zarušen uvedeným typem rušiče je 0,82.

Dále vypočteme výslednou pravděpodobnost dvou nezávislých jevů (pro statické a dynamické rušiče), která je dána jejich součinem tj. v našem příkladu  $0,80 \cdot 0,82 = 0,656$ . Dostaneme tak pravděpodobnost skoku na nezarušený kanál. My však hledáme jev opačný tj. pravděpodobnost skoku na zarušený kanál, proto vypočtenou pravděpodobnost odečteme od 1 a dostaneme tak výslednou pravděpodobnost  $P_{FH}$ .

Například pokud v pásmu o  $N = 100$  kanálech kde současně pracuje  $R = 20$  statických rušičů a  $S = 20$  dynamických rušičů, tak pravděpodobnost, že náhodně vybraný kanál nebude zarušen uvedeným typem rušičů je rovna hodnotě  $P_{FH} = 1 - 0,656 = 0,344$ .

Analogicky pravděpodobnosti kolize resp. skoku AFH systému na zarušený kanál je dána vztahem (3), kde  $R_{MAX}$  je maximální počet nahrazovaných kanálů systémem AFH :

$$P_{AFH} = 1 - \left( \frac{n-r}{n} \right) \left( \frac{n-1}{n} \right)^S \quad (3)$$

$$n = \begin{cases} N - R, & R \leq R_{MAX} \\ N - R_{MAX}, & R > R_{MAX} \end{cases} \quad r = \begin{cases} 0, & R \leq R_{MAX} \\ R - R_{MAX}, & R > R_{MAX} \end{cases}$$

Výpočet pravděpodobnosti kolize pro systém AFH probíhá podobně jako pro FH. Systém AFH disponuje korekčními schopnostmi vůči statickým rušičům, proto jsou proměnné  $N$ ,  $R$  nahrazeny  $n$ ,  $r$ . Z principu činnosti systému AFH vyplývá, že snižuje celkový počet používaných kanálů  $N$  v závislosti na počtu statických rušičů  $R$ , maximálně však o  $R_{MAX}$ , tuto skutečnost zohledňuje proměnná  $n$ . Dále systém AFH je schopen zcela eliminovat vliv rušičů statických o počtu  $R$ , ale maximálně do počtu  $R_{MAX}$ , tuto skutečnost zohledňuje proměnná  $r$ .

Chování proměnných  $n$ ,  $r$  je tedy třeba rozdělit do dvou intervalů. První interval vymezuje chování proměnných, kdy počet statických rušičů  $R$  je nižší nebo roven hranici  $R_{MAX}$ . Druhý interval vymezuje chování proměnných, kdy počet statických rušičů  $R$  je vyšší než hranici  $R_{MAX}$ .

Například pokud máme stanovenou hranici  $R_{MAX} = 20$  kanálů a v pásmu o  $N = 100$  kanálech je staticky rušeno  $R = 10$  kanálů, nacházíme se tedy v prvním intervalu. Systém AFH uvedené statické rušiče detekuje a kanály obsazené těmito rušiči přestane užívat.

