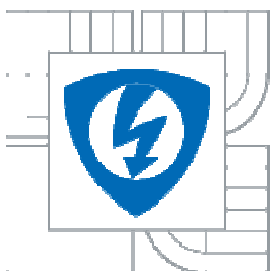


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA HANDOVERU V MOBILE IPv6

MOBILE IPv6 HANDOVER ANALYSIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

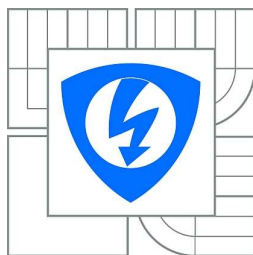
Bc. RICHARD KLÜGL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL SKOŘEPA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Richard Klügl

ID: 78217

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Analýza handoveru v Mobile IPv6

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku Mobile IPv6. Zaměřte se při tom na zajištění L3 handoveru při přechodu mobilní stanice mezi sítěmi s odlišným prefixem. Prostudujte existující schémata handoveru, jako jsou MIPv6, FMIPv6, HMIPv6, F-HMIPv6 atd. Určete velikost všech zpráv používaných při zprávové výměně během handoveru pro veškerá dostupná schémata handoveru.

S využitím dostupné literatury navrhnete analytickou metodu pro ohodnocení výkonnosti handoverů z pohledu doby trvání handoveru, režie apod. Tuto metodu aplikujte na zmíněná schémata a ohodnoťte je v závislosti na parametrech komunikačních sítí, v nichž mohou být nasazena.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MAKAYA, Ch., PIERRE, S., An Analytical Framework for Performance Evaluation of IPv6-Based Mobility Management Protocols. IEEE Transactions on Wireless Communications, March 2008, vol. 7, no. 3, p. 972 - 983. ISSN 1063-6692
- [2] JOHNSON, D. B., PERKINS, C. E., ARKKO, J. Mobility support in IPv6. The Internet Engineering Force Task RFC 3775, June 2004
- [3] KOODLI, R. S., PERKINS, C. E. Mobile Inter-networking with IPv6: Concepts, Principles and Practices. Wiley-Interscience, 2007. 365 pages. ISBN 978-0471681656

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Michal Skořepa

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

UPOZORNĚNÍ:

Předseda oborové rady

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na způsob zajištění a podpory IP mobility mobilních uživatelů a jejich zařízení v bezdrátových sítích s IPv6. Pro tento účel byl v rámci IPv6 definován protokol *Mobile IPv6* (MIPv6), který také představuje hlavní náplň obsahu práce. Ta se skládá z několika stěžejních částí, které jsou organizovány následovně:

Úvodní část se zabývá obecným popisem fungování *Mobile IP*, umožňující pohyblivost uzlů v rámci Internetu bez nutnosti změny jejich původní IP adresy. Jsou zde uvedeny také základní rozdíly mezi specifikací MIPv6 a předchozí verzí tohoto protokolu – tj. MIPv4, navržené pro prostředí s IPv4.

Druhá kapitola práce potom již obsahuje podrobnější informace o všech nejdůležitějších mechanismech a vlastnostech *Mobile IPv6* a celkově se tak snaží o objasnění principů jeho činnosti.

Dále práce rozebírá také některá z navržených rozšíření stávajícího protokolu MIPv6 – protokoly *Hierarchical Mobile IPv6* (HMIPv6), *Mobile IPv6 Fast Handover* (FMIPv6) a *Fast Handover for HMIPv6* (F-HMIPv6), přičemž se u nich zaměřuje především na průběh signalizace při zajištění handoveru mobilního uzlu.

Poslední část práce je věnována návrhu analytické metody, která by umožňovala ohodnocení a porovnání výkonnosti u protokolů *Mobile IPv6*. Tato metoda je následně aplikována na výše zmíněné typy protokolů a přitom je zkoumáno jaký vliv a dopad na jejich výkonnost mají změny různých síťových parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

analýza, analytická metoda, zhodnocení výkonnosti, Mobile IPv6, mobilita, MIPv6, HMIPv6, FMIPv6, F-HMIPv6, handover, zpoždění, režie

ABSTRACT

This master's thesis is focused on IP mobility support for mobile users and their devices in IPv6-based wireless networks. Then the *Mobile IPv6* (MIPv6) protocol was proposed for this purpose and that is also the main objective of the thesis. This consists of several basic sections and is organized as follows:

The first one deals with the overview of the function of *Mobile IP*, which enables the mobility of nodes around the Internet, without a change of their original IP address. Moreover there are introduced the primary differences between MIPv6 and its previous version – i.e., MIPv4, proposed for IPv4-based environment.

The second chapter of the master's thesis thereafter describes detailed information about all the most important mechanisms and features of *Mobile IPv6* and this way tries to explain principles of its functioning.

Further the thesis analyses some of proposed MIPv6 extensions – i.e., *Hierarchical Mobile IPv6* (HMIPv6), *Mobile IPv6 Fast Handover* (FMIPv6) a *Fast Handover for HMIPv6* (F-HMIPv6) protocols, and mainly aim at signaling process during the handover of a mobile node.

In the last main section of the master's thesis an analytical method to evaluate the performance of IPv6-based mobility management protocols was proposed. Subsequently, this method is applied on the protocols which were mentioned above and are studied the effects of various network parameters on the performance of these protocols.

KEYWORDS

analysis, analytical method, performance evaluation, Mobile IPv6, mobility, MIPv6, HMIPv6, FMIPv6, F-HMIPv6, handover, latency, signaling cost

KLÜGL, R. *Analýza handoveru v Mobile IPv6*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 95 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Skořepa.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analýza handoveru v Mobile IPv6“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Skořepovi za jeho vstřícný přístup, velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

OBSAH

OBSAH	8
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD.....	12
1. PODPORA MOBILITY S VYUŽITÍM MOBILE IP	14
1.1 Hlavní prvky Mobile IP	15
1.2 Základní princip	16
1.3 Rozdíly mezi protokoly MIPv6 a MIPv4.....	17
2. PROTOKOL MOBILE IPv6 (MIPv6).....	19
2.1 Správa vazeb	19
2.1.1 Hlavička Mobilita (Mobility).....	20
2.2 Určení domácího agenta.....	25
2.2.1 Nalezení a ustanovení agenta HA	25
2.2.2 Mobilní zjištění prefixu.....	27
2.3 Detekce změny místa připojení a vytvoření nové vazby	28
2.4 Optimalizace cesty a zpětná směrovatelnost.....	29
2.4.1 Začátek komunikace.....	30
2.4.2 Zpětná směrovatelnost (return routability).....	30
2.5 Doručování dat	32
3. ROZŠÍŘENÍ PROTOKOLU MIPv6	35
3.1 Mobile IPv6 (MIPv6) – schéma základního handoveru	36
3.2 Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6)	38
3.2.1 Princip HMIPv6	39
3.2.2 Nalezení a registrace bodu MAP.....	40
3.2.3 Schéma handoveru HMIPv6	42
3.3 Mobile IPv6 Fast Handover (FMIPv6)	44
3.3.1 Schéma handoveru FMIPv6.....	44
3.4 Fast Handover for HMIPv6 (F-HMIPv6)	47
3.4.1 Schéma handoveru F-HMIPv6.....	48
4. ANALYTICKÁ METODA PRO OHODNOCENÍ VÝKONNOSTI	
PROTOKOLŮ MOBILE IPv6.....	51
4.1 Celková režie.....	51

4.1.1	Signalizační režie při aktualizaci vazby	52
4.1.2	Režie při doručování paketů.....	60
4.2	Zpoždění při handoveru	67
5.	ZHODNOCENÍ VÝKONNOSTI JEDNOTLIVÝCH PROTOKOLŮ –	
	SCHÉMAT HANDOVERŮ	74
5.1	Topologie sítě a parametry použité pro analýzu	74
5.2	Výsledky analýzy	76
6.	ZÁVĚR.....	86
	LITERATURA	88
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	91

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: L2 a L3 handover.....	14
Obr. 1.2: Základní součásti Mobile IP	16
Obr. 2.1: Hlavička Mobilita (<i>Mobility</i>).....	21
Obr. 2.2: Aktualizace vazby (<i>Binding update</i>)	22
Obr. 2.3: Potvrzení vazby (<i>Binding acknowledgement</i>)	24
Obr. 2.4: ICMP zpráva <i>Home Agent Address Discovery Request</i>	26
Obr. 2.5: ICMP zpráva <i>Home Agent Address Discovery Reply</i>	27
Obr. 2.6: Test zpětné směrovatelnosti při optimalizaci cesty	32
Obr. 2.7: Hlavička Směrování (<i>Routing</i>) typ 2	33
Obr. 3.1: Zpoždění při handoveru u Mobile IPv6.....	35
Obr. 3.2: MIPv6 handover	37
Obr. 3.3: Hierarchická mobilita	39
Obr. 3.4: Volba <i>Mobility Anchor Point (MAP)</i>	40
Obr. 3.5: HMIPv6 handover	42
Obr. 3.6: FMIPv6 handover	45
Obr. 3.7: F-HMIPv6 handover.....	48
Obr. 4.1: Časové diagramy průběhu handoveru u jednotlivých protokolů.....	61
Obr. 5.1: Topologie sítě použita pro analýzu.....	74
Obr. 5.2: Množství signalační režie při aktualizaci vazby podle typu handoveru	77
Obr. 5.3: Vliv SMR na signalační režii při aktualizaci vazby C_{INTRA}	78
Obr. 5.4: Závislost celkové režie handoveru na počtu korespondujících uzlů CN.....	80
Obr. 5.5: Vliv množství příchozích paketů na režii při jejich doručování.....	81
Obr. 5.6: Zpoždění při handoveru u jednotlivých protokolů	83
Obr. 5.7: Vliv zpoždění bezdrátového spoje na celkové zpoždění intra handoveru.....	84

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Nové typy zpráv v Mobile IPv6	20
Tab. 2.2: Typy zpráv (<i>MH type</i>) pro hlavičku Mobilita	21
Tab. 3.1: Zprávy přenášené v průběhu MIPv6 handoveru	38
Tab. 3.2: Zprávy přenášené v průběhu HMIPv6 handoveru.....	43
Tab. 3.3: Zprávy přenášené v průběhu FMIPv6 handoveru	46
Tab. 4.1: Podrobné vyjádření a popis jednotlivých zpoždění při handoveru	69
Tab. 5.1: Seznam parametrů použitých pro analýzu.....	75

ÚVOD

Mobilita a přístup k Internetu, resp. s nimi spojená dostupnost síťových služeb se staly jedním ze základních požadavků dnešních uživatelů kladených na současné moderní síť. Možnost být on-line a komunikovat rychle a jednoduše „kdykoliv“ je to právě potřeba je hlavní trend současnosti, který dokládá i neustálý vývoj na trhu s těmito zařízeními jako jsou mobilní telefony (mj. smartphony), PDA, notebooky, netbooky, tablet PC a další. Je třeba umožnit mobilním uživatelům mít neustálý přístup ke službám typu web, e-mail, instant messaging, multimediálním aplikacím, aj., kdekoliv se právě nalézají a přitom se stejnou úrovní kvality jako pro běžné uživatele.

Jak uvádí [4], je však, v souvislosti s tím, nutné si nejprve uvědomit rozdílnost pojmů mobilita a přenositelnost. Přenositelnost (typicky vztažená k nějakému koncovému zařízení) v praxi znamená, že uživatel se vědomě odpojí ze sítě, kterou opouští, přičemž ukončí i veškeré běžící síťové aplikace, aby následně ve svojí práci pokračoval až v síti nové, do které se znovu připojí a kde získá i zcela novou IP adresu. Naproti tomu mobilita umožňuje komunikaci i za fyzické změny místa připojení k síti a vyžaduje proto řešení adresace, které by bylo zcela transparentní vůči všem aplikacím, transportním protokolům a směrovačům, což by umožnilo zachování všech právě probíhajících spojení a aplikačních relací. Je tedy zřejmé, že s mobilitou dále souvisí otázka předávání uživatele na úrovni spojové (L2) a síťové (L3) vrstvy, kdy mluvíme o tzv. L2, resp. L3 handoveru.

L2 handover, neboli předání na druhé vrstvě síťové architektury, znamená, že uživatel (mobilní stanice) přechází mezi dvěma přístupovými body AP (resp. základnovými stanicemi), které jsou však součástí téže IP podsítě a řeší se tedy hlavně samotné fyzické předání uživatele mezi oběma přístupovými body a související požadavky na výměnu rámců. Ve chvíli, kdy však uživatel při svém pohybu přechází do zcela jiné IP sítě, je nezbytně nutné, aby se, kromě vlastního předání uživatele mezi AP, vyřešila také otázka správné adresace a směrování paketů na místo jeho momentálního výskytu, protože uživatel (mobilní stanice) již po tomto přechodu nemůže dále navenek vystupovat pod svojí původní IP adresou. Zde se pak uplatňuje i síťová vrstva a tento proces je označován jako L3 handover. Jako typický příklad, kde se s handoverem lze setkat, můžeme uvést podnikové WLAN síť s pokrytím v rámci budovy nebo kampusu (tvořené dílčími podsítěmi), kterými tyto organizace podporují mobilitu svých uživatelů. Jiným příkladem může být situace, kdy cestujeme např. vlakem, přičemž

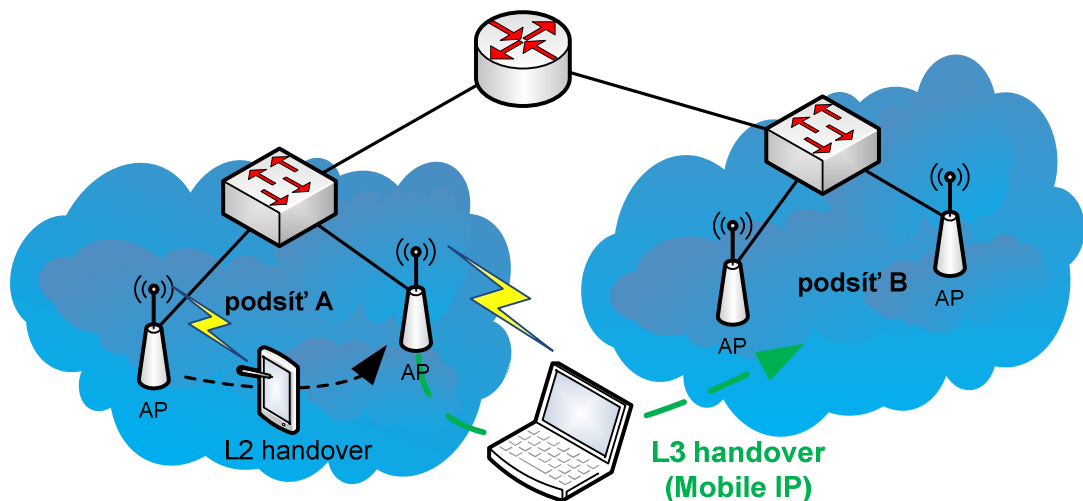
využijeme možnosti připojení k Internetu prostřednictvím svého mobilního telefonu a notebooku [3]. V takovém případě notebook získá IP adresu v rámci sítě daného mobilního operátora, ovšem v průběhu cesty bude mobilní telefon postupně přecházet mezi několika BTS stanicemi, což může znamenat i přechod mezi různými podsítěmi mobilního operátora a v konečném důsledku tak i změnu původní IP adresy.

Přestože je mobilita uživatelů na nejnižší úrovni (tj. na fyzické a spojové vrstvě) dnes již v mnoha případech zahrnuta přímo ve specifikacích daných síťových technologií, jako například IEEE 802.16e pro mobilní WiMAX, či IEEE 802.20 pro mobilní širokopásmový bezdrátový přístup (MBWA), ani tyto se v souvislosti s výše uvedeným (tj. L3 handoverem) neobejdou bez patřičné podpory také na úrovni vyšší – síťové vrstvy [4]. V současnosti nejrozšířenějším síťovým protokolem je bezpochyby protokol IP, jehož novou generací je IP verze 6 (IPv6). Tento, na rozdíl od předešlé verze IPv4, podporu mobility již přímo začlenil a integroval do svého jádra a pro veškeré tyto mechanismy podpory mobility se v návaznosti na dřívější protokol *Mobile IP* (MIPv4), vytvořený pro prostředí s IPv4, ujalo označení *Mobile IPv6* (MIPv6), viz RFC 3775.

