

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

**Predikce pohybu uživatele pro zrychlení handoveru
v sítích WiMAX**

květen 2009

Diplomant:
Vedoucí diplomové práce:

Bc. Radek Šindelář
Ing. Zdeněk Bečvář

Prohlášení

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

V Praze dne 22.5.2009

podpis

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Radek Šindelář**
Studijní program: **Elektrotechnika a informatika**
Obor: **Telekomunikace a radiotechnika – blok Telekomunikace**
Název tématu: **Predikce pohybu uživatele pro zrychlení handoveru
v sítích WiMAX**

Zásady pro vypracování:

Seznamte se s typy handoverů v sítích podle standardu IEEE 802.16e-2005 a IEEE 802.16j. Proveďte rozbor možností na urychlení handoveru pomocí predikce pohybu uživatele. Na základě rozboru možných způsobů predikce pohybu proveďte simulace a jednotlivé metody predikce zhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] IEEE 802.16e-2005
- [2] IEEE 802.16j
- [3] Andrews, J. G. *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. Prentice Hall, 2007, ISBN 0-13-222552-2


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Bečvář**

Platnost zadání diplomové práce: **Do konce zimního semestru 2009/2010**


.....

Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
zástupce vedoucího katedry




.....

Doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá predikcí pohybu uživatele pro zrychlení handoveru v sítích WiMAX. Pojednává o typech handoverů v sítích podle standardu IEEE 802.16e a IEEE 802.16j a popisuje jejich celkový průběh. Dále se práce zaměřuje na možnosti zrychlení handoveru na základě predikce pohybu uživatele. Součástí práce je i návrh změn výměny řídicích zpráv, které jsou nutné pro dosažení zrychlení handoveru. Pro výpočty a simulace je využito vývojové prostředí programu MATLAB®.

Summary

This final thesis deals with mobile user movement prediction to reduce handover latency in WiMAX networks. It discusses handover types in IEEE 802.16e and IEEE 802.16j standards and describes their process. The thesis takes a view of possibilities leading to reduce handover latency by user movement prediction. Further, the thesis contains the proposal of the modifications in management message flow necessary to achieve the reduction of the handover latency. For calculations and simulations is used MATLAB® development environment.

Obsah

Úvod	1
Struktura práce.....	3
Kapitola 1	
Úvod do technologie WiMAX	5
1.1. Standard IEEE 802.16e.....	5
1.2. Standard IEEE 802.16j	7
Kapitola 2	
Handover	10
2.1. Handover v sítích podle standardu IEEE 802.16e.....	10
2.1.1.Počáteční fáze handoveru	11
2.1.1.1.Získání informací o topologii sítě.....	12
2.1.1.2.Vyhledávání sousedních BS	12
2.1.1.3.Proces přidružení	14
2.1.2.Handover	18
2.1.2.1.Opětovný výběr buňky	18
2.1.2.2.Rozhodnutí o handoveru a jeho zahájení.....	20
2.1.2.3.Opuštění obsluhující základnové stanice.....	20
2.1.2.4.Zrušení handoveru	21

2.1.2.5.Synchronizace s cílovou základnovou stanicí	21
2.1.2.6.Ranging proces	22
2.1.2.7.Ztráta spojení během handoveru.....	22
2.1.2.8.Opětovné připojení mobilní stanice do sítě	22
2.1.3.Macro Diversity Handover a Fast Base Station Switching	25
2.1.3.1.Macro Diversity Handover	25
2.1.3.2.Fast Base Station Switching	27
2.2. Handover v sítích podle standardu IEEE 802.16j.....	29
2.2.1.Počáteční fáze handoveru	30
2.2.1.1.Získání informací o topologii sítě.....	30
2.2.1.2.Vyhledání sousedních přístupových stanic a proces přidružení.....	31
2.2.2.Handover	33
2.2.2.1.Opětovný výběr buňky	33
2.2.2.2.Rozhodnutí o handoveru a jeho zahájení.....	33
2.2.2.3.Opuštění obsluhující přístupové stanice	35
2.2.2.4.Zrušení handoveru	35
2.2.2.5.Synchronizace s cílovou přístupovou stanicí	35
2.2.2.6.Ranging proces	35
2.2.2.7.Ztráta spojení během handoveru.....	36
2.2.2.8.Opětovné připojení mobilní stanice do sítě	36
2.2.3.Macro Diversity Handover a Fast Access Station Switching.....	36
 Kapitola 3	
Predikce pohybu pro zrychlení handoveru	38
3.1. Možnosti zrychlení handoveru pomocí predikce pohybu.....	38
3.1.1.Predikce pohybu pomocí parametru RSSI	39
3.1.2.Predikce pohybu vycházející ze statistiky handoverů	44

3.2. Navrhované zrychlení handoveru vyplývající z uvedených metod predikce pohybu ..	47
Závěr	52
Seznam zkratk přenášených řídicích zpráv	54
Seznam obrázků.....	55
Použitá literatura a zdroje	56

Úvod

Se stále se zvyšujícími nároky na přenosové rychlosti v přístupových sítích, vyvstává otázka použití vhodné technologie, která by vysokorychlostní přenosy dat umožnila realizovat. Jednou z mnoha možností je použití poměrně nové technologie WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), založené na standardu IEEE 802.16, jenž umožňuje vysokorychlostní širokopásmové bezdrátové připojení a to i na relativně velké vzdálenosti.

Vývoj tohoto systému začal v roce 1999 [1] kdy společnost IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) založila pracovní skupinu nazvanou „802.16“ označovanou též jako Wireless MAN (*Metropolitan Area Network*). První výsledky byly publikovány v roce 2002 pod označením 802.16 a definovaly přístupovou metodu s nutností přímé viditelnosti přístupového bodu – LOS (*Line of Sight*). Pozdější rozšíření označované jako 802.16a umožnilo komunikaci i bez přímé viditelnosti přístupového bodu – NLOS (*None Line of Sight*). Komplexní standard IEEE 802.16-2004 byl publikován na konci roku 2004 [1].

Pokračující vývoj, průmyslová podpora a stejně tak i velká flexibilita technologie WiMAX vedla k vývoji její mobilní verze, tedy standardu IEEE 802.16e, který byl vydán v únoru 2006 [2] a je též známý pod jménem Mobile WiMAX. Mobilní WiMAX umožňuje přechod pohybující se mobilní stanice mezi základnovými stanicemi, tzv. handover, případně i přechod mezi různými operátory tzv. roaming.

V posledních letech vzniká nebo již vzniklo mnoho dalších standardů rozšiřujících původní standard IEEE 802.16. Jedním takovým je i nově vznikající standard IEEE 802.16j, který je vyvíjen od března 2006 [3]. Specifikuje možnosti zvýšení propustnosti a celkové kapacity systému implementací tzv. retranslačních stanic do sítě. Podstatnou úlohou retranslačních stanic je také zlepšení pokrytí v oblastech se špatným či žádným příjmem signálu od základnové stanice. V těchto případech může být pro dovykrytí oblasti nasazení

další základnové stanice nemožné či ekonomicky nevýhodné a proto se volí retranslační stanice, která není přímo připojena do páteřní sítě a je jednodušší (z pohledu funkce v síti) než základnová stanice. Síť obsahující retranslační stanice se též označuje anglicky jako *multi-hop relay*¹ síť.

Mezi významné kroky ve vývoji technologie WiMAX patří založení WiMAX Fora v roce 2001, které sdružuje více než 500 společností [4] angažujících se v oblasti rozvoje technologie WiMAX. Jedná se o neziskovou organizaci vytvořenou pro certifikaci a zaručení vzájemné kompatibility přístupových zařízení jednotlivých výrobců a také podporu rozvoje širokopásmových bezdrátových sítí založených na standardu IEEE 802.16. Cílem WiMAX Fora je i urychlit zavádění tohoto systému na trh.

Důležitou vlastností bezdrátových buňkových sítí, jakou je i mobilní WiMAX, je podpora mobility uživatelů a tím pádem i možnost vykonání handoveru (předání spojení) mezi jednotlivými buňkami resp. základnovými stanicemi. Problematika procesu handoveru je ve zmíněných sítích považována za jednu z nejdůležitějších, protože vhodně navržený proces handoveru minimalizuje problémy spojené s přechodem pohybující se MS přes rozhraní dvou buněk. Existují však různé možnosti, jak proces handoveru ještě zefektivnit a zrychlit. Jednou z takových možností zrychlení handoveru je využití metod založených na predikci pohybu mobilní stanice. V dnešní době jsou tyto predikční metody hojně prozkoumávány a to především v souvislosti se zvýšením kvality poskytovaných služeb bezdrátových mobilních sítí.

¹ Slovo „relay“ lze v tomto případě přeložit jako „přenos“. Signál je postupně přenášen mezi BS → RS → MS nebo naopak. „Hop“ znamená skok nebo-li předání (signálu). Jestliže síť umožňuje více takovýchto předání (skoků) používá se označení multi-hop relay síť. Maximální počet předání signálu není ve většině případech stanoven. V buňkových sítích bez RS, jakou je i IEEE 802.16e, je obvykle použito pouze jediného předání (single-hop) – BS → MS nebo naopak.

Struktura práce

Úkolem této diplomové práce je popsat typy handoverů v síti WiMAX a diskutovat možnosti zrychlení handoveru na základě predikce pohybu uživatele. Práce je rozdělena celkem do tří kapitol, jejichž obsah lze nastínit asi následujícím způsobem. První kapitola stručně pojednává o fyzické vrstvě technologie WiMAX a shrnuje nejpodstatnější rozdíly předmětných standardů. Druhá kapitola se soustředí přímo na popis handoveru v sítích podle standardu IEEE 802.16e a IEEE 802.16j. Krok za krokem je popsán celý proces handoveru, který se skládá z několika fází. Nejdříve je vysvětlen význam pojmu handover a jsou uvedeny možné typy handoverů ve standardu IEEE 802.16e. Poté následuje popis počáteční fáze handoveru, při které mobilní stanice získává informace o topologii sítě a informace o dostupnosti okolních základnových stanic, aby se mohl handover uskutečnit. V dalších podkapitolách je již podrobně popsán samotný proces tzv. tvrdého handoveru, který se taktéž skládá z několika částí a při kterém je již uskutečněn přechod (handover) mobilní stanice mezi dvěma základnovými stanicemi. Nakonec je popsán i princip dvou – ve standardu IEEE 802.16e – nepovinných typů handoverů. Stejně je členěna také podkapitola věnující se handoveru ve standardu IEEE 802.16j. V poslední kapitole jsou pak uvedeny možnosti predikce pohybu uživatele umožňující zrychlení handoveru. Podrobněji jsou popsány dvě metody predikce vycházející z úrovně přijímaného signálu mobilní stanicí a ze statistiky handoverů v síti. Nakonec je ukázáno, jak lze pomocí těchto predikčních metod snížit zpoždění handoveru.

Naprostá většina materiálů použitých při zpracovávání dané problematiky, ať již jsou to elektronické knihy či internetové zdroje, je psána v angličtině. V některých případech tak vzniká problém s překladem odborných termínů a proto jsou uvedeny i anglické názvy. Pouhý překlad do češtiny by nemusel být dosti výstižný.

Pro lepší přehlednost a čitelnost textu jsou velmi často objevující se termíny *mobilní stanice*, *základnová(é) stanice*, *retranslační stanice* a *přístupová(é) stanice* zkráceny na MS (z angl. Mobile Station), BS (z angl. Base Station), RS (z angl. Relay Station) a AS (z angl. Access Station).

Kapitola 1

Úvod do technologie WiMAX

1.1. Standard IEEE 802.16e

Standard 802.16 umožňuje provozovat síť WiMAX s přístupovou metodou s nutností přímé viditelnosti přístupového bodu (LOS) nebo bez nutnosti přímé viditelnosti přístupového bodu (NLOS). Pro variantu LOS jsou určeny frekvence v rozmezí 10 – 66 GHz a pro NLOS se používá nižší frekvenční pásmo 2 – 11 GHz [2]. V těchto dvou frekvenčních pásmech je standardem 802.16 definováno celkem pět specifikací fyzické vrstvy (viz tabulka 1.1 – [2]).

Tabulka 1.1: Přehled specifikací fyzické vrstvy.

Označení fyzické vrstvy	Frekvenční pásmo [GHz]	Podpora mobility	Metoda duplexního přenosu
WirelessMAN-SC	10 – 60	Ne	TDD, FDD
WirelessMAN-SCa	2 – 11	Ano	TDD, FDD
WirelessMAN-OFDM	2 – 11	Ano	TDD, FDD
WirelessMAN-OFDMA	2 – 11	Ano	TDD, FDD
WirelessHUMAN	2 – 11	Ne	TDD

Pro mobilní WiMAX, kterým se tato práce zabývá, je však určeno pouze frekvenční pásmo 2 – 11 GHz a pouze tři z pěti výše uvedených specifikací fyzické vrstvy, které podporují mobilitu MS:

- **WirelessMAN-SCa**

Jedná se o systém s jedinou nosnou (*SCa – Single Carrier*), která může být modulována pomocí BPSK, QPSK, 16QAM nebo 64QAM [2]. Šířku přenosového kanálu lze u této varianty volit mezi 3,5; 7; 10 nebo 20 MHz [2][5] a duplexní přenos je realizován použitím časového duplexu TDD (*Time Division Duplex*) nebo kmitočtového duplexu FDD (*Frequency Division Duplex*), který předpokládá použití i asymetrického datového provozu.

- **WirelessMAN-OFDM**

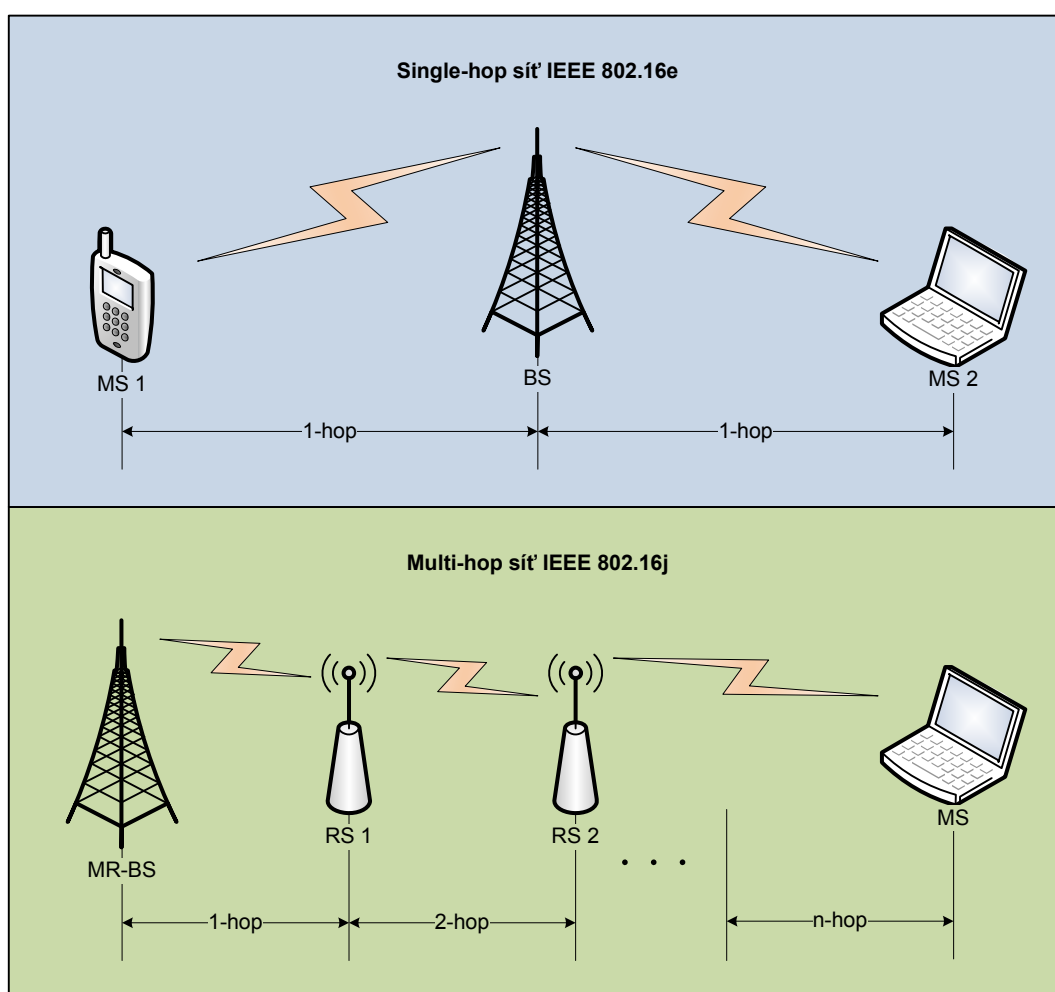
Tato varianta používá pro přenos dat metodu OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), kde je pro přenos dat použito více nosných kmitočtů (v tomto případě 256 nosných z toho 192 datových). Tyto nosné kmitočty mohou být stejně jako u předchozí varianty modulovány pomocí modulace BPSK, QPSK, 16QAM nebo 64QAM. Šířka pásma přenosového kanálu může být 1,75; 3; 3,5; 5,5 nebo 7 MHz [2][5].

- **WirelessMAN-OFDMA**

Poslední varianta s podporou mobility je založena na principu OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), jenž se jeví jako nejefektivnější metoda pro využití v sítích s přidělenou větší šířkou frekvenčního pásma. Stejně jako u OFDM se při použití OFDMA skládá poskytnuté frekvenční pásmo z mnoha nosných. Zásadní rozdíl v porovnání s OFDM spočívá v tom, že u OFDMA je možné jednotlivé nosné přiřadit více uživatelům v jednom časovém okamžiku [6]. Pro nosné kmitočty je opět možnost volby ze čtyř různých modulací a k dispozici jsou i různé šířky přenosového kanálu (1,25; 3,5; 7; 8,75; 14; 17,5 nebo 28 MHz [2][5]).

1.2. Standard IEEE 802.16j

Druhým standardem, který je předmětem této práce, je rozšiřující standard 802.16j. Jeho účelem není standardizace nové buňkové sítě, která by zahrnovala funkci multi-hop relay, ale rozšíření původní single-hop sítě 802.16e o multi-hop relay operace. Struktura obou sítí je znázorněna na obrázku 1.1 – v 802.16e je signál veden přímo od MS k BS, kdežto v 802.16j může být směřován přes několik RS až dojde k MS.



