



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
katedra telekomunikační techniky**

Dynamické sdílení spektra

Dynamic Spectrum Sharing

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Síťové a informační technologie

Vedoucí práce: Ing. Robert Beš'ák, Ph.D.

Jakub Staněk

Praha 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne

.....

Anotace:

Postupné zvyšování objemu dat přenášených po rádiových vlnách žádá efektivnějšího využití kmitočtového spektra. Dynamické sdílení spektra kognitivních sítí tento problém řeší. Monitorování spektra, rozhodování o připojení uživatele, sdílení spektra a změna spektra – funkce správy spektra kognitivního rádia společně s dalšími výzvami této nové generace sítí jsou v práci detailně popsány. Různé způsoby přidělování částí frekvenčního spektra jsou porovnány simulací.

Klíčová slova: Kognitivní rádiové sítě, správa spektra, dynamické sdílení spektra

Summary:

An increasing amount of information transmitted over radio frequencies demands more effective utilization of frequency spectrum. Cognitive radio dynamic spectrum sharing deals with that problem. Spectrum sensing, spectrum decision, spectrum sharing and spectrum mobility – the spectrum management functions as well as additional challenges are explained in detail thorough the paper. The simulation compares different options of spectrum allocation.

Index Terms: Cognitive radio networks, Spectrum management, Dynamic spectrum sharing

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Robertu Bešťákovi, Ph.D. za cenné odborné i metodické rady při zpracování této bakalářské práce i za další pomoc přesahující její rámec.

Obsah

1 Úvod	1
2 Kognitivní rádiové sítě	2
2.1 Softwarově definované rádio	2
2.2 Kognitivní rádio	4
2.3 Uživatelé kognitivního rádia	5
2.4 Digitální dividenda	5
3 Správa spektra v kognitivních sítích	7
3.1 Monitorování spektra	7
3.1.1 Detekce energie	8
3.1.2 Cyklostacionární detekce	8
3.1.3 Detekce přizpůsobeným filtrem	9
3.2 Rozhodování o připojení sekundárního uživatele	9
3.3 Sdílení spektra	10
3.4 Změna spektra	11
3.5 Predikce pohybu	11
4 Topologie kognitivních rádiových sítí	13
4.1 Distribuované kognitivní sítě	13
4.2 Centralizované kognitivní sítě	13
4.2.1 Výměna informací mezi uživateli a centrální jednotkou	15
5 Model a výsledky simulace	16
5.1 Model	16
5.2 Doba přidělení spektra	18
5.3 Výsledky simulace	21
5.3.1 Alokace spektra po proměnnou dobu	21
5.3.2 Alokace spektra po konstantní dobu	22
5.3.3 Alokace spektra na dobu neurčitou	24
5.3.4 Porovnání metod	25
6 Závěr	27
Seznam zkratk	28
Literatura	29

1 Úvod

V dnešní době se frekvenční spektrum pro bezdrátovou komunikaci rozděluje staticky státními úřady k tomu určenými. V České republice je národním regulátorem kmitočtového spektra Český telekomunikační úřad (ČTÚ). Ten na určitá kmitočtová pásma prodává dlouhodobé licence, platné na velkém území. Tato pásma jsou ale často z velké části nevyužita a tím dochází k plýtvání cenných frekvenčních pásem.

Řešením je spuštění kognitivního rádia, které je rozšířením schopností softwarově definovaného rádia. Aby kognitivní síť dokázala tato staticky přidělená spektra dynamicky nabídnout uživatelům, kteří by obvykle neměli licenční právo na těchto frekvencích vysílat, je třeba řešit efektivní správu kmitočtového spektra. Ta řeší problémy spojené s rozlišením volných frekvenčních míst a jejich spravedlivé rozdělení mezi uživatele s ohledem na jejich právo zde vysílat. S využitím znalostí prostoru a času je možno naprogramovat pokročilé algoritmy predikce pohybu a tím zlepšit kvalitu spojení většiny uživatelů.

Práce je rozdělena do pěti kapitol. V té druhé je rozebrán vztah mezi kognitivními a softwarově definovanými sítěmi a poté je blíže vysvětlena problematika frekvenčního spektra a uživatelů. Ve třetí kapitole práce popisuje schopnosti, které by kognitivní síť měly mít, aby správně určily nevyužité spektrum, vybraly nejvhodnější kanál, přiřadily kanál uživateli a v případě potřeby ho zase uvolnily. Také je zde uveden příklad předpovědi pohybu uživatelů. Ve čtvrté kapitole jsou zmíněny distribuované kognitivní síť a u centralizovaných je navržena topologie spolu s potřebnými informacemi, které je potřeba dodat k její správné činnosti. Na jednu z otázek přidělování spektra v centralizovaných kognitivních sítích se snaží odpovědět kapitola poslední. Pomocí vlastního modelu jsou porovnány tři různé metody podle doby propůjčení části frekvenčního spektra.

2 Kognitivní rádiové sítě

Rádiové sítě pracují na frekvencích přibližně od 3 kHz do 300 GHz, které se nazývají rádiové vlny. Mezi jejich největší výhody patří mobilita jednotlivých uzlů a univerzálnost. Nevýhodou bezdrátových sítí je nestálé přenosové médium – vzduch.

Speciálním případem rádiových sítí jsou buňkové rádiové sítě. Ty využívají statických vysílačů – základnových stanic k pokrytí buněk. Rozdělením území soustavou buněk lze zlepšit celkovou kapacitu sítě použitím stejného kmitočtu ve více buňkách. Využití stejného kmitočtu v sousedních buňkách je možné pouze použitím vícenásobného přístupu kódovým dělením (CDMA, *Code Division Multiple Access*) nebo ortogonálního multiplexu s kmitočtovým dělením (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Počet uživatelů toužících po přístupu k internetu a zároveň velikost médií na internetu se zvyšuje. Z toho plyne potřeba zvýšení kapacity a propustnosti v rádiových sítích. Propustnost je úzce spojena s kapacitou kanálu, která je podle Shannon–Hartleyova teorému (rovnice 1) přímo úměrná šířce kanálu:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

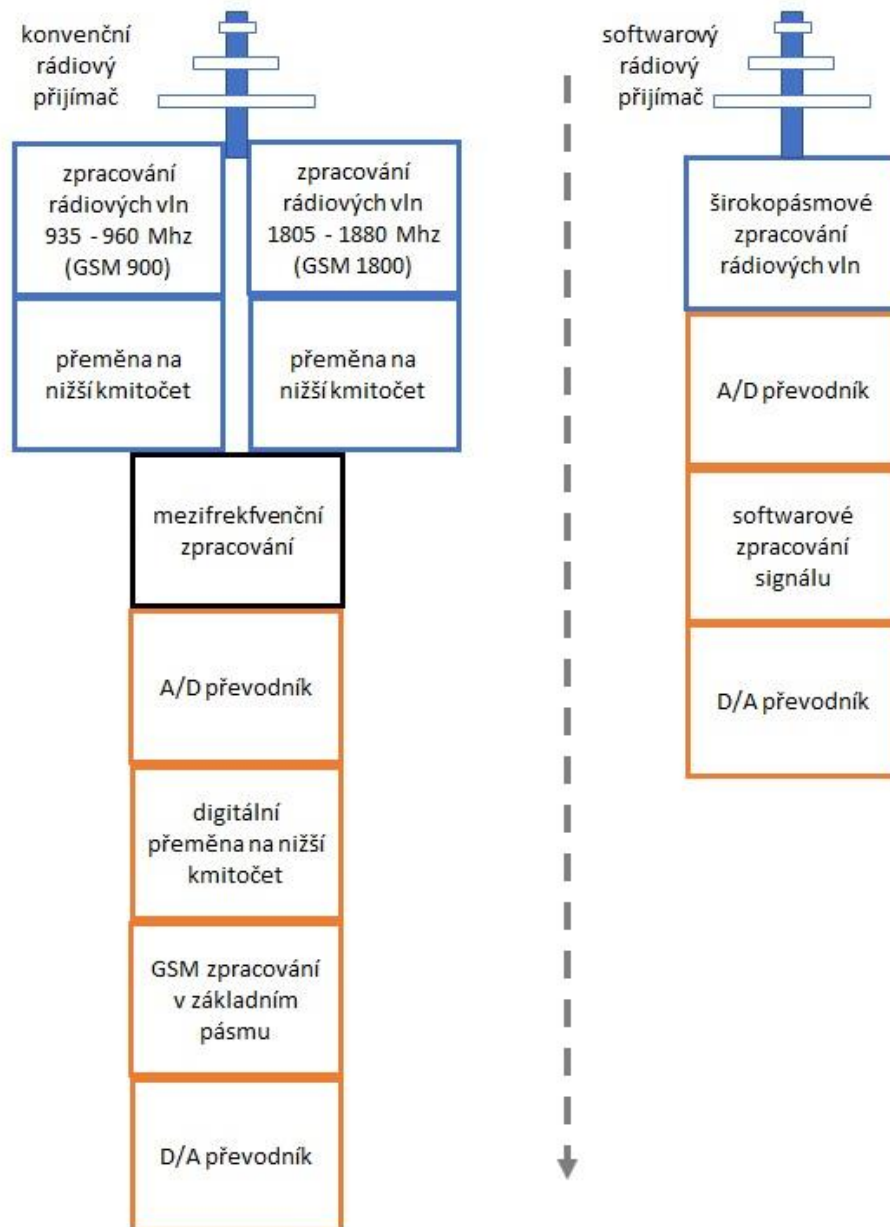
kde C je kapacita kanálu v bitech za sekundu, B je šířka kanálu v hertzech a SNR (*Signal to Noise Ratio*) je poměr výkonu signálu k výkonu šumu. Pro přenos informací vzduchem na velké vzdálenosti bez nutnosti přímé viditelnosti jsou vhodné jen nízké kmitočty do jednotek GHz, z čehož plyne omezená šířka pásma. Problémem je, že toto přírodní bohatství není efektivně využíváno. Frekvenční pásma jsou rozdělována Českým telekomunikačním úřadem podle druhu provozované služby a některá jsou dále nabízena k prodeji v aukci. Takto staticky rozdělené spektrum není rovnoměrně vytíženo z pohledu typu služby, z pohledu počtu uživatelů využívajících danou službu ani z pohledu využití v čase. Většinu času tedy není převážná část spektra maximálně využita. V okamžiku, kdy je některý z kanálů kapacitně vytížen, je pravděpodobné, že některý z blízkých komunikačních kanálů není.

Kognitivní rádiové sítě dokáží určitou část frekvenčního spektra monitorovat, a pokud je např. cizí část spektra volná, začnou zde vysílat, aniž by ovlivnily kvalitu služby cizích uživatelů na těchto frekvencích. Aby kognitivní rádio bylo co možná nejuniverzálnější se snadnou implementací chování a pravidel sítě, staví na technologii softwarově definovaného rádia.

2.1 Softwarově definované rádio

Softwarově definované rádio (SDR, *Software Defined Radio*) nebo také Softwarové rádio (SR, *Software Radio*) je technologie přinášející inovaci v technice zpracování rádiového signálu. Publikace [1] odlišuje SDR od SR v míře nahrazení hardwarových součástí softwarovou logikou. SDR je blíže konvenčním rádiovým zařízením než SR. U SDR dochází na straně přijímače k softwarovému

zpracování až za anténou, širokopásmovým filtrem, zesilovačem a konvertorem na nízkou frekvenci. Softwarové rádio má část softwarového zpracování co nejbližše anténě.