Právě problematika spojená s MIPv6, jako hlavního protokolu pro podporu mobility v bezdrátových sítích další generace (NGWN), bude předmětem následujícího obsahu této práce. Ta je věnována nejenom samotnému protokolu MIPv6 ve významu prostého popisu jeho fungování, ale ve své druhé části se zabývá také podrobnější analýzou provedení handoveru mobilního uzlu obecně u všech protokolů *Mobile IPv6*. Její výsledky jsou důležité a měly by pomoci hlavně při rozhodování o nasazení konkrétního typu protokolu dle daných podmínek a parametrů komunikačních sítí s cílem zajistit tím koncovému uživateli co možná nejlepší požadované vlastnosti a kvalitu poskytovaných síťových služeb.

1. PODPORA MOBILITY S VYUŽITÍM MOBILE IP

Jak již bylo naznačeno v úvodu, protokol *Mobile IP* (MIPv6, resp. i MIPv4) nachází své uplatnění v okamžiku, kdy mobilní stanice provádí přesun mezi dvěma rozličnými podsítěmi (viz obr. 1.1). Jako hlavní účel se přitom jeví snaha umožnit mobilnímu uzlu takovýto pohyb v rámci Internetu při současném zachování veškeré jeho komunikace – tj. aby byl daný uzel dosažitelný bez ohledu na aktuální místo jeho připojení. *Mobile IP* proto obsahuje mechanismy, které podporují tuto pohyblivost mobilních uživatelů bez nutnosti měnit jejich domácí IP adresu, která tak zůstává jejich stálým identifikátorem při komunikaci s ostatními uzly v síti [4].



Obr. 1.1: L2 a L3 handover

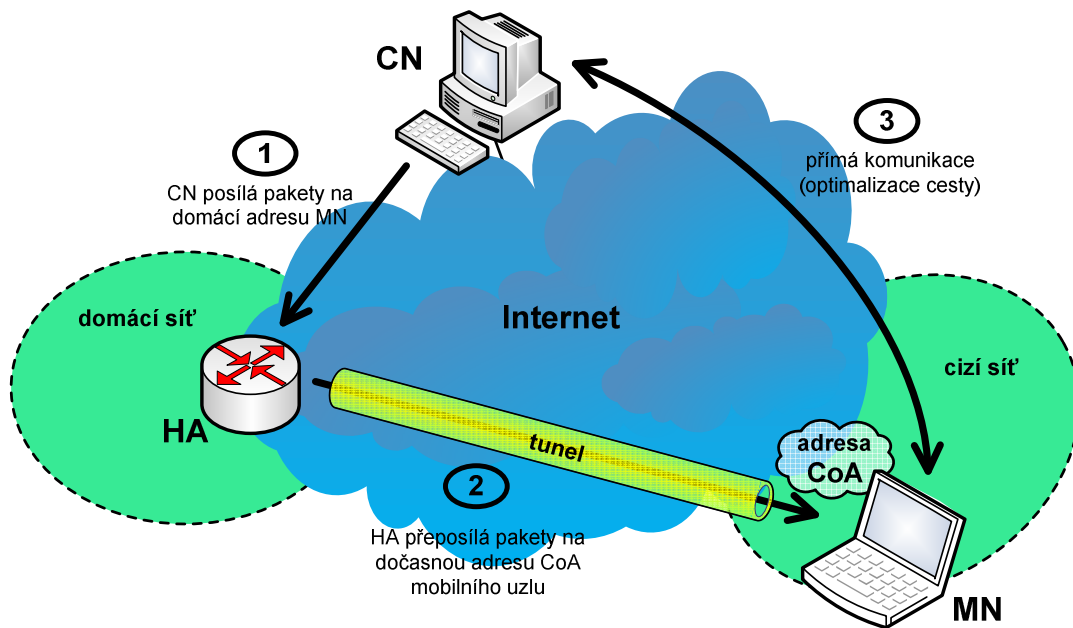
Podpora IP mobility byla sice vytvořena, i když až dodatečně, i pro dřívější protokol IPv4, ale při porovnání efektivity a nabízených možností za IPv6 značně zaostává. Při návrhu *Mobile IPv6* (MIPv6) se tak mohly uplatnit i zkušenosti získané právě již při vývoji protokolu *Mobile IPv4* (MIPv4), které se navíc skloubily s novými možnostmi a funkcemi poskytovanými protokolem IPv6. I proto MIPv6 do značné míry vychází z principů fungování protokolu MIPv4 a sdílí řadu jeho základních prvků [6]. Ty budou nyní blíže představeny.

1.1 Hlavní prvky Mobile IP

V této části jsou charakterizovány základní prvky a součásti spojené s funkcí *Mobile IP* [5]. Jejich bližší význam a funkce budou v užších souvislostech popsány v následující části práce, která se věnuje obecnému principu jeho fungování (viz část 1.2). Pro upřesnění definovaných pojmů je uveden také obrázek, znázorňující vzájemnou součinnost nejdůležitějších součástí *Mobile IP*, kterými jsou mobilní uzel, domácí agent a korespondující uzel (viz obr. 1.2).

- **Mobilní uzel MN (*Mobile Node*)** – uzel pohybující se v rámci Internetu – tj. může fyzicky změnit místo svého připojení k síti.
- **Domácí agent HA (*Home Agent*)** – směrovač v domácí síti mobilního uzlu, který rozšiřuje své funkce o podporu *Mobile IP*.
- **Korespondující uzel CN (*Correspondent Node*)** – uzel v síti (stacionární nebo také mobilní), s kterým daný mobilní uzel komunikuje.
- **Domácí adresa (*Home Address*)** – IP adresa, která je mobilnímu uzlu pevně přiřazena – tzn. je neměnná. Pod touto adresou je MN trvale dostupný bez ohledu na to, kde v síti se právě nalézá.
- **Adresa CoA (*Care of Address*)** – dočasná adresa MN, pokud se nalézá mimo svoji domácí síť. V případě MIPv6 má mobilní uzel svoji vlastní adresu CoA, u protokolu MIPv4 může tato adresa náležet také tzv. cizímu agentovi.
- **Vazba (*Binding*)** – vztah mezi domácí a dočasnou adresou CoA mobilního uzlu.
- **Cache vazeb (*Binding Cache*)** – množina záznamů jednotlivých vazeb (*binding*) pro všechny spravované mobilní uzly (v případě domácích agentů) nebo pro mobilní uzly, s kterými probíhá komunikace (v případě korespondujících uzlů).
- **Seznam aktualizací vazby** – seznam udržovaný mobilním uzlem. Obsahuje záznamy všech korespondujících stanic, u nichž má MN registrovanou platnou vazbu.
- **Domácí síť (*Home Network*)** – síť do níž mobilní uzel náleží (vzhledem k prefixu svojí domácí adresy).
- **Cizí síť (*Foreign Network*)** – jakákoliv síť mimo domácí síť mobilního uzlu.
- **Tunel** – virtuální dvoubodový spoj. Fyzicky se však může jednat o komplexní cestu sítí s mnoha mezilehlými směrovači.

V případě protokolu MIPv4 bychom mezi tyto základní prvky zařadili také cizího agenta (*Foreign Agent, FA*), kterým je směrovač v cizí síti mobilního uzlu. Mechanismy MIPv6 však jeho potřebu již zcela vylučují. Kromě výše uvedeného zde existuje ještě několik dalších odlišností v přístupu k řešení mobility u protokolů MIPv6 a MIPv4, z nichž ty nejzákladnější jsou uvedeny v další části práce (viz část 1.3) [4].



Obr. 1.2: Základní součásti Mobile IP

1.2 Základní princip

Jak se uvádí v [3], [5], je celý princip řešení mobility založen na myšlence, že i pro každý mobilní uzel MN existuje někde jeho domácí síť, v níž má pevně přiřazenu svoji domácí IP adresu, a do které díky ní trvale náleží. Tato adresa je používána také protokoly vyšších vrstev (transportní a aplikační), pro které je tak celý proces mobility zcela transparentní.

Již bylo uvedeno, že domácí adresa je po celou dobu pro daný MN neměnná, na rozdíl od dočasné adresy CoA, kterou mobilní uzel získá v okamžiku, kdy se ocitne mimo dosah svojí domácí sítě a kterou je pak jednoznačně určeno místo jeho aktuálního výskytu. O to, aby byl mobilní uzel na této svojí dočasné adrese CoA dosažitelný, se stará další neméně významný prvek *Mobile IP*, kterým je domácí agent HA. Tento má

vždy informaci o jeho momentálním výskytu, což mu umožňuje vazba (*binding*) mezi domácí a dočasnou adresou CoA mobilního uzlu. S mobilním uzlem komunikují jiné uzly v síti (korespondující uzly CN) a úkolem domácího agenta potom je, zachytávat na sebe veškerou tuto komunikaci určenou mobilnímu uzlu (MN u něj však musí být registrován v jeho *binding cache*) a přesměřovávat k němu tento provoz prostřednictvím tunelu vytvořeného mezi ním a MN. Komunikace v opačném směru potom probíhá podobným způsobem, kdy mobilní uzel ve svých odpovědích používá jako odesílatele svoji domácí adresu, tunelem předává tato data domácímu agentovi a ten je následně odesílá korespondujícímu uzlu.

Toto tzv. trojúhelníkové směrování, používané převážně v rámci MIPv4 však není příliš ideální ani efektivní, protože zbytečně spotřebovává kapacitu sítě a způsobuje v komunikaci další zpoždění. MIPv6 se proto již snaží tunelování vyhnout a tento režim komunikace používá jen pro přenos prvních paketů každé relace, a nebo v případech, kdy korespondující uzel nepodporuje mechanismy mobility. Běžně se využívá jiného způsobu, označovaného jako *optimalizace cesty (route optimization)*, jehož cílem je poskytnout korespondentům mobilního uzlu informace o svém aktuálním umístění (adrese CoA) prostřednictvím registrace přímo u nich (*correspondent registration*). To umožňuje další data mezi MN a CN posílat již přímo, bez účasti domácího agenta (viz obr. 1.2). Součástí této registrace je i test zpětné směrovatelnosti (*return routability, RR*), při kterém se provádí také autorizace nastavení vazby (*binding*) u korespondujícího uzlu, kdy mobilní uzel musí prokázat, že je skutečně tím, za koho se vydává. Blíže bude těmto jednotlivým mechanismům protokolu *Mobile IPv6* (MIPv6) věnována následující kapitola.

1.3 Rozdíly mezi protokoly MIPv6 a MIPv4

- *Mobile IPv6* (MIPv6) umožňuje činnost kdekoli bez speciální podpory směrovače v místní síti – tj. cizího agenta FA.
- Optimalizace cest (*route optimization*) je zásadní součástí MIPv6.
- Bezpečnost optimalizace cest (směrování) u MIPv6 zajišťuje metoda zpětné směrovatelnosti (*return routability*), není tedy potřeba žádných předem stanovených bezpečnostních asociací.

- Optimalizace cest u MIPv6 se má provádět globálně mezi všemi mobilními a jím korespondujícími uzly.
- Většina paketů se na mobilní uzel, nalézající se mimo svoji domácí síť, posílá s pomocí rozšiřujícího záhlaví IPv6 a nikoliv tunelem se zapouzdřením do IP paketu (protokol IP v IP). Tím se snižuje celková režie oproti MIPv4.
- Při použití zapouzdření a směrovacího záhlaví IPv6 se tedy nemusí udržovat žádné stavové informace o tunelu.
- IPv6 (resp. MIPv6) nezávisí na konkrétní použité síťové infrastruktuře. Místo ARP protokolu (*Address Resolution Protocol*), používaného pro mapování IPv4 adres na MAC (*Media Access Control*) adresy u sítí typu Ethernet, se u IPv6 používá protokol *objevování sousedů* (*Neighbor Discovery Protocol, NDP*), viz RFC 2461.
- Dynamické zjišťování adres domácích agentů u MIPv6 (*dynamic home agent address discovery*) používá výběrovou (*anycast*) adresu domácích agentů v dané síti a mobilnímu uzlu se tak vrátí jediná odpověď. V případě MIPv4 se používá dotaz na směrovanou všeobecnou adresu (*directed broadcast*) a mobilnímu uzlu se ozvou všichni připojení agenti zvlášť.

2. PROTOKOL MOBILE IPv6 (MIPv6)

V této kapitole budou nyní podrobněji popsány všechny nejdůležitější detaily související s podporou mobility v sítích s IPv6 – tzn. funkce protokolu MIPv6. Ty lze z pohledu jejich organizace rozdělit do několika následujících, vzájemně spolupracujících, mechanismů, kterým se kapitola dále věnuje: [3], [5], [6]

- **Správa vazeb**
- **Určení domácího agenta**
- **Detekce změny místa připojení a vytvoření nové vazby**
- **Optimalizace cesty a zpětná směrovatelnost**
- **Doručování dat**

Přestože MIPv6 ve své podstatě vychází ze základů protokolu IPv6, zavádí pro svoje účely také několik nových rozšiřujících záhlaví (hlaviček) IPv6 a typů zpráv protokolu ICMPv6 (*Internet Control Message Protocol version 6*). Mimo to definuje i jednu novou volbu (*Domácí adresa*) pro hlavičku *Volby pro příjemce* (*Destination option*) a nepatrně rozšiřuje také *Ohlášení směrovače* (*Router advertisement*). Všechny tyto nové položky budou popsány v průběhu této kapitoly a nyní je shrnuje tabulka 2.1.

2.1 Správa vazeb

Pro zajištění potřebné komunikace jednotlivých uzlů (ať už HA nebo CN) s jinými mobilními zařízeními v síti – uzly MN, se využívá jejich cache vazeb (*binding cache*). Tyto vždy obsahují záznamy o domácí adrese daného MN – ta je považována za cílovou, ale mimo to jsou zde uvedeny také informace o tom, jak doručit data do tohoto cíle v okamžiku, kdy se MN na této domácí adrese nenalézá – tj. odpovídající záznam s aktuální dočasnou adresou CoA. Navíc i při komunikaci v opačném směru jsou příchozí pakety cílovým uzlem dále zpracovávány jen v případě, kdy pro danou dvojici adres existuje v jeho cache vazeb platný záznam (vazba), jinak jsou zahozeny (viz část 2.5).

IPv6 díky dostatečnému počtu adres umožňuje, aby mobilní stanice v cizí síti získala svoji vlastní (kolokovanou) dočasnou adresu CoA a to buď stavovou (ze serveru

Tab. 2.1: Nové typy zpráv v Mobile IPv6

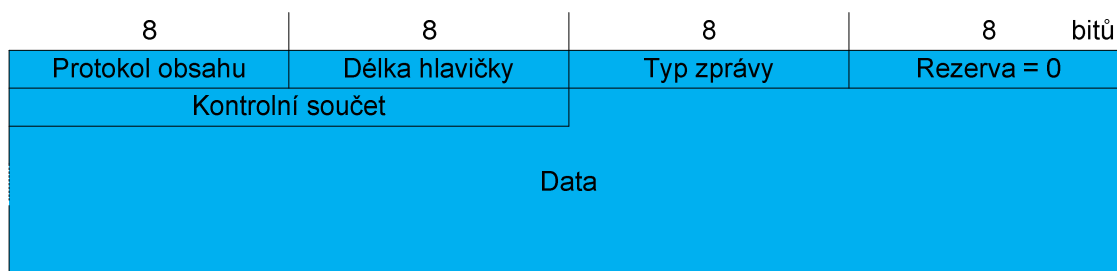
Nové typy zpráv v MIPv6		
ZÁHLAVÍ	Mobilita (<i>Mobility</i>)	- správa vazeb Binding - test domácí adresy - test dočasné adresy CoA
	Směrování (<i>Routing</i>) typ 2	doručování dat mobilnímu uzlu MN
ICMPv6	Home Agent Address Discovery Request/Reply	dynamické objevování adresy domácího agenta
	Mobile Prefix Solicitation/Advertisement	mobilní zjištění prefixů
VOLBY PRO PŘÍJEMCE	Domácí adresa	pro data odesílaná mobilním uzlem MN
OHLÁŠENÍ SMĚROVAČE	Informace o domácím agentovi (<i>Home Agent Information</i>)	priorita a životnost domácího agenta
	příznak <i>H</i>	schopnost vykonávat funkci HA

DHCPv6), nebo bezstavovou autokonfigurací, kdy si MN dočasnou adresu vytváří sám z prefixu dané sítě a svojí fyzické adresy MAC (viz RFC 4862). Mobilní uzel pak musí provést patřičnou registraci této dočasné adresy u svého domácího agenta (při optimalizaci cest i u všech svých korespondujících uzlů) a to prostřednictvím zpráv *Aktualizace vazby* (*Binding update*), *Potvrzení vazby* (*Binding acknowledgement*), případně *Žádost o obnovení vazby* (*Binding refresh request*), aj.