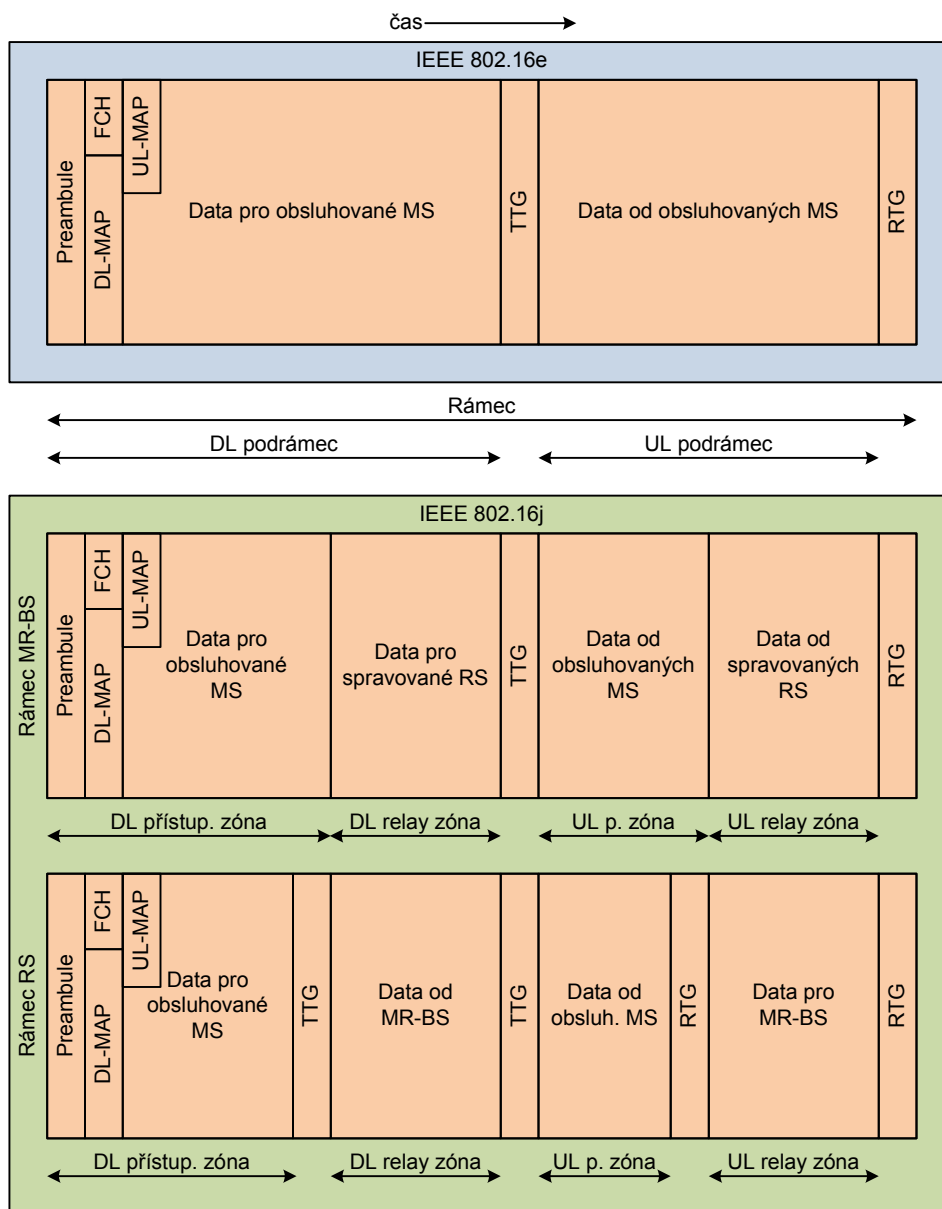
Obrázek 1.1: Porovnání struktur sítí podle IEEE 802.16e a IEEE 802.16j.

Standard 802.16j dále specifikuje celkem tři různé typy RS v závislosti na možnostech jejich mobility [7]:

-
- **pevná** (*fixed*)
 - **přenosná** (*nomadic*)
 - **mobilní** (*mobile*)

Každá s těchto tří RS má různorodou oblast využití. Pevnou RS lze z pohledu stacionární polohy přirovnat ke klasické BS a může být umístěna například v husté městské zástavbě na střeších budov pro navýšení kapacity sítě. Další uplatnění pevné nebo i přenosné RS je uvnitř budov, kde může odstranit zhoršené podmínky příjmu signálu od BS. Naproti tomu mobilní RS je možné použít v pohybujiících se vozidlech. Typickým příkladem takového vozidla je vlak, ve kterém RS obsluhuje obvykle větší počet účastníků (MS). V tomto případě se RS pohybuje vysokou rychlostí mezi buňkami, takže dochází i k přechodu RS mezi jednotlivými BS.

Rozšíření v podobě standardu 802.16j sebou přináší i určité změny fyzické a MAC vrstvy (*Media Access Control layer*). Jednou takovou změnou je omezení použití specifikací fyzické vrstvy pouze na WirelessMAN-OFDMA z 802.16e [3]. Účelem tohoto omezení je urychlit standardizační proces a zvýšit pravděpodobnost úspěchu nového standardu v praxi. U MAC vrstvy stojí za zmínku především úprava obsahu datového rámce a – z pohledu zde řešené problematiky – rozšíření řídicích (signalizačních) zpráv posílaných během handoveru. Datový rámec, jehož délka může být 2; 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5 nebo 20 ms [2], je v obou standardech rozdělen na DL (*downlink*) podrámec a UL (*uplink*) podrámec [2]. V 802.16j je každý z těchto podrámců ještě rozdělen na přístupovou zónu (*access zone*) a relay zónu (*relay zone*) [3]. DL přístupová zóna představuje data vysílaná pro MS a UL přístupová zóna zase data od MS přijímaná. V relay zóně se pak odehrává komunikace mezi RS a nadřazenou stanicí. Tou může být buď další RS nebo již obsluhující BS. DL podrámec a UL podrámec, stejně tak i přístupová a relay zóna v rámci RS, jsou odděleny intervalem TTG (*Transmit/receive Transition Gap*) a na konec rámce a UL přístupové zóny je vložen interval RTG (*Receive/transmit Transition Gap*). Oba intervaly umožňují anténě přejít z vysílacího režimu do přijímacího a naopak. Přesná struktura rámce resp. změna jeho obsahu během přenosu závisí na režimu přenosu a na počtu skoků signálu. Standard 802.16j definuje tři režimy přenosu [3]: transparentní (*transparent relaying*) – MS na přenosové trase „nevidí“ RS a ze svého pohledu je připojena přímo k obsluhující BS; netransparentní (*non-transparent relaying*) – RS je pro MS viditelná; kombinující (*cooperative Relaying*). Porovnání struktury rámce v 802.16e a v 802.16j (pro netransparentní přenos) je na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Struktura rámce v 802.16e a 802.16j (nettransparentní přenos) pro TDD.

[2][3][7]

Přes všechny provedené změny musí být nový standard kompatibilní s již vyvinutými MS pro 802.16e. Jediným místem v radiovém přenosovém řetězci kde musí nutně dojít ke změnám jsou BS, které musejí být pro podporu multi-hop relay přenosů přizpůsobeny [3].

Kapitola 2

Handover

2.1. Handover v sítích podle standardu IEEE 802.16e

Pod pojmem handover je myšlen proces, při kterém pohybující se MS přechází od jedné BS k jiné. Nejčastějším důvodem přechodu k jiné BS bývá nízká úroveň signálu od obsluhující BS nebo také případ, kdy MS může být obsluhována BS s vyšším stupněm kvality služby (*QoS*) [2]. Standard IEEE 802.16e definuje celkem tři typy handoveru [2]:

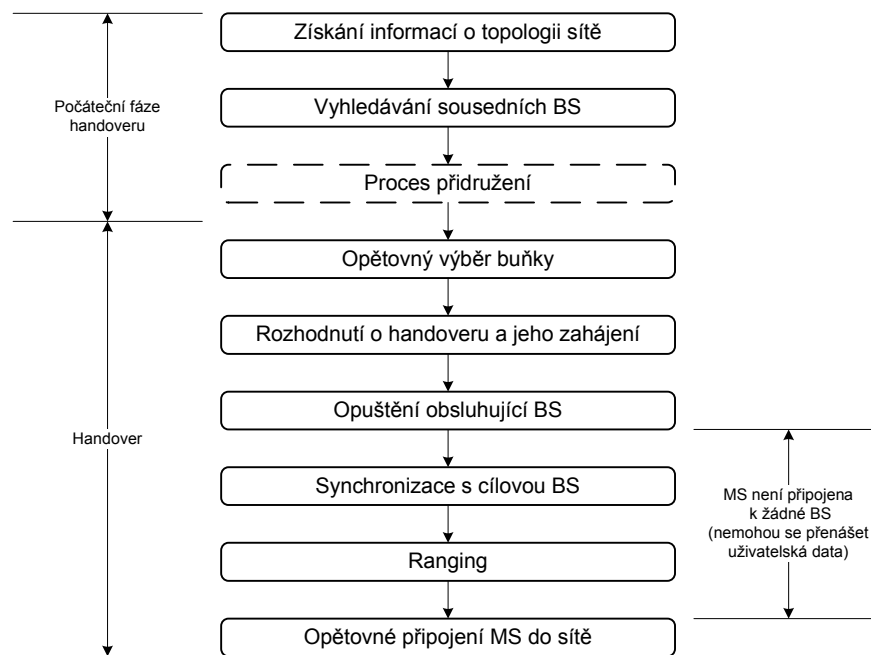
- **Hard handover** (HHO; tvrdý handover)
- **Macro Diversity Handover** (MDHO; bude ponecháno bez překladu)
- **Fast Base Station Switching** (FBSS; lze přeložit jako „rychlé přepojování mezi BS“).

Tvrdý handover je v síti WiMAX podporující mobilitu MS povinný, zatímco zbylé dva režimy (typy) handoveru jsou volitelné.

Pokud je v síti zvolen režim tvrdého handoveru, komunikuje MS vždy pouze s jednou BS. Má-li dojít k předání MS mezi dvěma BS, je nejprve ukončeno spojení s obsluhující BS a až poté je navázáno spojení s novou BS. V režimu MDHO je MS současně spojena s více BS (je stanoven seznam BS, ke kterým je připojena). Při pohybu MS jsou některá spojení díky slábnoucímu signálu rušena a jiná zase navazována (odpojená BS je ze seznamu odebrána a jiná může být do seznamu zase přidána). V tomto případě se jedná o tzv. měkký handover (*soft handover*). Poslední možností je režim FBSS, který je podobný režimu MDHO avšak s tím rozdílem, že je v seznamu BS zvolena jedna hlavní BS (*Anchor BS*), pomocí které

je MS připojena do sítě. Ostatní BS ze seznamu jsou MS monitorovány a v případě, že se nějaká BS ze seznamu ukáže jako vhodnější pro připojení do sítě (pro přenos dat), MS k ní přejde a ta se stává hlavní BS.

Proces handoveru lze rozdělit do dvou fází (počáteční fáze a fáze samotného handoveru), přičemž každá s těchto fází obsahuje několik částí (viz obrázek 2.1). Jednotlivé fáze a jejich části jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách, včetně řídicích zpráv MAC vrstvy, které jsou při procesu handoveru posílány mezi MS, obsluhující BS a sousední BS.



Obrázek 2.1: Fáze a části handover procesu.

2.1.1. Počáteční fáze handoveru

V počáteční fázi handoveru, která je jakousi přípravou na samotný handover, je nejprve potřeba získat informace popisující topologii sítě (resp. informace o sousedních BS) a kvalitativní parametry radiového spojení mezi MS a dostupnými BS. Tyto informace získá MS z periodicky vysílané řídicí zprávy informující o topologii sítě a také při procesu vyhledávání, kdy vyhledává dostupné BS vhodné pro handover. MS může navíc během vyhledávání provést nepovinné přidružení k sousední BS, pomocí ranging procedury mezi MS a cílovou BS, ke které se chce MS připojit.

2.1.1.1. Získání informací o topologii sítě

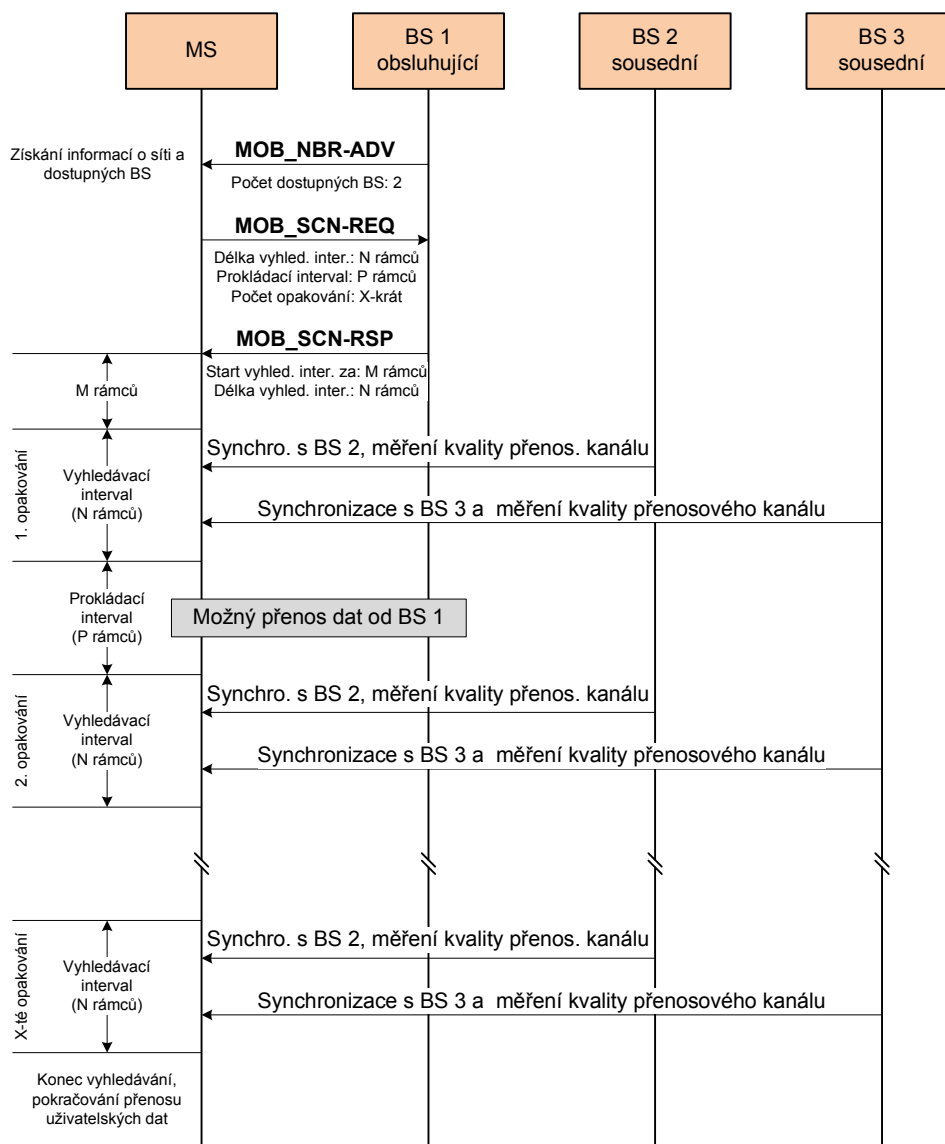
BS pravidelně vysílá řídicí zprávy MOB_NBR-ADV [2], které obsahují identifikátory sítě a informace o její topologii a sousedních BS. Tyto řídicí zprávy mohou sloužit pro počáteční přístup do sítě nebo pro uskutečnění počáteční fáze handoveru. Informace obsažené v MOB_NBR-ADV zprávách získává každá BS pomocí DCD/UCD zpráv, které se mohou přenášet z páteřní sítě. Samotné DCD zprávy jsou pro MS také dostupné a umožňují, spolu s dalšími řídicími zprávami, její synchronizaci se sousední BS (viz následující podkapitola).

2.1.1.2. Vyhledávání sousedních BS

V další části počáteční fáze handoveru skenuje MS dostupné BS za účelem vyhledání potenciální cílové BS pro uskutečnění handoveru. Doba, během které MS vyhledává dostupné BS, se nazývá vyhledávací interval (*scanning interval*) [2]. Samotný proces vyhledávání (viz obrázek 2.2) se skládá z přenosu tří řídicích zpráv mezi MS a BS. Jsou to zprávy [2]:

- MOB_SCN-REQ – je posílána MS jako žádost o přidělení vyhledávacích intervalů a ostatních parametrů procesu vyhledávání (viz dále).
- MOB_SCN-RSP – je posílána BS jako odpověď na předchozí zprávu a oznamuje přijetí či odmítnutí žádosti. Obsahuje požadované parametry procesu vyhledávání.
- MOB_SCN-REP – je posílána MS a informuje obsluhující BS o výsledku vyhledávání okolních BS. Tato zpráva je nepovinná.

Posláním zprávy MOB_SCN-REQ žádá MS BS o přidělení vyhledávacího intervalu za účelem vyhledání dostupných BS vhodných pro handover. Tato zpráva obsahuje odhadovanou dobu potřebnou pro vyhledání sousedních BS, požadovaný počet vyhledávacích intervalů resp. interval jejich opakování, prokládací interval tj. perioda, se kterou se vkládají vyhledávací intervaly do přenosu užitečných dat, počet skenovaných nebo přidružených (*associated*) sousedních BS, které byly zahrnuty ve zprávě MOB_NBR-ADV, typ skenování resp. asociace (viz dále), která má být použita, a jiné.



Obrázek 2.2: Vyhledávání dostupných BS. [2]

Odpověď obsluhující BS na MOB_SCN-REQ je zpráva MOB_SCN-RSP. Touto zprávou je MS přidělen požadovaný vyhledávací interval potřebné délky a označena je v ní také skupina sousedních BS. Jestliže zpráva MOB_SCN-RSP nebyla během určité doby přijata, je zpráva MOB_SCN-REQ odeslána znovu. Zpráva MOB_SCN-RSP může být poslána i jako nevyžádaná. V tomto případě je hodnota doby vyhledávání nastavena na nulu (vyhledávací interval není explicitně přidělen) a zpráva slouží jen k aktualizaci některých zprávou přenášených parametrů.

Přijetím zprávy MOB_SCN-RSP může MS v přiděleném vyhledávacím intervalu začít vyhledávat BS v ní uvedené. Kromě doporučených BS, se může MS v daném vyhledávacím intervalu pokusit vyhledat i jinou dostupnou BS. Je-li během vyhledávání nalezena vhodná BS

pokusí se s ní MS sesynchronizovat a zjistit přenosové parametry radiového kanálu. Pro úspěšnou synchronizaci a změření parametrů radiového kanálu musí MS přijmout tzv. preambuli, kterou začíná každý rámeček (obrázek 1.2) resp. DL podrámeček přenášející data mezi BS a MS, pole FCH (*Frame Control Header*) popisující délku a vlastnosti několika následujících datových bloků, zprávu DL-MAP určující kdy a jaká data jsou určena pro konkrétní MS a zprávu DCD definující typ modulace a kódování použitých na každý datový blok [6].