Obr. 1: Klasický a softwarový rádiový přijímač [1]

Na obrázku 1 je provedeno porovnání přijímačů založených na běžných dedikovaných hardwarových blocích a softwarově definovaných. Je vidět, že softwarový přijímač je založen na menším počtu méně specializovaných hardwarových blocích, které většinou slouží jako prostředí pro běh softwaru.

Důležitými vlastnostmi softwarově definovaných rádiových zařízení jsou vícepásmovost (*multiband*), tj. schopnost zařízení pracovat v několika kmitočtových pásmech, a schopnost práce ve více režimech (*multimode*), např. použití různých metod přístupu nebo modulačních technik. Splnění těchto požadavků vede k sestrojení zařízení kompatibilních se všemi lokálními přenosovými standardy. Schopnost zařízení pracovat v evropských GSM (*Global System for Mobile Communications*) sítích a zároveň v kanadských CDMA je pouze otázkou nahrání odpovídajícího softwaru. Použití SDR zjednodušuje opravu chyb a zlepšuje přizpůsobivost zařízení novým trendům, tím zpomaluje jejich stárnutí.

2.2 Kognitivní rádio

Klíčem k realizaci kognitivních rádiových sítí je právě SDR. „Kognitivní rádio je SDR, které si je vědomo svého prostředí, vnitřního stavu, místa a samo přizpůsobuje svou činnost tak, aby dosáhlo vytyčených cílů.“ [2] Přizpůsobování činnosti je prováděno převážně změnou rádiových parametrů, kterými jsou např. frekvence, výkon, šířka pásma nebo modulace, pomocí SDR. Těmto změnám předchází změny v prostředí, které ovlivňují vlastnosti vysílání v síti včetně připojených uživatelů. Ideálně se kognitivní rádio naučí tyto změny předpovídat, což povede ke zkrácení doby potřebné pro reakci systému. Vztah mezi kognitivním rádiem a softwarově definovaným rádiem je na obrázku 2 [2]. Použité výrazy jsou vysvětleny v kapitole tři.



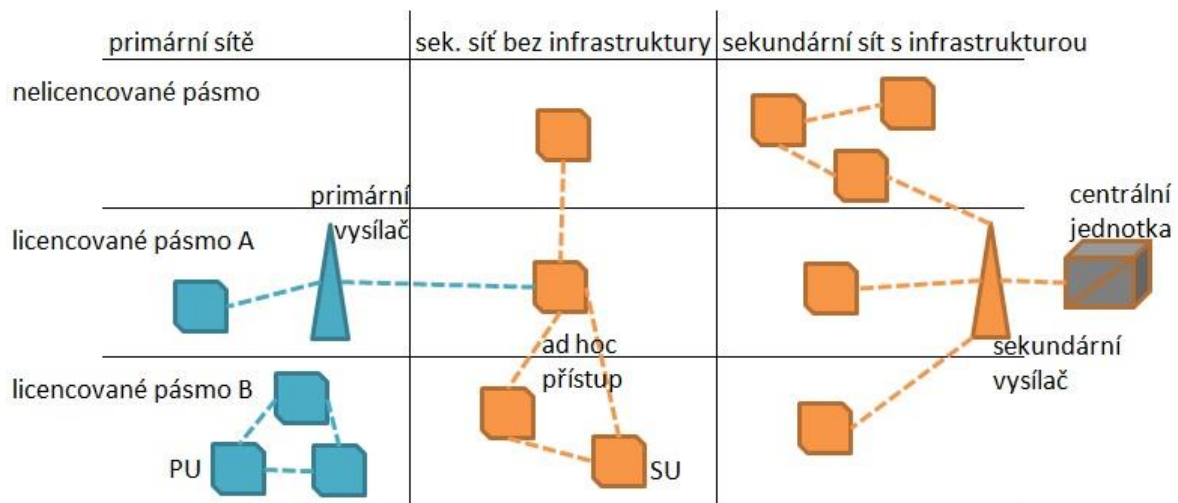
Obr. 2: Vztah mezi kognitivním rádiem a SDR

Použití kognitivních sítí s sebou může nést výhody v podobě lepšího využití frekvenčního spektra, zlepšení kvality služby (QoS, *Quality of Service*), propustnosti a zabezpečení. Na druhou stranu jejich zavedení zvýší potřebný výpočetní výkon, vzrostou výdaje spojené s implementací nové architektury a vyškolením odborníků. Při rozhodování o zavedení kognitivních sítí se musejí tyto skutečnosti vzít v úvahu. V kabelových sítích bez změn a pohybu uživatelů bude mít implementace této technologie jen malý dopad na zlepšení služeb.

2.3 Uživatelé kognitivního rádia

V licencovaných kmitočtových pásmech rozlišujeme dva druhy uživatelů. Primární uživatele (PU, *Primary Users*), kteří jsou připojeni k tzv. primární síti, která vlastní licenci pro komunikaci v daném pásmu. Sekundární uživatele (SU, *Secondary Users*), kteří přistupují ke kognitivní rádiové síti (sekundární síti), která danou licenci nemá. Proto musí umět přistupovat k sdílenému licencovanému pásmu tak, aby sekundární uživatelé PU nijak nerušili. Toto je také nazýváno jako vertikální sdílení spektra.

V nelicencovaných kmitočtových pásmech chybí primární uživatelé. Všichni mají stejné právo vysílat (horizontální sdílení spektra), tudíž je potřeba aplikace spravedlivé metody pro sdílení spektra. Příkladem takové koexistence sítí jsou Bluetooth a WiFi na 2,4 GHz. Musí se také počítat s tím, že někteří uživatelé mohou být na staré síti nepodporující metody kognitivního rádia.



Obr. 3: Primární a sekundární (kognitivní) rádiové sítě [3]

V obrázku 3 jsou mj. ilustrovány architektury kognitivních sítí. Ty mohou být bez infrastruktury – distribuované nebo s infrastrukturou – centralizované. Distribuované fungují na principech ad hoc přístupu, případně některý z uživatelů může přistupovat i na vysílač primární sítě. V centralizovaných sítích jsou SU připojeni k sekundárnímu vysílači, který je dále napojen na centrální jednotku.

2.4 Digitální dividenda

Digitalizace televizního a rozhlasového vysílání je proces, ve kterém země ukončují analogové vysílání na frekvencích pro to určených (do 900 MHz). Členské země Evropské unie se shodly na ukončení analogového televizního vysílání nejpozději v roce 2012. Jediné Polsko dohodu nedodržel s ročním zpožděním.

Díky nízké náročnosti digitálního vysílání na šířce frekvenčního pásma jsou některé kmitočtové rozsahy uvolněny a připraveny k dalšímu použití. Tyto nízké frekvence (asi 470 – 790 MHz [4]) jsou cenným prostředkem pro vykrývání rozlehlých území malým počtem vysílačů a efektivním přístupem signálu budovami. Dále se v rámci jednoho území nevysílá na stejných nebo sousedních kanálech, aby nedošlo k rušení. Toho by jednoduše mohly využít kognitivní sítě pro své potřeby.

3 Správa spektra v kognitivních sítích

Kognitivní sítě společně s jejich uživateli jsou schopny práce jak v licencovaném, tak nelicencovaném frekvenčním pásmu. V obou případech je nutné zajistit, aby nejlépe vůbec nenarušovaly komunikaci primárních uživatelů a zároveň využily co nejvíce dostupných děr ve spektru. Je potřeba je navrhnout a postavit tak, aby správně fungovaly po boku nynější generace sítí.

Řešení zmíněné správné správy spektra bude docíleno tehdy, budou-li následující problémy efektivně řešeny [5]:

- Monitorování spektra (*Spectrum sensing*)
 - Sekundárním uživatelům v kognitivním rádiu je dovoleno využití jen právě nevyužívaného spektra. Proto by kognitivní síť měla rychle a bezchybně určit, zda na daném kanále vysílá primární uživatel.
- Rozhodování o připojení SU (*Spectrum decision*)
 - Po nalezení volného místa v dané lokaci, čase i frekvenci by se ještě před jeho přidělením měla vzít v potaz statisticky vzatá četnost výskytu vysílání primárních uživatelů. Dále je potřeba kontroly potenciálního místa, jestli splňuje QoS pro službu požadovanou sekundárním uživatelem.
- Sdílení spektra (*Spectrum sharing*)
 - Na možnost vysílat může čekat více sekundárních uživatelů. Je potřeba vymyslet spravedlivý a efektivní způsob přidělování volného spektra.
- Změna spektra (*Spectrum mobility*)
 - Primární uživatel má výhradní právo na přenos. Proto pokud si vyžádá část spektra již využívaného sekundárním uživatelem, bude mu přidělen. Komunikace sekundárního uživatele je převedena na jiný dostupný kanál nebo pokračuje s vysílacím výkonem tak malým, že primárního uživatele neovlivňuje.

3.1 Monitorování spektra

Z hlediska obsazenosti spektra signálem jsou rozlišována tato základní místa, která [6][7]:

- obsahují pouze šum (*White spaces*). Příležitosti k vysílání jsou dány volnými místy z pohledu místa, času a frekvence.
- včetně šumu obsahují i interference (*Gray spaces*). Příležitosti k vysílání jsou získány použitím vyššího vysílacího výkonu nebo použitím vysílání rozprostřeným spektrem.
- jsou plná již probíhající komunikací (*Black spaces*). Místa bez příležitostí k vysílání, aniž by byla ovlivněna komunikace okolních uživatelů.

Při vyhodnocování nejlepší metody monitorování spektra je v zájmu především detekce a správná identifikace děr ve spektru. Důležitá je identifikace míst jen se šumem a po správném určení výkonového spektra i těch s rušením. Dále sledováním směru příchodu interferencí je získán pojem

o prostoru [6]. Sledování spektra by také mělo sledovat, jestli chování dané kognitivní sítě nekale neovlivňuje primárního uživatele.

Dále v textu jsou stručně popsány některé techniky monitorování [5][8], seřazené podle komplexnosti jejich realizace. Lze je rozdělit podle detekce na detektory primárních vysílačů (níže uvedené) a primárních přijímačů. Detekce primárních přijímačů je založena na identifikaci úniků výkonu lokálního oscilátoru primárních uživatelů při příjmu [8].

3.1.1 Detekce energie

Hlavní výhodou tohoto přístupu je schopnost detekce signálu bez jeho jakékoli znalosti. Toho lze docílit tím, že je jen srovnávána úroveň přijaté energie s úrovní porovnávací, která je vypočítána z úrovně šumu.

Detektor je postaven tak, že výstup A/D (Analogově digitální) převodníku je po provedení FFT (*Fast Fourier transform*) umocněn, zprůměrován a nakonec porovnán s nastavenou úrovní.

Limitace této metody je hlavně v nutnosti správně nastavit porovnávací úroveň, což je s přihlédnutím k interferencím složité. Detekce energie dále nefunguje se signály rozprostřenými ve spektru (např. CDMA) a nedokáže rozlišit primárního od sekundárního uživatele, což je pro správnou funkci kognitivního rádia kritické.