Celý tento proces udržování aktuálních informací o dostupnosti cílového mobilního uzlu bývá označován jako správa vazeb (*Binding cache management*) a klíčovou roli při něm hraje právě nová rozšiřující IPv6 hlavička *Mobilita* (*Mobility*).

2.1.1 Hlavička Mobilita (Mobility)

První z dvojice nových IPv6 hlaviček definovaných pro účely MIPv6 – *Mobilita* (*Mobility*), slouží tedy především pro správu vazeb, kdy se jejím prostřednictvím zasílají aktualizace a potvrzení vazeb (viz výše). Dále se jí využívá také při testu dosažitelnosti mobilního uzlu v rámci optimalizace cesty a podobně. Je identifikována hodnotou 135 v poli *Další hlavička* předcházejícího IPv6 záhlaví a její formát znázorňuje následující obrázek (viz obr. 2.1).

Obr. 2.1: Hlavička Mobilita (*Mobility*)

- **Protokol obsahu (*Payload Proto*)** – identifikuje typ hlavičky následující bezprostředně za touto. Využívá stejných identifikátorů jako standardní položka IPv6 *Další hlavička (Next Header)*.
- **Typ zprávy (*MH Type*)** – je vůbec nejvýznamnější položkou tohoto záhlaví. Definuje jaký typ zprávy je touto hlavičkou přenášen (viz tabulka 2.2).
- **Data (*Message Data*)** – struktura dat je ovlivněna samotným typem přenášené zprávy, která tak vlastně tvoří obsah tohoto pole (viz např. obr. 2.2).

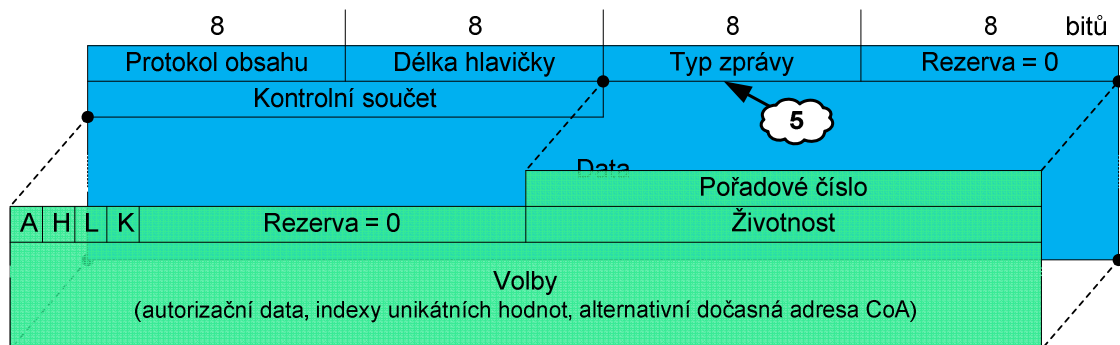
Jednotlivé typy zpráv, pro jejichž přenos je možné využít právě hlavičku *Mobilita*, shrnuje následující tabulka 2.2. Nyní budou blíže popsány pouze ty, bezprostředně související s mechanismy správy vazeb – tj. zprávy *Aktualizace vazby*, *Potvrzení vazby* a *Žádost o obnovení vazby*. Zbylé zprávy se vztahují k procesu ověření důvěryhodnosti mobilního uzlu při optimalizaci cesty a podrobněji se jimi bude zabývat až další část práce (viz část 2.4.2).

Tab. 2.2: Typy zpráv (*MH type*) pro hlavičku *Mobilita*

Typy zpráv hlavičky <i>Mobilita</i> (MH type)	
TYP	VÝZNAM
0	žádost o obnovení vazby (Binding refresh request)
1	zahájení testu domácí adresy (home test init)
2	zahájení testu dočasné adresy CoA (care-of test init)
3	test domácí adresy (home test)
4	test dočasné adresy CoA (care-of test)
5	aktualizace vazby (Binding update)
6	potvrzení vazby (Binding acknowledgement)
7	chyba vazby (Binding error)

Aktualizace vazby (*Binding update*)

Zpráva *Aktualizace vazby* (*Binding update*) je základním prvkem ve specifikaci protokolu *Mobile IPv6* (MIPv6), jejímž prostřednictvím mobilní uzel informuje domácího agenta, případně korespondující uzly, o své aktuální dočasné adrese CoA. Pro její přenos se využívá datová část rozšiřující hlavičky *Mobilita*, kde je identifikována indexem 5 v položce *Typ zprávy* (viz obr. 2.2). Vlastní adresy mobilní stanice, ať už domácí, či dočasná CoA, však v této zprávě přímo obsaženy nejsou. Cílový uzel si je totiž „vyzvedne“ z ostatních částí paketu – dočasná adresa CoA mobilního uzlu je současně zdrojovou adresou tohoto paketu a lze ji proto získat ze základního záhlaví IPv6. Domácí adresu, k níž se daná vazba vztahuje, pak MN oznámí pomocí volby pro příjemce *Domácí adresa* (viz tab. 2.1).



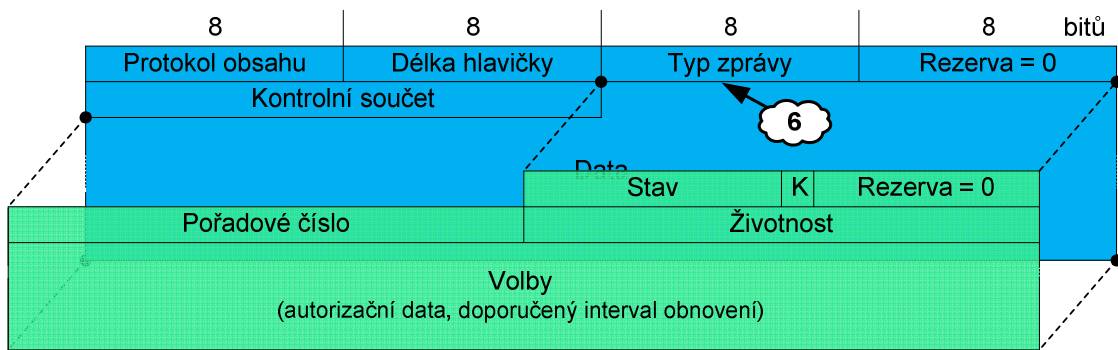
Obr. 2.2: Aktualizace vazby (*Binding update*)

- **Pořadové číslo (*Sequence #*)** – obsahuje jej každá aktualizace vazby. Na straně přijímacího uzlu (HA nebo CN) musí být vždy větší než pořadové číslo předešlé aktualizace pro danou vazbu. Tím se zamezí situaci, kdy by se cílový uzel vrátil k předchozí (nyní již neplatné) dočasné adrese MN, například vinou zpoždění paketu v síti. Na straně mobilního uzlu se pak používá ke správnému přiřazení přijatých zpráv *Potvrzení vazby* (*Binding acknowledgement*).
- **Životnost (*Lifetime*)** – určuje dobu platnosti dané dočasné adresy CoA (používá časovou jednotku délky 4 sekund). Dosáhne-li hodnoty 0, je vazba považována za neplatnou.
- **A (*Acknowledge*)** – je-li nastaven, znamená, že MN požaduje po protějším uzlu potvrzení vazby – tj. zprávu *Binding acknowledgement*.

- **H (*Home registration*)** – příznak *H* značí, že zpráva představuje žádost, aby se daný cílový uzel stal domácím agentem mobilního uzlu. V takovém případě musí být adresátem této zprávy směrovač v domácí síti MN.
- **L (*Link-local address compatibility*)** – bit *L* umožňuje mobilnímu uzlu informovat svého domácího agenta o tom, že jeho domácí adresa má stejný identifikátor rozhraní (prefix) jako jeho lokální linková adresa.
- **K (*Key management mobility capability*)** – používá se pouze při komunikaci s HA, kdy MN oznamuje, zda podporuje nějaký z definovaných bezpečnostních prvků pro zajištění IPsec (*Internet Protocol security*). V případě, že se používá manuální konfigurace mechanismů IPsec, je tento bit nastaven na hodnotu 0.
- **Volby (*Mobility options*)** – umožňují připojit k aktualizaci další (nepovinné) doplňující informace. Například při komunikaci s korespondujícím uzlem připojuje MN ke své žádosti také *Autorizační data* (*Binding authorization data*) a *Indexy unikátních hodnot* (*Nonce indices*), aby prokázal svoji totožnost (viz část 2.4.2). Při uvedení volby *Alternativní dočasná adresa* (*Alternate Care-of Address*) MN požaduje, aby se ve vytvořené vazbě použila jako dočasná adresa právě tato a nikoliv zdrojová adresa ze základní IPv6 hlavičky této zprávy. Jakákoliv z těchto voleb, které není schopna cílová stanice porozumět, je ignorována.

Potvrzení vazby (*Binding acknowledgement*)

Hlavní funkcí zprávy *Potvrzení vazby* (*Binding acknowledgement*) je informovat mobilní uzel o stavu jeho poslední žádosti o aktualizaci dočasné adresy CoA – tedy jaký je výsledek jím zaslané zprávy *Aktualizace vazby*. Protějšší stanice tuto zprávu povinně zasílá vždy, pokud předcházející přijatá žádost o aktualizaci obsahovala nastavený příznakový bit *A* (viz výše) a nebo v případě, kdy se jednalo o žádost na vykonávání funkce domácího agenta pro daný mobilní uzel (příznak *H*). *Potvrzení vazby* je stejně jako v předešlém případě součástí datové části hlavičky *Mobilita*, tentokrát však pole *Typ zprávy* nese hodnotu indexu 6 (viz obr. 2.3).



Obr. 2.3: Potvrzení vazby (*Binding acknowledgement*)

- **Stav (*Status*)** – je nejdůležitější informací celé zprávy, která určuje výsledek zpracování žádosti o aktualizaci vazby. Existuje zde celá řada možných návratových hodnot, ale v nejtypičtějším případě obdrží mobilní uzel hodnotu 0, která udává, že žádost byla akceptována. Obecně platí, že hodnoty menší než 128 zpravidla představují kladně vyřízenou žádost o aktualizaci, zatímco hodnoty od 128 signalizují její zamítnutí.
- **K (*Key management mobility capability*)** – používá jej pouze HA (CN jeho hodnotu ponechá vždy na 0), který tak sděluje mobilnímu uzlu, zda bude použit dynamický protokol pro správu bezpečnostních asociací mezi ním a MN.
- **Pořadové číslo (*Sequence #*)** – je vlastně kopií hodnoty obsažené v přijaté zprávě *Aktualizace vazby*. Pořadové číslo pak umožní mobilnímu uzlu přiřadit toto potvrzení k odpovídající žádosti o aktualizaci.
- **Životnost (*Lifetime*)** – specifikuje dobu (časovou jednotkou je opět 4s), po kterou si cílový uzel uchová tuto vazbu ve svojí cache vazeb (*binding cache*). Pokud se jedná o potvrzení žádosti o domácího agenta, znamená tato hodnota dobu, po kterou bude daný směrovač fungovat jako domácí agent tohoto MN.
- **Volby (*Mobility options*)** – jsou opět nepovinnou součástí zprávy. Například volbou *Doporučený interval obnovení* (*Binding refresh advice*) je HA umožněno doporučit mobilnímu uzlu kratší interval pro obnovení své vazby (*binding*) u něj a zajistit si tím další pokračování jeho služeb.

Žádost o obnovení vazby (*Binding refresh request*)

Zpráva *Žádost o obnovení vazby* (*Binding refresh request*) sama o sobě neobsahuje žádná data a má pouze informativní význam. Jejím prostřednictvím

korespondující uzel CN informuje mobilní stanici, s níž právě komunikuje, že se doba platnosti pro záznam dané vazby (*binding*) blíží ke konci. Mobilní uzel potom může na její přijetí reagovat trojím způsobem. Pokud chce MN vazbu zachovat – tj. prodloužit její platnost, zahájí proces *optimalizace cesty* (viz dále), který vede k její aktualizaci. V případě, že již nemá zájem na další existenci této vazby, má na výběr další dvě možnosti jak zareagovat. První, mobilní uzel odešle CN zpět zprávu *Aktualizace vazby* s nastavenou nulovou životností, čímž de facto dává najevo své přání vazbu zrušit. Druhá možnost je, že MN takto přijatou žádost o obnovení vazby jednoduše ignoruje a po vypršení doby její platnosti tak dojde k jejímu automatickému zrušení.

Je nutné dále poznamenat, že v případě udržování platnosti záznamu vazby (*binding*) v cache vazeb domácího agenta, je veškerá iniciativa o jejím prodloužení ponechána na straně mobilního uzlu. Samotný HA žádná upozornění na blížící se konec její platnosti nezasílá.

2.2 Určení domácího agenta

Ve chvíli, kdy mobilní uzel opouští svoji domácí síť a vydává se na cesty, nastává u něj potřeba zajistit si pro sebe služby některého z domácích agentů, který by jej v době, kdy bude mimo tuto síť, zastupoval. Tímto agentem se může stát prakticky kterýkoliv ze směrovačů v místní síti mobilního uzlu, který disponuje patřičnými funkcemi a má k tomu i dostatek volných prostředků. *Mobile IPv6* podporuje také více domácích agentů a v určité míře řeší i situace, kdy dojde k rekonfiguraci domácí sítě, resp. ke změnám adres v ní.

To vše je umožněno díky několika novým postupům navrženým v rámci protokolu MIPv6. Konkrétně se jedná o mechanismy *dynamického zjištění adresy domácího agenta* (*Dynamic home agent address discovery*), který MN umožňuje zjistit adresu HA i v případě, kdy se nachází mimo domácí síť a odpadá tedy nutnost statické konfigurace těchto agentů na jednotlivých mobilních uzlech, a mechanismu *mobilního zjištění prefixu* (*Mobile prefix discovery*).

2.2.1 Nalezení a ustanovení agenta HA

Proces určení domácího agenta sestává ze dvou dílčích fází, kdy MN nejprve nalezne (tj. zjistí jejich adresy) všechny potenciálně dostupné domácí agenty v rámci

své domácí sítě a ve druhé fázi pak provede výběr a ustanovení jednoho konkrétního z nich, který pro něj bude tuto úlohu plnit. K tomuto účelu mobilní uzel využije dvojice nově definovaných ICMP zpráv (viz tab. 2.1) – *Žádost o adresy domácích agentů* (*Home Agent Address Discovery Request*) a *Odpověď na objevování adresy domácího agenta* (*Home Agent Address Discovery Reply*), jejichž formát je možné vidět na obrázcích 2.4 a 2.5.

8	8	8	8	bitů
Typ = 144	Kód = 0	Kontrolní součet		
Identifikátor		Rezerva = 0		

Obr. 2.4: ICMP zpráva *Home Agent Address Discovery Request*

- **Identifikátor (*Identifier*)** – je jedinou informací přenášenou ve zprávě. Pomocí něj MN rozpozná příslušnou odpověď.