V průběhu trvání vyhledávacího intervalu je přenos užitečných dat k MS pozastaven. Jsou uložena do paměti BS a jsou vysílána buď v prokládacím intervalu nebo až po ukončení režimu vyhledávání. MS může také kdykoliv během vyhledávacího intervalu ukončit skenování (režim vyhledávání) a vrátit se zpět do režimu přenosu dat posláním nějaké datové jednotky (MAC PDU). Jestliže obsluhující BS přijme od MS MAC PDU během vyhledávacího intervalu, předpokládá, že MS již není v režimu vyhledávání. Režim vyhledávání je také ukončen kdykoliv je od MS poslána zpráva MOB_SCN-REQ nebo od obsluhující BS poslána zpráva MOB_SCN-RSP s hodnotou doby vyhledávání nastavenou na nulu.

Poslední řídicí zprávou, která se v této fázi handoveru může přenášet je MOB_SCN-REP. Touto zprávou informuje MS obsluhující BS po každém vyhledávacím intervalu o výsledku vyhledávání okolních BS, ale pouze v případě, že to bylo v poslední zprávě MOB_SCN-RSP indikováno.

2.1.1.3. Proces přidružení

Pro správný výběr cílové BS potřebuje MS získat a zaznamenat důležité provozní informace. Vedle přenosových parametrů radiového kanálu, může MS pro získání dalších parametrů spojení tzv. ranging parametrů („synchronizačních“ parametrů) provést nepovinné přidružení (*association*) k sousední BS. Tyto ranging parametry a další provozní informace poslouží při výběru cílové BS pro handover i pro urychlení handoveru na cílovou BS. Přidružení se vykonává pomocí počátečního ranging procesu („zaměřovacího“ procesu), který se vyskytuje i v průběhu vyhledávacího intervalu s ohledem na jednu ze sousedních BS. Ranging proces, nebo-li jednoduše ranging („zaměřování“), je procedura fyzické vrstvy, která má za úkol udržovat kvalitu a spolehlivost radiového spoje mezi MS a BS. Pokud BS přijímá od MS ranging přenos, zpracovává následně přijatý signál, ze kterého určuje parametry radiového spojení jakými jsou: impulsová odezva přenosového kanálu, CINR (*Carrier to*

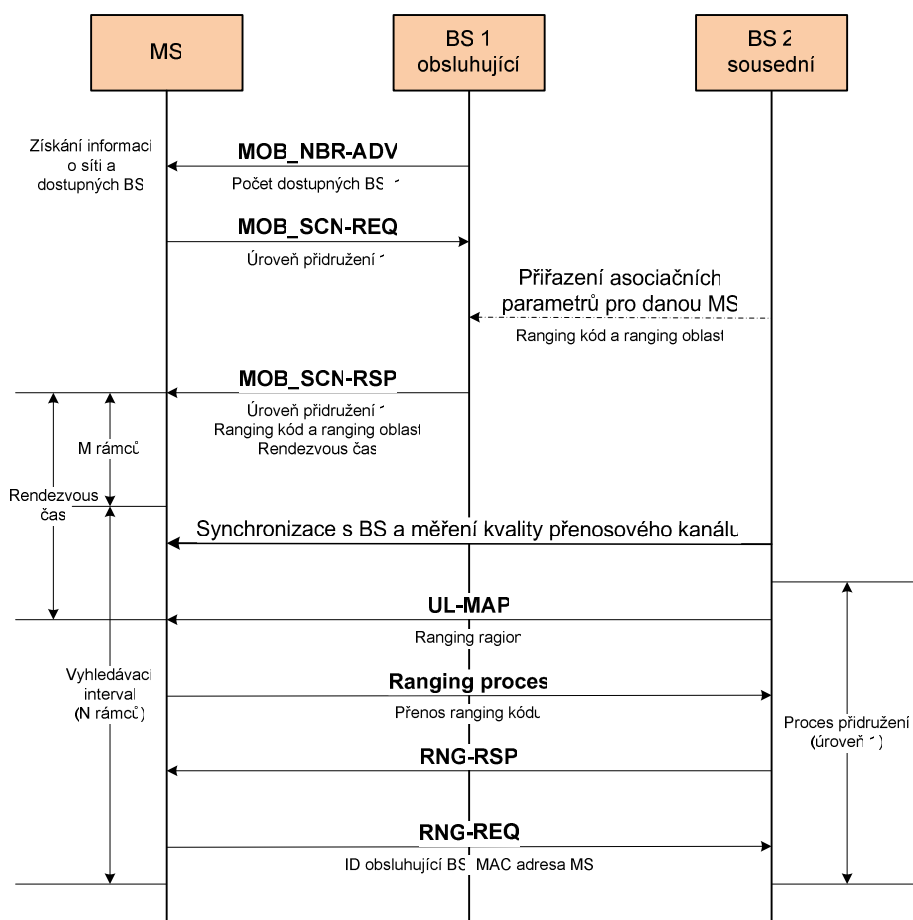
Interference plus Noise Ratio) a čas příjmu signálu. Tyto ranging parametry umožní BS informovat MS o změnách přenosových parametrů kanálu, to znamená časový offset a výkonová úroveň signálu. Ranging proces tedy umožní BS a MS výkonovou a časovou synchronizaci při přihlášení nebo při návratu MS do sítě. Čas potřebný na synchronizaci s cílovou BS může být pomocí funkce přidružení redukován. Počáteční ranging proces zahrnuje přenos i předem určené pseudonáhodné sekvence tzv. ranging kódu, který je použit pro počáteční přihlášení do sítě a při procesu přidružení jako prostředek sloužící k rozlišení jednotlivých ranging procesů mezi BS a různými MS. [2][8]

Typ skenování resp. asociace je indikován ve zprávě MOB_SCN-REQ resp. MOB_SCN-RSP. V ní je konkrétně poznamenáno, zda se má přidružení k nějaké sousední BS vykonat či nikoliv, a pokud ano, tak jaká úroveň přidružení má být zvolena. Ve standardu IEEE 802.16e jsou definovány celkem tři úrovně přidružení MS k sousední BS [2][8]:

- **Úroveň přidružení 0 – Skenování / asociace bez koordinace**

Pokud je síť zvolena úroveň přidružení 0 (viz obrázek 2.3), obsluhující BS a MS vyjednávají o intervalech přidružení a jejich trvání pomocí zpráv MOB_SCN-REQ a MOB_SCN-RSP. Na základě toho přidělí obsluhující BS opakující se intervaly, ve kterých může MS zaměřit sousední BS. MS tedy během vyhledávacího intervalu nejen skenuje sousední BS, ale vykonává i ranging proces pro asociaci s některou z cílových BS uvedených ve zprávě MOB_NBR-ADV. Pokud MS nalezne nějakou cílovou BS, tato nemá žádné informace o dané MS a při ranging přenosu poskytuje pouze přístup k přenosovým prostředkům založený na metodě soupeření o přístup k médium (*contention-based*). Na začátku ranging procesu vybrala MS náhodný ranging kód z ranging domény cílové BS a ten je přenášen pomocí výše uvedené metody. Poté co BS úspěšně přijme ranging kód, pošle zprávu RNG-RSP a přidělí tak MS vzestupné pásmo na dobu potřebnou pro přenos zprávy RNG-REQ. Zpráva RNG-REQ obsahuje MAC adresu MS a ID obsluhující BS, od které chce MS vykonat handover. Tato úroveň přidružení tedy používá pouze základní ranging proces pro asociaci s cílovou BS a nevyžaduje žádnou koordinaci s obsluhující BS. Je zde však možnost kolize ranging kódů (MS vybírá z omezeného seznamu ranging kódů) během asocičního procesu, což může prodloužit dobu potřebnou pro úspěšné přidružení.

definována doba (ranging region) určená pro přenos přiřazeného ranging kódu. Poté MS určí čas kdy se bude přenášet přiřazený ranging kód v celkové době vyhrazené pro spojení s cílovou BS v době ranging procesu. Nakonec následuje přenos řídicích zpráv RNG-RSP a RNG-REQ mezi MS a cílovou BS jako při úrovni přidružení 0. Každá ze sousedních BS přiřazuje odlišný kód nebo odlišný čas pro spojení s cílovou BS v době procesu přidružení, takže možnost kolize s ostatními MS je při ranging procesu téměř vyloučená.



Obrázek 2.4: Proces přidružení – úroveň 1. [8]

- **Úroveň přidružení 2 – Asociace s asistencí sítě**

Posledním typem asociace, o kterou může MS zasláním zprávy MOB_SCN-REQ obsluhující BS požádat, je přidružení za asistence sítě. Stejně jako při úrovni přidružení 1, koordinuje obsluhující BS asociační proceduru s požadovanými sousedními BS uvedenými ve zprávě MOB_SCN-REQ. Avšak u této úrovně přidružení po odeslání ranging kódu k sousední BS již MS neočekává odpověď pomocí zprávy RNG-RSP.

Místo toho je zpráva RNG-RSP od každé v seznamu uvedené sousední BS poslána přes páteřní síť obsluhující BS. Obsluhující BS pak všechny související ranging informace od sousedních BS zahrne do zprávy MOB_ASC-REP, kterou pošle MS. Po přijetí této zprávy MS aktualizuje asociační parametry o každé přidružené BS. Určitou výhodou této úrovně přidružení je, že poskytuje rychlou asociaci se sousední BS bez přístupové kolize, ale vyžaduje přenos více řídicích (signalizačních) zpráv mezi obsluhující a cílovou BS.

2.1.2. Handover

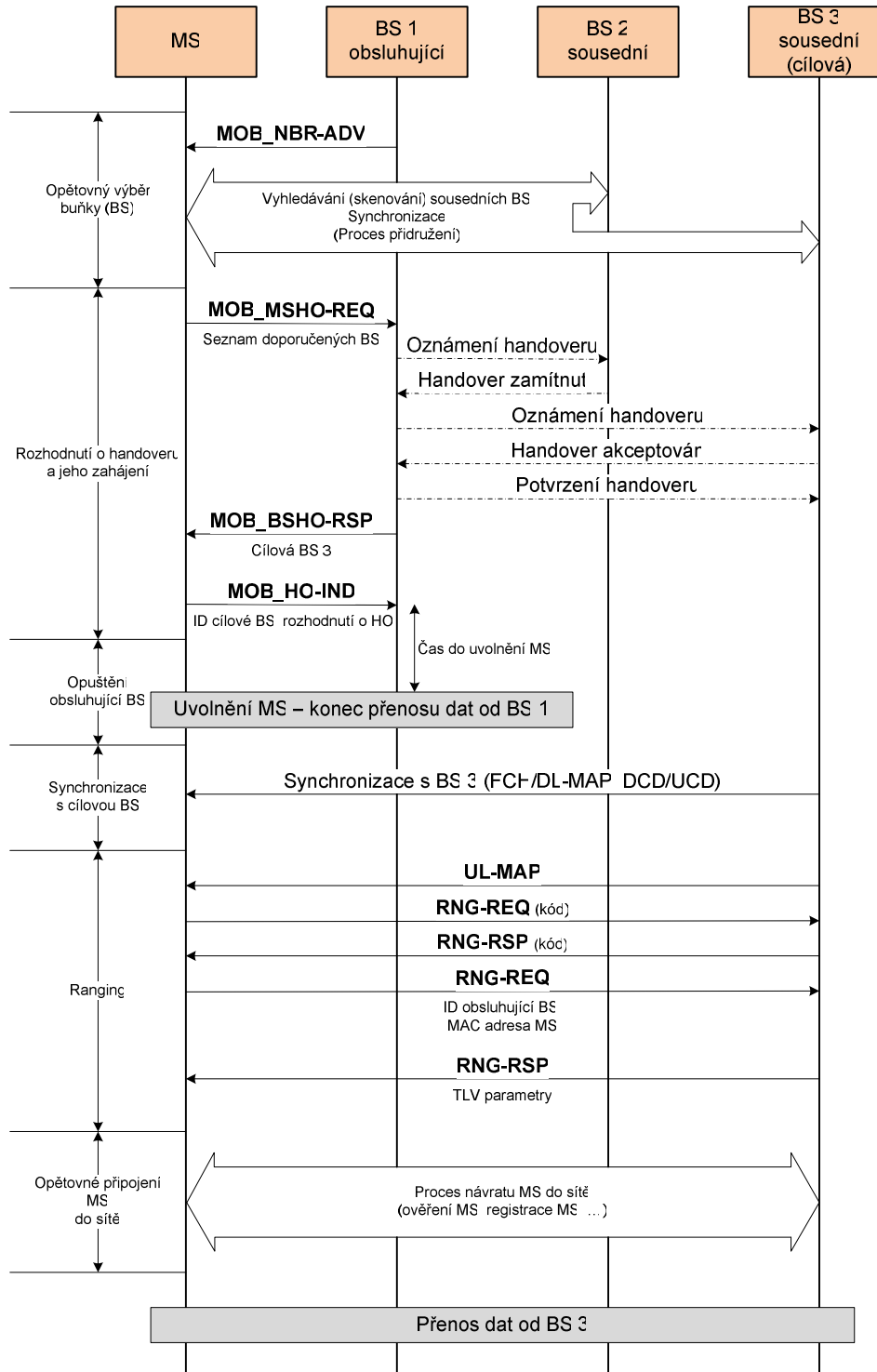
Jak již bylo řečeno výše, handover je proces, při kterém pohybující se MS přechází od jedné BS k jiné, a je tedy základním předpokladem mobility v síti podle standardu 802.16e. V této druhé fázi handover procesu je využito informací získaných ve fázi počáteční. Proces handoveru, znázorněný na obrázku 2.5, se skládá z několika částí, které jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. Jsou jimi: opětovný výběr buňky, rozhodnutí o handoveru a jeho zahájení, synchronizace s cílovou BS, opuštění obsluhující BS, opětovné připojení do sítě a možné zrušení handoveru. Signalizace mezi MS a BS je i zde stejně jako v předchozí fázi realizována pomocí několika řídicích zpráv MAC vrstvy. Konkrétně zprávami [2][8]:

- MOB_MSHO-REQ – je posílána MS, která chce zahájit handover. Obsahuje informace o doporučených sousedních BS.
- MOB_BSHO-RSP – je posílána BS jako odpověď na příjem zprávy MOB_MSHO-REQ a obsahuje informace o sousedních BS doporučených pro handover.
- MOB_BSHO-REQ – je posílána BS a slouží pro zahájení handoveru. MS po přijetí této zprávy skenuje sousední BS, které jsou v této zprávě specifikovány.
- MOB_HO-IND – je posílána MS obsluhující BS za účelem informovat o konečném stavu handover procesu, který může mít za následek opuštění obsluhující BS, zrušení handoveru nebo zamítnutí handoveru.

2.1.2.1. Opětovný výběr buňky

Opětovný výběr buňky (obsluhující BS) vychází z informací, které MS získala při skenování případně asociaci s některou ze sousedních BS a které určují vhodnost BS jako cílových pro uskutečnění handoveru. MS může ještě při opětovném výběru buňky zohlednit

informace obsažené ve zprávě MOB_NBR-ADV, aby získala představu o dostupnosti sousedních BS. V této části handover procesu zůstává MS zatím připojena ke své obsluhující BS a k jejímu předání cílové BS dojde až v jedné z dalších částí handover procesu.



Obrázek 2.5: Proces handoveru. [8]

2.1.2.2. Rozhodnutí o handoveru a jeho zahájení

Samotný handover začíná přechodem MS od obsluhující BS k cílové BS. Rozhodnutí o handoveru může učinit buď MS nebo obsluhující BS a nebo také síť. Handover může být zahájen posláním zprávy MOB_MSHO-REQ od MS nebo MOB-BSHO-REQ od obsluhující BS. Pokud byl handover iniciován MS, tedy zprávou MOB_MSHO-REQ, je to potvrzeno ze strany obsluhující BS posláním zprávy MOB_BSHO-RSP. Zahájila-li handover BS, není od MS žádná potvrzovací řídicí zpráva přenášena a zpráva MOB-BSHO-REQ je považována za „nevyžádanou“. To je například tehdy, když BS potřebuje přinutit MS k handoveru (to je pak signalizováno jedním z parametrů uvnitř zprávy).

Jestliže obsluhující BS přijme zprávu MOB_MSHO-REQ nebo usoudí, že MS potřebuje vykonat handover, pošle přes páteřní síť zprávu, obsahující informace o MS jedné nebo více sousedním BS, aby oznámila, že MS zamýšlí vykonat handover. Poté co obsluhující BS přijme od sousedních BS odpověď, vybere jednu cílovou BS vhodnou pro handover podle statusu odpovědní zprávy (handover je buď cílovou BS akceptován nebo zamítnut) a pošle potvrzovací zprávu vybrané cílové BS. Obsluhující BS následně informuje MS o vybrané cílové BS zprávou MOB_BSHO-RSP (v případě, že handover iniciovala MS) nebo MOB_BSHO-REQ (v případě, že handover iniciovala BS). Kritéria pro vybrání a následné doporučení cílové BS mohou zahrnovat faktory, jakými jsou například kvalita služby (*QoS*) či výkonové parametry poskytované MS potenciální cílovou BS. Tyto informace získá obsluhující BS od potenciální cílové BS přes páteřní síť.