3.1.2 Cyklostacionární detekce

Metoda cyklostacionární detekce využívá cyklostacionarity vysílacích signálů. Ta je dána periodickým vkládáním různých prefixů, modulací signálu sinusovou nosnou, rozprostírací sekvencí atp. Z definice je signál cyklostacionární, pokud je jeho autokorelační funkce periodická. Šum cyklostacionární vlastnosti nemá, proto lze úspěšně oddělit od signálu primárního uživatele.

Implementace takového detektoru pak vypadá následovně. Na signál z výstupu A/D konvertoru je aplikována FFT a poté je signál korelován podle rovnice 2, kde ω je úhlová frekvence. Výsledný signál je nakonec zprůměrován a vyhodnocen.

$$X(f + \omega) X^*(f - \omega) \quad (2)$$

Nevýhodou této detekce je její relativní pomalost a složitost implementace mezi více systémy na jednom místě.

3.1.3 Detekce přizpůsobeným filtrem

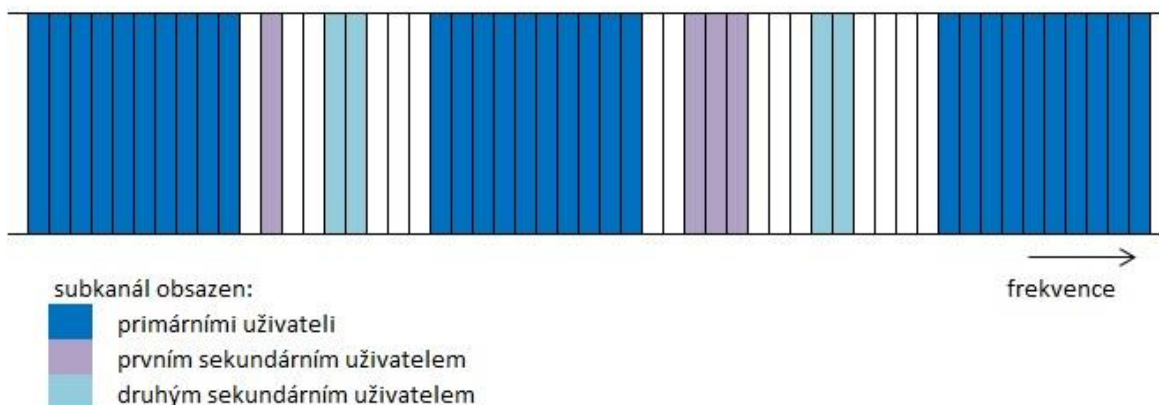
Tuto metodu lze využít v případě, kdy jsou známy vlastnosti prvních dvou vrstev (OSI modelu) vysílaného signálu. Funguje na principu korelace vysílaného signálu se signálem hledaným. Tímto je dosaženo velmi vysokého odstupů signálu od šumu.

Nevýhodou je nutnost samostatného přijímače pro každý primární systém v dosahu a dále právě nutnost znalosti hledaného signálu. Je požadováno, aby kognitivní sítě byly co nejvíce samostatné, tedy by měly být schopné tyto vlastnosti samy detekovat.

3.2 Rozhodování o připojení sekundárního uživatele

Rozhodování o připojení SU se provádí vzhledem k charakteristice vybraného kanálu. Ta je dána několika měřitelnými parametry [3]:

- Interference – Lze odvodit z míry interference u primárního uživatele. Toho lze dále využít při odhadu kapacity kanálu.
- Útlum – Se zvyšující se vzdáleností a frekvencí se zvyšuje i útlum. Zvýšením vysílacího výkonu lze rušit ostatní uživatele.
- Linkové chyby – Vznikají v závislosti na rušení a použité modulaci.
- Zpoždění na linkové vrstvě – Identifikace výše zmíněných parametrů chvíli trvá. Někdy může být výhodnější použít kanál, o kterém jsou tyto informace již známy, nežli čekat na další.
- Aktivita primárního uživatele – Pravděpodobnost výskytu žádosti od primárního uživatele o přidělení právě nevyužívaného místa v kanálu a tedy následného přerušení spojení. Lze ji snížit alokací více subkanálů jako např. na obrázku 4. Zde je vidět, že pokud by se objevil další primární uživatel (tmavě modrá barva), neobsadil by všechny subkanály SU (fialová a světle modrá). Do doby, než jim budou alokovány nové subkanály, může komunikace běžet bez přerušení skrze zbylé.

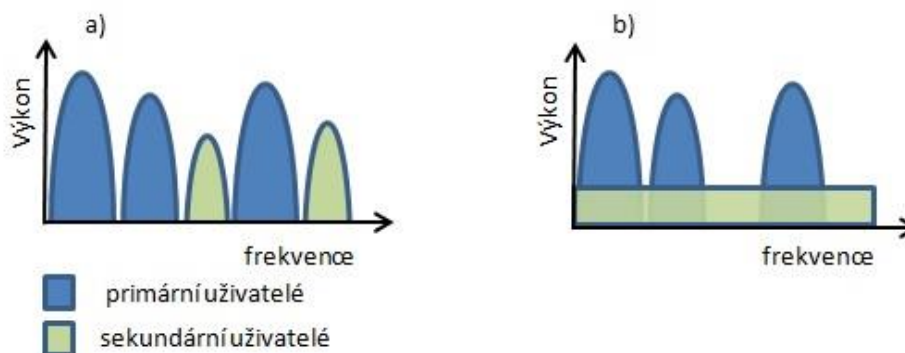


Obr. 4: Alokační různých subkanálů ve spektru [3]

3.3 Sdílení spektra

Techniku sdílení spektra je možno dělit několika způsoby [3][9][10] podle:

- Architektury
 - Centralizované – Výsledky měření a další získané informace sítě jsou odesílány do centrální jednotky. Ta na základě těchto vědomostí může sestavit mapu obsazenosti spektra a dále rozhodovat podle politiky sítě.
 - Distribuované – Každý uzel v síti dělá rozhodnutí v rámci buď všeobecné globální politiky nebo naopak lokální, se kterou soupeří s ostatními o QoS.
- Spolupráce
 - Kooperativní – Jednotlivé uzly spolu sdílejí informace o vzájemných interferencích, které vedou k menšímu vzájemnému rušení v síti.
 - Nekooperativní – Uzly se rozhodují sobecky, podle maximálního přínosu pro ně samotné.
- Přístupu ke spektru (obrázek 5)
 - a) Sekundární uživatelé mají přístup ke spektru, když primární uživatel nevysílá. (*Overlay*)
 - b) Využití techniky rozprostřeného spektra. Sekundární uživatelé vysílají tak nízkým výkonem, že se ostatním jeví jako šum. (*Underlay*)



Obr. 5: Přístupy ke spektru [8]

Simulace ukazují [3][9], že spolupráce uzlů v síti je pro ně velice přínosná – napomáhá větší propustnosti a spravedlnosti. Naopak mezi použitím výše zmíněných architektur větší rozdíly nejsou.

Sdílení spektra lze také brát jako hru [10]. V ní primární uživatelé nabízejí své frekvenční pásmo za určitou cenu a sekundární uživatelé toto pásmo poptávají při použití určitého vysílacího výkonu po danou dobu. V decentralizovaných sítích, ve kterých nelze vynutit dobré mravy, je potřeba ošetřit chování sobeckých uživatelů, kteří nedodrží dohodnuté podmínky a zlomyslných uživatelů, kteří chtějí narušit komunikaci ostatních. Zajištěním spravedlnosti a efektivnosti v distribuovaných systémech se zabývá např. metoda Homo Egalis navržená v knize [2]. V této strategii uživatelé dosahují nejlepších výsledků, když jsou si navzájem rovni.

3.4 Změna spektra

Ke změně spektra, tj. změně vysílací frekvence sekundárního uživatele by mělo dojít v případě, kdy si tento kanál vyžádá primární uživatel nebo již není splněn QoS dané služby. Během tohoto předávání v komunikaci nelze pokračovat. Na základě používaného protokolu je třeba zajistit [9] např. pozastavení a následné obnovení přenosu se správnými směrovacími údaji (pro TCP, *Transmission Control Protocol*) nebo prozatímní uložení příchozích/odchozích paketů (pro FTP, *File Transfer Protocol*).

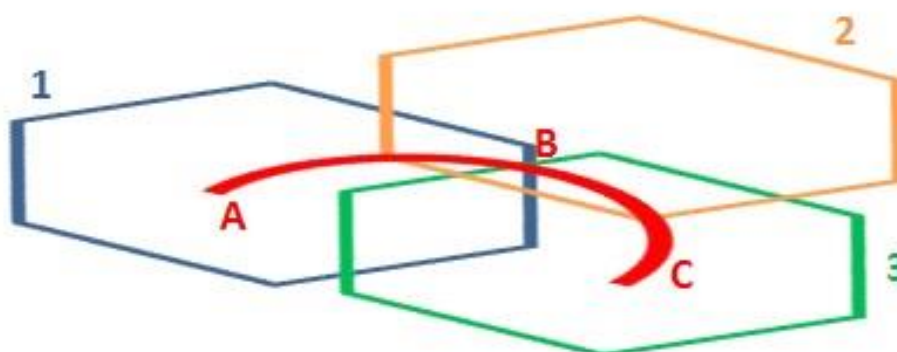
3.5 Predikce pohybu

Pohyb uživatelů mezi buňkami nebývá zcela náhodný. Na jeho predikci lze podle složitosti nahlížet několika způsoby. Mezi nejjednodušší patří statistický výpočet pravděpodobnosti, se kterou se uživatel ocitne v nějaké z okolních buněk. Tento model je uveden ve studii [11]:

Uživatel je v určitém místě připojen na základnovou stanici. Ta je povinna udržovat tabulku predikce, aby byla schopna předpovědět příští základnovou stanici za určitou dobu. Tabulka je členěna do čtyř či více sloupců. Jeden udává stáří záznamu, další rychlost pohybu uživatele a dále jsou tu sloupce označující předchozí buňky. Čím více jich je vedeno, tím přesnější předpověď. Predikovaná buňka nebo základnová stanice je v samostatném sloupci. Každý nový uživatel v buňce se porovná s uloženými záznamy a ten, který se nejméně liší, se použije jako předpověď.

Znalosti příští základnové stanice lze využít k zamluvení části frekvenčního spektra primárním uživatelem. Sekundární uživatel má tedy více času k přenesení komunikace do jiného kanálu. Predikcí pohybu se také mohou zkrátit reakce systému na nového uživatele (např. rychlejší handover).

Uživatel se většinou pohybuje po cestách a silnicích. Ty může kognitivní rádio poznat jako trajektorie pohybu většího množství uživatelů. Toho lze využít například v situaci na obrázku 6.



Obr. 6: Ušetření handoveru predikcí pohybu po cestě (červená)

Použití klasické predikce vektoru rychlosti by z pohybu mezi body A a B předpovědělo pohyb dále do buňky 2 a tudíž by proběhl handover. Kognitivní síť ale ví, že mezi těmito body je silnice vedoucí do bodu C a tudíž uživatele předá až v buňce 3.

Sekundárnímu uživateli, o kterém lze předpokládat, že se bude dlouho zdržovat v blízkosti vysílače, se může přidělit vyšší kmitočet než SU, který se nachází na okraji buňky. Dále lze predikci zdokonalit např. počítáním s pracovními dny, počasím nebo kulturními akcemi v okolí.