První z těchto zpráv – tedy žádost, MN odešle na výběrovou (*anycast*) adresu domácích agentů v síti. Tvar této adresy je takový, že její první polovinu tvoří prefix domácí sítě MN a zbylých 64 bitů má hodnotu `fdff:ffff:ffff:fffe` (viz RFC 2526). Právě tato adresa umožňuje, že je žádost doručena pouze jedinému z domácích agentů v dané síti a MN se tak dostane i jediné odpovědi, na rozdíl od protokolu MIPv4 (viz část 1.3). Každý z domácích agentů si také povinně udržuje informace o všech okolních směrovačích, kteří vystupují jako HA – tzv. *seznam domácích agentů*. Toto jim umožňují další z nových prvků MIPv6 – jedná se o rozšíření *Ohlášení směrovače o volbu Informace o domácím agentovi* a o příznakový bit *H* (viz tab. 2.1).

Na základě těchto dat pak domácí agent, který žádost přijal, odešle mobilnímu uzlu zpět ICMP zprávu s odpovědí – tj. zprávu *Odpověď na objevování adresy domácího agenta* (viz obr. 2.5), ve které uvede seznam všech potenciálních domácích agentů této sítě. Mobilní uzel následně vybere agenta s nejvyšší prioritou, kterému zašle *Aktualizaci vazby* s nastaveným příznakovým bitem *H*, čímž jej zažádá o registraci. V případě, že při následné *detekci duplicitních adres* (*Duplicate Address Detection*, *DAD*) nebude daná registrovaná domácí adresa mobilního uzlu shledána za kolizní, HA její registraci MN potvrdí zprávou *Potvrzení vazby*. Veškerá tato komunikace mezi MN a domácím agentem musí podléhat zabezpečení v rámci mechanismů IPsec, kdy se pro

zajištění autentizace obou komunikujících stran použije konkrétně hlavička ESP (*Encapsulating Security Payload*).

Od tohoto okamžiku směrovač funguje jako domácí agent pro daný MN, používá mechanismus *objevování sousedů* (*Neighbor discovery*) a zachytává tak IPv6 datagramy adresované na tuto domácí adresu mobilního uzlu. Tuto funkci pak směrovač pro daný mobilní uzel plní minimálně po dobu uvedenou v *Potvrzení vazby* (položka *Životnost*).

8	8	8	8	bitů
Typ = 145	Kód = 0	Kontrolní součet		
Identifikátor		Rezerva = 0		
Adresa 1				
...				
Adresa N				

Obr. 2.5: ICMP zpráva *Home Agent Address Discovery Reply*

2.2.2 Mobilní zjištění prefixu

Je dalším z významných mechanismů protokolu *Mobile IPv6* (MIPv6), který MN umožňuje být neustále informován o tom, jaké adresy se v jeho domácí síti právě používají. V případě, kdy by totiž došlo v domácí síti MN k mimořádné události a změnily by se prefixy adres, je nutné o tom neprodleně podat zprávu také mobilnímu uzlu, protože od tohoto okamžiku by se jeho domácí adresa stala neplatnou. MIPv6 pro tento účel definuje ICMP zprávu *Ohlášení mobilního prefixu* (*Mobile Prefix Advertisement*) – viz tab. 2.1, kterou HA v pravidelných intervalech a také při každé významné změně rozesílá všem jím spravovaným mobilním uzlům a informuje je tak o platných globálních prefixech domácí sítě.

Díky dalšímu novému typu ICMP zprávy, jež MIPv6 zahrnuje – tj. *Žádost o mobilní prefix* (*Mobile Prefix Solicitation*), si MN navíc může tyto požadované informace od domácího agenta sám vyžádat a nemusí tak čekat až na jejich periodickou inzerci. To MN umožňuje získat tyto informace rychleji a kdykoliv je třeba.

2.3 Detekce změny místa připojení a vytvoření nové vazby

Změnou místa připojení mobilního uzlu označujeme proces, při kterém MN provádí takový přechod v rámci Internetu, v jehož důsledku se jeho současná IP adresa a parametry spojení stávají irelevantními. Klíčovou otázkou přitom je, aby mobilní stanice byla schopna detekovat, že k takovému přesunu vůbec došlo. Hlavním prostředkem, jak toto zajistit, se u protokolu MIPv6 staly zprávy *Ohlášení směrovače* (*Router Advertisement messages*), které současně tvoří také základ bezstavové autokonfigurace v IPv6 a umožňují tak MN následně i stanovit parametry nového připojení k síti.

Mobilní uzel naslouchá těmto ohlášením směrovačů a na základě nich samotných a informací, které obsahují, se mimo jiné dozví o všech dostupných implicitních směrovačích a prefixech adres dané sítě, v níž se právě nalézá. Z těchto směrovačů potom zvolí jeden za svůj implicitní – tj. svůj defaultní přístupový směrovač (*Access Router, AR*), současně s ním také některý z jím ohlašovaných prefixů a s pomocí mechanismu bezstavové autokonfigurace (viz část 2.1) si určí dočasnou adresu CoA, kterou následně zaregistruje u svého domácího agenta jako svoji primární dočasnou adresu. K tomu využije standardní zprávy *Aktualizace vazby* s nastaveným příznakovým bitem *H*. V souladu s principy optimalizace směrování (viz dále) musí MN tuto změnu adresy ohlásit také všem stanicím, se kterými v poslední době komunikoval a pro něž má uvedeny platné záznamy ve svém *seznamu aktualizací vazby* – tj. životnost těchto aktualizací dosud nevypršela. Korespondující uzly tak díky tomu mohou udržovat své cache vazeb stále aktuální.

Od této chvíle také MN neustále kontroluje dosažitelnost svého implicitního směrovače. K tomu může opět využít zpráv *Ohlášení směrovače*, které by měl daný směrovač pravidelně vysílat. *Mobile IPv6* navíc specifikuje kratší minimální interval pro jejich šíření – tento činí 30 ms, což je z pohledu vysoce dynamického prostředí mobility velmi výhodné. V okamžiku, kdy mobilní uzel takto zjistí, že jeho implicitní směrovač již není dosažitelný, vyvodí z toho závěr, že pravděpodobně změnil svoji aktuální síť. Znovu tedy opakuje výše popsany proces, při kterém si určí nový implicitní směrovač a novou dočasnou adresu CoA, kterou potom opět stejným způsobem registruje u svého domácího agenta a korespondujících uzlů.

Speciálním případem přesunu mobilního uzlu je jeho návrat do vlastní domácí sítě. Tento stav MN zjistí běžnou cestou jako kteroukoliv jinou změnu aktuální adresy. Podstatný rozdíl spočívá v tom, že veškeré mobilním uzlem zasílané zprávy *Aktualizace vazby* (pro HA i CN) pak mají nastavenou nulovou životnost, čímž tak vlastně nepředstavují žádost o aktualizaci, nýbrž o zrušení vazby. Cílový uzel na základě takto přijaté zprávy odstraní patřičný záznam (*binding*) ze svojí cache vazeb a tím je vazba mezi ním a MN zrušena. Mobilní uzel pak ještě v rámci své domácí sítě rozešle několik nevyžádaných zpráv *Ohlášení souseda*, čímž zajistí, že veškerý příslušný provoz je následně směřován již přímo jemu na jeho domácí adresu.

2.4 Optimalizace cesty a zpětná směrovatelnost

Optimalizace cesty (společně s vyloučením potřeby cizího agenta) je vůbec tou největší změnou ve způsobu řešení mobility v rámci IPv6 oproti IPv4 a představuje tak hlavní pozitivní posun, který s sebou protokol MIPv6 přináší. Jejím předpokladem je, aby se vazba mezi domácí a dočasnou adresou CoA mobilního uzlu vytvořila přímo u korespondující stanice. Optimalizace tedy spočívá ve vytváření těchto vazeb (*binding*) adres a cest s aktuálním umístěním MN ve směrovacích tabulkách korespondujících uzlů.

Mobilní uzel ji zahájí okamžitě, jakmile zjistí, že se s ním některá jiná stanice v síti (uzel CN) snaží komunikovat a používá jeho domácí adresu – tj. ihned při příchodu prvních paketů od této nové korespondující stanice. Než je však cílový korespondující uzel schopen tyto aktualizací informace, určené pro začlenění do svojí směrovací tabulky, od mobilního uzlu přijmout, je nejprve nutné ověřit jejich důvěryhodnost. Proces optimalizace totiž, stejně jako další oblasti síťových komunikací, provází určitá bezpečnostní rizika. Konkrétně se jedná o případ, kdy by se jistý uzel v síti vydával za jiný (uzel na cestách), čímž by dokázal zcizit všechny provoz určený původně tomuto uzlu. Na rozdíl od komunikace mezi MN a HA však zde již není možné využít mechanismů IPsec, jak je popisuje RFC 3776. Korespondujícím uzlem totiž může být prakticky kterákoliv stanice v síti a není tudíž dost dobře možné zde zajistit podobnou distribuci klíčů a dalších náležitostí jako tomu bylo v předešlém případě, kdy se obě komunikující strany navzájem znají. MIPv6 proto vytváří zcela nový mechanismus ověření totožnosti MN označovaný jako tzv. *zpětná směrovatelnost*

(*return routability*), v rámci níž MN musí korespondujícímu uzlu prokázat, že skutečně naslouchá (přijímá data) jak na dočasné (CoA), tak na svojí domácí adrese, které obě uvedl ve zprávě *Aktualizace vazby* zaslané právě CN. Nyní budou jednotlivé procedury *optimalizace cesty* blíže popsány.

2.4.1 Začátek komunikace

V okamžiku, kdy některá stanice v Internetu odesílá data mobilnímu uzlu, avšak o jeho mobilitě zatím netuší, dostává se ke slovu domácí agent daného MN. Tyto pakety jsou totiž směrovány na domácí adresu mobilního uzlu a dorazí tak do jeho domácí sítě. Zde jsou přijaty některým z místních směrovačů a následně přeposlány příslušnému HA agentovy. Ten se o ně přihlásí prostřednictvím odpovědi na výzvy objevování sousedů, na které reaguje právě namísto mobilního uzlu, jehož zastupuje.

Domácí agent potom celé takto přijaté pakety zapouzdří do datových částí nových paketů protokolu IPv6. Zároveň je opatří také novou cílovou adresou – tou je dočasná adresa CoA mobilního uzlu a následně tedy odešle (tunelem zabezpečeným ESP) na aktuální místo jeho výskytu. Až zde pak mobilní uzel provede opětovné vyjmutí původních paketů – tj. jejich odpouzdření. Celý výše popsaný proces bývá velmi často označován také jako tunelování. Když pak mobilní uzel obdrží takto tunelovaná data, vyvodí z toho, že odesílající stanice neví o jeho aktuální adrese a pokusí se jí proto o tomto informovat. Zahájí tedy proces *optimalizace cesty*, resp. nejprve *zpětné směrovatelnosti*, který v ní vyústí (viz obr. 2.6).

2.4.2 Zpětná směrovatelnost (return routability)

V reakci na výše uvedený stav, kdy korespondující stanice nezná aktuální adresu MN, jí mobilní uzel zašle dvě vzájemně nezávislé testovací zprávy – *Zahájení testu domácí adresy* (*Home Test Init*) a *Zahájení testu dočasné adresy* (*Care-of Test Init*). V obou případech se jedná o zprávy přenášené hlavičkou *Mobilita* (viz tab. 2.2). Každá tato zpráva pak obsahuje jinou náhodnou hodnotu označovanou jako *Cookie*, kterou korespondující uzel zkopíruje do svých odpovědí, čímž dokazuje, že reaguje na zahájení testu iniciovaného mobilním uzlem. Ve zprávě *Zahájení testu domácí adresy* MN sice použije svoji domácí adresu, ale zprávu zapouzdří a tuneluje zpět přes domácího agenta, který ji až následně přepoše korespondujícímu uzlu. To je nezbytné v sítích s filtrováním provozu, kdy zdrojová adresa musí odpovídat skutečnému rozsahu adres

dané síť. *Zahájení testu dočasné adresy* jako zdrojovou adresu obsahuje přímo dočasnou adresu CoA, a proto ji MN již může poslat přímo korespondujícímu uzlu.

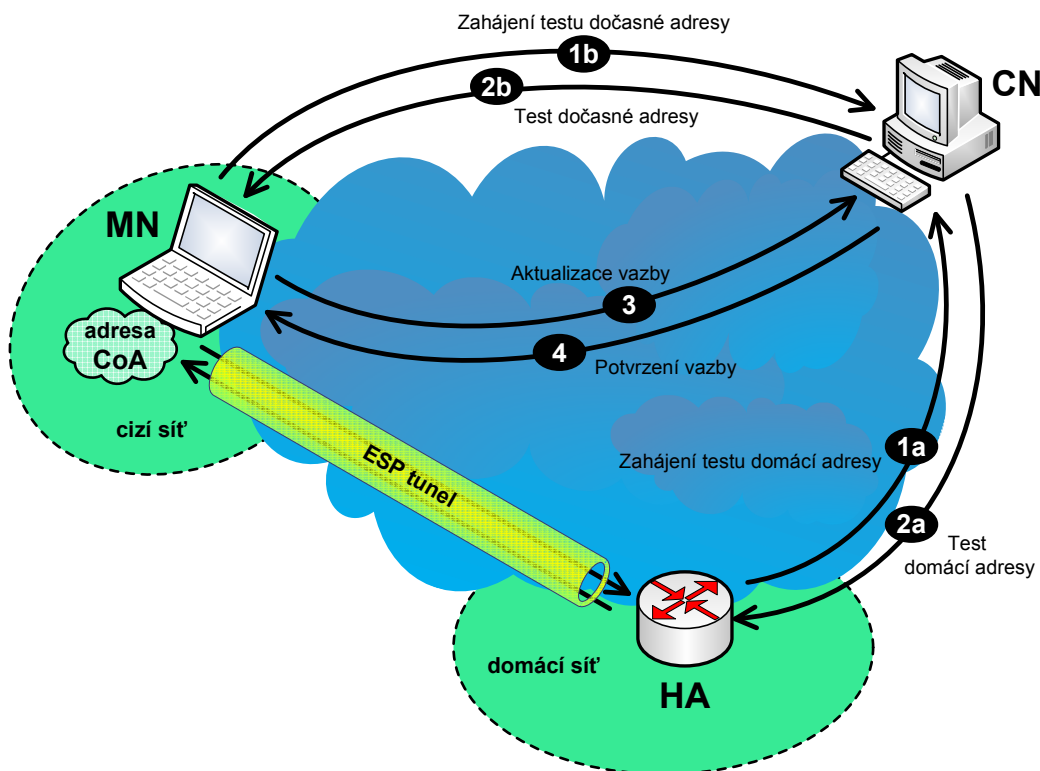
Jakmile korespondující stanice přijme jednu z těchto inicializačních zpráv, reaguje na ni odesláním testu pro příslušnou adresu. CN proto nejprve vypočítá speciální hodnotu označovanou jako *Token*, k jejímuž určení využije několika hodnot. Z příchozí zprávy o zahájení testu adresy (domácí či CoA) vybere právě tuto adresu, k ní připojí aktuální hodnotu $N(i)$ (tj. náhodná unikátní hodnota *nonce* s pořadovým číslem i , kterou si CN v několikaminutových intervalech pravidelně generuje) a dále konstantu 0 nebo 1 (v závislosti zda se jedná o test domácí – tj. 0, nebo CoA adresy – tj. 1). Všechny tyto hodnoty, společně se svým soukromým klíčem K , který si musí udržovat každý IPv6 uzel podporující mobilitu, poté CN podrobí hašovací funkci HMAC-SHA-1. Prvních 64 bitů jejího výsledku pak tvoří právě *Token* pro danou adresu. Tento následně korespondující stanice vloží do zprávy *Test domácí adresy* (*Home Test*), resp. *Test dočasné adresy* (*Care-of Test*), přidá index použité unikátní hodnoty i a odešle na odpovídající adresu mobilního uzlu – zpráva *Test domácí adresy* bude opět tunelována přes HA, *Test dočasné adresy* se adresuje přímo MN.