Když MS úspěšně přijme zprávu MOB_BSHO-RSP nebo MOB_BSHO-REQ učiní rozhodnutí o handoveru a pošle zprávu MOB-HO-IND, kterou oznamuje obsluhující BS konečné rozhodnutí, které může znamenat uvolnění obsluhující BS, ale též zrušení handoveru či jeho zamítnutí. Handover by měla MS vykonat k jedné, ve zprávě MOB_BSHO-RSP doporučené cílové BS, ale to je pouze doporučené nikoliv vyžadované. MS se může rozhodnout, že se pokusí vykonat handover k jiné BS, která nemusí být zahrnuta v seznamu BS ve zprávě MOB_BSHO-RSP. Jestliže MS signalizuje zamítnutí pokynu pro handover na od obsluhující BS vybranou BS ve zprávě MOB-HO-IND, posílá BS znovu zprávu MOB_BSHO-RSP, ve které je uveden nový seznam sousedních BS. [2][8]

2.1.2.3. Opuštění obsluhující základnové stanice

Pokud se mobilní stanice rozhodne po přijetí zprávy MOB_BSHO-RSP či MOB_BSHO-REQ vykonat handover, je potřeba nějakým způsobem ukončit spojení

s obsluhující základnovou stanicí. Ukončení spojení je ze strany mobilní stanice uskutečněno pomocí zprávy MOB_HO-IND, která obsahuje ukazatel indikující opuštění obsluhující základnové stanice. Obdrží-li obsluhující základnová stanice žádost o uvolnění mobilní stanice ze své obsluhy, stanoví se doba (je určen počet časových jednotek, přičemž jedna časová jednotka má délku trvání 100 ms [2]), po kterou bude ještě obsluhující základnová stanice udržovat spojení s mobilní stanicí. Po vypršení této doby ukončí obsluhující základnová stanice obsluhu mobilní stanice a odebere jí poskytnuté přenosové prostředky. Nicméně, bez ohledu na dobu nastavenou pro udržení spojení, může obsluhující základnová stanice ukončit obsluhu mobilní stanice dříve, jestliže přes páteřní síť přijala od cílové základnové stanice zprávu, která signalizuje, že mobilní stanice je již spojena s cílovou základnovou stanicí a má přístup do sítě. [8]

2.1.2.4. Zrušení handoveru

Nastávající či probíhající handover může MS kdykoliv zrušit, bez ohledu na to, zda byl handover zahájen MS nebo obsluhující BS. Případné zrušení handoveru oznamuje MS ve zprávě MOB_HO-IND, ve které je patřičný ukazatel nastaven na hodnotu „handover zrušen“. Tento ukazatel může být nastaven také na hodnotu „handover odmítnut“ a to v případě, že chce MS vykonat handover na jinou cílovou BS než na tu, která byla vybrána obsluhující BS (doporučena ve zprávě MOB_BSHO-RSP resp. MOB_BSHO-REQ). Obdrží-li tedy obsluhující BS zprávu MOB_HO-IND, ve které je daný ukazatel nastaven na jednu ze zmíněných hodnot, proces handoveru je přerušen a MS s obsluhující BS pokračují v běžné komunikaci. [2][8]

2.1.2.5. Synchronizace s cílovou základnovou stanicí

Jakmile je stanovena konečná cílová BS, pokusí se MS sesynchronizovat s jejím datovým přenosem v sestupném směru (DL). To provede tak, že přijme a následně zpracuje preambuli rámce resp. DL podrámce cílové BS, která poskytuje MS časovou, frekvenční a výkonovou synchronizaci s cílovou BS. Pro získání informací o parametrech radiového kanálu pak ještě MS dekóduje DL-MAP, UL-MAP, DCD a UCD zprávy, které následují za preambulí. Jestliže MS dříve přijala zprávu MOB_NBR-ADV, ve které byla zahrnuta konečná cílová BS, získala již její BSID, frekvenci přenosového kanálu a zprávy DCD a UCD, a celkový proces synchronizace se tak může urychlit. [8]

2.1.2.6. Ranging proces

Po synchronizaci s DL cílové BS provádí MS a cílová BS počáteční ranging proces (resp. handover ranging proces) tak, jak byl popsán podkapitole 2.1.1.3..

2.1.2.7. Ztráta spojení během handoveru

Během handoveru může nastat situace, kdy MS ztratí spojení s obsluhující BS, aniž by byl handover k cílové BS kompletně dokončen. Ztráta spojení je MS zjištěna při neúspěšném příjmu dat nebo když selže opakující se ranging proces (pokud byl překročen dovolený limit poslaných RNG-REQ zpráv). Není-li tedy handover na cílovou BS (vybranou od obsluhující BS resp. sítě) dokončen, může se MS pokusit o handover k cílové BS, kterou sama vybrala při procesu opětovného výběru buňky. Může však také zkusit pokračovat v komunikaci s obsluhující BS posláním zprávy MOB_HO-IND, ve které bude ukazatel stavu handoveru nastaven na hodnotu „handover zrušen“. Pokud selžou všechny zmíněné pokusy o návrat do sítě, postupuje pak MS jako při počátečním přihlášení do sítě. [8]

2.1.2.8. Opětovné připojení mobilní stanice do sítě

Poslední částí (procedurou) druhé fáze procesu handoveru je návrat MS do sítě přes novou BS, který je MS započat po úspěšně vykonané synchronizaci a ranging procesu s touto BS. Při návratu (nebo přihlašování) MS do sítě jsou prováděny následující kroky (postup zobrazen na obrázku 2.6) [5]:

1. Stanovení možností komunikace

Jedná se první krok po ranging procesu, který je nezbytné provést pro úspěšnou komunikaci MS a BS. Zahrnuje výměnu informací o základních přenosových možnostech MS (podporované parametry fyzické vrstvy – modulace, kódování, vstupní a výstupní výkonové úrovně apod.). Výměna těchto parametrů je realizována prostřednictvím zpráv SBC-REQ a SBC-RSP.

2. Ověření MS a výměna klíčů pro šifrování

Při autorizačním procesu a výměně klíčů pro zabezpečení komunikace mezi MS a BS je použit PKM (*Privacy Key Management*) protokol. Autorizace MS je zahájena posláním zprávy PKM-REQ, která obsahuje identifikační údaje MS. Další zprávou PKM-REQ pak MS žádá o autorizaci a sděluje cílové BS informace o podporovaných šifrovacích

souborech (*cryptographic suites*). Po úspěšném ověření MS odpovídá cílová BS zprávou PKM-RSP, která akceptuje podporu uvedených šifrovacích souborů, stanovuje dobu platnosti přiřazených klíčů apod..

3. Registrace MS

Provedením registrace je MS umožněn přístup do sítě přes cílovou BS. Proces registrace zahajuje MS posláním zprávy REG-REQ cílové BS. V této řídicí zprávě jsou také stanoveny různé parametry komunikace – např. parametry ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), verze IP protokolu apod.. Jako odpověď na obdrženu žádost posílá cílová BS zprávu REG-RSP.

4. Vytvoření IP spojení²

Po úspěšné registraci MS je dalším krokem získání IP adresy (a IP adres dalších serverů, viz dále) z DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) serveru. Při získání IP adresy se postupuje podle doporučení RFC 2131.

5. Nastavení data a času²

Potřebné nastavení data a času získává MS od k tomu určenému serveru (*Time server*). Komunikace s tímto serverem probíhá pomocí protokolu definovaném v doporučení RFC 868.

6. Přenos provozních parametrů²

V předposlední fázi přihlašování MS do sítě stáhne MS pomocí TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*) protokolu svůj konfigurační soubor specifikující provozní parametry.

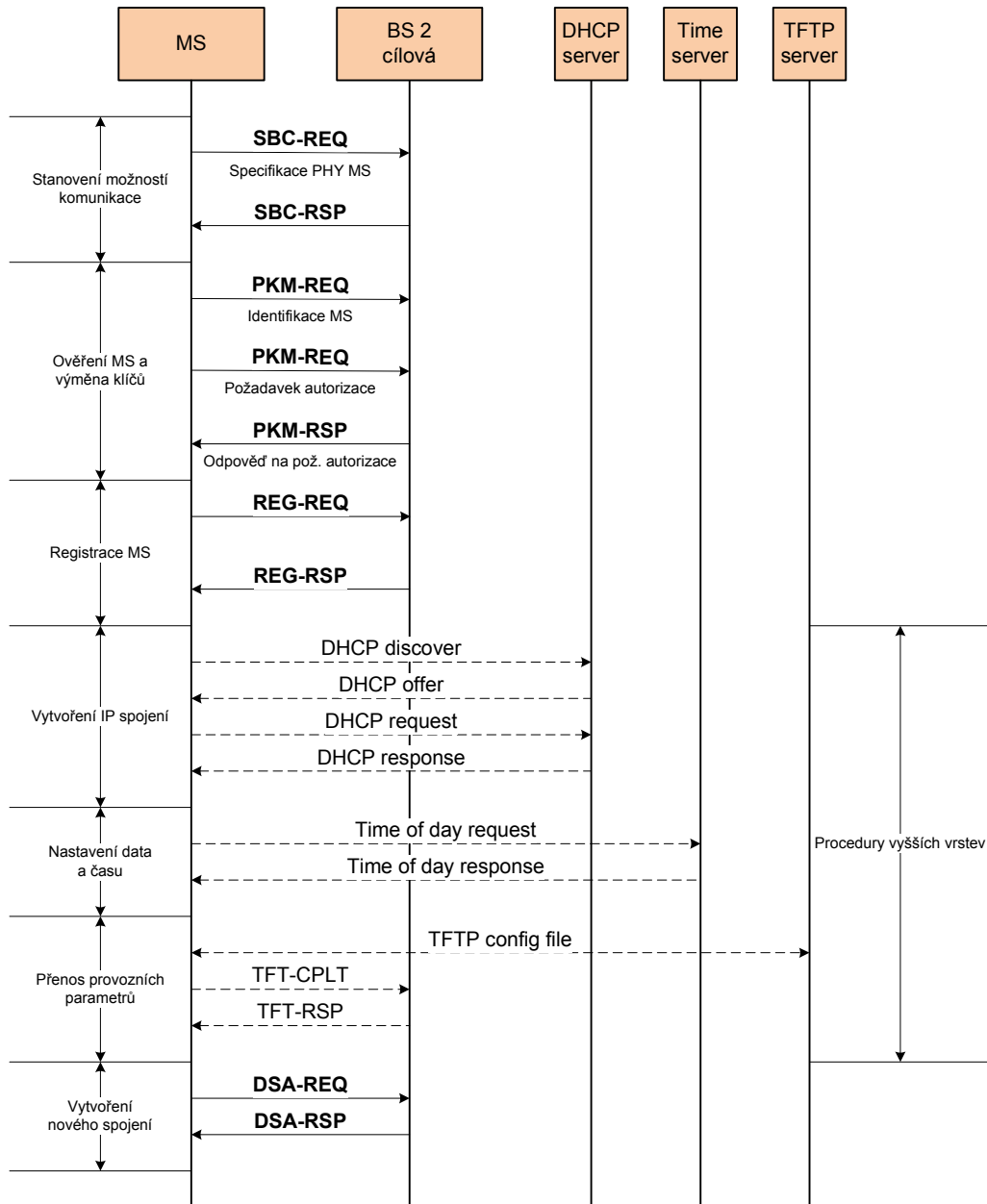
7. Vytvoření nového spojení

Po přenosu provozních parametrů nebo po registraci MS (v závislosti na nastavení – viz poznámka 2) je odesílána zpráva DSA-REQ pro vytvoření nového služebního toku (přenosu). K odpovědi na zprávu DSA-REQ slouží zpráva DSA-RSP. Obě tyto zprávy mohou být generovány jak MS tak i BS.

Obsahovala-li však zpráva RNG-REQ, poslaná MS během ranging procesu identifikátor obsluhující BS (BSID), může cílová BS získat přihlašovací parametry týkající se MS

² Jedná se procedury vyšších vrstev referenčního modelu OSI (mimo rámec standardu 802.16), které jsou navíc volitelné a jsou prováděny pouze v případě, že je to ve zprávě REG-REQ indikováno. Není proto nezbytně nutné je v procesu uvažovat. Více v [5].

od obsluhující BS přes páteří síť. V závislosti na množství poskytnutých parametrů od obsluhující BS může cílová BS přeskočit jeden či více kroků přihlašování, což přispěje ke zkrácení celé této procedury [8]. Úspěšným návratem MS do sítě je handover dokončen a MS již komunikuje s novou obsluhující BS.



Obrázek 2.6: Proces přihlašování (návratu) MS do sítě. [5]

2.1.3. Macro Diversity Handover a Fast Base Station Switching

Kromě doposud popisovaného handoveru, tedy tzv. tvrdého handoveru (*Hard handover*), se můžeme v sítích podle standardu IEEE 802.16e setkat ještě se dvěma nepovinnými režimy (typy) handoveru: Macro Diversity Handover (MDHO) a Fast Base Station Switching (FBSS). Účelem těchto dvou režimů handoveru je odstranění nedostatků tvrdého handoveru (tzn. zmenšit zpoždění při handoveru, minimalizovat ztrátu přenášených paketů) a tím celkově urychlit předání MS jiné BS. Základní princip obou těchto režimů handoveru je stejný: MS a její obsluhující BS udržují seznam aktivních BS (*diversity set*) a zároveň je v seznamu určena jedna hlavní BS (*anchor BS*) [2]. Hlavní BS je běžnou obsluhující BS, která jediná v režimu FBSS přenáší data k MS a také jediná je od MS přijímá, zatímco v režimu MDHO je přenos dat oběma směry realizován mezi MS a všemi aktivními BS ze seznamu. Jednotlivé aktivní BS mohou být ze seznamu odebírány a sousední BS zase do seznamu přidávány a to podle určitého pravidla, které bude popsáno dále.

Režim handoveru je ustanoven pomocí řídicích zpráv REG-REQ resp. REG-RSP [2], přičemž použitý režim určuje nastavení jednotlivých parametrů (ukazatelů) řídicích zpráv, které se během přechodu MS mezi dvěma BS posílají. Při použití režimů MDHO a FBSS musí být navíc splněny určité požadavky, které jsou kladeny na BS zahrnuté v seznamu aktivních BS. Mezi tyto požadavky například patří: synchronizace odesílaných datových rámců, použití stejného frekvenčního pásma pro komunikaci s MS či sdílení řídicích zpráv MAC vrstvy.

2.1.3.1. Macro Diversity Handover

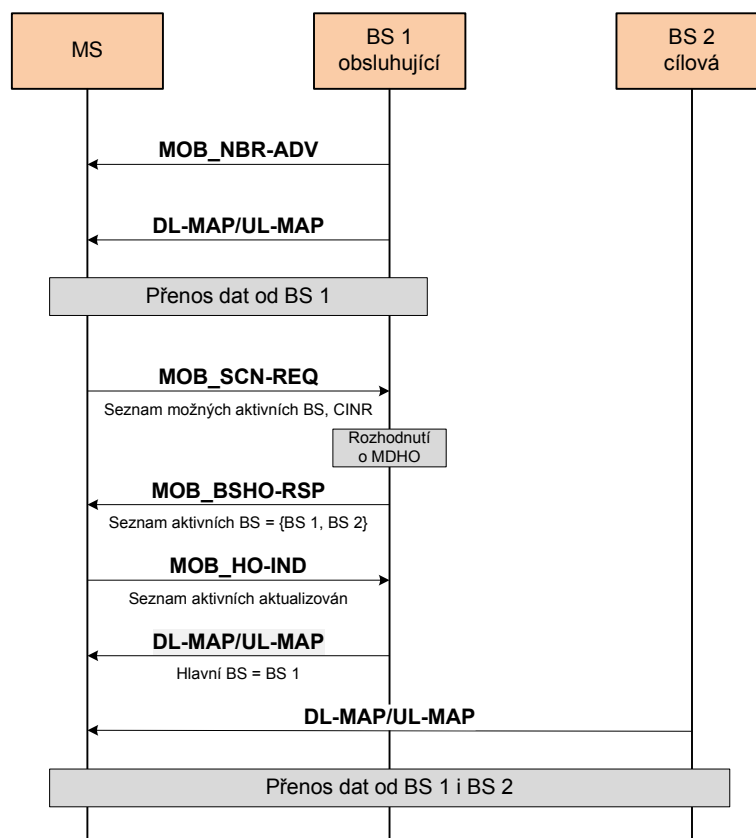
V režimu MDHO jsou data určená pro MS odesílána současně ze všech v seznamu uvedených aktivních BS a stejně tak při přenosu dat od MS jsou tato data přijímána všemi aktivními BS. Při příjmu dat tak MS může kombinovat signál přijímaný od více BS. Seznam aktivních BS není stálý a může se měnit resp. aktualizovat. Mezi MS a aktivními BS a mezi MS a sousedními BS, které nejsou zahrnuty do seznamu, je pravidelně zjišťována kvalita přenosových parametrů kanálu, přičemž rozhodujícím parametrem pro odebrání resp. přidání BS ze resp. do seznamu aktivních BS je parametr CINR (*Carrier to Interference plus Noise Ratio*) [2]. Dále jsou stanoveny dvě mezní (prahové) hodnoty parametru CINR (ty jsou pro MS přenášeny ve zprávě DCD) – práh odebrání H_Delete a práh přidání H_Add – podle

kterých MS rozhoduje, zda má konkrétní BS ze seznamu odebrat nebo do seznamu přidat. Pokud je hodnota měřeného parametru CINR obsluhující BS po určitý interval nižší než práh odebrání H_Delete, posílá MS pomocí zprávy MOB_MSHO-REQ požadavek, aby tato obsluhující BS byla odebrána ze seznamu aktivních BS. Je-li naopak hodnota měřeného parametru CINR sousední BS po určitý interval vyšší než práh přidání H_Add, pošle MS zprávu MOB_MSHO-REQ s požadavkem na přidání této sousední BS do seznamu aktivních BS. Z popsaného postupu tedy vyplývá, že při přidávání nebo odebírání aktivní BS odesílá MS ve zprávě MOB_MSHO-REQ svůj aktualizovaný seznam možných BS vhodných pro zařazení do seznamu aktivních BS a to včetně informací o kvalitě parametrů jejich přenosových kanálů získaných při předchozích měřeních. Tyto naměřené hodnoty přenosových parametrů mohou být dále využity při některé z pozdějších aktualizací seznamu aktivních BS.

Potvrzení přijetí zprávy MOB_MSHO-REQ s aktualizovaným seznamem možných aktivních BS je MS od BS oznámeno zprávou MOB_BSHO-RSP [2]. Ve zprávě MOB_BSHO-RSP poskytuje BS vlastní seznam aktivních BS vhodných pro konkrétní MS stejně jako v případě, že je aktualizace seznamu aktivních BS iniciována ze strany BS. V tomto případě je od hlavní BS poslána „nevyžádaná“ zpráva MOB_BSHO-REQ.

Jestliže MS přijme zprávu MOB_BSHO-RSP resp. MOB_BSHO-REQ s aktualizovaným seznamem aktivních BS, pošle zprávu MOB_HO-IND, která obsahuje parametr potvrzující aktualizaci. Na konci úspěšného procesu aktualizace seznamu přijme MS od nové, do seznamu zařazené, BS DL-MAP/UL-MAP zprávu (určuje kdy a jaká data jsou určena pro konkrétní MS) a následně je zahájen přenos dat. Celý tento proces aktualizace seznamu aktivních BS je zobrazen na příkladu přidání nové BS na obrázku 2.7.