4 Topologie kognitivních rádiových sítí

4.1 Distribuované kognitivní sítě

Topologie distribuovaných kognitivních sítí může být řešena mnoha způsoby. Jedním je úplná nezávislost na fixní infrastruktuře [12]. Zde mají jednotlivé uzly sítě určitou volnost pohybu, z čehož vyplývá častá změna spojení mezi uzly. Zařízení uživatelů neslouží jen k odesílání a přijímání dat, ale i ke směrování komunikace ostatních uzlů.

Pro efektivní fungování distribuovaných sítí je nutná kooperace jednotlivých uživatelů. Ta spočívá především v úkonech spojených se směrováním. Je nutné, aby každý uživatel zjišťoval sousední uzly a získané informace rozesílal ostatním, protože každý uzel musí mít informace o celé topologii sítě. Další možností je sdružování sekundárních uživatelů do skupin [7]. V této topologii již každý SU nemusí mít mapu všech uzlů sítě, stačí jen směrovací informace o těchto skupinách.

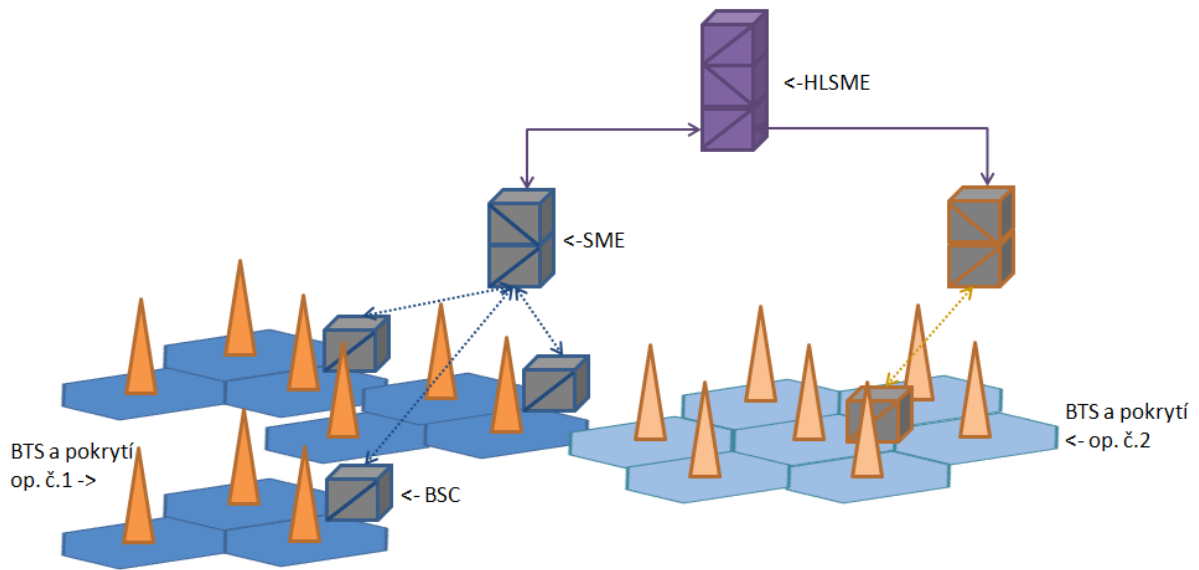
K monitorování spektra mohou být využity různé prostředky. V literatuře [7] je navrženo zavedení nové vrstvy složené pouze ze sítě senzorů. Tato vrstva by monitorovala vysílání primárních uživatelů a tyto informace dál posílala sekundárním uživatelům. Otázkou je, kdo by tuto síť senzorů postavil a provozoval. Cena takového řešení na velkém území by byla vysoká. V článku [12] je popsáno zavedení speciálního monitorovacího kanálu mezi primárními a sekundárními uživateli. Pomocí něho SU monitorují PU v jejich dosahu a o výsledcích z naměřených dat informují ostatní sekundární uživatele.

4.2 Centralizované kognitivní sítě

Na základě zadání se budu zabývat centralizovanými kognitivními sítěmi, které budou spolupracovat. Pro zachování jednoduchosti následné implementace, budu vycházet ze současných architektur GSM sítí. Logika této implementace by měla být analogicky aplikovatelná i pro novější systémy. Příklad takové architektury je na obrázku 7.

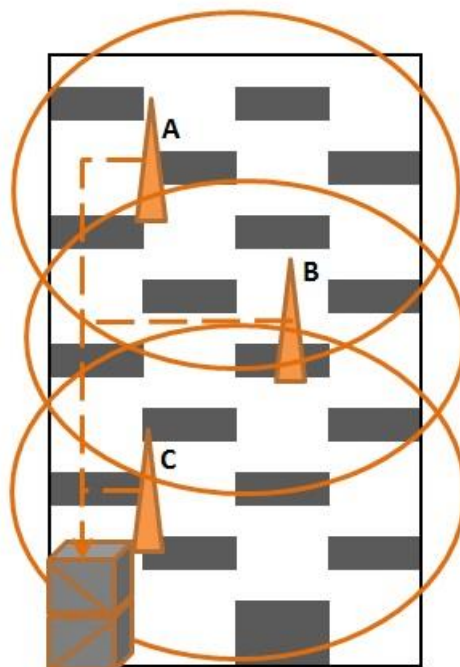
Nechť nejvýše postavenou jednotkou centralizovaných kognitivních sítí je HLSME (*High level Spectrum Management Entity*) [13], logická entita spravující nižší jednotky politikou národního regulátora kmitočtového spektra – v našem případě ČTÚ. Dále by měla být potenciálně využitelná k výměně informací mezi operátory (např. o alokaci spektra), pokud již takové spojení neexistuje mezi nižšími jednotkami na daném území.

Nižší jednotkou by mohla být SME (*Spectrum Management Entity*). Zařadil bych ji na úroveň GSM vrstvy NSS (*Network and Switching Subsystem*). SME by měla být manažerem spektra pro danou oblast. Měla by mít spojení s jednotkami SME dalších operátorů buď přímo, nebo alespoň přes HLSME z důvodu efektivní kooperace v síti.



Obr. 7: Architektura kognitivních sítí s centrální jednotkou

Hierarchicky nejnižší vidím BSC (*Base Station Controller*) na GSM vrstvě BSS (*Base Station Subsystem*). Ta by měla podle pokynů od SME řídit své BTS (*Base Transceiver Station*). Dále by měla řídit místní monitorování spektra a výsledky posílat do SME. BSC by mohla sama rozhodovat i o změně spektra (*Spectrum decision*). O tomto výkonu by měla být SME alespoň zpravena.



Obr. 8: Centralizovaná kognitivní WLAN v budově [2]

Moderním přístupem k rozšíření kapacity mobilních sítí a dodatečnému dokrývaní signálem je využití tzv. pico a femtobuněk. Když ale vysílají na stejné frekvenci jako jejich mateřské BTS, dochází k interferencím. Využitím technik kognitivního rádia by se tyto buňky mohly chovat jako sekundární uživatelé – mohly by přistupovat ke spektru v době jeho nevyužívání a tím tyto interference potlačit.

Centralizované kognitivní rádio lze také například využít v případě WLAN (*Wireless Local Area Network*) ve výškových budovách jako na obrázku 8. Uživatel nacházející se v nejvyšším patře sejde o několik pater níže mimo oblast použitelné síly signálu přístupového bodu A. Z důvodu přetížení přístupového bodu B je uživatel připojen až k přístupovému bodu C [2].

4.2.1 Výměna informací mezi uživateli a centrální jednotkou

Zprávy posílané mezi jednotlivými uzly kognitivních sítí by měly obsahovat informace, které umožní co možná nejúčinnější management spektra. Například podle publikace [5] je potřeba na nejnižší vrstvě uvažovat frekvenci (nosné), šířku pásma, RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) a SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*).

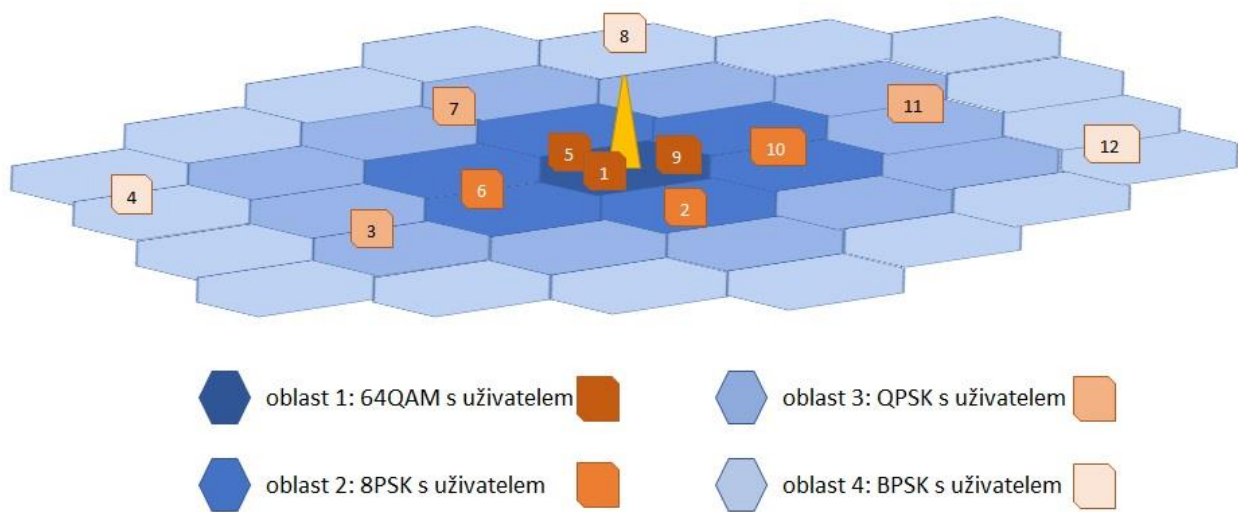
Po převedení na digitální signál je dobré identifikovat uživatele, znát modulační rychlost a další parametry modulace, informace o FEC (*Forward Error Correction*), řízení výkonu a parametry MIMO (*multiple-input and multiple-output*).

Na nejvyšší vrstvě je potřeba výměny informací o routingu (směrování), o protokolu pro vícenásobný přístup (FDMA, TDMA, CDMA) a o ARQ (*Automatic Repeat reQuest*).

5 Model a výsledky simulace

5.1 Model

V programovacím jazyce Matlab jsem vytvořil program, který simuluje využití frekvenčního spektra v jednoduché rádiové síti s předem daným přístupem uživatelů. Uživatelé jsou rozmístěni rovnoměrně do čtyř oblastí podle vzdálenosti od vysílače (viz obrázek 9). Nejbližše vysílači můžeme využít nejúčinnější, ale nejméně robustní modulace 64QAM s 6 bity na symbol (uživatelé 1, 5, 9). Dále od vysílače jsem použil klíčování 8PSK s 3 bity na symbol (uživatelé 2, 6, 10), dále QPSK s 2 bity na symbol (uživatelé 3, 7, 11) a nejdále nejrobustnější BPSK s 1 bitem na symbol (uživatelé 4, 8, 12).