Stejným způsobem pak CN počítá také *Token* pro druhou adresu. Protože však obě zprávy o zahájení testu cestují jinudy, je pravděpodobné, že k CN nedorazí ve stejný okamžik. Může se tak teoreticky stát, že pro tento výpočet již bude použita jiná unikátní hodnota $N(i)$, pokud mezitím došlo k její změně. Opět je tedy nezbytně nutné ji v odpovědi pro MN uvést.

V případě, že mobilní uzel nelhal a skutečně disponuje adresami, které uvedl korespondujícímu uzlu, obdržel od něj zpět obě testovací zprávy – *Test domácí adresy* a *Test dočasné adresy*. Údaje z nich (*Tokeny*) pak definovaným způsobem použije pro výpočet klíče *Aktualizace vazby*. Pomocí HMAC-SHA-1 a tohoto klíče je poté schopen vypočítat speciální autentizační hodnotu (v podstatě digitální podpis daného MN). Tuto hodnotu následně vloží do volby *Autorizační data* zprávy *Aktualizace vazby*, zároveň přidá také *Indexy unikátních hodnot* (viz obr. 2.2), aby CN věděl, které hodnoty pro ověření má použít, a zprávu *Aktualizace vazby* odešle danému korespondujícímu uzlu. CN si po přijetí této zprávy vyzvedne ze své paměti obě odpovídající hodnoty $N(i)$ a zopakuje znovu celý výpočet autentizační hodnoty. Svůj výsledek následně porovná s hodnotou obsaženou ve zprávě o aktualizaci, a pokud jsou shodné, znamená to, že mobilní uzel prokázal znalost obou *Tokenů* a že skutečně naslouchá na obou uvedených adresách. V takovém případě potom korespondující uzel může danému MN potvrdit

jeho žádost o aktualizaci a jejich další komunikace bude probíhat již přímo s využitím dočasné adresy CoA.

Mobilní uzel si také ve svém *seznamu aktualizací vazby* udržuje přehled o všech uzlech, u nichž má registrovanou vazbu. Kdykoliv pak změní svoji dočasnou CoA adresu, informuje je. CN tak mají neustále přehled o tom, jak s daným mobilním uzlem optimálně komunikovat. Celý výše popsany mechanismus autentizace mobilního uzlu znázorňuje obrázek 2.6.



Obr. 2.6: Test zpětné směrovatelnosti při optimalizaci cesty

2.5 Doručování dat

Dočasnou adresu CoA mobilního uzlu je nutné skrýt před protokoly vyšších vrstev (tj. transportní a vyšších). Aplikace a transportní protokoly potom používají pouze domácí adresu MN a o jeho mobilitě nemají vůbec tušení. Klíčovým prvkem, který tuto transparentnost umožňuje je *cache vazeb (binding cache)*, kterou by si měl udržovat každý uzel v síti s IPv6 podporující mobilitu. Ta obsahuje záznamy

s informacemi, že některý uzel je momentálně dosažitelný na určité dočasné adrese. Mezi základní informace obsažené v těchto záznamech patří:

- **Domácí adresa mobilního uzlu** – podle ní probíhá vyhledávání.
- **Odpovídající dočasná adresa CoA**
- **Doba životnosti vazby** – po jejím vypršení je záznam vazby zrušen.
- **Pořadové číslo aktualizace vazby** – dosud nejvyšší přijaté.
- **Příznak určující zda se jedná o domácí registraci** – uzel by pak plnil funkci HA.

Před tím, než stanice odešle data, nejprve prohlédne svoji cache vazeb, aby zjistila, zda pro danou cílovou adresu neobsahuje odpovídající záznam (tj. záznam se shodnou domácí adresou). V případě, že takový skutečně nalezne, připojí ke všem odesílaným paketům rozšiřující hlavičku *Směrování (Routing)*. Toto záhlaví se v rámci IPv6 obecně používá pro specifikaci předepsané cesty sítě, ale protokol MIPv6 definuje nový, jednoduchý typ této hlavičky označovaný jako typ 2 (viz tab. 2.1). V tomto případě obsahuje jedinou adresu, kterou je domácí adresa mobilního uzlu, jak ukazuje následující obrázek 2.7.

8	8	8	8 bitů
Další hlavička	Délka dat = 2	Typ směrování = 2	Zbývá segmentů = 1
Rezerva = 0			
Domácí adresa			

Obr. 2.7: Hlavička Směrování (*Routing*) typ 2

Prostřednictvím této hlavičky jsou pak všechna data odeslána přímo na dočasnou adresu CoA mobilního uzlu, která je uvedena jako cílová adresa vlastních paketů. Když potom dorazí ke svému cíli, je hlavička *Směrování* při přijetí mobilním uzlem zpracována standardním způsobem a do základní IPv6 hlavičky se vrátí domácí adresa MN – paket je tak přijat, jako by dorazil na domácí adresu mobilního uzlu.

Při komunikaci v opačném směru, kdy jsou data odesílána mobilním uzlem, se jako adresa odesílatele (zdrojová) uvádí přímo dočasná adresa MN. Mobilní uzel ale

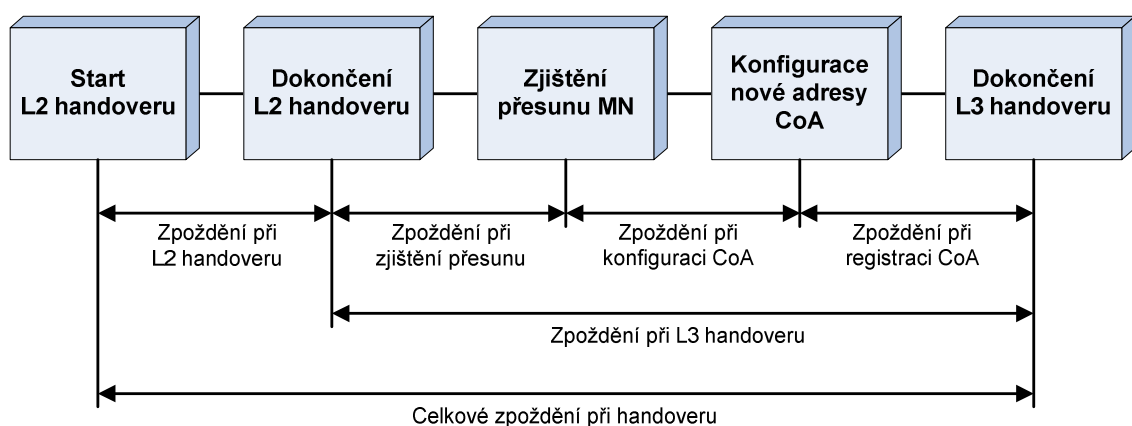
připojuje ke každému paketu volbu *Domácí adresa* (viz tab. 2.1), kterou posílá v rámci hlavičky *Volby pro příjemce* a cílovou stanicí pomocí ní informuje o své domácí adrese. Příjemce si následně ověří, zda pro danou dvojici adres má platný záznam ve svojí cache vazeb a pokud ano, nahradí zdrojovou adresu v paketu domácí adresou z rozšiřující hlavičky *Volby pro příjemce*. Jestliže se mu ale žádnou platnou vazbu nalézt nepodaří, paket jednoduše zahodí.

Již bylo uvedeno, že MIPv6 počítá i se situací, kdy korespondující uzel nepodporuje mechanismy mobility. V takovém případě komunikace probíhá i bez předchozí registrace vazby (*binding*) domácí a dočasné adresy CoA provedené mobilním uzlem. Využije se obousměrného tunelu a data jsou v obou směrech směrována přes domácího agenta a tunel mezi ním a MN.

3. ROZŠÍŘENÍ PROTOKOLU MIPv6

Výchozí (základní) protokol *Mobile IPv6* (MIPv6), jako takový, má několik obecně známých nedostatků, které jeho výkonnost do značné míry limitují [1], [2], [9]. Jedná se zejména o poměrně vysokou režii spojenou se způsobem poskytování mobility a pak také zpoždění, ke kterému v rámci něj dochází. Zvláště v případech, kdy spolu domácí agent (resp. korespondující uzly) a mobilní uzel komunikují na větší geografické vzdálenosti, se doba potřebná k přenosu zpráv pro aktualizace vazeb stává velmi vysokou a logicky vede i ke zvýšení celkové doby zpoždění handoveru. To pak ovlivňuje kvalitu veškeré probíhající komunikace – tj. dobu zpoždění i ztrátovost paketů, a má negativní dopad zejména na real-time aplikace jako jsou *VoIP*, streamované video, aj. Z tohoto důvodu je také *Mobile IPv6* (MIPv6) určen převážně pro podporu *Macro-mobility*, v jejímž rámci nedochází k příliš častým přesunům mobilních uzlů.

Na následujícím obrázku 3.1 je možné vidět, že u protokolu MIPv6 se uplatňují dva hlavní faktory, které toto zpoždění a potažmo tak i ztrátovost při procesu handoveru způsobují. Jedním z nich je zpoždění v průběhu handoveru L2, kdy MN provádí vlastní fyzické předání mezi dvěma přístupovými body AP – v tomto okamžiku také není schopen odesílat ani přijímat žádná data, což je právě jedním z hlavních důvodů značného zvýšení ztrátovosti paketů. Druhou příčinou je potom režijní zpoždění během L3 handoveru, kdy se jedná o časovou prodlevu související s aktualizací vazeb a jejíž dílčí části obrázek dále popisuje (viz obr. 3.1).



Obr. 3.1: Zpoždění při handoveru u Mobile IPv6

Pro odstranění výše uvedených nedostatků MIPv6 bylo specifikováno několik jeho doplňků a rozšíření. Ty si kladou za cíl právě zdokonalit jím poskytované vlastnosti a celkově tak zlepšit jeho výkonnost. Těmto nově vzniklým mechanismům (resp. protokolům), jako jsou *Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6)*, *Mobile IPv6 Fast Handover (FMIPv6)* a *Fast Handover for HMIPv6 (F-HMIPv6)*, je proto věnován obsah následující kapitoly. V souvislosti s nimi je vhodné zde nejprve uvést také průběh klasického handoveru u protokolu MIPv6, od něhož se vlastně veškerá tato rozšíření odvíjejí.

3.1 Mobile IPv6 (MIPv6) – schéma základního handoveru

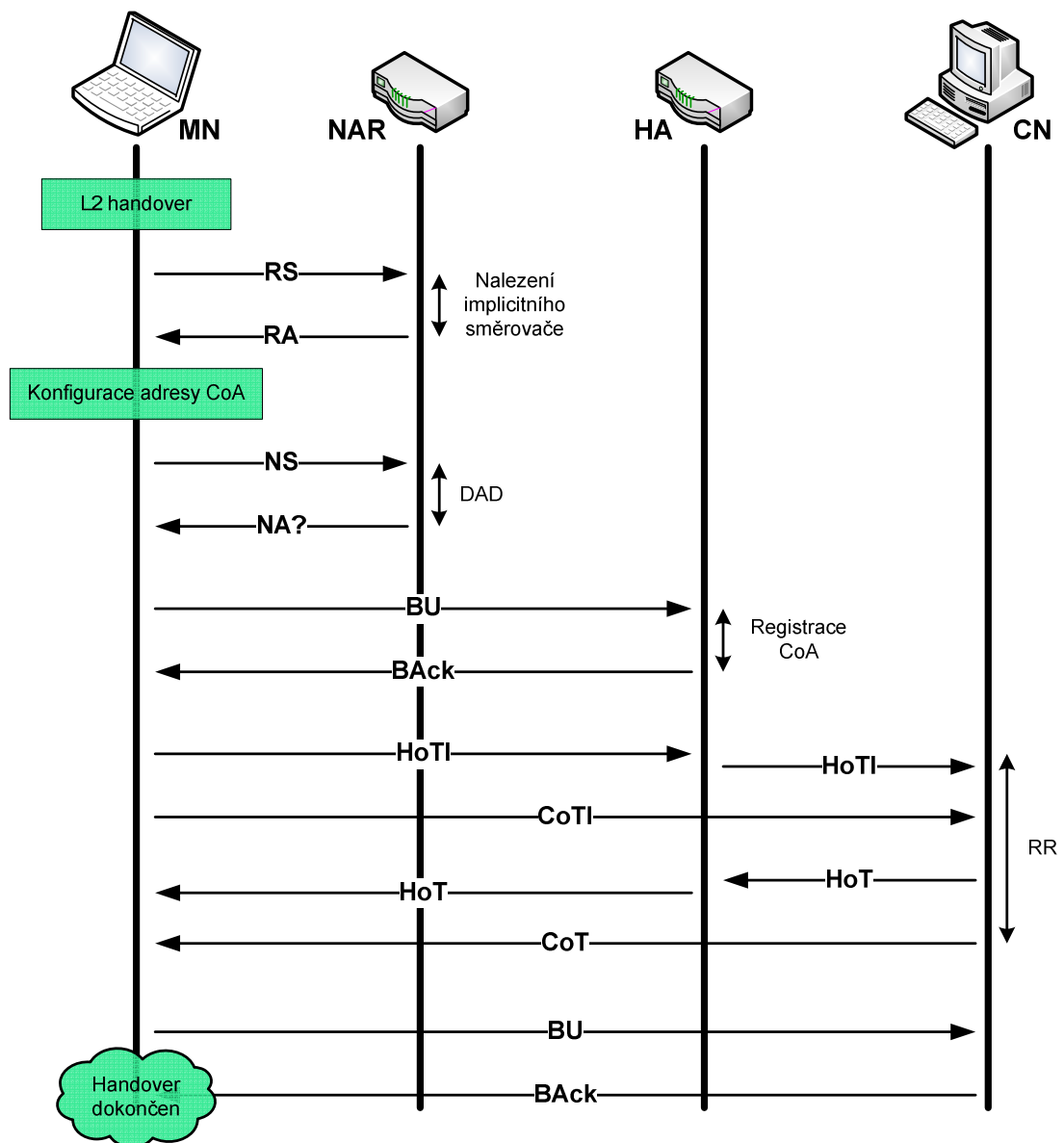
Schéma základního typu handoveru, definovaného v rámci *Mobile IPv6 (MIPv6)* [1], ve své podstatě vychází z principů a informací, které popisuje předcházející kapitola 2, této práce. Jeho průběh a význam většiny zasílaných zpráv, by proto měly být již víceméně zřejmé (viz obr. 3.2).

Mobilní uzel jej zahájí nalezením svého nového implicitního přístupového směrovače (*New Access Router, NAR*), čímž tedy zároveň detekuje svůj vlastní přesun a změnu sítě. Toto se děje s pomocí dvojice ICMP zpráv *Výzva směrovači (Router Solicitation, RS)* a *Ohlášení směrovače (Router Advertisement, RA)*, na jejichž základě si MN následně stanoví svoji dočasnou adresu CoA (blíže viz část 2.3). Poté je třeba zjistit, zda tato nová adresa CoA není v dané síti již používána některou jinou stanicí, k čemuž mobilní uzel využije mechanismu *detekce duplicitních adres DAD*. Ten je založen na standardním principu *objevování sousedů (Neighbor Discovery)*, kdy MN rozešle zprávu *Výzva sousedovi (Neighbor Solicitation, NS)*, v níž hledá případného vlastníka této jím stanovené adresy. V případě, že se mu na ni nedostane žádné odpovědi – tj. zprávy *Ohlášení souseda (Neighbor Advertisement, NA)*, znamená to, že nikdo jiný dosud stejný identifikátor rozhraní nepoužívá a danou adresu CoA si tak lze přiřadit. Následně již MN může provést její registraci u svého domácího agenta – tj. odešle svému HA zprávu *Aktualizace vazby (Binding update, BU)* a čeká na její potvrzení (*Binding acknowledgement, BACk*).