Aktualizovaný seznam aktivních BS doporučený od hlavní BS může být MS také odmítnut a to posláním zprávy MOB_HO-IND, ve které daný parametr zprávy indikuje, že změnu seznamu aktivních BS z nějakého důvodu zamítla. V tom případě je seznam aktivních BS opět aktualizován a BS jej pomocí zprávy MOB_BSHO-RSP posílá znovu. [2][8]



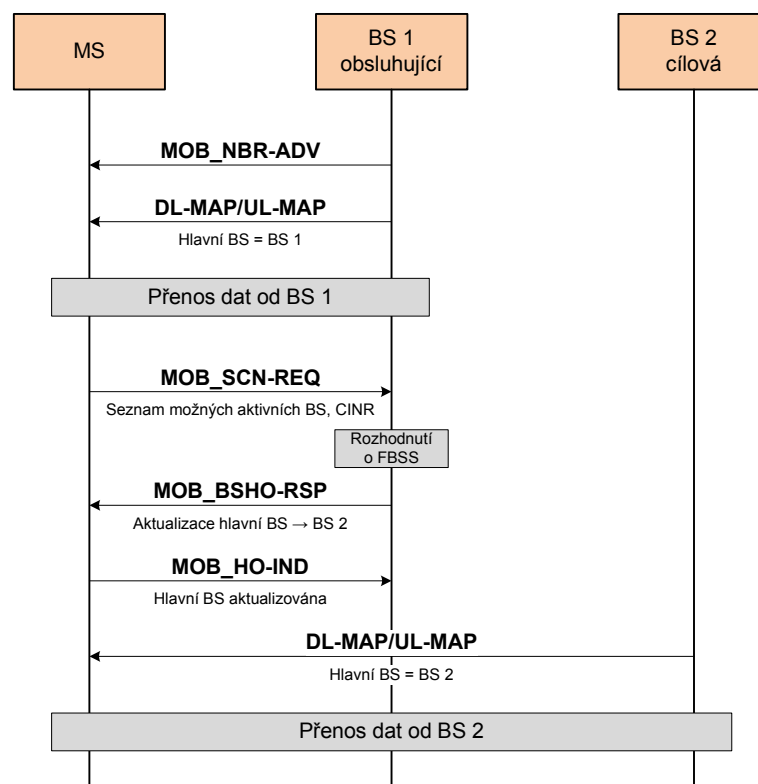
Obrázek 2.7: Příklad přidání BS do seznamu aktivních BS v režimu MDHO. [2][8]

2.1.3.2. Fast Base Station Switching

Jak již bylo výše poznamenáno, MS a BS zahrnuté v FBSS režimu udržují stejně jako při MDHO seznam aktivních BS (*diversity set*), ve kterém je zvolena jedna hlavní BS. Na rozdíl od MDHO je zde hlavní BS také jedinou obsluhující BS což znamená, že MS komunikuje se sítí při vzestupném i sestupném směru přenosu uživatelských dat pouze pomocí této hlavní BS. Ostatní aktivní BS jsou s MS stále ve spojení, aby mohly v případě potřeby převzít úlohu hlavní BS a začít přenášet uživatelská data. Aktualizace seznamu aktivních BS je prováděna podle stejného mechanismu jako u MDHO, tedy pomocí prahových hodnot parametru CINR pro přidání (H_Add) resp. pro odebrání (H_Delete). Přejít MS od hlavní BS k jiné aktivní BS je v režimu FBSS díky seznamu aktivních BS vykonán bez zdlouhavého procesu handoveru popsaného v podkapitole 2.1.2.. Změna hlavní BS se podle stanoveného schématu výběru BS může měnit i rámec po rámci [2] (proto je režim pojmenován jako rychlé přepojování mezi základnovými stanicemi).

Celý proces změny hlavní BS (zobrazený na obrázku 2.8) začíná posláním zprávy MOB_MSHO-REQ ze strany MS a nebo zprávou MOB_BSHO-REQ v případě, že je změna

hlavní BS iniciována ze strany obsluhující BS. Ve zprávě MOB_MSHO-REQ oznamuje MS obsluhující BS svoji preferovanou novou hlavní BS, která byla vybrána na základě provedených měření kvality přenosových parametrů kanálů mezi MS a pro obsluhu vhodnými BS. Odpovědí BS na MOB_MSHO-REQ je zpráva MOB_BSHO-RSP, která obsahuje rozhodnutí o aktualizaci hlavní BS i na základě zprávy od MS. Podle informací obdrženy ve zprávě MOB_BSHO-RSP může MS aktualizovat svoji hlavní BS. Jestliže MS novou hlavní BS akceptuje, informuje o tom obsluhující BS posláním zprávy MOB_HO-IND, ve které je příslušný ukazatel nastaven na status „hlavní BS aktualizována“. Poté je již proces přechodu dokončen a MS může přijímat data od nové hlavní BS. Stejně jako ve všech předchozích případech kdy MS přecházela od jedné BS k druhé tak i zde může MS novou BS odmítnout. Potom je ve zprávě MOB_HO-IND indikován status „aktualizace hlavní BS zamítnuta“. [2][8]



Obrázek 2.8: Proces změny hlavní BS v režimu FBSS. [8]

2.2. Handover v sítích podle standardu IEEE 802.16j³

Stejně jako v 802.16e je pod pojmem handover myšlen proces přechodu pohybující se MS k jiné přístupové stanici (AS). Tou může být v síti 802.16j jak BS resp. MR-BS⁴ tak i RS. Navíc může v síti 802.16j vykonávat handover mezi dvěma MR-BS nejen MS, ale i mobilní RS. Rozšiřující standard 802.16j také zachovává podporu všech tří typů handoverů známých z 802.16e – tvrdý handover, MDHO a FBSS resp. FASS (*Fast Access Station Switching*).

Na obrázku 2.9 jsou znázorněny možné případy handoveru v síti 802.16j. První tři případy představují tzv. vnitrobuňkový handover a nastávají tehdy, když:

- MS přechází od MR-BS 1 k RS 2 (1)
- MS přechází od RS 1 k MR-BS 1 (2)
- MS přechází od RS 1 k RS 2 (3)

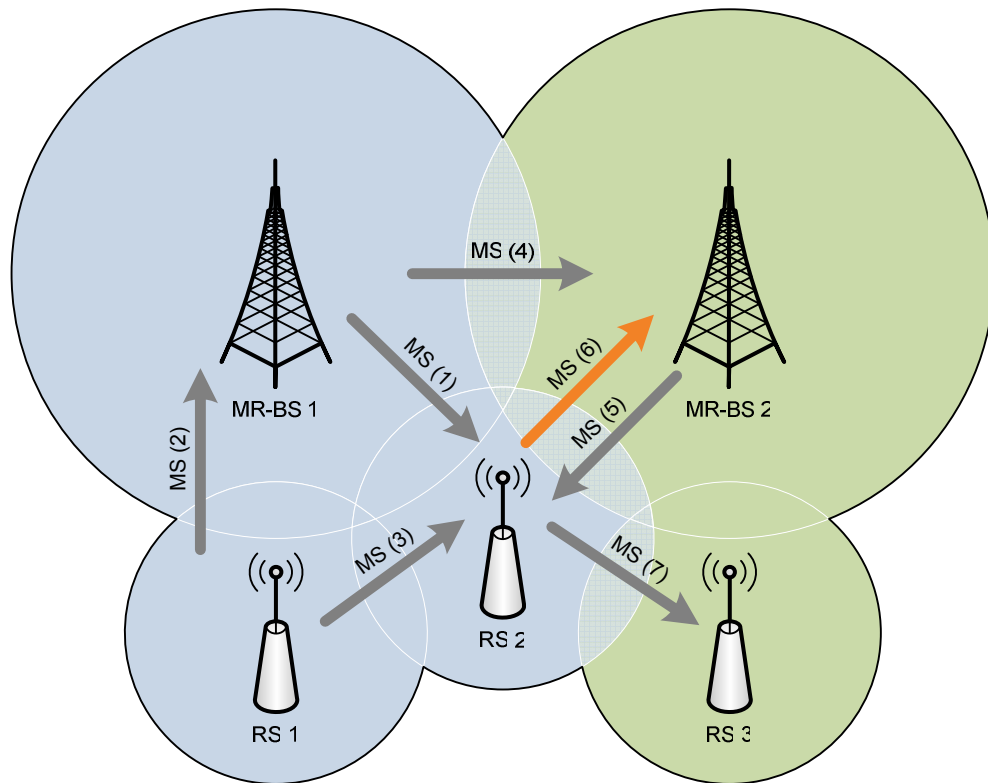
Přechází-li navíc MS přes hranici pokrytí dvou MR-BS, tedy mezi dvěma buňkami, jedná se o tzv. mezibuňkový handover, jenž představují zbylé čtyři možnosti:

- MS přechází od MR-BS 1 k MR-BS 2 (4)
- MS přechází od MR-BS 2 k RS 2 (5)
- MS přechází od RS 2 k MR-BS 2 (6)
- MS přechází od RS 2 k RS 3 (7)

V následujících podkapitolách je popsán celý proces handoveru jako tomu bylo u 802.16e v podkapitole 2.1.. Vzhledem k tomu, že 802.16j je rozšiřujícím standardem 802.16e, je většina postupů stejná a liší se jen v detailech, na které se v následujících řádcích především zaměříme. Jedná se zejména o nově zavedené řídicí zprávy MAC vrstvy týkající se procesu handoveru. Pro popis výměny nových řídicích zpráv budeme uvažovat situaci mezibuňkového handoveru, kdy MS přechází od RS2 k MR-BS2 (případ 6 z obrázku 2.9, označený oranžovou šipkou). Samotná výměna řídicích zpráv uvažované situace je pak uvedena na obrázcích 2.10 a 2.11. Pro zbylé případy handoveru je situace s výměnou řídicích zpráv obdobná.

³ Při psaní této podkapitoly byly jako zdroj informací použity dostupné „proposaly“ (návrhy na konečné znění standardu), protože v době psaní této práce ještě nebyla konečná verze standardu IEEE 802.16j publikována. Může se tedy stát, že v konečné verzi standardu dojde k nepatrným změnám.

⁴ Zkratka MR-BS označuje BS podporující funkci multi-hop relay.



Obrázek 2.9: Příklady možného handoveru v sítích podle IEEE 802.16j.

V úvodu této kapitoly je zmínka o transparentním a netransparentním režimu přenosu resp. o transparentní a netransparentní RS. Tato práce se dále bude zabývat pouze netransparentními RS, jelikož transparentní se chovají pouze jako opakovače signálu (MS připojená k této RS si myslí, že je připojena přímo k MR-BS). Níže popisované postupy tedy platí pouze pro síť s netransparentními RS, kde došlo k zavedení nových řídicích zpráv.

Pro zachování přehlednosti a komplexnosti jsou uvedeny všechny podkapitoly jako tomu je pro 802.16e, přestože jsou některé části procesu handoveru beze změn.

2.2.1. Počáteční fáze handoveru

2.2.1.1. Získání informací o topologii sítě

Přístupová stanice (AS) vysílá pro MS informace o topologii sítě (o sousedních AS) ve zprávě MOB_NBR-ADV. Zmíněné informace může AS získat buď z páteřní sítě (v případě MR-BS) nebo pomocí relay spojů od RS. Účelem MOB_NBR-ADV zprávy je poskytnout MS seznam sousedních AS možných pro uskutečnění handoveru.

V multi-hop relay síti podle 802.16j probíhá mezi MR-BS a RS komunikace, při které si stanice vyměňují informace o sousedních AS v jejich okolí. Komunikace probíhá výměnou zpráv NBR_ADV-INFO [9], kterou posílá MR-BS všem spravovaným RS a zároveň každá RS své nadřízené MR-BS. Zpráva od MR-BS obsahuje seznam sousedních AS (včetně informací potřebných ke spojení s nimi) kolem MR-BS, který poslouží RS k vytvoření zprávy MOB_NBR-ADV posílané obsluhovaným MS. Stejně tak zpráva od RS obsahuje potřebné informace o sousedních AS, na jejichž základě může MR-BS přizpůsobit obsah zprávy MOB_NBR-ADV vysílané pro MS nacházející se v ní obsluhované oblasti. Jelikož zde mluvíme o multi-hop relay síti, může být vzdálenost MS od MR-BS i několik hopů /skoků/ (viz obrázek 1.1) a při pohybu MS nemusí tato nutně přecházet jen z buňky RS do buňky MR-BS, ale i mezi dvěma RS. A tehdy dochází k výměně zpráv NBR_ADV-INFO mezi dvěma RS. V každém případě je však zpráva MOB_NBR-ADV vytvořena přístupovou stanicí na základě informací získaných z přijatých zpráv NBR_ADV-INFO.

V závislosti na možnostech RS, se v této fázi handoveru může přenášet ještě zpráva NBR_ADVINFO-REQ, kterou RS posílá MR-BS chce-li zjistit informace o okolních AS, které nejsou na „cestě“ signálu od MS k MR-BS, ale jsou potenciální cílové AS pro handover. Zpráva NBR_ADVINFO-REQ se přeposílá mezi RS dokud nedorazí k MR-BS. Zjistí-li však některá z RS, přes které je zpráva NBR_ADVINFO-REQ směřována, že má potřebné informace o požadovaných okolních AS, zprávu již dále neposílá a odpoví zprávou NBR_ADV-INFO.

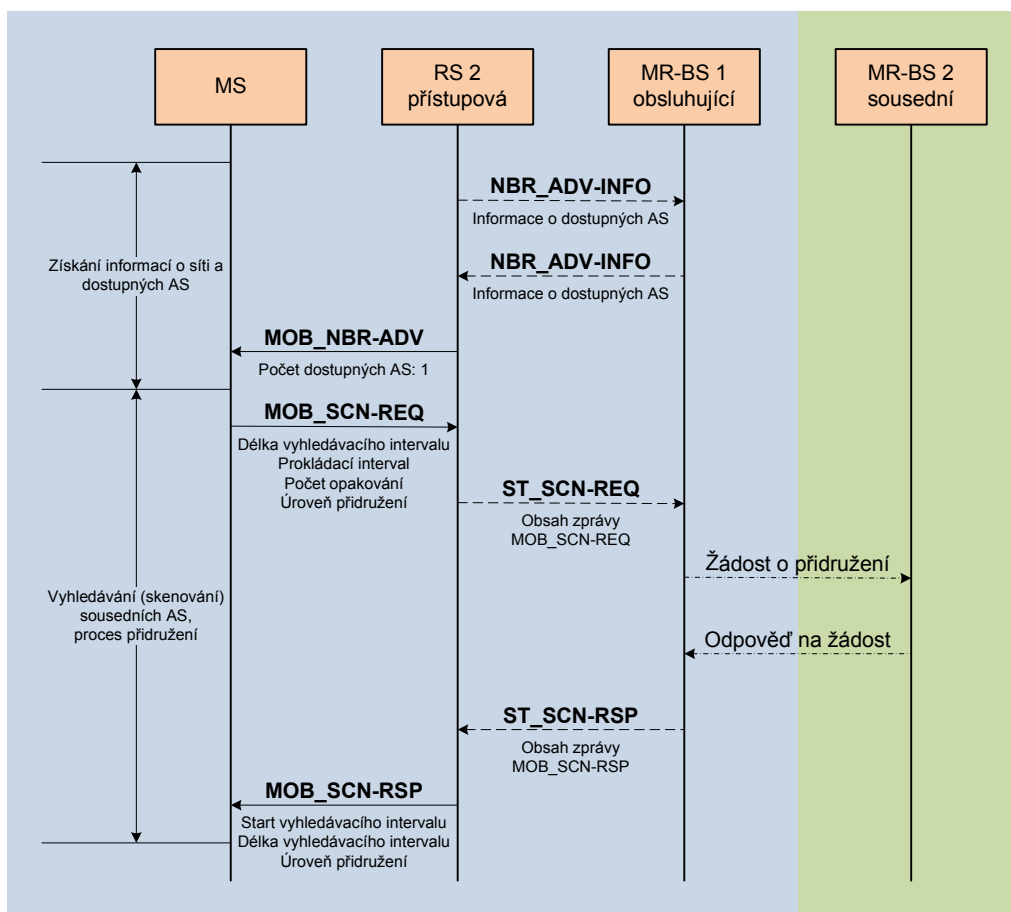
2.2.1.2. Vyhledání sousedních přístupových stanic a proces přidružení

Postup vyhledávání AS a proces přidružení je víceméně shodný s postupem uvedeným pro 802.16e (podkapitola 2.1.1.2 resp. 2.1.1.3.). MS žádá obsluhující AS prostřednictvím zprávy MOB_SCN-REQ o přidělení vyhledávacího intervalu (a určité úrovně přidružení) za účelem vyhledání potenciálních cílových AS vhodných pro handover. Obsluhující AS odpovídá zprávou MOB_SCN-RSP, ve které poskytuje MS požadované informace ohledně vyhledávacího intervalu včetně seznamu doporučených AS pro handover, a případně i úrovně přidružení.

Změny oproti 802.16e se týkají úrovní přidružení 1 a 2, které vyžadují koordinaci procesu přidružení mezi MS a potenciální cílovou AS [9]. V prvním případě má koordinaci na starost obsluhující AS, v druhém případě je využito asistence sítě. Tyto změny představují

zavedení dvou nových řídicích zpráv – ST_SCN-REQ a ST_SCN-RSP [9] – používaných při koordinaci procesu přidružení MS s cílovou AS přes relay spoje.

Princip použití obou řídicích zpráv je patrný z obrázku 2.10, kde je výměna řídicích zpráv znázorněna pro mezibuňkový handover. Nejdříve je ze strany MS poslána zpráva MOB_SCN-REQ. Po jejím přijetí odesílá přístupová RS obsluhující (nadřízené) MR-BS zprávu ST_SCN-REQ (obsahuje žádost o přidělení vyhledávacích intervalů a požadovanou úroveň přidružení), která je přeposlána cílové MR-BS jako žádost o přidružení (*association request*). Cílová MR-BS odpoví na přijatou žádost (*association response*) obsluhující MR-BS, která poté na dříve přijatou zprávu ST_SCN-REQ reaguje prostřednictvím zprávy ST_SCN-RSP. Závěrem celé této procedury je odeslání zprávy MOB_SCN-RSP, kterou přístupová RS posílá MS.



Obrázek 2.103: Počáteční fáze handoveru v sítích podle IEEE 802.16j. [9]

2.2.2. Handover

2.2.2.1. Opětovný výběr buňky

Opětovný výběr buňky využívá poznatky získané v počáteční fázi handoveru, ve které MS určila cíl (cíle) handoveru pomocí vyhledávání a případně i procesu přidružení (zprávy MOB_SCN-REQ a MOB_SCN-RSP). Eventuelně může MS ještě využít informací o sousedních AS získaných ze zprávy MOB_NBR-ADV. Z uvedeného vyplývá, že opětovný výběr buňky je shodný s postupem pro 802.16e.