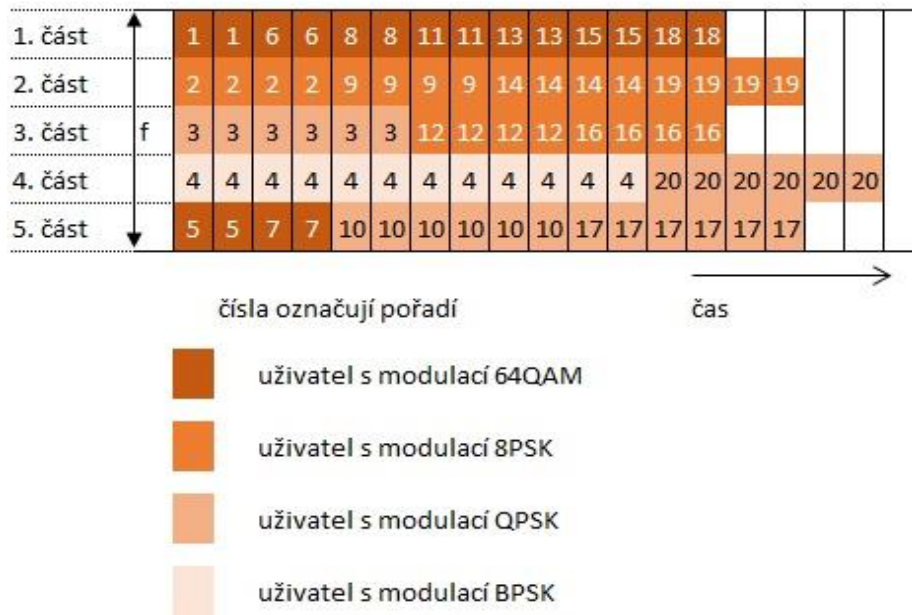


Obr. 9: Rozložení uživatelů v síti

Ke správné alokaci spektra sekundárním uživatelům je potřeba určit několik parametrů. Ty definují následnou komunikaci tak, aby neovlivňovala primární uživatele. Spektrum je obecně určeno buď intervalem frekvence ($f_0, f_0+\Delta f$), kde f_0 je počáteční frekvence a Δf je šířka pásma, nebo počtem (sub)kanálů s předem definovanou šířkou pásma. V čase je určeno intervalem ($t_0, t_0+\Delta t$), kde t_0 je počáteční čas a Δt je doba spojení. Určením maximálního možného vysílacího výkonu P_{\max} se zamezí rušení PU.

Ke správné definici těchto parametrů lze využít například znalosti typu požadované služby (volání, sms, mms, data), duplexního schématu (FDD nebo TDD), lokace uživatele a predikce jeho dalšího pohybu nebo priority SU danou politikou vlastní kognitivní sítě.

Pro jednoduchost se v programu neobjevují informace o výkonu, duplexním schématu, lokaci uživatele a ani se nerozlišují požadované služby. Frekvenční spektrum je rozděleno na stejně velké části, které jsou přidělovány bez ohledu na výšku nosné. Časovou jednotkou je Δt . Doba přiděleného spektra je brána jako počet Δt .



Obr. 10: Pořadí uživatelů v přístupu ke spektru rozděleného do pěti částí

Primární a sekundární uživatelé rozlišování nejsou, všichni se snaží po spuštění simulace získat svou část spektra v pořadí odpovídajícímu očíslování uživatelů na obrázku 10. V něm je vidět, že uživatelé blíže anténě budou vždy odbaveni rychleji. To vyplývá z použitého algoritmu, který s každým začátkem nové časové jednotky přiděluje volné části spektra v pořadí z obrázku 9 (pokud o ně mají uživatelé zájem). Množství přidělených časových jednotek jednotlivým uživatelům je závislé na použité modulaci a je vysvětleno dále v textu.

Vstupem funkce je pět měnitelných parametrů. Prvním je počet částí, na které je rozděleno dané kmitočtové spektrum. Druhým je počet těchto dílů, který je každému přidělován. Dalším vstupním parametrem je tzv. parametr K, který je určen jako počet časových jednotek, který uživatel s neefektivnější modulací (64QAM) potřebuje pro přenos celého svého souboru při využití frekvenčního pásma definovaného předešlým parametrem. Čtvrtým parametrem je počet uživatelů, respektive počet čtveřic uživatelů. Pokud je tedy roven jedné, funkce počítá se čtyřmi uživateli, každým v jedné oblasti. Posledním parametrem je počet souborů, které chtějí uživatelé odeslat.

Funkce nejprve vytvoří matici, ve které každý řádek odpovídá jednomu uživateli. V prvním sloupci je počet souborů, který chce uživatel ještě poslat. Druhý sloupec vyjadřuje velikost přiděleného kmitočtového dílu. Třetí sloupec obsahuje informaci o tom, po kolik dalších časových jednotek bude dané spektrum uživatelem obsazeno. Jedna časová jednotka je jedním krokem simulace a je rovna Δt .

Tato matice je dále vyhodnocována v cyklu, který běží, dokud nejsou v prvním sloupci jenom nuly, tj. dokud mají uživatelé co poslat. V tomto cyklu projde každý uživatel sérií podmínek. Pokud je spektrum volné, chce odeslat nějakou zprávu a zrovna žádnou neodesílá, tak mu je přidělen daný

počet kanálů na čas, definovaný použitou modulací. Pro modulaci 8PSK je to dvojnásobek času, který potřebuje uživatel s 64QAM na poslání stejného množství informace, u QPSK trojnásobek a u BPSK šestinásobek potřebného času u 64QAM. Toto stojí dvě signalizační zprávy. První je žádost uživatele o spektrum a druhá je kladná odpověď sítě. Dále se uživateli odečte jedna časová jednotka a jemu přidělená frekvenční část se přičte k jejich celkové sumě. Pokud je kmitočtové spektrum plné a zároveň chce daný uživatel komunikovat, přičte se k sumě signalizačních zpráv jednička. To odpovídá dvěma situacím. Uživatel, který vysílat ještě nezačal, vyšle signalizační zprávu o zájmu o přidělení spektra, na kterou mu není odpovězeno. Druhá možnost simuluje uživatele, který již vysílá. Zde se zmiňovaná suma zvyšuje o signalizační zprávu s příkazem, aby uživatel na jednu časovou jednotku přerušil komunikaci.

Po vyhodnocení všech uživatelů se inkrementuje časomíra a aktuální zaplnění spektra se přičte k celkovému zaplnění, platnému od zavolání funkce. Hodnota časomíry je rovna počtu kroků simulace – počtu Δt . Ve chvíli, kdy všichni uživatelé mají vše odesláno, se celkové zaplnění kmitočtového spektra vydělí hodnotou časomíry. Výsledkem je tedy aritmetický průměr využití spektra. Časomírou se vydělí i počet signalizačních zpráv. V konečné statistice se tedy počítá s průměrným počtem signalizačních zpráv za jednu časovou jednotku. Výsledná data jsou nakonec aproximována polynomickou regresí devátého stupně. Shrnutí parametrů modelované sítě je provedeno v tabulce 1.

Krok simulace	1 Δt
Šířka dostupného frekv. pásma	1 f
Počet uživatelů	4 až 248 (násobky čtyř)
Pohyb uživatelů	Žádný; stacionární uživatelé
Modulace	64QAM, 8PSK, QPSK, BPSK
Počet souborů	4

Tab. 1: Shrnutí parametrů modelované sítě

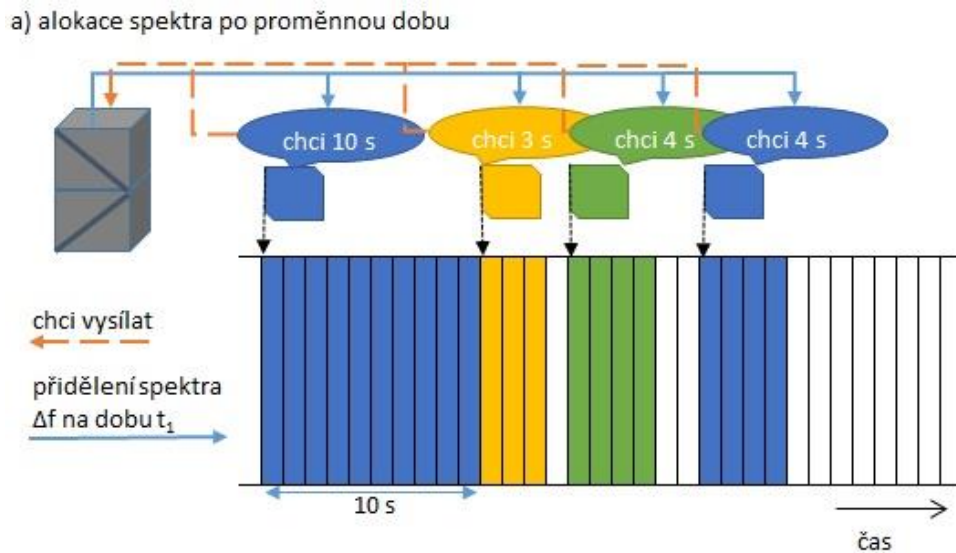
5.2 Doba přidělení spektra

Navrhl jsem tři metody, s jejichž pomocí lze dynamicky alokovat spektrum podle doby přidělení spektra: 1) alokaci spektra po dobu proměnnou, 2) alokaci spektra po dobu konstantní a 3) alokaci spektra na dobu neurčitou. Tyto metody jsou znázorněny v obrázcích 11a,b,c. V nich je využívaná část spektra vyznačena tmavě, část přidělená, ale nevyužívaná k žádnému přenosu je odlišena odstínem světlým. Každá signalizační zpráva od uživatele je reprezentována jednou oranžovou šipkou a odpovědi centrální jednotky šipkou modrou.

1) Alokace spektra po proměnnou dobu

Nejobecnějším případem je alokace spektra po proměnnou dobu dlouhou podle potřeb SU. Lze předpokládat nejlepší využití spektra za cenu vysokého vytížení signalizačního kanálu. V obrázku 11a je první uživatel označen modře. Na odeslání souboru si vyžádá 10 s nebo centrální jednotka

sama vyhodnotí, že tento čas potřebuje. Černá šipka ukazuje na místo v časové ose, ve kterém se daná událost děje. Po 10 s se ozve druhý uživatel, který je označen oranžovou barvou, s menším souborem a jsou mu přiděleny 3 s. Po této době nemá o komunikaci v tomto pásmu nikdo zájem, proto prázdné (bílé) místo. Dále se přihlásí třetí uživatel označený zeleně o 4 s a poté je kmitočtové pásmo po 2 s znovu bez využití. Nakonec první uživatel žádá o 4 s k odeslání dalšího souboru.