Po tomto již přichází ke slovu proces *optimalizace cest* mezi MN a všemi korespondujícími uzly CN, který je provázen ověřením totožnosti mobilního uzlu – tj.

testem *zpětné směrovatelnosti* (viz část 2.4). MN při něm odešle korespondujícím uzlům dvě zprávy – *Zahájení testu domácí adresy* (*Home Test Init, HoTI*) a *Zahájení testu dočasné adresy* (*Care-of Test Init, CoTI*), na které CN reagují zasláním testu příslušné adresy – *Test domácí adresy* (*Home Test, HoT*) a *Test dočasné adresy* (*Care-of Test, CoT*). V případě, že vše proběhne v pořádku, mobilní uzel opět provede registraci své CoA adresy u příslušných korespondujících uzlů prostřednictvím zpráv *Binding update* (*BU*) a *Binding acknowledgement* (*BAck*) a tím vlastně dokončí i celý handover.

Z výše uvedeného vyplývá, že ačkoliv *zpětná směrovatelnost* (RR) v určité míře předchází bezpečnostním problémům, tak na druhou stranu také vnáší do procesu handoveru další zpoždění, což dokládá následující obrázek 3.2.



Obr. 3.2: MIPv6 handover

V tabulce 3.1 jsou nyní shrnuty význam a velikosti všech jednotlivých zpráv používaných v průběhu zprávové výměny během MIPv6 handoveru [10], [11], [12], tak jak jej popisuje výše uvedené schéma (viz obr. 3.2).

Tab. 3.1: Zprávy přenášené v průběhu MIPv6 handoveru

Zprávy při handoveru MIPv6			
ZPRÁVA	VÝZNAM	VELIKOST ZPRÁVY [Bajty]	CELKOVÁ VELIKOST (včetně pevného záhlaví) [Bajty]
RS	Výzva směrovači (<i>Router Solicitation</i>)	16 B	56 B
RA	Ohlášení směrovače (<i>Router Advertisement</i>)	64 B	104 B
NS	Výzva sousedovi (<i>Neighbor Solicitation</i>)	28 B	68 B
NA	Ohlášení souseda (<i>Neighbor Advertisement</i>)	32 B	72 B
BU	Aktualizace vazby (<i>Binding Update</i>)		
	MN → HA	90 B ¹	136 B ¹
	MN → CN	26 B	72 B
BAck	Potvrzení vazby (<i>Binding Acknowledgement</i>)		
	HA → MN	82 B ¹	128 B ¹
	CN → MN	26 B	72 B
HoTI	Zahájení testu domácí adresy (<i>Home Test Init</i>)		
	MN → HA	82 B ¹	128 B ¹
	HA → CN	10 B	56 B
CoTI	Zahájení testu dočasné adresy (<i>Care-of Test Init</i>)	10 B	56 B
HoT	Test domácí adresy (<i>Home Test</i>)		
	CN → HA	18 B	64 B
	HA → MN	90 B ¹	136 B ¹
CoT	Test dočasné adresy (<i>Care-of Test</i>)	18 B	64 B

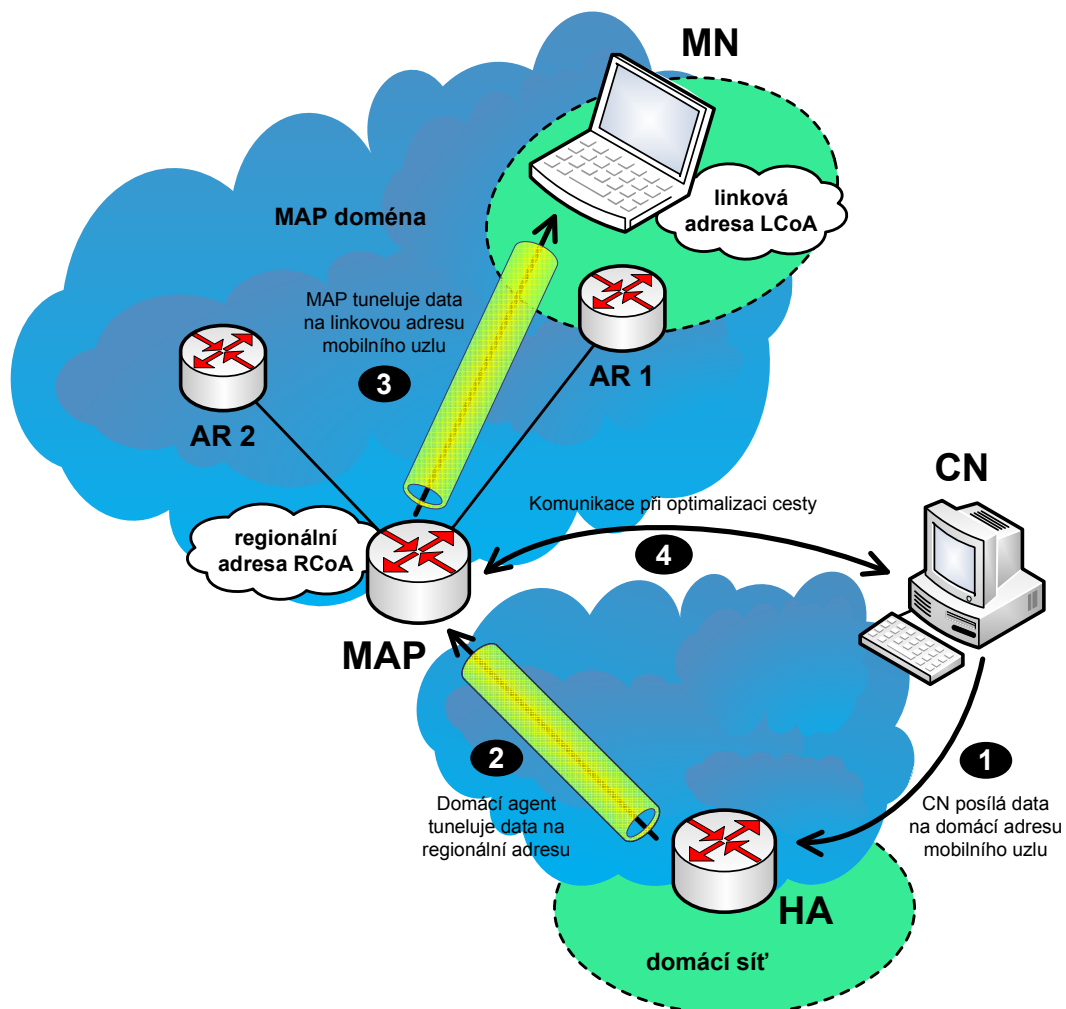
¹ Předpokládá využití zabezpečení IPsec (hlavička ESP).

3.2 Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6)

Prvním, z nově navržených rozšíření stávajícího protokolu *Mobile IPv6* (MIPv6), je *Hierarchical Mobile IPv6* (HMIPv6), který definuje RFC 4140 [3], [7], [20]. Jako hlavní důvod jeho vzniku se jeví snaha o to, rozšířit funkce MIPv6 také o podporu *Micro-mobility* – tedy omezit důsledky mobility uzlu pouze na oblast (doménu) jeho přístupové sítě (*access network, AN*) – tzv. *intra-domain handover*, kdy se MN pro ostatní komunikující uzly jeví jako statický, se stále stejnou IP adresou a zaručenými parametry QoS. To nakonec vede i ke snížení celkové režie (počtu zasílaných zpráv) vně dané domény a tím tak i ke snížení zpoždění při aktualizaci vazeb. Další z výhod tohoto protokolu je, že se jedná pouze o nepovinné rozšíření základního *Mobile IPv6*, což v praxi tedy znamená, že pokud některá ze zúčastněných stran HMIPv6 z jakéhokoliv důvodu nepodporuje, bude se využívat jen klasického protokolu MIPv6.

3.2.1 Princip HMIPv6

Klíčovou úlohu při poskytování hierarchické mobility hraje zcela nový prvek označovaný jako tzv. *kotevní bod mobility* (*Mobility Anchor Point, MAP*), který HMIPv6 pro tyto účely zavádí. Tím je obvykle směrovač, případně skupina směrovačů, nacházející se v síti nad přístupovými směrovači (AR) a to v rámci jediné oblasti – tzv. domény, kterou může být například síť jednoho poskytovatele, či mobilního operátora, apod. (viz obr. 3.3).



Obr. 3.3: Hierarchická mobilita

Základní myšlenka *Hierarchical Mobile IPv6* je ta, že pokud mobilní uzel provádí přesun pouze v rámci jediné MAP domény (na obr. 3.3 mezi AR1 a AR2), jeho dočasná adresa zůstává stejná a není proto nutné zasílat HA ani korespondujícím uzlům

aktualizace vazby. Tato dočasná adresa je zde označována jako *regionální dočasná adresa* (*Regional Care-of Address, RCoA*).

Kotevní bod MAP funguje vlastně jako jakýsi místní domácí agent pro mobilní uzel, a k tomu, aby mohl začít jeho funkcí využívat, je proto nejprve nutné, aby se u něj MN zaregistroval. Je tedy zřejmé, že, na rozdíl od běžného MIPv6, zde při použití hierarchické mobility musí mobilní uzel provést registrace dvě. Nejprve si u kotevního bodu zaregistruje vazbu mezi svou regionální adresou RCoA a aktuální dočasnou adresou – v HMIPv6 označovanou jako *linková dočasná adresa* (*On-link Care-of Address, LCoA*). Následně pak u HA a všech korespondujících uzlů provádí druhou registraci, tentokrát vazby mezi domácí adresou a regionální dočasnou adresou RCoA, což v konečném důsledku vede ke způsobu komunikace, který uvádí obrázek 3.3.

3.2.2 Nalezení a registrace bodu MAP

K tomu, aby MN vůbec existenci takového kotevního bodu zjistil, je třeba rozšířit zprávy ohlášení směrovačů (*Router Advertisements*) o novou volbu *Mobility Anchor Point (MAP)*, viz následující obrázek 3.4.

8	8	8	8	8	bitů
Typ = 23	Délka = 3	Vzdál.	Priorita	R	Rezerva = 0
Doba platnosti					
Globální adresa MAP					

Obr. 3.4: Volba *Mobility Anchor Point (MAP)*

- **Vzdálenost (*Dist*)** – vyjadřuje vzdálenost MAP od dané podsítě mobilního uzlu. Vzdálenější kotevní bod leží ve vyšší hierarchické úrovni sítě a MN jej tak bude moci využívat po delší dobu (tj. má větší oblast MAP domény).
- **Priorita (*Pref*)** – obecná míra dostupnosti daného kotevního bodu – čím vyšší hodnota, tím lépe.
- **Doba platnosti (*Valid Lifetime*)** – minimální doba platnosti adresy MAP bodu.
- **Globální adresa MAP (*Global IP Address for MAP*)** – adresa kotevního bodu. Její prefix MN využije k určení svojí regionální dočasné adresy RCoA.

V dané síti může být provozováno i několik kotevních bodů v různých místech a hierarchických úrovních. Informace o nich jsou pak přenášeny právě prostřednictvím této volby *MAP* ve zprávách *ohlášení směrovače* (*Router Advertisement*) všech směrovačů, jež se v této síti nacházejí. Princip je takový, že v okamžiku, kdy některý z nich přijme zprávu RA obsahující volbu *MAP* od jiného směrovače, zkopíruje celou tuto volbu do svojí zprávy *ohlášení směrovače* (zároveň však musí zvýšit hodnotu položky *Dist*) a tuto rozešle dále. V případě, kdy by i daný směrovač fungoval jako kotevní bod, zahrnul by do zprávy RA také volbu pro svoji adresu.

Mobilní uzel tedy může obdržet nabídku i od několika kotevních bodů současně a k výběru toho nejvhodnějšího pak využije právě položek *Priorita* (*Pref*) a *Vzdálenost* (*Dist*). MN si seřadí ohlášené *MAP* body sestupně podle vzdálenosti a následně vybere první z nich s nenulovou hodnotou priority a doby platnosti. Spojením prefixu (tj. počátečních 64 b) jím ohlašované globální adresy a svého identifikátoru rozhraní si určí regionální dočasnou adresu *RCoA* a tuto pak registruje u daného kotevního bodu *MAP*.

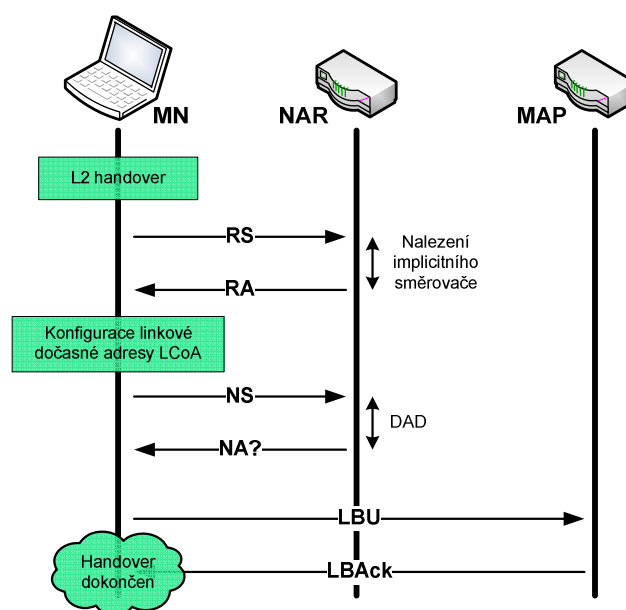
Pro účely této registrace byla v rámci *HMIPv6* zpráva *Aktualizace vazby* rozšířena o nový příznakový bit *M* (*MAP registration*), který MN nastaví právě tehdy, když provádí registraci u kotevního bodu. Aktualizaci vazby mobilní uzel bodu *MAP* zasílá ze svojí aktuální linkové adresy *LCoA*, kterou si stanoví standardním způsobem jako běžnou dočasnou adresu *CoA*, ve volbě *Domácí adresa* však již neuvede pevnou domácí adresu, nýbrž regionální adresu *RCoA* a tím tak kotevní bod informuje o obou svých adresách používaných ve venkovní síti. V okamžiku, kdy *MAP* tuto zprávu o aktualizaci mobilnímu uzlu potvrdí, vytvoří si s ním obousměrný tunel, kterým budou předávány pakety směřující na jeho regionální dočasnou adresu (tj. pakety odeslané mobilním uzlem) a také ty, které z ní přicházejí (příchozí data od CN). Poslední, co nyní zbývá, je, aby MN provedl registraci regionální adresy *RCoA* také u svého domácího agenta *HA* a případně i u korespondujících uzlů (při optimalizaci cest).

Když pak mobilní uzel provede přesun a změní svojí aktuální linkovou dočasnou adresu *LCoA*, přičemž však stále zůstane v působnosti stejného *MAP*, jediné, co bude třeba změnit, bude jeho registrace u kotevního bodu. Svůj případný přesun mimo oblast registrované *MAP* domény by MN poznal tak, že v přijatých zprávách *ohlášení směrovačů* by již nebyl jím používaný kotevní bod ohlašován. Až v tomto případě by pak MN musel přejít k jinému kotevnímu bodu a patřičným způsobem změnit i registraci u svého domácího agenta a vazby u všech korespondujících uzlů.

Jak uvádí [20], určitá nevýhoda při využití výše popsaného principu HMIPv6 může nastat ve chvíli, kdy by se jak mobilní uzel MN, tak i korespondující uzel CN, nacházeli ve stejné části sítě (přesněji v téže MAP doméně). V takovém případě by totiž docházelo k neoptimalizovanému způsobu směrování dat mezi oběma uzly, protože veškeré pakety by bylo nutné, namísto přímé komunikace mezi MN a CN, předávat prostřednictvím kotevního bodu MAP. To by samozřejmě mělo za následek jednak zbytečné zvýšení zpoždění při komunikaci a navíc i zatížení dané konkrétní části sítě – resp. MAP bodu. Řešením tohoto problému však může být použití tzv. místní optimalizace cesty, popsané právě ve [20]. Nakonec je vhodné zde také uvést, že RFC 4140 veškerou komunikaci mezi mobilním uzlem a kotevním bodem doporučuje autentizovat. Podobně jako mezi MN a domácím agentem HA je možné zde využít hlavičky ESP a nebo také AH (*Authentication Header*).