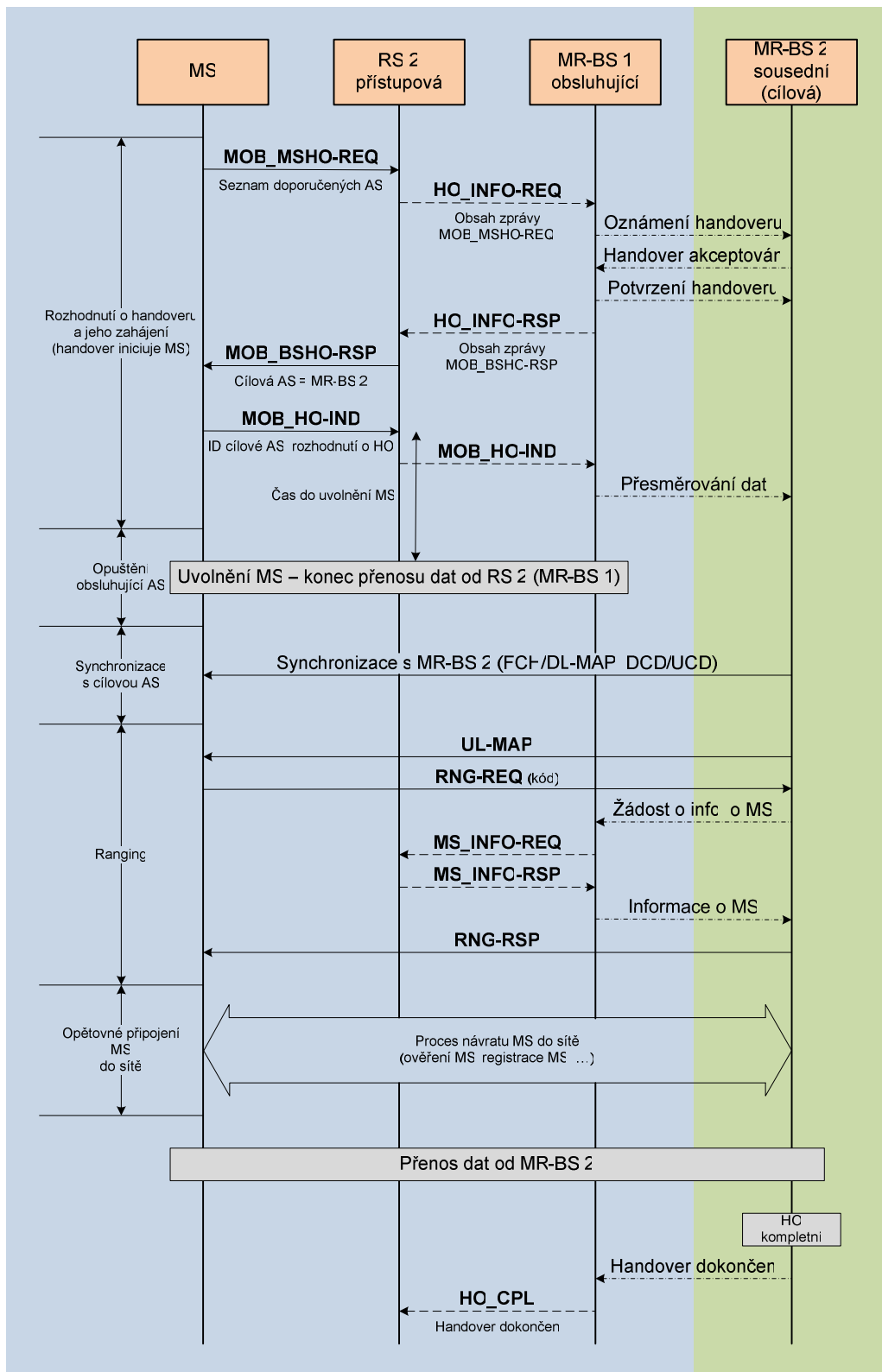
2.2.2.2. Rozhodnutí o handoveru a jeho zahájení

V multi-hop relay sítích podle 802.16j rozhoduje o handoveru MS nebo obsluhující AS. Ze strany MS je handover zahájen posláním zprávy MOB_MSHO-REQ. Jako odpověď na přijatou zprávu MOB_MSHO-REQ, odesílá obsluhující AS zprávu MOB_BSHO-RSP. Je-li handover iniciován obsluhující AS, odesílá tato zprávu MOB_BSHO-REQ. V těchto dvou zprávách jsou obsaženy informace související s handoverem dané MS (informace o potenciálních cílových AS resp. vybraná cílová AS atd.).

V 802.16e mezi výměnou zpráv MOB_MSHO-REQ a MOB_BSHO-RSP informuje obsluhující BS přes páteřní síť potenciální cílové BS o MS a o tom, že zamýšlí vykonat handover (viz obrázek 2.5). V sítích podle 802.16j se však informace o MS a jejím chystaném handoveru mohou přenášet mezi obsluhující AS a potenciálními cílovými AS nejen přes páteřní síť, ale i přes relay spoje. A aby se mohly přenášet informace uvedené ve zprávách MOB_MSHO-REQ a MOB_BSHO-RSP pomocí relay spojů, byly zavedeny dvě nové řídicí zprávy – HO_INFO-REQ a HO_INFO-RSP [10].

Poslední řídicí zprávou, která se v této části procesu handoveru přenáší, je zpráva MOB_HO-IND. MS v ní sděluje obsluhující AS stav handoveru, tedy jeho potvrzení či zamítnutí. O úspěšném handoveru MS pak informuje nová obsluhující AS tu původní přes páteřní síť. Je-li však tato informace směrována přes relay spoje, použije se ještě zpráva HO_CPL [11].

Pro lepší pochopení výměny všech výše uvedených řídicích zpráv, je na obrázku 2.11 zobrazena realizace představující zde uvažovanou situaci, kdy MS přechází od RS k MR-BS (případ 6 z obrázku 2.9).



Obrázek 2.11: Příklad procesu handoveru v sítích podle IEEE 802.16j. [10][11][12]

2.2.2.3. Opuštění obsluhující přístupové stanice

Spojení s obsluhující AS je ukončováno stejně jako případě 802.16e (podkapitola 2.1.2.3.), kdy je ve zprávě MOB_HO-IND stanovena určitá doba, po kterou bude ještě obsluhující AS udržovat spojení s MS. Po uplynutí této doby je obsluha MS ze strany obsluhující AS definitivně ukončena.

2.2.2.4. Zrušení handoveru

Zahájený handover, ať již iniciovaný ze strany MS či obsluhující AS, může MS kdykoliv před uplynutím času do uvolnění MS nastaveném v přenášené zprávě MOB_HO-IND zrušit a pokračovat v komunikaci s obsluhující AS. Je-li navíc aktuální přístupovou stanicí RS, předá tato RS zprávu MOB_HO-IND s indikovaným zrušením handoveru ještě obsluhující (nadřazené) MR-BS, aby dále poskytovala obsluhu (posílala data přes přístupovou RS) pro MS.

2.2.2.5. Synchronizace s cílovou přístupovou stanicí

Před opuštěním původní obsluhující AS se MS pokusí sesynchronizovat s cílovou AS tím, že dekoduje záhlaví přijatého datového rámce resp. DL podrámce (viz obrázek 1.2), tedy jednotlivé zprávy v něm obsažené. Získá tak časovou, frekvenční a výkonovou synchronizaci s cílovou AS. V UL-MAP zprávě pak najde okamžik, kdy má vysílat zprávu RNG-REQ obsahující ranging kód pro zahájení ranging procesu.

2.2.2.6. Ranging proces

Princip a úloha ranging procesu při handoveru byla již podrobně popsána v podkapitole 2.1.2.6.. Stejně jako v 802.16e je i zde ranging proces realizován výměnou zpráv RNG-REQ (obsahuje mimo jiné MAC adresu MS a ID obsluhující AS) a RNG-RSP. V 802.16j se však mezi uvedenými řídicími zprávami mohou přenášet ještě zprávy MS_INFO-REQ a MS_INFO-RSP [12]. Ty jsou použity v případě, že cílová AS neobdrží z nějakého důvodu informace o MS a obsluhující AS, od které MS přechází. Cílová AS může tyto informace dodatečně získat buď z páteřní sítě, jako tomu je v 802.16e, nebo od obsluhující AS přes relay spoje, k čemuž právě slouží nově zavedené řídicí zprávy.

2.2.2.7. Ztráta spojení během handoveru

Příčiny a možnosti řešení případné ztráty spojení během handoveru jsou zcela totožné s již uvedeným pro 802.16e v podkapitole 2.1.2.7..

2.2.2.8. Opětovné připojení mobilní stanice do sítě

Proces opětovného připojení MS do sítě je uveden na obrázku 2.11. Přístupová RS přijala od MS zprávu MOB_HO-IND, kterou přeposílá obsluhující MR-BS a ta následně odesílá do páteřní sítě požadavek na přesměrování dat na cílovou MR-BS, aby mohla cílová MR-BS převzít obsluhu MS. Jakmile je úspěšně provedena synchronizace, ranging proces a přihlášení MS (podrobněji viz 1.1.2.8.), začne být MS obsluhována cílovou MR-BS. Poté ještě sdělí nová obsluhující MR-BS původní přístupové RS, že handover MS byl kompletně dokončen. O úspěšném handoveru je přes relay spoj informována přístupová RS zprávou HO_CPL.

2.2.3. Macro Diversity Handover a Fast Access Station Switching

Princip funkce a vlastnosti obou těchto nepovinných režimů (typů) handoveru byly dostatečně popsány v podkapitole 2.1.3.. Pro připomenutí jen poznamenejme: v obou režimech je udržován seznam aktivních AS (*diversity set*) přičemž jedna AS ze seznamu je zvolena za hlavní. V režimu MDHO je MS obsluhována (pro sestupný i vzestupný směr přenosu dat) všemi v seznamu uvedenými AS, zatímco při FASS je MS obsluhována pouze hlavní AS. Do seznamu aktivních AS může být zahrnuta jak MR-BS tak i RS a hlavní AS může být taktéž MR-BS či RS. Aktualizace seznamu aktivních AS probíhá v obou režimech stejným způsobem a to podle zjištěné úrovně CINR přenosového kanálu mezi MS a aktivními AS a mezi MS a sousedními AS. Je-li hodnota parametru CINR po určitou dobu nižší než stanovené minimum, je AS ze seznamu aktivních odebrána. V případě, že je hodnota parametru CINR sousední AS po určitou dobu vyšší než mez pro přidání AS, může být tato sousední AS do seznamu přidána. Aktualizovaný seznam je přenášén pomocí zpráv MOB_MSHO-REP resp. MOB_BSHO-RSP a nebo MOB_BSHO-REQ v případě, že je aktualizace seznamu uskutečněna ze strany AS. Pokud musejí být informace obsažené v zprávách MOB_MSHO-REQ a MOB_BSHO-RSP poslány přes relay spoje, použije se zpráva HO_INFO-REQ resp. HO_INFO-RSP. O úspěšné (zamítnuté) aktualizaci seznamu

aktivních AS pak MS informuje posláním zprávy MOB_HO-IND. Pomocí stejných řídicích zpráv je signalizována i změna hlavní AS v režimu FASS.

Kapitola 3

Predikce pohybu pro zrychlení handoveru

3.1. Možnosti zrychlení handoveru pomocí predikce pohybu

Tato kapitola je zaměřena na možnosti zrychlení samotného handoveru, tedy té části handover procesu, kdy došlo k uvolnění MS z obsluhy původní obsluhující BS (přenos uživatelských dat byl přerušen) až do opětovného připojení MS do sítě přes cílovou BS (přenos uživatelských dat pokračuje) – viz obrázek 2.5. Z tohoto je patrné, že při dalším postupu bude uvažován pouze tvrdý handover popsáný v podkapitole 2.1.2. resp. 2.2.2., jelikož zbylé dva typy (režimy) handoveru – MDHO a FBSS resp. FASS – byly navrženy právě proto, aby minimalizovaly zpoždění tvrdého handoveru. Dále také nebude rozlišováno mezi tím, zda se jedná o síť s RS (802.16j) nebo bez RS (802.16e), protože handover má v obou případech stejný průběh. Rozdíl je pouze v tom, že v 802.16j dochází k přeposílání řídicích zpráv přes relay spoje, což má za následek pouze zanedbatelný nárůst zpoždění při handoveru. Predikce pohybu MS však nebude mít na tuto část zpoždění vliv.

Při předpovědi pohybu MS lze vycházet z některého z měřených parametrů radiového spojení, které MS získává při skenování sousedních BS. Mezi tyto parametry patří [2]: střední hodnota úrovně přijatého signálu (*RSSI; Received Signal Strength Indicator*), střední hodnota parametru CINR (*Carrier to Interference plus Noise Ratio*) a relativní zpoždění mezi signálem od obsluhující a sousedních BS (*relative delay*). Podle těchto parametrů je pak stanovena nejvhodnější cílová BS pro handover. Zde je nejvhodnější vycházet z parametru

RSSI, jelikož jej lze pro potřeby simulace stanovit jednoduchým výpočtem, jak bude také dále ukázáno.

Další možností jak predikovat pohyb MS resp. odhadovat na jakou sousední BS vykoná MS handover, je zaznamenávat statistiku handoverů v síti. To znamená, že se bude zaznamenávat počet přechodů z každé BS na její sousední BS. Tím se získá statistika určující s jakou pravděpodobností přejde MS k té které sousední BS. Samotná pravděpodobnost přechodů by však pro rozhodnutí o handoveru na konkrétní sousední BS byla nedostačující a bude ji potřeba doplnit o další kritérium, které se na rozhodnutí o handoveru bude podílet.

Vedle těchto dvou metod, které zde budou podrobněji rozebrány, existují i jiné možnosti pro předvídání pohybu uživatele. Jednou z nich je metoda, která je založena na výpočtu hodnot parametru RSSI z hodnot předcházejících, přičemž ke stanovení hodnot RSSI určitý čas dopředu je použita lineární regrese [13]. Další využívá například poznatků Bayesovy nauky o neuronových sítích (*Bayesian Learning for Neural Networks*) a na základě předchozích pozic uživatele určuje pozici budoucí [14].

3.1.1. Predikce pohybu pomocí parametru RSSI

Vlivem pohybu MS (zejména při vysokých rychlostech) se v závislosti na vzdálenosti MS od BS výše zmíněné kvalitativní parametry radiového spojení rychle mění. Tohoto jevu lze do určité míry využít ke zjišťování přibližné polohy MS resp. k odhadu směru jejího pohybu a tím přechod MS mezi jednotlivými buňkami zefektivnit. Při určování směru pohybu MS napříč buňkami lze tedy využít parametr RSSI, jehož úroveň s rostoucí vzdáleností MS od BS klesá. Tato závislost vychází z útlumu prostředí (*Path Loss*), který lze v tomto konkrétním případě vyjádřit jako [1]

$$PL(d) = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s + L_f + L_h; \quad d \geq d_0, \quad (3.1)$$

kde d je vzdálenost mezi BS a MS a A , γ , s , L_f a L_h jsou definovány následovně.

Člen A představuje ztráty volným prostorem definované rovnicí [1]

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right), \quad (3.2)$$

kde $d_0 = 100$ m je referenční vzdálenost a λ je vlnová délka v metrech závisající na kmitočtu nosné.

Exponent γ závisí na prostředí resp. na zvoleném modelu terénu (viz tabulka 3.1) a je dán vztahem [15]

$$\gamma = \left(a - bh_{BS} + \frac{c}{h_{BS}} \right) + x\sigma_\gamma; \quad 10 \text{ m} \geq h_{BS} \geq 80 \text{ m}, \quad (3.3)$$

kde h_{BS} je výška antény BS nad zemí, x je proměnná veličina směrodatné odchylky s normálním (Gaussovým) rozdělením $N[0,1]$ a σ_γ je směrodatná odchylka γ .

Parametr s vyjadřuje tzv. *shadow fading*, což je jev nastávající tehdy, když je MS zastíněna nějakou velkou překážkou (např. budova) a tím dojde k náhlému poklesu úrovně přijímaného signálu. Tento činitel lze vyjádřit jako [15]

$$s = y\sigma, \quad (3.4)$$

kde y je proměnná veličina směrodatné odchylky s normálním (Gaussovým) rozdělením $N[0,1]$ a σ je směrodatná odchylka s , kterou lze rozepsat jako [15]

$$\sigma = \mu_\sigma + z\sigma_\sigma \quad (3.5)$$

kde μ_σ je střední hodnota σ , z je proměnná veličina směrodatné odchylky s normálním (Gaussovým) rozdělením $N[0,1]$ a σ_σ je směrodatná odchylka σ .

Člen L_f představuje frekvenční korekci a je dán vztahem [1]

$$L_f = 6 \log \left(\frac{f}{2000} \right), \quad (3.6)$$

kde f je kmitočet nosné v MHz.

Člen L_h zohledňuje vliv výšky antény MS nad zemí a definován je jako [1]

$$L_h = -10.8 \log \left(\frac{h_{MS}}{2} \right); \quad 2 \text{ m} \geq h_{MS} \geq 10 \text{ m}, \quad (3.7)$$

pro kategorie terénu A a B a

$$L_h = -20 \log \left(\frac{h_{MS}}{2} \right); \quad 2 \text{ m} \geq h_{MS} \geq 10 \text{ m}, \quad (3.8)$$

pro kategorii terénu C, kde h_{MS} je výška antény MS nad zemí.

Tabulka 3.1: Číselné hodnoty parametrů podle kategorie terénu [15].

Parametry modelu	Kategorie terénu		
	A	B	C
a	4,6	4	3,6
b [m^{-1}]	0,0075	0,0065	0,005
c [m]	12,6	17,1	20
σ_γ	0,57	0,75	0,59
μ_σ	10,6	9,6	8,2
σ_σ	2,3	3	1,6

Uvedený model šíření (nebo též model útlumu prostředí) vyvinutý na Stanford University je používán pro IEEE 802.16 systémy a je vhodný pro různé oblasti – městskou, příměstskou i mimoměstskou [16]. Jak je patrné z tabulky 3.1, Stanford University Interim (SUI) model se dělí na tři kategorie [16]: kategorie A s nejvyšší mírou útlumu prostředí představuje kopcovitý terén se středním až hustým zalesněním, kategorie B představuje kopcovitý terén s řídkým zalesněním nebo rovinnou oblast se středním až hustým zalesněním a kategorie C představuje řídké zalesněnou rovinou oblast, u které se předpokládá nejmenší vliv na šíření signálu.