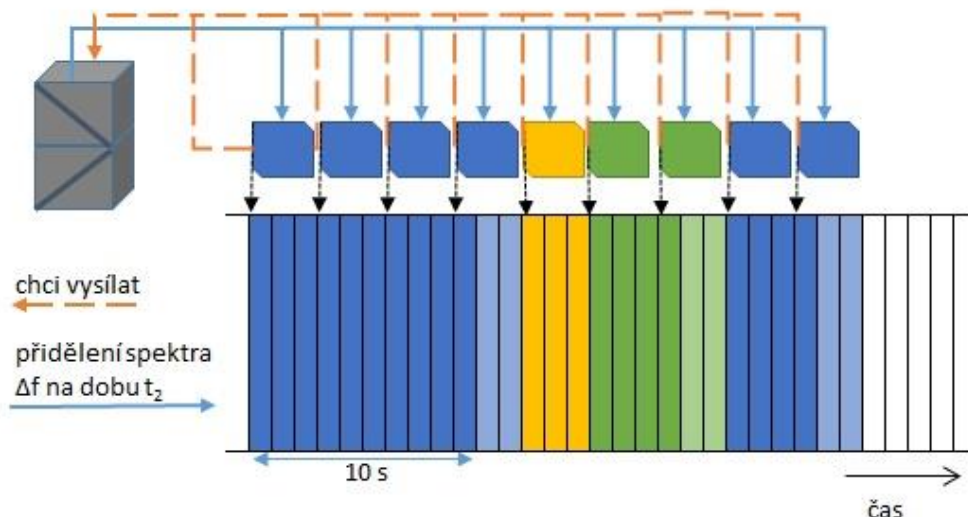
Obr. 11 a: Metoda přidělování spektra po proměnnou dobu

2) Alokace spektra po konstantní dobu

Druhou možností je použití alokace po konstantní dobu t_2 . V tomto případě je klíčové najít kompromis mezi vysokým množstvím signalizačních zpráv (malá hodnota t_2) a neefektivním využitím kmitočtového spektra (velká hodnota t_2). Kromě toho záleží i na době vysílání jednotlivých uživatelů. To je zřetelné z obrázku 11b, ve kterém je zvolena doba $t_2 = 3$ s. Pokud ale tuto dobu zvýšíme o 1 s, klesne počet signalizačních zpráv o třetinu a dokonce se sníží i doba celkového využití spektra.

V tomto obrázku znovu začíná uživatel označený modře se souborem, na jehož odeslání potřebuje 10 s. V tomto případě mu je kanál přidělen jen na předem definovanou konstantní dobu 3 s a poté musí uživatel žádat znovu. Každá taková žádost stojí dvě signalizační zprávy. Nakonec je odeslání tohoto souboru o 2 sekundy delší než v případě alokace po proměnnou dobu. Tyto 2 sekundy jsou vyznačeny světlejším odstínem modré barvy. Druhý uživatel označený oranžově, který se k vysílání dostane o 2 s dříve než v prvním případě, stihne soubor odeslat ve stanovených třech sekundách, není tedy dále nijak ovlivněn. Třetí a znovu první uživatel si poté musí vysílání o 2 s prodloužit.

b) alokace spektra po konstantní dobu

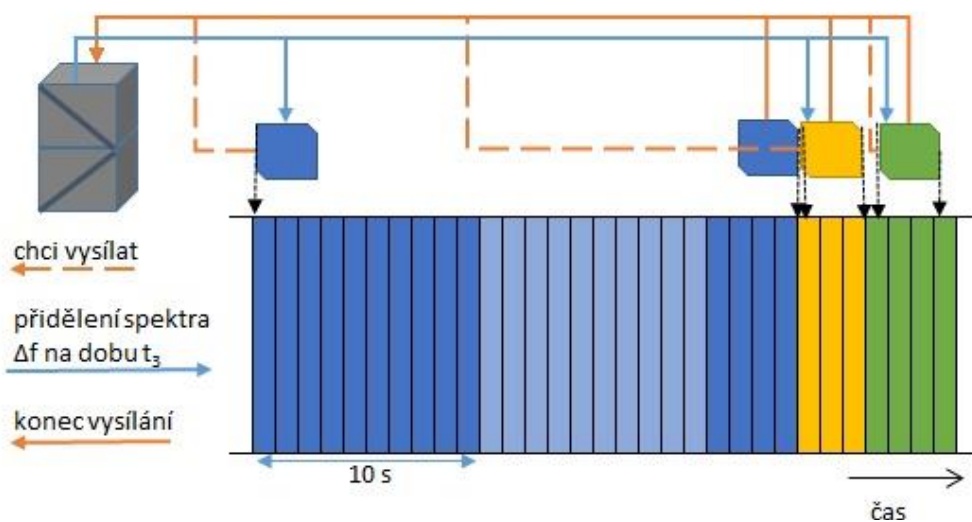


Obr. 11 b: Metoda přidělování spektra po konstantní dobu

3) Alokační spektra na dobu neurčitou

Poslední možností je alokace spektra na dobu neurčitou (v praxi spíše dlouhou dobu) s tím, že SU přidělené spektrum nevyužívá v celé své době. Sekundární uživatel signalizuje ztrátu zájmu o tuto alokaci centrální jednotce a spektrum je uvolněno. V případě posílání více zpráv je tento způsob nejšetrnější k signalizačnímu kanálu, ale plýtvá s frekvenčním spektrem. Další nevýhodou tohoto přístupu je nesnadná změna přidělených kmitočtů s ohledem na zhoršení parametru QoS nebo pohybu uživatele v prostoru.

c) alokace spektra na dobu neurčitou



Obr. 11 c: Metoda přidělování spektra na dobu neurčitou

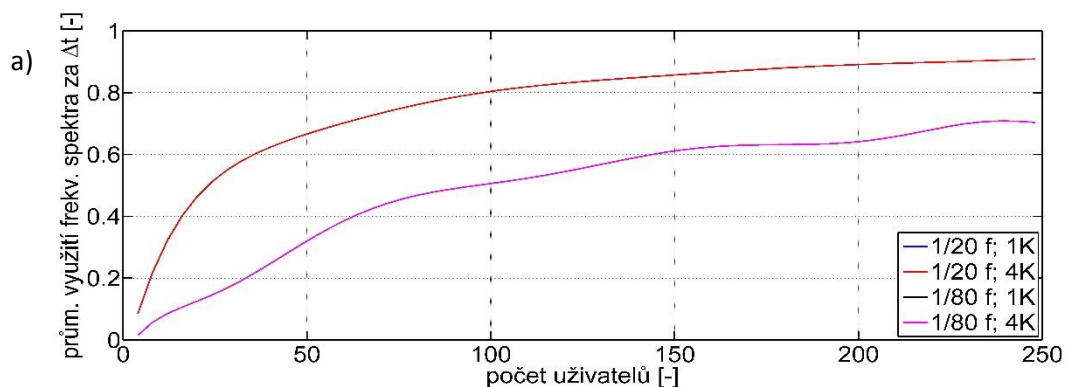
První uživatel na obrázku 11c označen modrou barvou si jednou signalizační zprávou zažádá o obsazení kanálu a centrální jednotka mu další zprávou kladně odpoví. Následně 10 s odesílá soubor a poté dalších 10 s čeká na odpověď. Po tuto dobu je spektrum označeno jako obsazené a nikdo jiný nemůže skrze něj komunikovat. Poté tomuto uživateli přijde odpověď, kterou přijme ve čtyřech sekundách a ukončí spojení další signalizační zprávou. V komunikaci pokračuje uživatel označený oranžově následovaný uživatelem označeným zeleně. Oba odešlou oproti prvnímu případu jednu ukončovací signalizační zprávu navíc.

5.3 Výsledky simulace

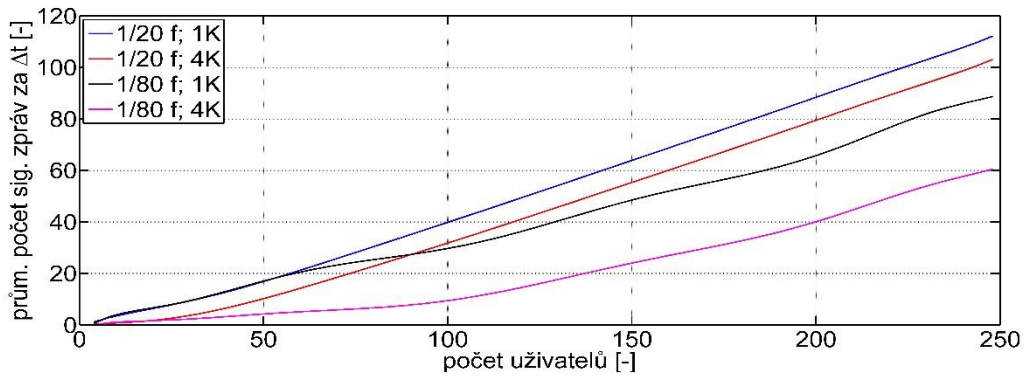
Nejdříve jsem pomocí vytvořeného programu porovnal změny výsledků průměrného využití frekvenčního spektra a průměrného počtu signalizačních zpráv jednotlivých metod použitím různých vstupních parametrů. Nakonec jsem všechny metody alokace spektra porovnal mezi sebou.

5.3.1 Alokace spektra po proměnnou dobu

Simulace je provedena pro čtyři scénáře. V prvním scénáři je kmitočtové spektrum rozděleno na dvacet dílů. Parametr K je roven jedné, uživatelům používajícím modulaci 64QAM je tedy jeden díl přidělen po dobu Δt , u modulace 8PSK po $2 \Delta t$, u QPSK po $3 \Delta t$ a u BPSK po $6 \Delta t$. V grafech na obrázcích 12a,b mu odpovídá modrý průběh. Ve druhém scénáři (červený průběh) je zachována velikost přidělovaného spektra, ale parametr K je zčtyřnásoben. Třetí (černý průběh) a čtvrtý (purpurový) scénář zobrazuje závislosti v případě dělení spektra na menší části – konkrétně na osmdesátiny. Ve třetím scénáři se počítá s $K = 1$ (v grafech a tabulkách označováno jako 1K) a ve čtvrtém scénáři s $K = 4$ (v grafech a tabulkách označováno jako 4K).