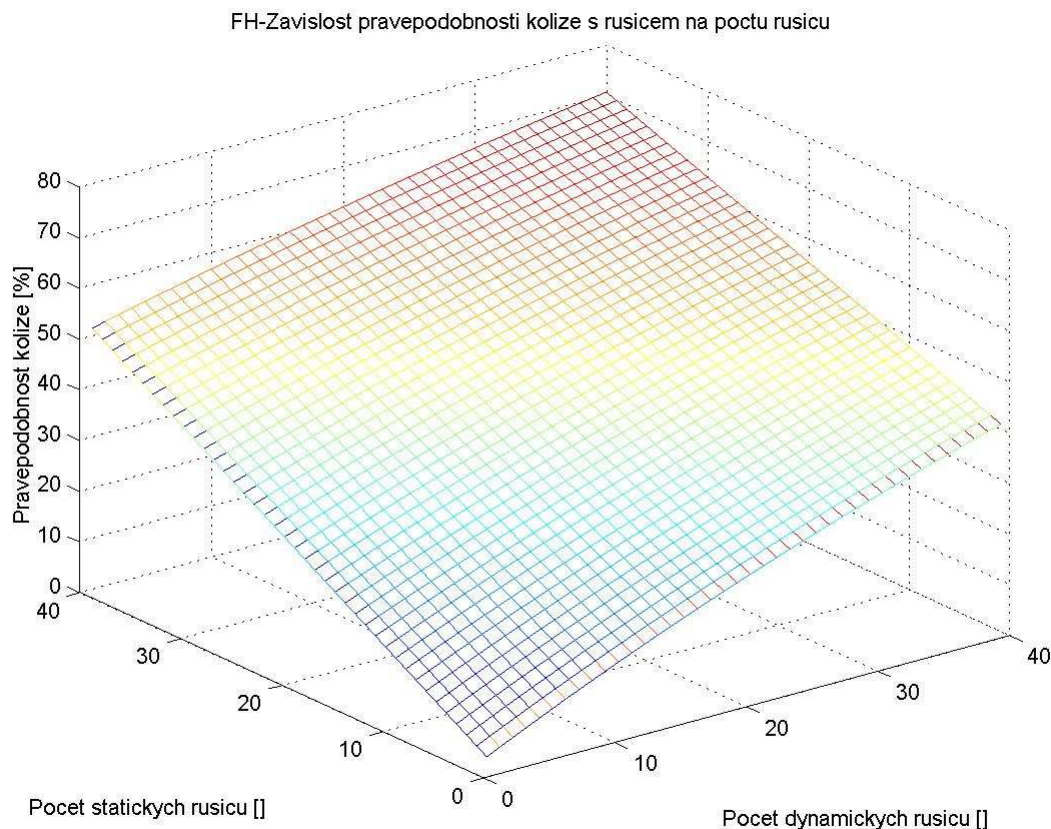
Tím dojde ke snížení celkového počtu využívaných kanálů o celkový počet statických rušičů  $R$  na  $n = N - R = 100 - 10 = 90$  kanálů. Současně v pásmu o  $n$  kanálech se již nenachází další statické rušiče proto  $r = 0$ .

Pokud bychom za stejných podmínek  $R_{MAX} = 20$  kanálů a  $N = 100$  kanálů uvažovali počet staticky zarušených kanálů  $R = 30$ , pak bychom překročili korekční schopnosti techniky AFH a nacházíme se tak v druhém intervalu, kde systém AFH vyřadí z užívání maximální počet nahrazovaných kanálů. Tím dojde ke snížení celkového počtu využívaných kanálů na  $n = N - R_{MAX} = 100 - 20 = 80$  kanálů. Současně v pásmu o  $n$  kanálech se již nenachází původních  $R = 30$  rušičů, ale méně o  $R_{MAX}$ , proto počet statických rušičů v pásmu o  $n$  kanálech je roven  $r = R - R_{MAX} = 30 - 20 = 10$  rušičů.