Vraťme se nyní zpět k rovnici (3.1), pomocí které lze spolu se známým vysílacím výkonem BS jednoduše vypočítat hodnoty RSSI podle vzorce

$$RSSI_{[dBm]} = EIRP_{[dBm]} - PL_{[dB]}, \quad (3.9)$$

kde EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) je efektivní izotropický vyzařovaný výkon BS definovaný jako [17]

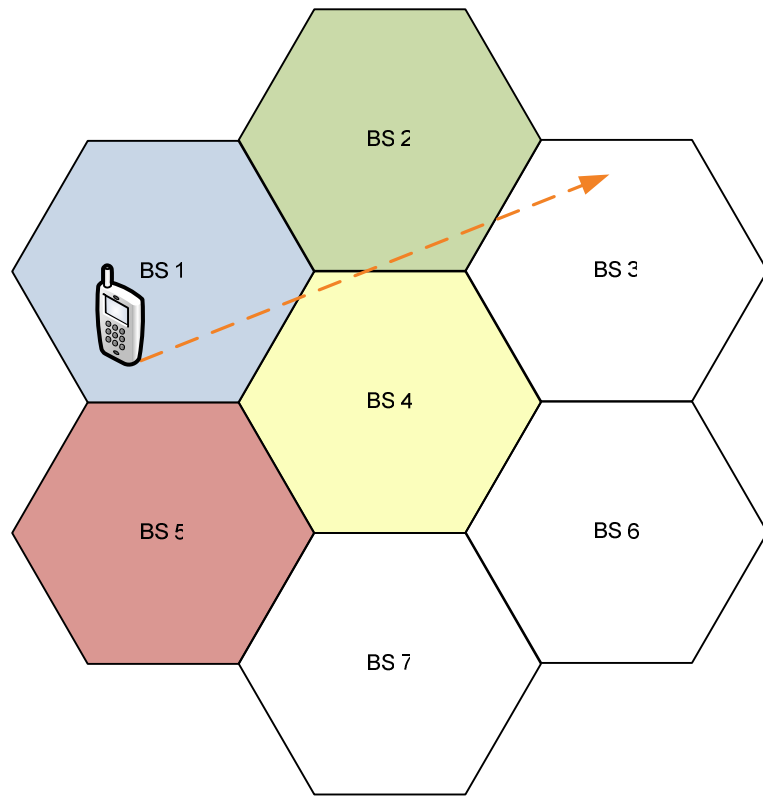
$$EIRP_{[dBm]} = P_{T[dBm]} + G_{A[dBi]} - L_{[dB]}, \quad (3.10)$$

kde P_T je vysílací výkon BS, G_A je zisk vysílací antény a L představuje ztráty (nepřesným zaměřením antény, polarizační, přívodů, vlivem úniků apod.).

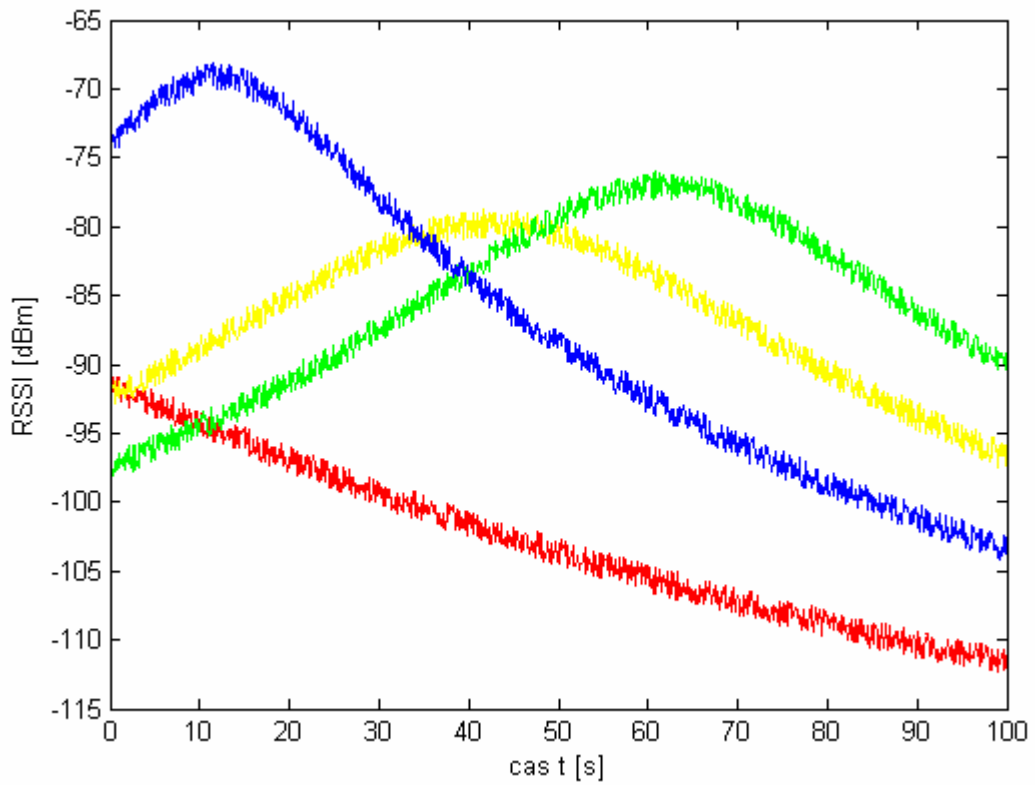
Na obrázku 3.1 je uveden konkrétní modelový případ, na kterém je znázorněna struktura buňkové mobilní sítě WiMAX a trajektorie pohybu MS napříč buňkami. Na počátku oranžově vyznačeného úseku je MS obsluhována BS 1 a BS 2, BS 4 a BS 5 představují sousední BS o jejichž existenci se MS dozvěděla ze zprávy MOB_NBR-ADV. Jsou-li následným skenováním v přiděleném vyhledávacím intervalu nalezeny uvedené sousední BS, pokusí se s nimi MS sesynchronizovat a zjistit kvalitativní parametry radiového spoje (vykonat ranging – viz podkapitola 2.1.1.3.). Jakmile se MS začne přibližovat k rozhraní buněk BS 1 a BS 4, je zřejmé, že bude muset vykonat handover k BS 4, která byla vybrána na základě provedeného skenování sousedních BS a která je na trase MS. Jestliže je handover na BS 4 potvrzen ze strany MS, obsluhující BS 1 a i cílové BS 4, začne odpočet doby do opuštění BS 1 a je opět provedena synchronizace a ranging mezi MS a BS 4. Poté již následuje přihlášení MS do sítě (viz podkapitola 2.1.2.8.) přes BS 4 a MS může být toto BS obsluhována. Popsaný průběh se pak ještě opakuje pro přechody BS 4 → BS 2 a BS 2 → BS 3. Průběh úrovně přijímaného signálu (RSSI) od každé BS po celé uvažované trase MS je zobrazen na obrázku 3.2. Nejprve byl vypočítán pomocí rovnice (3.1) útlumu prostředí a následně z rovnice (3.9) hodnoty úrovně RSSI. Pro další související výpočty a simulaci byl zvoleny tyto parametry (hodnota EIRP a průměr buňky byly pro zde uvedený příklad odvezeny z [18]):

Tabulka 3.2: Parametry simulace.

Parametr simulace	Hodnota
kategorie terénu	B
kmitočet nosné	2,5 GHz
vzdálenost BS (příměstská oblast)	1 km
výška antény BS nad zemí	30 m
výška antény MS nad zemí	2 m
EIRP základnové stanice	43 dBm
hodnota RSSI počítána každých	100 ms
rychlost pohybu MS	20 m.s ⁻¹
délka sledovaného úseku	2 km



Obrázek 3.1: Struktura sítě s uvažovanou trajektorií MS.



Obrázek 3.2: Průběhy RSSI od jednotlivých BS na trase MS.

Navrhované zrychlení handoveru pomocí predikce pohybu MS vychází ze sledování průběhu RSSI v závislosti na čase. Bude-li se MS přibližovat k rozhraní dvou buněk, bude jí měřená úroveň RSSI od obsluhující BS klesat a zároveň úroveň RSSI od sousední(-ch) BS bude narůstat, podobně jak je tomu na obrázku 3.2. Z tohoto poznatku vyplývá, že když se hodnoty RSSI od sousední BS během pohybu MS zvyšují, pohybuje se MS směrem k této BS a je téměř jisté, že k ní MS také vykoná handover. Jak bude ukázáno později, může být na základě tohoto způsobu predikce zkrácen čas potřebný pro návrat MS do sítě přesunutím některých úkonů prováděných při procesu návratu MS do sítě na dobu před uvolněním MS z obsluhy původní BS. Poznatky o průběhu RSSI v závislosti na čase mají také uplatnění již při skenování sousedních BS před samotným handoverem. BS, od kterých se hodnota RSSI snižuje, lze vyloučit ze seznamu vhodných pro handover a tím přispět k optimalizaci celého handover procesu.

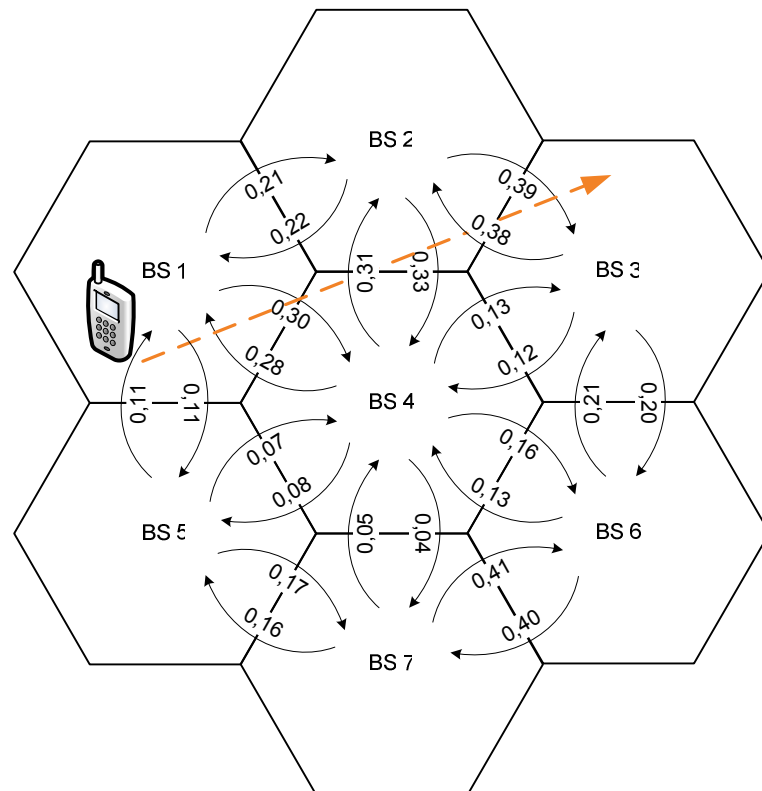
Nevýhodou této metody je, že při měření úrovně RSSI od sousedních BS musí být MS v režimu vyhledávání. Aby MS mohla měřit RSSI, musí na dobu měření přerušit radiové spojení s obsluhující BS, protože nemůže být připojena ke dvěma (či více) BS současně (od jedné přenášet uživatelská data a od druhé měřit RSSI). Při zjišťování RSSI se tedy střídají vyhledávací a prokládací intervaly (jak je naznačeno na obrázku 2.2), což má za následek snížení rychlosti přenosu uživatelských dat. Určité zlepšení lze provést měřením RSSI po kratších intervalech (než je uvedeno v simulaci) a tím zvětšit poměr prokládacích intervalů k vyhledávacím.

3.1.2. Predikce pohybu vycházející ze statistiky handoverů

Druhou zde rozebíranou možností predikce pohybu MS je metoda vycházející ze statistiky handoverů v síti. Zaznamenáváním přechodů všech MS mezi jednotlivými BS lze získat určitou představu o pohybu MS a tím do jisté míry predikovat, na kterou ze sousedních BS s největší pravděpodobností daná MS vykoná handover. Je zřejmé, že odhad cílové BS bude tím přesnější, čím déle se statistika handoverů v síti bude zaznamenávat. Nicméně se stále jedná pouze o odhad, který je pro definitivní rozhodnutí o cílové BS nedostatečný a bude jej potřeba doplnit ještě o další kritérium.

Na obrázku 3.3 je znázorněn možný případ pravděpodobností přechodů mezi jednotlivými buňkami mobilní sítě WiMAX. Rozhodnutí o cílové BS bude vycházet z výsledku skenování sousedních BS a z přechodu s největší pravděpodobností. V uvedeném případě, kdy se MS pohybuje vyznačeným směrem, budou při skenování sousedních BS

zřejmě nalezeny BS 2, BS 4 a BS 5. Bude-li ze získané statistiky vyplývat, že největší pravděpodobnost připadá na přechod BS 1 → BS 4 (vychází se z množiny skenovaných BS), bude za cílovou BS označena právě BS 4. Pro zvýšení správnosti stanovení cílové BS se ještě zohlední parametry radiového spojení naměřené při vyhledávání (skenování) sousedních BS. Podle toho, zda se tyto parametry při každém dalším vyhledávacím intervalu zhoršují či zlepšují (parametry radiového spojení se mění, protože se MS při pohybu buď vzdaluje nebo přibližuje k té které BS) lze rozhodnout, jestli má MS vykonat handover podle odhadu vyplývajícího ze získané statistiky. V případě, že se zjištěné kvalitativní parametry od předpovězené cílové BS zlepšují, lze to považovat za potvrzení přechodu, který má největší pravděpodobnost. V opačném případě, když se parametry radiového spojení s předpovězenou cílovou BS zhoršují, lze usoudit, že MS vykoná handover k jiné sousední BS. Následovat pak bude označení té sousední BS jako cílové, na kterou je přechod podle statistiky druhý nejpravděpodobnější. Opět se pro ověření vhodnosti dané BS zohlední naměřené parametry radiového spojení a rozhodne se, zda má MS na tuto BS handover vykonat či nikoli. Uvedený postup se bude opakovat, dokud se ze skenovaných BS definitivně neurčí cílová BS pro handover.



Obrázek 3.3: Příklad pravděpodobností přechodů (handoverů) mezi buňkami.

I tato metoda má však jisté omezení. Její použití je vhodné zejména pro buňky v mimoměstských a případně příměstských oblastech. Možnost pohybu MS je v těchto oblastech víceméně dána silniční či železniční sítí a je velmi pravděpodobné, že odhad cílové BS vycházející ze statistiky handoverů bude správný. Ve městech je naopak pohyb uživatelů proti příměstské a mimoměstské oblasti náhodný a stanovení cílové BS na základě nejčastějších přechodů by nebylo tak jednoznačné, protože vlivem náhodného pohybu MS budou mít přechody mezi BS víceméně podobnou pravděpodobnost. Určitou nevýhodou je i to, že statistiku handoverů v síti je třeba nejprve vytvořit a až poté lze metodu implementovat.

3.2. Navrhované zrychlení handoveru vyplývající z uvedených metod predikce pohybu

Uvažovaná část handover procesu, kdy MS není připojena k žádné BS, zabere určitý čas, během kterého se vykonávají procedury potřebné pro návrat MS do sítě. To má za následek zpoždění, které lze vyjádřit součtem časů potřebných pro vykonání dílčích procedur

$$D = T_{SYNC} + T_{RNG} + T_{AUTH}, \quad (3.11)$$

kde T_{SYNC} , T_{RNG} a T_{AUTH} jsou časy potřebné na synchronizaci s DL cílové BS, vykonání ranging procesu a přihlášení MS do sítě. Čas, který vyžaduje přihlášení MS do sítě, lze ještě rozepsat na doby potřebné pro přenos jednotlivých řídicích zpráv jako

$$T_{AUTH} = T_{SBC} + T_{PKM} + T_{REG} + T_{DHCP} + T_{TOD} + T_{TFTP} + T_{DSA}, \quad (3.12)$$

kde T_{SBC} , T_{PKM} , T_{REG} , T_{DHCP} , T_{TOD} , T_{TFTP} a T_{DSA} jsou časy potřebné na přenos řídicích zpráv pro stanovení možností komunikace, ověření MS a výměnu klíčů pro šifrování, registraci MS, vytvoření IP spojení, nastavení data a času, přenos provozních parametrů a vytvoření nového datového spojení. Pro úplnost je vhodné poznamenat, že časy T_{DHCP} , T_{TOD} , T_{TFTP} se týkají procedur vyšších vrstev referenčního vrstevového modelu OSI, než které jsou definovány ve standardu 802.16(e). Podrobnější popis všech těchto procedur procesu opětovného připojení MS do sítě je uveden v podkapitole 2.1.2.8.. V tabulce 3.3 a 3.4 jsou pak uvedeny typické hodnoty zpoždění připadající na dílčí procedury resp. na přenos jejich řídicích zpráv, které se podílí na celkovém zpoždění handoveru.

Tabulka 3.3: Hodnoty zpoždění dílčích procedur.

Zpoždění	Hodnota
T_{SYNC}	20 ms
T_{RNG}	7 rámců
T_{SBC}	2 rámce
T_{PKM}	3 rámce
T_{REG}	2 rámce
T_{DSA}	2 rámce

Tabulka 3.4: Hodnoty zpoždění dílčích procedur vyšších vrstev.

Zpoždění	Hodnota
T_{DHCP}	5 rámců
T_{TOD}	2 rámce
T_{TFTP}	3 rámce

Podívejme se nyní na možnosti redukce zpoždění procesu návratu MS do sítě vedoucí ke zrychlení handoveru. Z obou probraných metod predikce pohybu MS vyplývá, že cílovou BS lze pomocí predikce určit již během skenování sousedních BS. Díky tomu by se mohly některé procedury prováděné během opětovného připojení MS do sítě provést místo přes cílovou BS (novou obsluhující) ještě přes původní obsluhující BS, tedy dříve než bude spojení mezi MS a obsluhující BS přerušeno. Z procesu opětovného návratu MS do sítě popsaného v podkapitole 2.1.2.8. by se takto daly přesunout procedury přenášející informace, které nejsou bezpodmínečně potřeba při opětovném přihlášení MS do sítě a síť je klidně může získat ještě přes původní obsluhující BS. Navrhované přesunutí se týká následujících procedur:

- Stanovení možností komunikace s MS – podporované parametry fyzické vrstvy dané MS se nemění a tudíž nemají bezprostřední vliv na opětovné připojení MS do sítě a informace o nich se mohou přenést dříve přes původní obsluhující BS.
- Registrace MS – nastavení různých parametrů komunikace (parametry ARQ, verze IP protokolu apod.) není třeba nutně pozměňovat a lze je též provést pomocí původní obsluhující BS.
- Nastavení data a času – provedeno bylo již při prvním přihlášení MS.
- Přenos provozních parametrů – konfigurační soubor specifikující provozní parametry získala MS při prvním přihlášení do sítě a jeho případnou aktualizaci lze provést po připojení k nové obsluhující BS (viz dále).