Obr. 12 a: Graf závislosti alokace kmitočtového spektra na počtu uživatelů



Obr. 12 b: Graf závislosti počtu signalizačních zpráv na počtu uživatelů

Počet uživatelů [-]	1/20 f; 1K [Δt]	1/20 f; 4K [Δt]	1/80 f; 1K [Δt]	1/80 f; 4K [Δt]
60	52	208	24	96
120	88	352	32	128
180	124	496	44	176
248	164	656	52	208

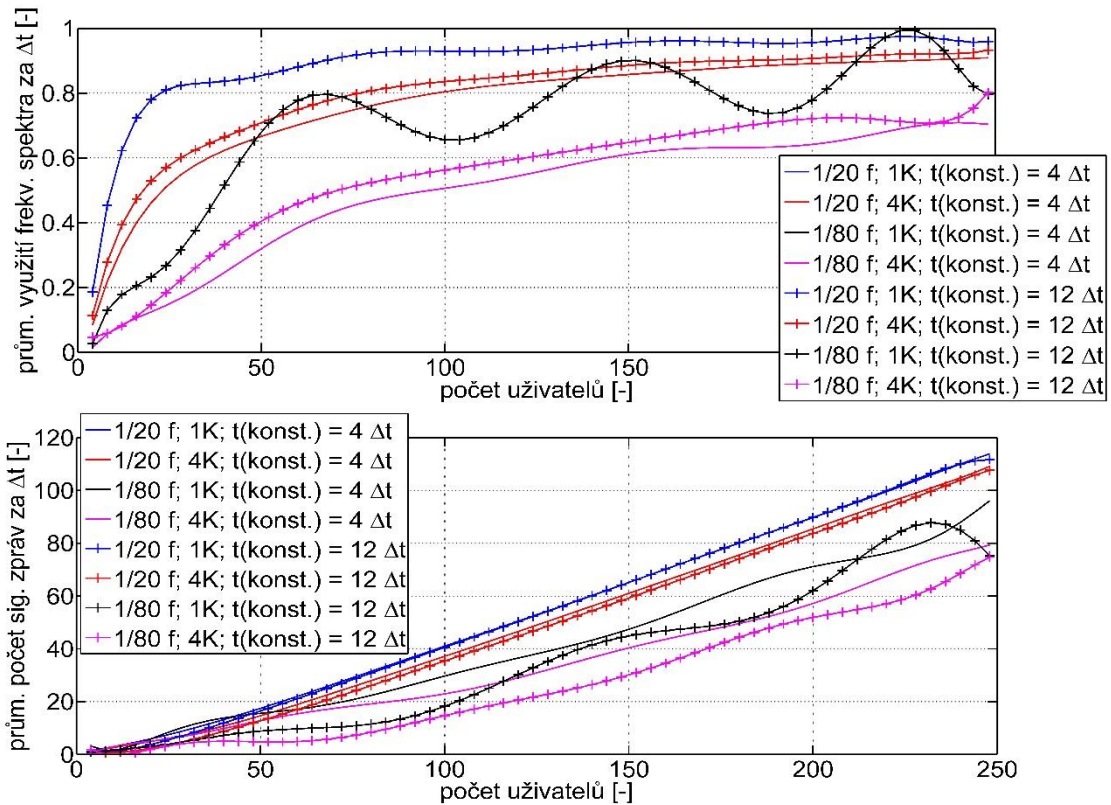
Tab. 2: Porovnání scénářů z hlediska délky trvání simulace

V tabulce 2 jsou jednotlivé scénáře rozdělené do sloupců porovnány podle délky trvání simulace (délky časomíry) v závislosti na počtu uživatelů. Z grafu na obrázku 12a, ve kterém jsou první, druhý a třetí, čtvrtý scénář přes sebe, by se mohlo zdát, že využití kmitočtového spektra nezávisí na parametru K. V tabulce 2 je ale vidět, že zčtyřnásobení parametru K zčtyřnásobí i celkový počet Δt. Průběhy na obrázku 12a rostou do rovnosti počtu uživatelů s počtem částí frekvenčního spektra konstantně, dále se nárůst postupně zpomaluje.

Z porovnání prvního a čtvrtého scénáře na obrázku 12b vyplývá, že rozdělení frekvenčního spektra na více menších částí s jejich přidělováním po delší čas dosahuje nižšího celkového počtu signalizačních zpráv. Pro malý počet uživatelů je ale druhý scénář k signalizačnímu kanálu šetrnější než scénář třetí.

5.3.2 Alokace spektra po konstantní dobu

Ve srovnání s předchozí metodou jsem zavedl nový parametr – dobu t_2 (v grafech a tabulkách označovanou jako $t(\text{konst.})$) vyjádřenou jako počet časových jednotek Δt . Centrální jednotka přiděluje všem uživatelům část spektra po dobu t_2 , která je v průběhu scénáře konstantní. Použity jsou stejné (i stejně barevně odlišené) scénáře z předchozí metody. Scénáře s parametrem $t_2 = 4 \Delta t$ mají v grafu průběhy bez značek a scénáře s $t_2 = 12 \Delta t$ jsou v grafu označeny křížkovými značkami.



Obr. 13 a, b: Grafy závislosti alokace kmitočtového spektra a počtu signalizačních zpráv na počtu uživatelů

Počet uživatelů [-]	1/20 f; 1K [Δt]	1/20 f; 4K [Δt]	1/80 f; 1K [Δt]	1/80 f; 4K [Δt]
60	80	208	32	96
120	144	352	48	128
180	192	496	64	176
248	272	656	80	208

Tab. 3 a: Porovnání scénářů z hlediska délky trvání simulace pro $t(\text{konst.}) = 4 \Delta t$

Počet uživatelů [-]	1/20 f; 1K [Δt]	1/20 f; 4K [Δt]	1/80 f; 1K [Δt]	1/80 f; 4K [Δt]
60	144	240	48	96
120	288	432	96	144
180	432	576	144	192
248	624	816	192	240

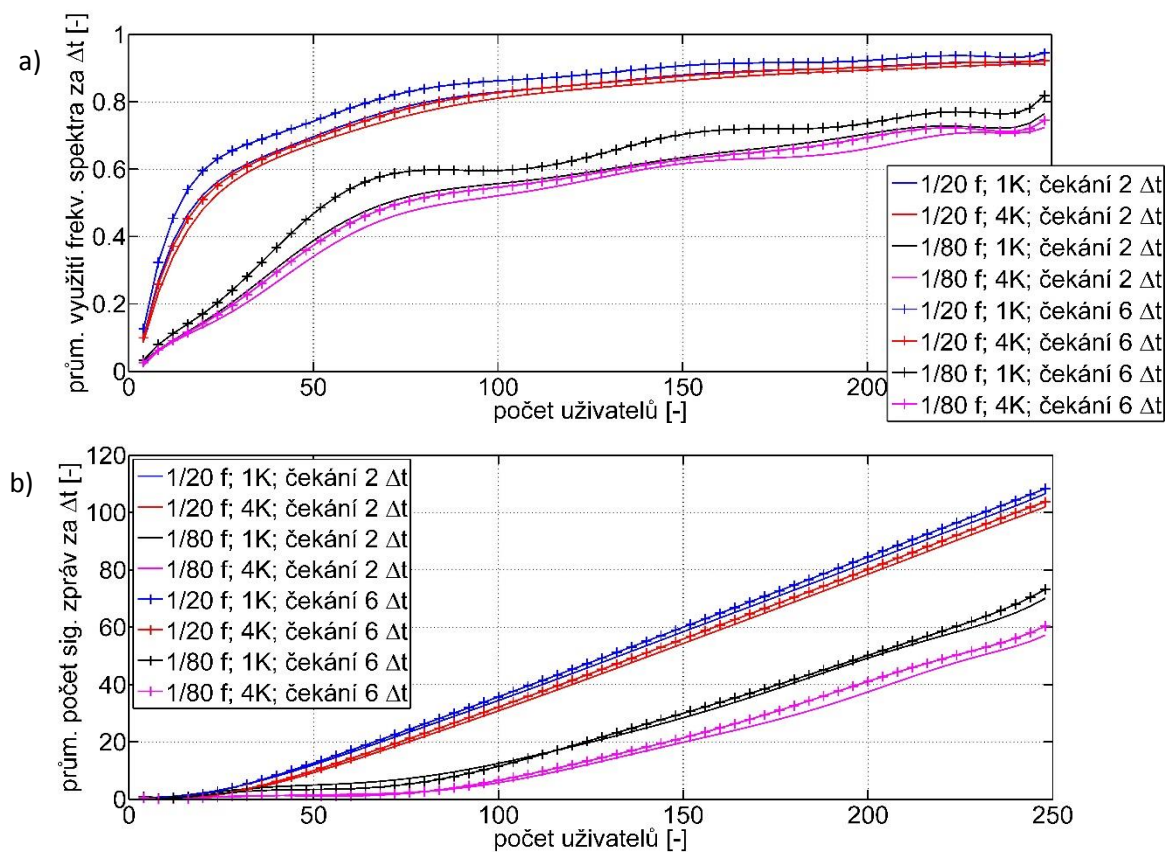
Tab. 3 b: Porovnání scénářů z hlediska délky trvání simulace pro $t(\text{konst.}) = 12 \Delta t$

Tvar průběhů na obrázcích 13a,b se většinou podobá těm z předchozí metody v kapitole 5.3.1. Lokální maxima a minima černého křížkovaného průběhu v grafu průměrného obsazení spektra na obrázku 13a jsou způsobeny dělením obsazenosti spektra časomírou, která po každých dvaceti uživateli skokově roste. To je pravděpodobně dáno citlivostí tohoto scénáře na jev, kdy čas potřebný k odeslání souborů je o málo vyšší než násobky t_2 . Tento jev lze částečně pozorovat i v grafu průměrného počtu signalizačních zpráv na obrázku 13b.

Z obrázků 13a,b a tabulek 3a,b lze vyčíst, že vyšší hodnota t_2 má za následek vyšší hodnotu časomíry i vyšší využití frekvenčního spektra. Jedině v porovnání scénářů s purpurovými průběhy se dá hovořit o zlepšení v počtu signalizačních zpráv.

5.3.3 Alokace spektra na dobu neurčitou

Do části programu pro simulaci přidělování spektra na dobu neurčitou jsem přidal nový parametr. Ten vyjadřuje počet kroků simulace mezi jednotlivými soubory, po které uživatel vyčkává, než začne odesílat soubor další. Dále je zde změněn způsob odesílání souborů. Místo alokace spektra na dobu potřebnou pro poslání jedné zprávy je uživateli přiděleno spektrum na dobu, kterou potřebuje pro odeslání všech čtyř souborů i s rezervou danou výše zmíněným parametrem. Počet signalizačních zpráv potřebných pro navázání, udržení a zrušení spojení vzrostl o jednu. Dvě jsou potřeba stejně jako v předchozích případech pro aktivaci spojení a jedna pro jeho deaktivaci.



Obr. 14 a, b: Grafy závislosti alokace kmitočtového spektra a počtu signalizačních zpráv na počtu uživatelů

Počet uživatelů [-]	1/20 f; 1K [Δt]	1/20 f; 4K [Δt]	1/80 f; 1K [Δt]	1/80 f; 4K [Δt]
60	72	226	30	102
120	128	388	44	140
180	180	550	60	194
248	242	734	74	232

Tab. 4 a: Porovnání scénářů z hlediska délky trvání simulace pro čekání $2 \Delta t$

Počet uživatelů [-]	1/20 f; 1K [Δt]	1/20 f; 4K [Δt]	1/80 f; 1K [Δt]	1/80 f; 4K [Δt]
60	114	264	42	114
120	204	464	68	164
180	294	662	94	228
248	396	890	116	278

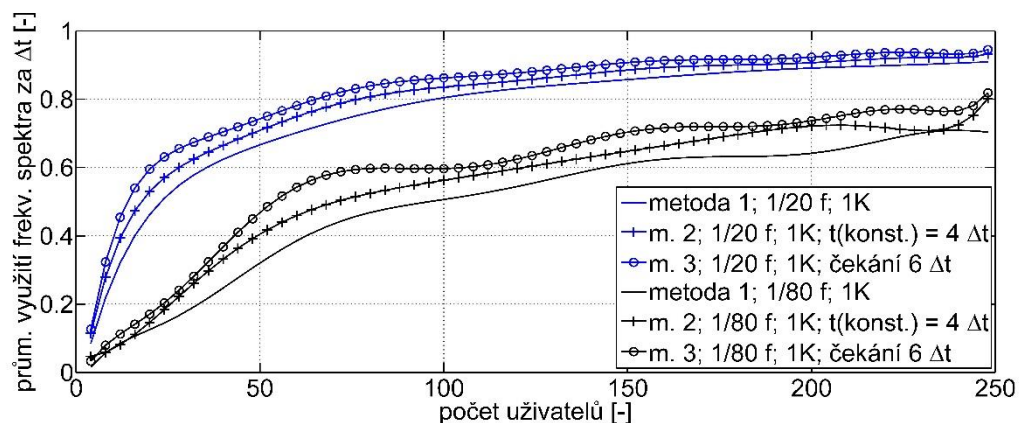
Tab. 4 b: Porovnání scénářů z hlediska délky trvání simulace pro čekání $6 \Delta t$

Znovu byly použity scénáře z první metody. Neoznačované průběhy v grafech na obrázcích 14a,b jsou pro scénáře s parametrem čekání $2 \Delta t$. Scénáře, ve kterých uživatel mezi soubory čeká $6 \Delta t$, jsou v grafech označovány křížky.