Popsané úpravy popisují redukci počtu používaných kanálů a počtu staticky rušených kanálů tak, jak ji provádí technika AFH. V takto adaptovaném pásmu již technika AFH dále pracuje jako technika FH a tak je možné použít pro její popis vztah (2).

## 5. Získané výsledky

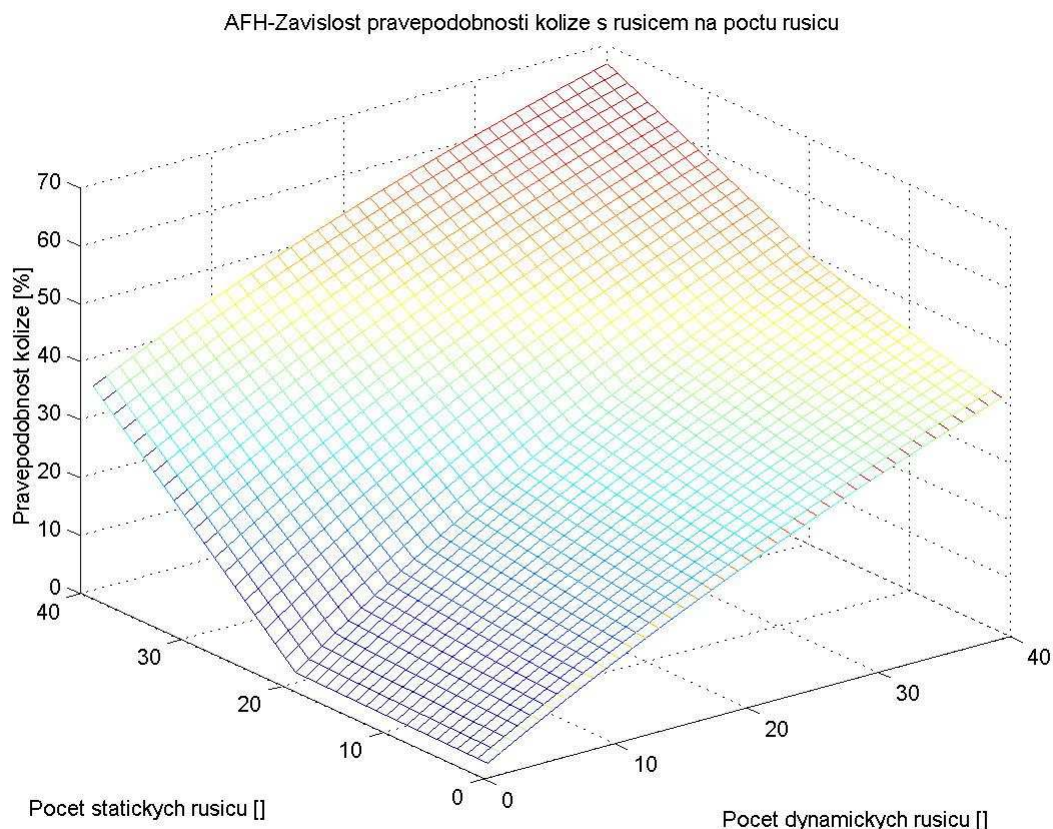
Ze získaných vztahů (2) a (3) lze vykreslit závislosti pravděpodobnosti kolize na počtu statických i dynamických rušičů působících současně. Níže uvedené grafy jsou vypočteny v rozsahu  $R = 1$  až 40 statických rušičů a  $S = 1$  až 40 dynamických rušičů, v pásmu s celkovým počtem  $N = 79$  kanálů. Takovéto parametry odpovídají prakticky používanému systému Bluetooth. Pravděpodobnost kolize pro systém FH dle (2) ilustruje obrázek 3.