Tyto přesunuté procedury je možné vykonat i po připojení MS k nové obsluhující BS a to z důvodu ověření správnosti nebo kdyby bylo potřeba změnit některý z parametrů přenášených v přesunutých procedurách.

Doba potřebná na vykonání procesu přihlášení MS do sítě přes cílovou BS (bez přesunutých procedur) bude dána vztahem

$$T_{AUTH} = T_{PKM} + T_{DHCP} + T_{DSA}, \quad (3.13)$$

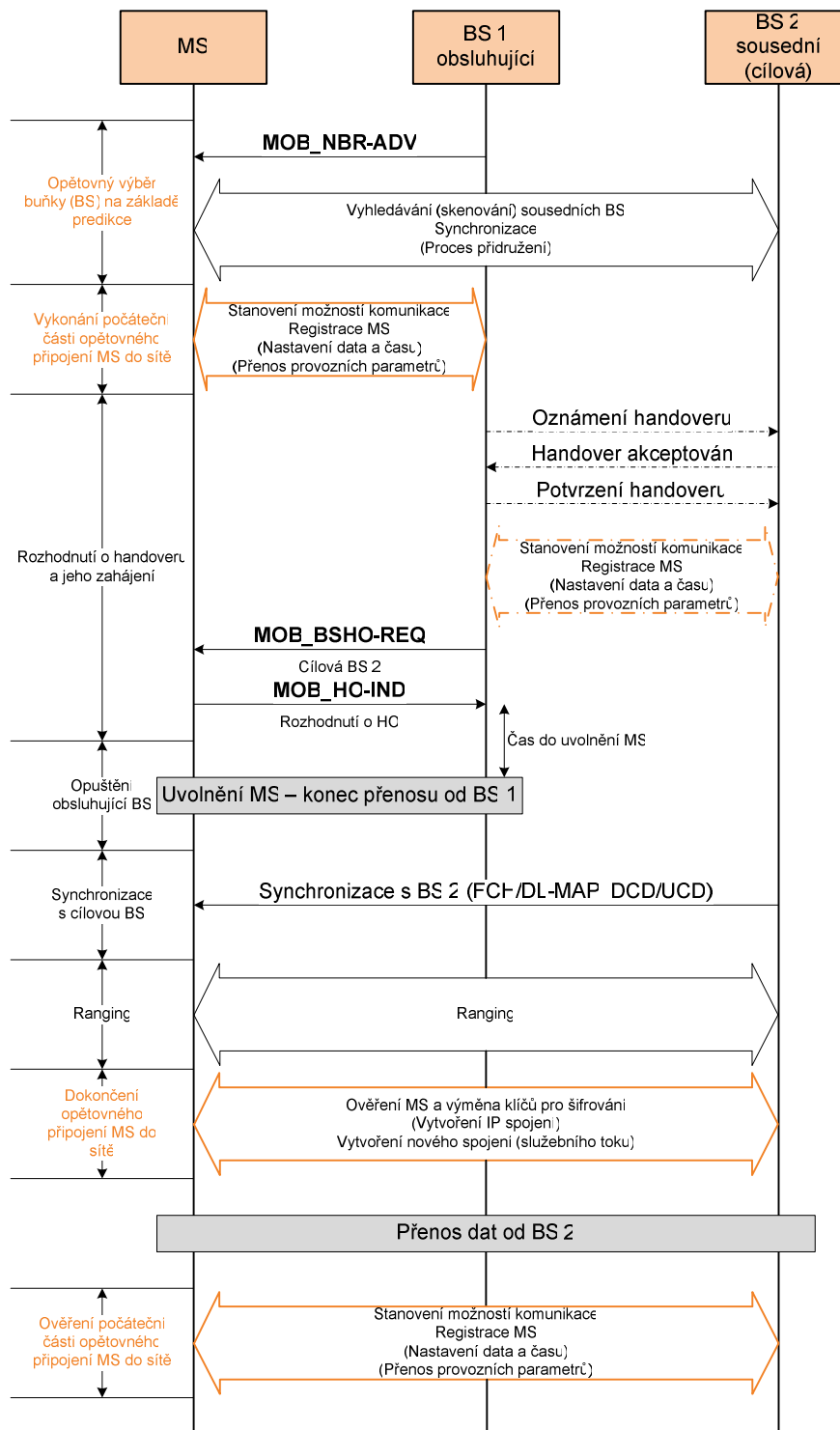
a celkové zpoždění handoveru bude rovno

$$D = T_{SYNC} + T_{RNG} + T_{PKM} + T_{DHCP} + T_{DSA}. \quad (3.14)$$

Vynechají-li se navíc zpoždění způsobené procedurami přenášející zprávy vyšších vrstev, lze celkové zpoždění handoveru vyjádřit vztahem

$$D = T_{SYNC} + T_{RNG} + T_{PKM} + T_{DSA}. \quad (3.15)$$

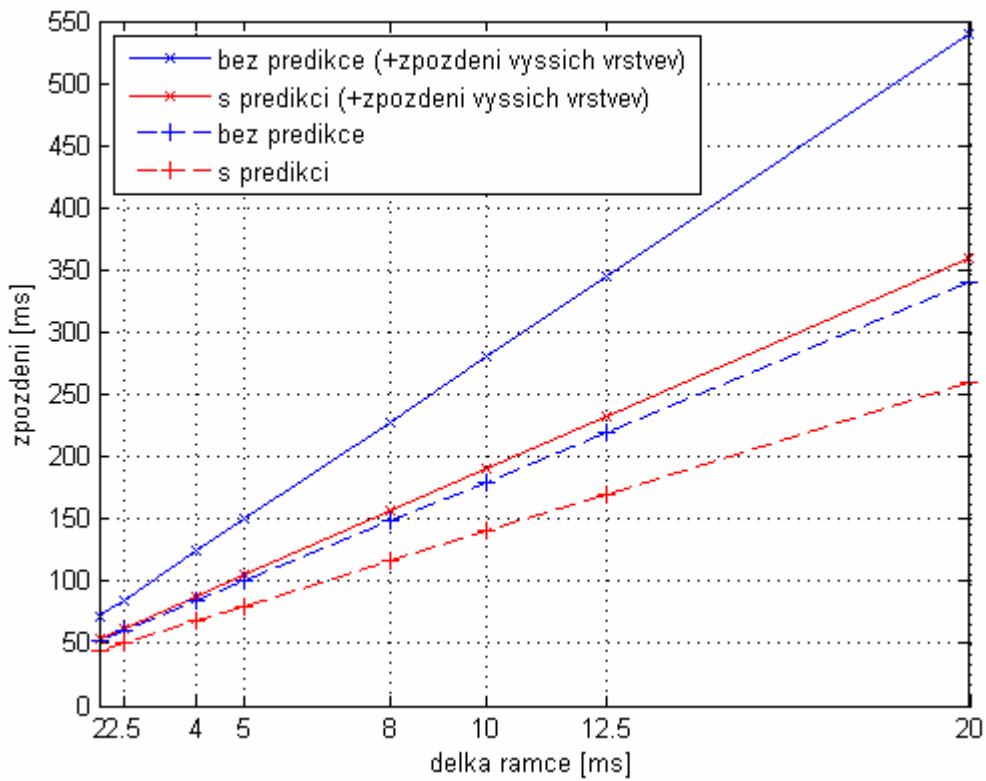
Výsledkem takto provedené úpravy bude pozměněný průběh handover procesu, který je zobrazen na obrázku 3.4. Změny oproti klasickému handover procesu jsou zde barevně zvýrazněny.



Obrázek 3.4: Upravený proces handoveru.

Jak dokládá graf na obrázku 3.5, na kterém je znázorněn průběh závislosti zpoždění handoveru na délce rámce, přesunem zmíněných částí procesu návratu MS do sítě se docílilo snížení zpoždění během handoveru. Plnou čarou jsou znázorněny průběhy odpovídající rovnici (3.11) resp. (3.14), které uvažují i zpoždění procedur vyšších vrstev.

Průběhy, které vyjadřují zpoždění způsobené pouze procedurami MAC vrstvy standardu 802.16e/j, jsou provedeny čárkovaně.



Obrázek 3.5: Závislost zpoždění handoveru na délce rámce.

Z uvedených průběhů vyplývá, že například při délce rámce 10 ms je možné díky navrhanému řešení, které vychází z predikce pohybu uživatele, zkrátit handover o 90 ms resp. 40 ms. To podle toho, zda se uvažuje zpoždění procedur vyšších vrstev či nikoli. Vyjádřeno procentuelně to odpovídá zmenší zpoždění handoveru přibližně o 32,14 % resp. 22,22 %.

Závěr

V mobilních sítích s buňkovou architekturou, kterou je i mobilní WiMAX, je možnost handoveru základním všeobecným předpokladem podpory mobility MS. Porovná-li se jednotlivé typy handoverů, tak tvrdý handover zaručuje možnost bezproblémového uskutečnění handoveru pouze při nízkých rychlostech pohybující se MS. Navíc je u tvrdého handoveru potřeba relativně „dlouhý“ čas na předání MS mezi dvěma BS (AS). Takto vniklé přerušování spojení zapříčiňuje při přenosu dat zpoždění či dokonce ztrátu paketů, což může u přenosů v reálném čase, jakým je například VoIP (*Voice over Internet Protocol*) komunikace, činit problémy. Proto je důležité, aby čas potřebný na vykonání handoveru byl co nejkratší. Možným řešením je použití jednoho ze dvou nepovinných typů handoverů. Jak MDHO tak i FBSS (FASS) odstraňují tento hlavní nedostatek tvrdého handoveru a podporují navíc i plnou mobilitu MS (uskutečnění handoveru i při vysokých rychlostech pohybující se MS). Mají však větší nároky na přenosovou kapacitu sítě, protože data určená pro MS musejí být k dispozici na všech BS (AS) uvedených v seznamu aktivních BS (AS). V režimu MDHO je tomu tak proto, že jsou data přenášena od všech aktivních BS (AS) a u FBSS (FASS) zase musí být jakákoliv aktivní BS (AS) připravena kdykoliv převzít úlohu hlavní BS (AS).

Je tedy otázkou, jak docílit snížení zpoždění tvrdého handoveru. Jak bylo ukázáno, je jednou z možností predikce pohybu uživatele. Úlohou predikce pohybu není zjišťovat přesnou budoucí polohu MS, nýbrž na jejím základě co nejpřesněji určit cílovou BS (AS) pro handover. Ukázány a ověřeny zde byly dvě metody, které využívají stávající možnosti sítě. Zhodnotí-li se obě tyto metody, pak výhodou metody využívající ke stanovení cílové BS (AS) úroveň přijímaného signálu, je její základ v objektivním měření. Určitou nevýhodou je nárůst režijního přenosu (časté vyhledávací intervaly) souvisejícího s predikcí pohybu a tím pádem omezení přenosu uživatelských dat. Druhá metoda, vycházející ze statistiky handoverů, sice potřebuje pro definitivní rozhodnutí o cílové BS (AS) pomocné kritérium a díky svému

principu je její funkčnost v městských oblastech omezena, ale její nespornou výhodou oproti prvně jmenované je nulový nárůst režijního přenosu. Obě uvedené metody predikce pohybu uživatele však vedou ke stanovení cílové BS (AS) dostatečnou dobu dopředu na to, aby je bylo možno využít ke zrychlení tvrdého handoveru.

Navrhované zrychlení handoveru, které vychází z obou metod predikce pohybu, spočívá v provedení některých úkonů procesu opětovného připojení MS do sítě v době, kdy je MS stále připojena k obsluhující BS (AS). Takto přesunout lze pouze ty úkony, které nejsou bezpodmínečně nutné pro opětovné připojení MS do sítě. Zbylé části zmíněného procesu se pak standardně provedou přes cílovou BS (AS). Díky přesunutí těchto úkonů se zkrátí čas potřebný pro opětovné připojení MS do sítě a tím se zmenší zpoždění handoveru.

Seznam zkratek přenášených řídicích zpráv

Pro úplnost je v tabulce níže uveden seznam zkratek v textu zmíněných řídicích zpráv. Samotný český překlad uveden nebude, protože úloha každé zprávy byla vysvětlena v textu.

Zkratka	Význam
RNG-REQ	Ranging Request message
RNG-RSP	Ranging Response message
REG-REQ	Registration Request message
REG-RSP	Registration Response message
MOB_NBR-ADV	Neighbor Advertisement message
MOB_SCN-REQ	Scanning Interval Allocation Request message
MOB_SCN-RSP	Scanning Interval Allocation Response message
MOB_SCN-REP	Scanning Result Report message
MOB_ASC-REP	Association Result Report message
MOB_MSHO-REQ	Mobile Station Handover Request message
MOB_BSHO-RSP	Base Station Handover Response message
MOB_BSHO-REQ	Base Station Handover Request message
MOB_HO-IND	Handover Indication message
NBR_ADV-INFO	Neighbor Advertisement Information message
NBR_ADVINFO-REQ	Neighbor Advertisement Information Request message
ST_SCN-REQ	Scanning Interval Allocation Request message (over relay links)
ST_SCN-RSP	Scanning Interval Allocation Response message (over relay links)
HO_INFO-REQ	Handover Information Request message
HO_INFO-RSP	Handover Information Response message
HO_CPL	Handover Complete message
MS_INFO-REQ	Mobile Station Information Request message
MS_INFO-RSP	Mobile Station Information Response message

Seznam obrázků

Obrázek 1.4: Porovnání struktur sítí podle IEEE 802.16e a IEEE 802.16j.	7
Obrázek 1.2: Struktura rámce v 802.16e a 802.16j (netransparentní přenos) pro TDD..	9
Obrázek 2.5: Fáze a části handover procesu.	11
Obrázek 2.2: Vyhledávání dostupných BS.	13
Obrázek 2.3: Proces přidružení – úroveň 0.	16
Obrázek 2.4: Proces přidružení – úroveň 1.	17
Obrázek 2.5: Proces handover.	19
Obrázek 2.6: Proces přihlašování (návratu) MS do sítě.	24
Obrázek 2.7: Příklad přidání BS do seznamu aktivních BS v režimu MDHO.	27
Obrázek 2.8: Proces změny hlavní BS v režimu FBSS.	28
Obrázek 2.9: Příklady možného handoveru v sítích podle IEEE 802.16j.	30
Obrázek 2.10: Počáteční fáze handoveru v sítích podle IEEE 802.16j.	32
Obrázek 2.11: Příklad procesu handoveru v sítích podle IEEE 802.16j.	34
Obrázek 3.6: Struktura sítě s uvažovanou trajektorií MS.	43
Obrázek 3.2: Průběhy RSSI od jednotlivých BS na trase MS.	43
Obrázek 3.3: Příklad pravděpodobností přechodů (handoverů) mezi buňkami.	45
Obrázek 3.4: Upravený proces handoveru.	50
Obrázek 3.5: Závislost zpoždění handoveru na délce rámce.	51

Použitá literatura a zdroje

- [1] KWANG-CHENG, Chen, DE MARCA, J. Roberto B. *Mobile WiMAX*. West Sussex (England) : John Wiley & Sons Ltd, c2008. 400 s. ISBN 978-0-470-51941-7.
- [2] IEEE 802.16e. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*. 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA : IEEE, únor 2006.
- [3] PETERS, Steven, HEATH, Robert. The Future of WiMAX: Multihop Relaying with IEEE 802.16j. *IEEE Communications magazine* [online]. 2009, vol. 47, no. 1 [cit. 2009-03-21], s. 104-111. Dostupný z WWW: <<http://www.comsoc.org>>. ISSN 0163- 6804.
- [4] *WiMAX Forum* [online]. c2009 [cit. 2009-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.wimaxforum.org/about/about-wimax-forum-overview>>.
- [5] IEEE 802.16. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*. 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA : IEEE, říjen 2004.
- [6] MACH, Pavel. Přenosy dat ve standardu IEEE 802.16 (WiMAX) [online]. 2008 [cit. 2009-02-12]. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=prenosy-dat-ve-standardu-ieee-802-16-wimax&cisloclanku=2008050005>>. ISSN 1214-9675.
- [7] IEEE 802.16j. *Baseline Document for Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Multihop Relay Specification*, červen 2007.
- [8] AHSON, Syed, ILYAS, Mohammad. *WiMAX : Standards and Security*. Boca Raton (Florida) : CRC Press, 2007. 280 s. ISBN 978-1-4200-4523-9.
- [9] IEEE C802.16j-06/218. *MS MAC Handover Procedure in an MR Network – Network Topology Acquisition and MS Scanning*, listopad 2006.
- [10] IEEE C802.16j-06/219. *MS MAC Handover Procedure in an MR Network – Handover Decision and Initiation*, listopad 2006.

-
- [11] IEEE C802.16j-06/221. *MS MAC Handover Procedure in an MR Network – Termination*, listopad 2006.
- [12] IEEE C802.16j-06/220. *MS MAC Handover Procedure in an MR Network – Handover Execution*, listopad 2006.
- [13] YONG-HOON, Choi,. Mobility Management of IEEE 802.16e Networks. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security* [online]. 2008, vol. 8, no. 2 [cit. 2009-04-07], s. 89-93. Dostupný z WWW: <<http://ijcsns.org/index.htm>>. ISSN 1738-7906.
- [14] AKOUSH, Sherif, SAMEH, Ahmed. Mobile User Movement Prediction Using Bayesian Learning for Neural Networks. In *International Conference On Communications And Mobile Computing*. New York, NY, USA : ACM, 2007. Mobile computing symposium: movement prediction and planning. s. 191-196. Dostupný z WWW: <<http://portal.acm.org>>. ISBN 978-1-59593-6.
- [15] ERCEG, Vinko, et al. An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS* [online]. 1999, vol. 17, no. 7 [cit. 2009-04-07], s. 1205-1211.
- [16] ABHAYAWARDHANA, V.S., et al. Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems. In *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*. 1st edition. , 2005. [cit. 2009-04-7], s. 73-77. Dostupný z WWW:<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1543252>. ISBN 0-7803-8887-9. ISSN 1550-2252.
- [17] DOBEŠ, Josef, ŽALUD, Václav. *Moderní radiotechnika*. [s.l.] : BEN - technická literatura, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.
- [18] Mobile WiMAX – Part I: *A Technical Overview and Performance Evaluation*. [online]. 2006, [cit. 2009-04-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.wimaxforum.org/>>.