3.2.3 Schéma handoveru HMIPv6

Průběh handoveru u protokolu *Hierarchical Mobile IPv6* [1], [2], [9], který znázorňuje obrázek 3.5, poukazuje právě na největší výhodu plynoucí z využití hierarchické mobility. Uvedený scénář komunikace předpokládá, že MN již dokončil proces registrace svého kotevního bodu MAP a přechod, který nyní provádí, se odehrává pouze v rámci působnosti tohoto kotevního bodu – tj. uvnitř jeho MAP domény.



Obr. 3.5: HMIPv6 handover

Z obrázku je pak vidět, že probíhající signalizace (výměny zpráv) se v takovém případě vůbec neúčastní domácí agent HA, ani korespondující uzly CN, pro které zůstává tato událost skryta. Mobilní uzel totiž prostřednictvím zprávy *Ohlášení směrovače (Router Advertisement, RA)*, kterou obdržel od svého nového implicitního směrovače NAR, zjistil, že se stále ještě nachází pod správou svého kotevního bodu a není proto nutné, aby měnil svou regionální adresu RCoA. Jedinou operací, kterou tak MN musí v danou chvíli provést je, že si na základě prefixů ohlášených v RA určí novou dočasnou linkovou adresu LCoA, kterou potom opět podrobí běžnému testu detekce duplicitních adres DAD – zprávy NS (*Neighbor Solicitation*) a NA (*Neighbor Advertisement*), a následně zaregistruje pouze u kotevního bodu. K tomu se využije standardních zpráv *Aktualizace* a *Potvrzení vazby*, které jsou zde však příznačně označeny jako tzv. místní – *local (LBU a LBAck)*.

Teprve v okamžiku, kdy by došlo k situaci, že daný MAP bod by již nebyl v přijaté zprávě RA ohlašován – tj. mobilní uzel by provedl přesun mimo svoji registrovanou MAP doménu, bylo by třeba, aby si kromě konfigurace nové linkové adresy LCoA, stanovil i zcela novou regionální dočasnou adresu RCoA a tuto u příslušného kotevního bodu zaregistroval. Pak by již bylo nutné o této skutečnosti informovat také domácího agenta a korespondující uzly. Na uvedené schéma komunikace (viz obr. 3.5) by proto plynule navázal proces při klasickém handoveru HMIPv6, kdy MN registruje svoji dočasnou adresu u svého HA a přes mechanismus optimalizace cest také u všech korespondujících uzlů (viz obr. 3.2). Jediná výrazná odlišnost by spočívala v tom, že registrovanou adresou by nebyla běžná CoA, ale právě regionální dočasná adresa RCoA. Velikosti jednotlivých signalizačních zpráv při HMIPv6 handoveru potom uvádí tabulka 3.2 (viz níže) [10], [11], [12].

Tab. 3.2: Zprávy přenášené v průběhu HMIPv6 handoveru

Zprávy při handoveru HMIPv6			
ZPRÁVA	VÝZNAM	VELIKOST ZPRÁVY [Bajťů]	CELKOVÁ VELIKOST (včetně pevného záhlaví) [Bajťů]
RS	Výzva směrovači (<i>Router Solicitation</i>)	16 B	56 B
RA	Ohlášení směrovače (<i>Router Advertisement</i>)	$64 + 24n$ B ¹	$104 + 24n$ B ¹
NS	Výzva sousedovi (<i>Neighbor Solicitation</i>)	28 B	68 B
NA	Ohlášení souseda (<i>Neighbor Advertisement</i>)	32 B	72 B
LBU	Místní aktualizace vazby (<i>Local Binding Update</i>)	90 B ²	136 B ²
LBAck	Místní potvrzení vazby (<i>Local Binding Ack.</i>)	82 B ²	128 B ²

¹ n označuje počet kotevních bodů MAP, které jsou ve zprávě ohlašovány

² Předpokládá využití zabezpečení IPsec (hlavička ESP).

3.3 Mobile IPv6 Fast Handover (FMIPv6)

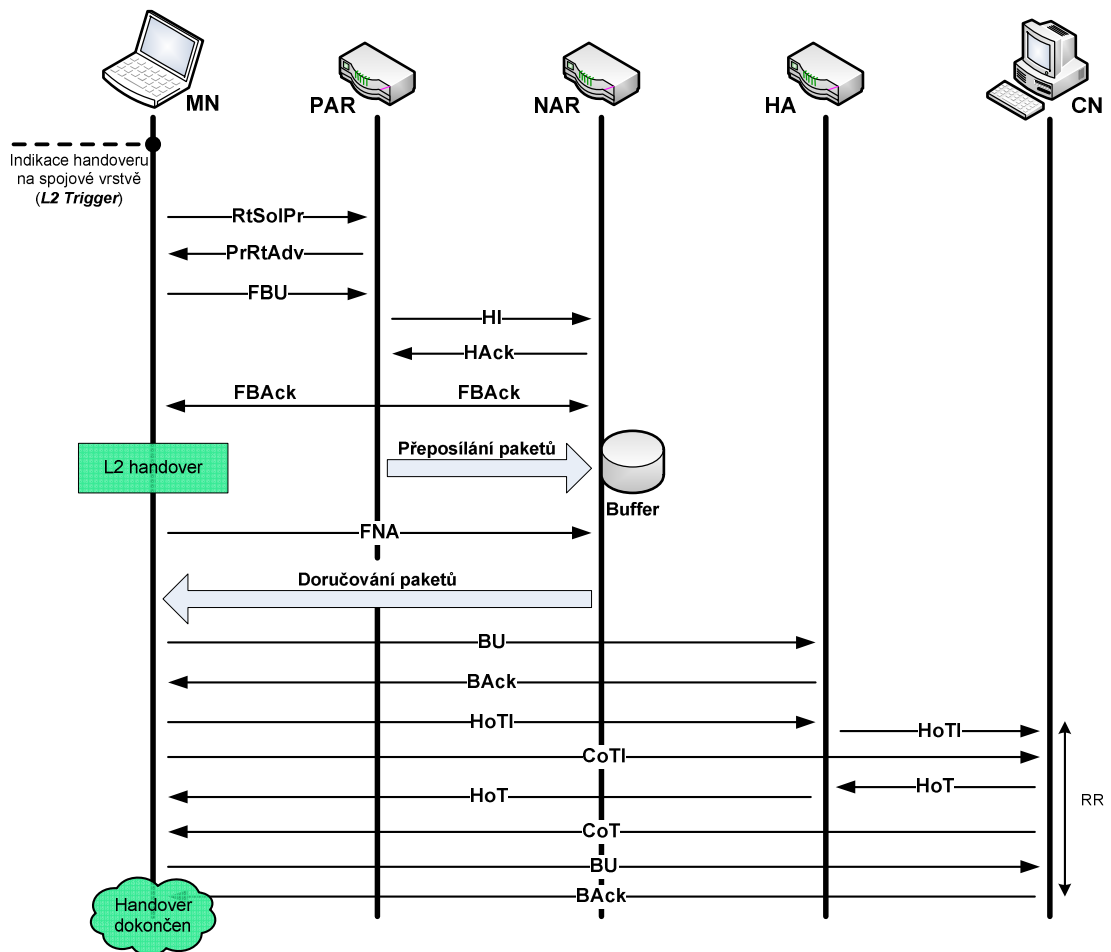
Pro podporu rychlého předávání byl pro MIPv6 specifikován jako doplněk protokol *Mobile IPv6 Fast Handover* (FMIPv6), viz RFC 5568, který snižuje zpoždění při procesu handoveru a navíc se snaží zamezit ztrátám paketů, ke kterým v jeho důsledku dochází. Tímto tak vyhovuje požadavkům aplikací probíhajících v reálném čase, jako je například VoIP [1], [2], [8], [15], [19]. Někdy bývá označován také jako protokol s nízkým zpožděním při konfiguraci adresy (*low latency address configuration protokol*), protože díky němu dochází ke konfiguraci nové CoA adresy mobilního uzlu ještě před tím, než MN vůbec svůj vlastní přesun zahájí. To je umožněno díky spolupráci ze strany spojové vrstvy – konkrétně jde o využití indikátorů handoveru (tzv. *L2 Trigger*), které z ní přicházejí. Může se jednat například o klesající úroveň a kvalitu současného přijímaného signálu od stávajícího AP, apod. Tyto informace pak pro protokol FMIPv6 představují pokyn k zahájení přípravy na předání mobilního uzlu.

3.3.1 Schéma handoveru FMIPv6

Rychlý handover podle *Mobile IPv6 Fast Handover* lze rozdělit do tří fází – iniciace, vytvoření tunelu a přeposílání paketů (viz obr. 3.6).

V první fázi mobilní uzel s využitím skenování detekuje svůj nový potenciální přístupový bod (resp. základnovou stanici) a proto zahájí také proces, při kterém se snaží získat informace nutné pro provedení možného L3 handoveru – tj. informace o souvisejícím novém přístupovém směrovači NAR (jeho IP adresu a prefixy pro danou síť). K tomu MN využije proxy zprávy *Výzva směrovači (Router Solicitation for Proxy Advertisement, RtSolPr)*, kterou zašle svému stávajícímu implicitnímu směrovači – na obrázku 3.6 označen již jako předchozí (*Previous Access Router, PAR*), a která obsahuje volbu s MAC adresou, resp. tedy s identifikátorem BSSID (*Basic Service Set Identifier*), právě tohoto nového přístupového bodu, k němuž MN předpokládá svůj přesun a po kterém proto tyto informace požaduje (volba *New Access Point Link-Layer Address*). BSSID mobilní uzel od příslušného AP získá z přijatého rámce *Beacon* během skenování. Zpráva RtSolPr může navíc obsahovat i několik adres (identifikátorů) těchto možných přístupových bodů současně (v závislosti na výsledcích procedury skenování) a MN pomocí ní zároveň také dává najevo svůj záměr provést handover. Jako reakci na tuto výzvu pak mobilní uzel prostřednictvím implicitního směrovače PAR, obdrží odpověď ve formě proxy zprávy *Ohlášení směrovače (Proxy Router*

Advertisement, PrRtAdv), díky níž získá o novém přístupovém směrovači všechny potřebné informace. MN má nyní možnost také ověřit, zda se specifikovaná cílová podsíť nenachází ve stejné síti jako jeho současná, protože při této situaci by mohl i po předání nadále používat svoji stávající IP adresu a funkcí protokolu FMIPv6 by nebylo vůbec potřeba.



Obr. 3.6: FMIPv6 handover

V opačném případě MN získané prefixy sítě použije ke konfiguraci nové dočasné adresy (*New Care-of Address, NCoA*), kterou následně ve zprávě *Rychlá aktualizace vazby (Fast Binding Update, FBU)* zašle svému stávajícímu implicitnímu směrovači. PAR si po jejím přijetí přidruží tuto novou adresu NCoA mobilního uzlu k jeho dosavadní dočasné adrese CoA a na základě takto utvořené vazby se následně pokusí mezi těmito adresami – resp. tedy mezi ním a novým přístupovým směrovačem NAR, k němuž tato adresa přísluší, sestavit obousměrný tunel. Ten by umožňoval pakety určené mobilnímu uzlu přeposílat na jeho novou adresu NCoA (tj. k NAR) a tím

tak zabránit jejich ztrátám v době, kdy MN provádí vlastní přesun k novému přístupovému bodu AP – resp. předání na vrstvě L2. Pro vytvoření tohoto tunelu (současně i pro ověření duplicity – DAD, dočasné adresy NCoA, kterou si mobilní uzel autokonfigurací stanovil) proto PAR s novým přístupovým směrovačem provede výměnu zpráv o zahájení handoveru (*Handover Initiate, HI*) a jeho potvrzení (*Handover Acknowledgement, HAck*), jejíž úspěšné dokončení následně mobilnímu uzlu oznámí zprávou *Rychlé potvrzení vazby (Fast Binding Acknowledgement, FBAck)*.

Od tohoto okamžiku na sebe také stávající implicitní směrovač stahuje veškerá příchozí data určená MN a ty následně tuneluje na jeho novou adresu NCoA, kde jsou zachycena přístupovým směrovačem NAR. Nový přístupový směrovač potom veškeré příchozí pakety, pro mobilní uzel, ukládá ve svojí vyrovnávací paměti (*buffer*) a to až do doby, dokud mu MN zprávou *Rychlé ohlášení souseda (Fast Neighbor Advertisement, FNA)* neoznámí svoji přítomnost v novém místě připojení – tj. na nové dočasné adrese NCoA. NAR pak přijetím této zprávy zjistí, že mobilní uzel již dokončil svůj přesun k novému přístupovému bodu a může mu proto odeslat všechna uložená data, která pro něj má do této doby k dispozici. Fáze přeposílání paketů – resp. i celý FMIPv6 handover, je tímto skončena a dále následuje již jen obvyklý proces registrace nové dočasné adresy NCoA u domácího agenta a korespondujících uzlů, jejímž provedením zároveň odpadá i potřeba, aby PAR nadále tuneloval příchozí pakety pro MN, protože ty jsou poté směrovány a doručovány už přímo jemu.

Význam a velikosti zpráv zasílaných při rychlém handoveru FMIPv6 opět shrnuje následující tabulka 3.3 [11], [12].

Tab. 3.3: Zprávy přenášené v průběhu FMIPv6 handoveru

Zprávy při handoveru FMIPv6			
ZPRÁVA	VÝZNAM	VELIKOST ZPRÁVY [Bajtů]	CELKOVÁ VELIKOST (včetně pevného záhlaví) [Bajtů]
RtSolPr	Proxy výzva směrovači (<i>Router Solicitation for Proxy Advertisement</i>)	24 + 16n B ¹	64 + 16n B ¹
PrRtAdv	Proxy ohlášení směrovače (<i>Proxy Router Advertisement</i>)	104 B	144 B
FBU	Rychlá aktualizace vazby (<i>Fast Binding Update</i>)	72 B	118 B
HI	Zahájení handoveru (<i>Handover Initiate</i>)	72 B	118 B
HAck	Potvrzení handoveru (<i>Handover Ack.</i>)	32 B	78 B
FBAck	Rychlé potvrzení vazby (<i>Fast Binding Ack.</i>)	32 B	78 B
FNA	Rychlé ohlášení souseda (<i>Fast Neighbor Advertisement</i>)	24 B	64 B

¹ n označuje počet přístupových bodů (AP), které MN během skenování našel (tj. zpráva obsahuje volby s adresami těchto AP).

Reaktivní mód FMIPv6 handoveru

Vedle výše uvedeného tzv. *prediktivního módu* FMIPv6 handoveru (*predictive mode*) existuje ještě jeho druhá varianta – tzv. *reaktivní mód* (*reactive mode*), který nastává v situaci, kdy MN od svého stávajícího implicitního směrovače PAR neobdrží zpět zprávu s potvrzením vazby jeho současné CoA a nové dočasné adresy NCoA – tj. zprávu FBACk. K tomu může dojít hned ze dvou důvodů – buď kvůli tomu, že mobilní uzel svému PAR vůbec neodeslal zprávu s rychlou aktualizací vazby FBU a nebo v situaci, kdy MN tuto zprávu sice odeslal, ale zahájil svůj přechod k novému AP ještě před tím, než vlastně mohl od směrovače PAR obdržet jeho odpověď. V tomto druhém případě mobilní uzel nemá jak ověřit, že stávající implicitní směrovač jeho žádost o aktualizaci skutečně přijal a schválil, musí proto tuto zprávu odeslat ještě jednou. Jakmile se tedy MN připojí k novému přístupovému směrovači NAR (resp. k danému AP), zašle tuto FBU znovu, tentokrát ji však zahrne jako součást zprávy *Rychlé ohlášení souseda* (*Fast Neighbor Advertisement*). Pokud NAR po přijetí této zprávy detekuje, že zdrojová adresa, ze které byla odeslána (tj. adresa NCoA mobilního uzlu), je již používána jinou stanicí v síti a dochází tím ke kolizi, NAR zahodí uvnitř obsaženou FBU a mobilnímu uzlu ve zprávě *Ohlášení směrovače* (*Router Advertisement*) nabídne k použití jinou alternativní dočasnou adresu. V opačném případě tuto FBU z těla zprávy *Rychlé ohlášení souseda* (FNA) vyjme a přepošle ji na adresu předchozího přístupového směrovače mobilního uzlu – tj. k PAR, který mu na její přijetí následně odpoví rychlým potvrzením vazby FBACk. Od tohoto okamžiku je pak vše v pořádku a příchozí data pro mobilní uzel již mohou být směrovačem PAR přeposílána na jeho novou dočasnou adresu NCoA, jak to definuje FMIPv6.