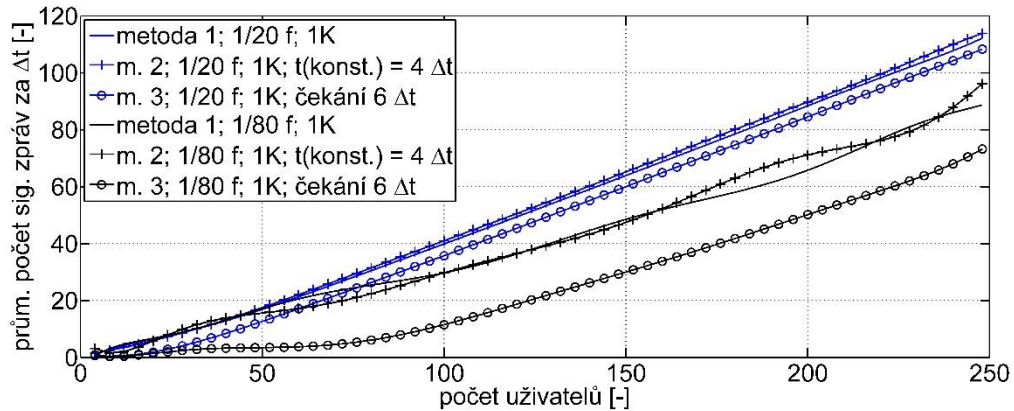
Z obrázku 14a,b a tabulek 5.4a,b lze vyčíst, že zvětšení čekací doby více ovlivňuje více scénáře s parametrem $K = 1$, než s parametrem $K = 4$. Zvětšuje jak průměrné zaplnění spektra, tak dobu trvání simulace. Mimo toho platí pro průběhy stejný popis, který jsem již uvedl pro průběhy u první metody v kapitole 5.3.1.

5.3.4 Porovnání metod

K porovnání jsou vybrány scénáře s modrými a černými průběhy z předchozích kapitol. Jako reprezentující scénáře druhé metody byly zvoleny ty s parametrem $t(\text{konst.}) = 4 \Delta t$ a z metody alokace spektra na dobu neurčitou byly zvoleny scénáře s parametrem čekání $6 \Delta t$. Průběhy scénářů metody první jsou bez jakýchkoliv značek, u druhé metody jsou označovány křížky a u třetí jsou okroužkovány.



Obr. 15 a: Graf závislosti alokace kmitočtového spektra na počtu uživatelů



Obr. 15 b: Graf závislosti počtu signalizačních zpráv na počtu uživatelů

Počet u. [-]	M. 1; 1/20 f [Δt]	M. 2; 1/20 f [Δt]	M. 3; 1/20 f [Δt]	M. 1; 1/80 f [Δt]	M. 2; 1/80 f [Δt]	M. 3; 1/80 f [Δt]
60	52	80	114	24	32	42
120	88	144	204	32	48	68
180	124	192	294	44	64	94
248	164	272	396	52	80	116

Tab. 5: Porovnání metod z hlediska délky trvání simulace

Simulace částečně potvrdily úvahy ze začátku kapitoly. Nejlepšího využití kmitočtového spektra dosáhla alokace spektra po proměnnou dobu. Nejmenší průměrný počet signalizačních zpráv docílila alokace spektra na dobu neurčitou. Alokace spektra po konstantní dobu nedosáhla dobrých výsledků v průměrném využití kmitočtového spektra, v průměrném počtu signalizačních zpráv ani v délce simulace.

Vítězným modelem je alokace spektra na dobu neurčitou, protože je použitím tohoto modelu také dosaženo nejmenšího množství časových jednotek potřebných k odeslání všech souborů všemi uživateli. To zaručuje nejkratší čekací doby na přidělení kmitočtového spektra.

6 Závěr

Kognitivní rádiové sítě jsou závislé na implementaci softwarově definovaného rádia jako nástroje k jednoduchým změnám vysílacích i přijímacích parametrů sítě. Využití naleznou především jako prostředek k efektivnímu rozdělení frekvenčního spektra mezi primární a sekundární uživatele. Po vyřešení problémů správy spektra (monitorování spektra, rozhodování o připojení SU, sdílení spektra a změna spektra) nic nebrání jejich použití ke zlepšení QoS a celkové funkčnosti sítě.

V této práci jsem se zaměřil na centralizovanou kognitivní síť. V takovéto architektuře jsou získané informace sítě odesílány do centrální jednotky, podle níž jsou všechny uzly v síti řízeny. Výhodou je jednoduché vynucení zvolené politiky sítě.

Mezi hlavní parametry definující komunikaci patří vysílací výkon, přidělená část frekvenčního spektra a doba, po kterou je spektrum alokováno. Vytvořený model se zabýval třemi metodami:

- Spektrum je alokováno po proměnnou dobu, kterou definuje centrální jednotka. Může být určena individuálně například typem vyžadované služby, přáním uživatele nebo predikcí doby setrvání uživatele pod stávající základnovou stanicí.
- Spektrum je alokováno po předem danou konstantní dobu. Výhodou je jednoduchá implementace. Ve většině případů je ale spektrum přidělováno po zbytečně dlouhou dobu, poněvadž čas využití spektra neodpovídá násobku času přiděleného.
- Spektrum je alokováno do doby, dokud uživatel nedá pokyn. Tato metoda dosahuje nejlepších výsledků, pokud se nemění QoS nebo jiné parametry, které ovlivňují hodnotu přidělených frekvencí. Při využití u časově náročných služeb se dá očekávat výrazná úleva signalizačnímu kanálu.

Ve vlastně vytvořeném programu dosáhlo nejlepších výsledků propůjčení spektra po proměnnou dobu. To je zapříčiněno vysokou adaptibilitou konkrétním požadavkům uživatelů a služeb. Tento scénář bude pravděpodobně nejnáročnější na výpočetní výkon centrální jednotky i využití signalizačního kanálu. V simulaci sice dopadl velmi dobře i v počtu signalizačních zpráv, v reálném prostředí lze ale předpokládat, že tyto zprávy budou rozměrné z důvodu velkého množství informací potřebných ke správnému rozhodnutí centrální jednotky o době alokace spektra.

Alokace spektra na dobu neurčitou dosáhla špatného průměrného využití frekvenčního spektra, ale nejnižšího průměrného počtu signalizačních zpráv. Odeslání všech souborů trvalo uživatelům až o 141 % déle než v první metodě. Alokace spektra po konstantní dobu dopadla ve všem hůř než alokace po dobu proměnnou.

Pokud centrální jednotka disponuje vysokým výpočetním výkonem a je k dispozici dostatečně prostorný signalizační kanál, je nejlepší použít alokace kmitočtového spektra po proměnnou dobu. Pokud je třeba signalizační kanál šetřit, je nejvýhodnější použít kombinace alokace po proměnnou dobu s alokací na dobu neurčitou. Zažádá-li uživatel o přidělení spektra pro službu, která typicky trvá dlouho, ale její doba není ani přibližně známa (např. streamování videa), je nejlepší využít právě propůjčení spektra na dobu neurčitou.

Seznam zkratek

A/D	Analog-to-digital
ARQ	Automatic Repeat reQuest
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	Code Division Multiple Access
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform,
FTP	File Transfer Protocol
GSM	Global System for Mobile Communications
HLSME	High level Spectrum Management Entity
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
NSS	Network and Switching Subsystem
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PSK	Phase-Shift Keying
PU	Primary users
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SDR	Software Defined Radio
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SME	Spectrum Management Entity
SNR	Signal to Noise Ratio
SR	Software Radio
SU	Secondary users
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Literatura

- [1] Software defined radio: Enabling technologies. Editor Wally H Tuttlebee. New York: John Wiley, 2002, xxxvii, 402 s. ISBN 04-708-4318-7.
- [2] Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems. Editor Hüseyin Arslan. Dordrecht: Springer, 2007, xiii, 469 s. ISBN 978-1-4020-5541-6.
- [3] AKYILDIZ, Ian F., Won-Yeol LEE, Mehmet C. VURAN a Shantidev MOHANTY. A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks. IEEE Communications Magazine [online]. 2008
- [4] COGEU (Cognitive radio systems for efficient sharing of TV white spaces in European context). D2.1 – European TV White Spaces Analysis and COGEU use-cases
- [5] CHEN, Kwang-Cheng a Ramjee PRASAD. Cognitive radio networks. Chichester, U.K.: Wiley, 2009, ix, 359 s. ISBN 978-0-470-69689-7.
- [6] HAYKIN, Simon, David J. THOMSON a Jeffrey H. REED. Spectrum Sensing for Cognitive Radio. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2009
- [7] SALAMI, Gbenga, Olasunkanmi DUROWOJU, Alireza ATTAR, Oliver HOLLAND, Rahim TAFAZOLLI a Hamid AGHVAMI. A Comparison Between the Centralized and Distributed Approaches for Spectrum Management. IEEE Communications Surveys & Tutorials [online]. 2011, roč. 13, č. 2.
- [8] RAWAT, Danda B. a Gongjun YAN. Spectrum Sensing Methods and Dynamic Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: A Survey. International Journal of Research and Reviews in Wireless Sensor Networks [online]. 2011
- [9] AKYILDIZ, Ian F., Won-Yeol LEE, Mehmet C. VURAN a Shantidev MOHANTY. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. Computer Networks 50 [online]. 2006
- [10] JI, Zhu a K. J. Ray LIU. Dynamic Spectrum Sharing: A Game Theoretical Overview. IEEE Communications Magazine [online]. 2007
- [11] CEN, Zhiwei, Hong CHEN, Xiaomei LIU. Motion Prediction in Mobile Communication Systems from a Historical and Geographical Perspective. Computer Science and Engineering Department, Michigan State University [online]. 2002
- [12] YU, F. Richard, Minyi HUANG, Peter MASON a Zhiqiang LI. Distributed Cooperative Spectrum Sensing in Mobile Ad Hoc Networks with Cognitive Radios. [online].
- [13] SALAMI Gbenga a Rahim TAFAZOLLI. Inter-operator Dynamic Spectrum Sharing (Analysis, Cost and Implications). International Journal of Computer Networks [online]. Volume (2): Issue (1)

[14] WALKE, Bernhard. Mobile radio networks: networking and protocols. New York: John Wiley, c1999, xx, 871 p. ISBN 04-719-7595-8.

[15] HOSSAIN, Ekram, Dusit NIYATO a Dong In KIM. Evolution and future trends of research in cognitive radio: a contemporary survey. Wireless Communications and Mobile Computing. říjen 2013