Obrázek 3: Pravděpodobnosti kolize systému FH v pásmu se statickými i dynamickými rušiči

Na tomto obrázku je vidět, že zatímco pravděpodobnost kolize se statickým rušičem roste v závislosti na jejich počtu lineárně, tak pravděpodobnost kolize s dynamickým rušičem stoupá v závislosti na jejich počtu nelineárně. Tato skutečnost je dána tím, že dynamické rušiče se mohou navzájem kmitočtově překrývat.

Pravděpodobnost kolize pro systém AFH s  $R_{MAX} = 20$  kanálů je zobrazena na obrázku 4. Z grafu lze odečíst, že korekční schopnosti systému AFH jsou v daném rozsahu proměnných  $R$  a  $S$  účinné zejména proti rušičům statickým.

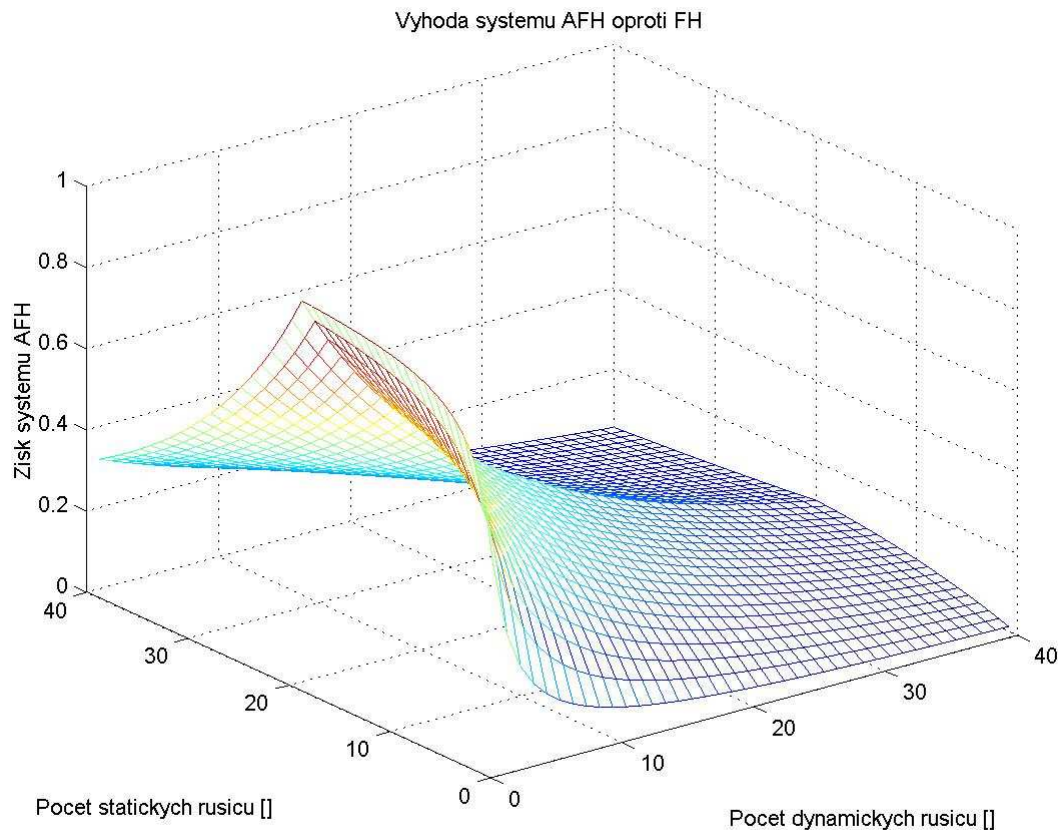


Obrázek 4: Pravděpodobnosti kolize systému AFH pro  $R_{MAX} = 20$  v pásmu se statickými i dynamickými rušiči

Srovnání obou systémů lze provést dle vztahu (4), kde odečteme pravděpodobnosti kolize u obou technik tj. FH od AFH a výsledek vztáhneme k pravděpodobnosti kolize u techniky FH. Získáme tak výsledný zisk  $G$  techniky AFH. Kladný výsledek znamená výhodu systému AFH, záporný naopak jeho nevýhodu oproti systému FH.

$$G = \frac{P_{FH} - P_{AFH}}{P_{FH}} \quad (4)$$

Závislost (4) pro námi analyzovaný systém reprezentuje graf, který je na obrázku 5. Z uvedeného grafu lze vyčíst jasnou výhodu techniky AFH použitou u systému Bluetooth v rozsahu  $R = 1$  až 40 statických rušičů a  $S = 1$  až 40 dynamických rušičů.



Obrázek 5: Srovnání systému FH s AFH pro  $R_{MAX} = 20$  v pásmu se statickými i dynamickými rušiči

Z obrázku 5 je patrné, že technika AFH dosahuje nejvyšších hodnot zisku  $G$  pro statické rušiče. Pro dynamické rušiče použitá technika AFH vcelku pochopitelně nenabízí podstatné zlepšení. Dále je z uvedeného grafu zřejmé, že pro malé hodnoty  $S$  v případě statických rušičů narůstá zisk  $G$  pro  $R \leq 10$  nejrychleji. Poté však již zisk narůstá jen pozvolna do  $R \approx 20$  což je hodnota hranice  $R_{MAX}$ . Aplikací (2) lze ukázat, že pro  $R \geq 20$  a malá  $S$  zisk již prakticky stagnuje. Tato skutečnost potvrzuje správnost volby hodnoty  $R_{MAX}$  tvůrců systému Bluetooth.

## 6. Závěr

V článku je popsán princip činnosti techniky FH a od ní odvozené techniky AFH. Dále je v článku odvozen matematický model, pomocí něhož je možné modelovat pravděpodobnosti kolizí s rušiči u systémů FH i AFH v prostředí jak se statickými tak dynamickými rušiči. Správnost matematického modelu byla ověřena počítačovými simulacemi.

Vzhledem k zavedeným idealizacím jsou výsledky popsané techniky AFH ty nejlepší jakých lze dosáhnout. V praxi totiž žádný systém AFH v prostředí s nezávisle pracujícími dynamickými rušiči nemůže být lepší. Navržený model umožňuje posoudit přínos techniky AFH oproti FH. Zároveň umožňuje posoudit potřebné parametry pro kódové zabezpečení přenosu.

Do budoucna předpokládáme model rozšířit i o jiné perspektivní techniky AFH systémů a pokusíme se odstranit některé z idealizací. Taktéž předpokládáme zformulovat obecná kritéria pro návrhu parametrů AFH systémů.

## Použitá literatura:

- [1] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Society. IEEE Std 802.15.1-2005, Part 15.1: Wireless MAC and PHY specifications for WPANs. [ieee.org](http://www.ieee.org) [online]. červen 2005 [cit. 20. březen 2008].  
Dostupné na WWW:< <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.1-2005.pdf>>.
- [2] B. Treister et. al., KC Chen et. al., A. Batra et. al.. Clause 14.3 Adaptive Frequency Hopping. [ieee.org](http://www.ieee.org) [online]. červenec 2001 [cit. 20. březen 2008].  
Dostupné na WWW:  
< [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) >.
- [3] Burda, Karel. Optimalizace bezpečnostního kódování pro radiové stanice s kmitočtovým skákáním. Brno: Habilitační práce, 1999.