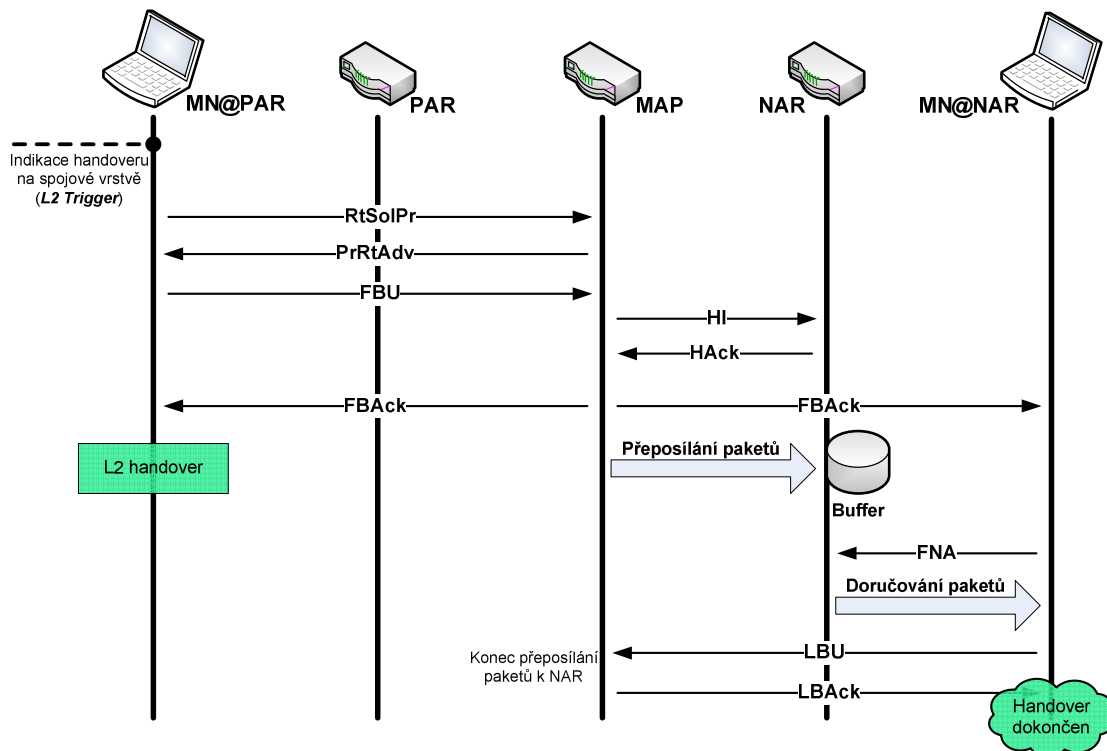
3.4 Fast Handover for HMIPv6 (F-HMIPv6)

Snaha zkombinovat v sobě výhody obou výše popsanych doplňků *Mobile IPv6* (MIPv6) – tj. hierarchického (HMIPv6) a rychlého (FMIPv6) handoveru, dala vzniknout dalšímu novému rozšiřujícímu protokolu, kterým se stal *Fast Handover for HMIPv6* [1], [13], [14], [17]. F-HMIPv6, stejně jako je tomu v případě *Hierarchical Mobile IPv6*, umožňuje omezit počet zasílaných signalizačních zpráv při přechodu mobilní stanice uvnitř jediné MAP domény, čímž snižuje množství režijního provozu zbytečně spotřebovávající dostupnou šířku pásma, ale navíc, po vzoru druhého z

protokolů – *Mobile IPv6 Fast Handover*, se snaží také o zmenšení celkového zpoždění a ztrátovosti paketů.

3.4.1 Schéma handoveru F-HMIPv6

Specifikací F-HMIPv6 je umožněno, aby se obousměrný tunel, kterým jsou pakety přenášeny v době, kdy MN realizuje přechod k novému AP, sestavil mezi kotevním bodem MAP a novým přístupovým směrovačem NAR mobilního uzlu, namísto mezi jeho stávajícím implicitním směrovačem PAR a NAR, jako je tomu při běžném handoveru FMIPv6. Z tohoto důvodu také MN neprovádí výměnu zpráv o předání se svým současným implicitním směrovačem, ale s kotevním bodem MAP, což dokládá následující obrázek 3.7.



Obr. 3.7: F-HMIPv6 handover

Schéma probíhající komunikace, uvedené výše (viz obr. 3.7), předpokládá situaci, při níž mobilní uzel přechází k novému přístupovému směrovači, který se, stejně jako jeho stávající implicitní směrovač, nachází v oblasti spravované totožným kotevním bodem a daný MAP proto má k dispozici patřičné informace o obou těchto přístupových směrovačích. V souvislosti s tím je také uvažováno, že MN již dříve, při

vstupu do této MAP domény, dokončil svůj proces registrace u příslušného kotevního bodu.

V okamžiku, kdy pak mobilní uzel na spojové vrstvě zjišťuje blížící se přechod k novému přístupovému bodu, opět si prostřednictvím zpráv *Proxy výzva směrovači* (*Router Solicitation for Proxy Advertisement, RtSolPr*) a *Proxy ohlášení směrovače* (*Proxy Router Advertisement, PrRtAdv*) vyžádá o souvisejícím novém přístupovém směrovači potřebné informace. Svoji výzvu však tentokrát neadresuje stávajícímu implicitnímu směrovači, ale svému MAP, jehož prostřednictvím se mu také dostane odpovědi. Ze získaných prefixů si MN nyní určí pouze novou linkovou dočasnou adresu LCoA – jeho regionální adresa RCoA se totiž nemění, a tu ve zprávě *Rychlá aktualizace vazby* (*Fast Binding Update, FBU*) zašle zpět kotevnímu bodu. MAP po přijetí FBU zahájí proces definovaný právě v rámci F-HMIPv6 – tj. že s pomocí zpráv o zahájení (*Handover Initiate, HI*) a potvrzení handoveru (*Handover Acknowledgement, HAck*) sestaví tunel mezi ním a novým přístupovým směrovačem mobilního uzlu. O jeho dokončení potom MAP mobilní uzel znovu informuje rychlým potvrzením vazby (*Fast Binding Acknowledgement, FBACk*), které zasílá jak na jeho stávající CoA, tak i na novou dočasnou adresu NCoA, pro případ, že by MN mezitím již zahájil svůj přechod k NAR. Když pak mobilní uzel, po provedení předání k novému AP, získá zpět své připojení, informuje o tom svůj nový implicitní přístupový směrovač zprávou *Rychlé ohlášení souseda* (*Fast Neighbor Advertisement, FNA*), na kterou daný NAR reaguje doručením všech paketů, které mu MAP pro mobilní uzel dosud přeposlal.

Nyní již následují obvyklé operace spojené se zajištěním hierarchické mobility podle HMIPv6 – tj. mobilní uzel zašle svému kotevnímu bodu místní aktualizaci vazby (*Local Binding Update, LBU*) s žádostí o registraci své nové dočasné linkové adresy LCoA, kterou mu MAP následně potvrdí ve zprávě *Místní potvrzení vazby* (*Local Binding Acknowledgement, LBACk*). Tato výměna zpráv pak pro kotevní bod zároveň představuje signál k tomu, aby zastavil další přeposílání paketů ke směrovači NAR a zrušil s ním sestavený tunel, kterého není dále potřeba, protože veškerý datový provoz od této chvíle probíhá již přímo mezi mobilním uzlem a MAP.

Je tedy zřejmé, že celkový průběh F-HMIPv6 handoveru se, ve své podstatě, nijak výrazněji neliší od klasického předání v rámci FMIPv6, viz část 3.3 (s výše uvedeným rozdílem při sestavování tunelu). Zachován zůstává také význam a účel všech jednotlivých zasílaných signalizačních zpráv, které vycházejí ze specifikací obou zahrnutých protokolů – *Mobile IPv6 Fast Handover* (viz tab. 3.3) a *Hierarchical Mobile*

IPv6 (viz tab. 3.2). F-HMIPv6 z tohoto důvodu také nedefinuje ani žádné nové typy zpráv, nicméně pro zde používané zprávy protokolu HMIPv6 – tj. pro místní aktualizaci (*Local Binding Update, LBU*) a potvrzení vazby (*Local Binding Acknowledgement, LBAck*), specifikuje nový příznakový bit *P* (*Pause*), který souvisí s požadavky mobilního uzlu na kotevní bod o přeposílání jemu určených paketů – celková velikost těchto zpráv se tím však nijak nemění a zůstávají zachovány jejich původní hodnoty uváděné v tabulce 3.2.

4. ANALYTICKÁ METODA PRO OHODNOCENÍ VÝKONNOSTI PROTOKOLŮ MOBILE IPv6

Kvalita služeb (QoS) v bezdrátových sítích založených na IPv6 (tj. zahrnujících i podporu mobility uživatelů) se přímo odvíjí mimo jiné od hodnot ztrátovosti paketů, zpoždění vznikajícího při handoveru a množství režijního provozu (režie) [1]. Analýza těchto parametrů je proto velmi důležitá z pohledu stanovení výkonnosti jednotlivých protokolů (resp. schémat handoverů) a může být užitečná i při konečném rozhodování o jejich možném nasazení při konkrétních realizacích – tedy na základě kladených požadavků na parametry komunikace a v neposlední řadě také na samotných vlastnostech komunikačních sítí, v nichž se jejich využití předpokládá. Tato kapitola se proto zabývá právě návrhem analytické metody, která by takovéto ohodnocení výkonnosti u protokolů *Mobile IPv6* umožňovala.

4.1 Celková režie

Jak se uvádí v [1] a [16], podobně, jako je tomu u celulárních (buňkových) mobilních sítí, také analýza výkonnosti v případě bezdrátových IP sítí by se měla zabírat množstvím režie nezbytně nutné pro správu a řízení mobility. Za dva hlavní faktory vzniku nadbytečné režijní zátěže při vykonávání handoveru je možné zde označit jednak signalizaci při změně místa připojení MN – tj. při aktualizaci vazby, a dále také režii spojenou s doručováním dat (datových paketů) mobilnímu uzlu v průběhu provádění procedury handoveru, protože také tento proces využívá dostupných síťových prostředků a představuje tak další dodatečné režijní náklady, které je vhodné při analýze zohlednit [1], [15], [16], [17].

Celkové množství režie při handoveru (C_{TOTAL}) tak lze vyjádřit jako součet těchto dvou dílčích složek – signalizační režie při aktualizaci vazby (C_{SIGNAL}) a režie při doručování paketů MN (C_{PACKET}), následovně:

$$C_{TOTAL} = C_{SIGNAL} + C_{PACKET}. \quad (4.1)$$

4.1.1 Signalizační režie při aktualizaci vazby

Obecně, v závislosti na druhu prováděného přesunu a také na vlastním typu použitého protokolu, může mobilní uzel při svém pohybu v Internetu vykonávat dvě rozdílné procedury aktualizace vazby – místní aktualizaci (*local*) pouze u kotevního bodu MAP (blíže popsanou v části 3.2) a standardní (někdy označovanou jako globální – *global*), v rámci níž je jeho nová dočasná adresa NCoA běžným způsobem registrována u HA i korespondujících uzlů [1], [14], [16]. První varianta nastává pouze v případě protokolů implementujících principy hierarchické mobility (HMIPv6 a F-HMIPv6) a to konkrétně v situacích, kdy mobilní uzel přechází mezi dvěma podsítěmi, jež jsou pod správou jediného bodu MAP (*intra-domain handover*). V kterémkoliv jiném případě – tj. u protokolů MIPv6 a FMIPv6 (nerozlišujících mezi oběma druhy přesunu MN) vždy, u hierarchických HMIPv6 a F-HMIPv6 jen pokud dojde k předání MN do sítě, která již není součástí stejné MAP domény (tzv. *inter-domain handover*), je pak prováděna druhá varianta – tedy standardní procedura aktualizace vazby.

Na základě výše uvedeného je při analýze signalizační režie jednotlivých protokolů *Mobile IPv6* potřeba uvážit obě tyto možnosti a na rozdíl od prací zabírajících se buď výhradně protokoly hierarchické mobility, jako např. [17], nebo naopak pouze těmi, které její podporu nezahrnují (tj. MIPv6 a FMIPv6), viz [15], je žádoucí, aby zde navrhovaná metoda obsáhla obě možné alternativy. Průměrné množství režie při aktualizaci vazby tak, podle [1], lze stanovit jako:

$$C_{\text{SIGNAL}} = E(N_{\text{INTRA}})C_{\text{INTRA}} + E(N_{\text{INTER}})C_{\text{INTER}}, \quad (4.2)$$

kde $E(N_{\text{INTRA}})$ představuje průměrný počet podsítí, mezi kterými mobilní uzel, během své probíhající datové (komunikační) relace s uzly CN, přechází, přičemž však stále zůstává uvnitř stejné MAP domény; $E(N_{\text{INTER}})$ je ve významu totožný, avšak s tím rozdílem, že se již vztahuje na přesuny MN mezi různými přístupovými sítěmi (AN) v rozdílných MAP doménách. Je také zřejmé, že prvky C_{INTRA} a C_{INTER} symbolizují vlastní režijní náklady při aktualizaci vazby pro daný typ handoveru (resp. přesunu MN).

Obecně je počet jednotlivých podsítí, mezi kterými mobilní uzel přechází, definován jako $E(N) = \frac{\mu}{\lambda_S}$, vyjadřující vzájemný poměr mezi mobilitou MN (μ) – tj. mírou s jakou, resp. jak často, mobilní uzel provádí přesun mezi jednotlivými podsítěmi

a množstvím příchozích datových (komunikačních) relací pro mobilní uzel neboli počtem příchozích žádostí o zahájení spojení od uzlů CN za 1 sekundu (tzv. *session arrival rate*, λ_S). Označíme-li nyní mobilitu s jakou se MN přesunuje mezi jednotlivými podsítěmi, ale nepřekročí přitom oblast stávající MAP domény jako μ_{INTRA} , resp. mobilitu, při níž již současně se samotným handoverem do jiné IP sítě provádí také přechod mezi MAP doménami jako μ_{INTER} , pak následným dosazením do rovnice (4.2) se její původní tvar mění na:

$$C_{\text{SIGNAL}} = \frac{1}{\lambda_S} (\mu_{\text{INTRA}} C_{\text{INTRA}} + \mu_{\text{INTER}} C_{\text{INTER}}). \quad (4.3)$$

Nyní, podobně jako je tomu v [1], [14] a [16], je pro provedení analýzy signalizační režie vhodné zavést výkonnostní činitel označovaný jako tzv. SMR (*Session to Mobility Ratio*), který je obdobou podobného prvku CMR (*Call to Mobility Ratio*) používaného při analýze výkonnosti u buňkových mobilních sítí. SMR je, jak popisuje [18], možné definovat jako poměr příchozích datových (komunikačních) relací (λ_S) ku mobilitě uzlu MN, která je zde formulována jako $\mu = \frac{1}{T_{\text{SUB}}}$, kde T_{SUB} představuje dobu, po kterou mobilní uzel setrvává v dané podsíti před tím, než vykoná svůj další přesun (handover). Potom tedy: $SMR = \frac{\lambda_S}{\mu} = \lambda_S \cdot T_{\text{SUB}}$, z čehož je poměrně snadno vyvoditelný vzájemný vztah mezi oběma definovanými prvky SMR a $E(N)$ – tj. že $E(N) = \frac{1}{SMR}$.

Aplikací těchto předpokladů na rovnici (4.3), při současném uvažování daných poměrů pro mobilitu uzlu MN uvnitř a mezi MAP doménami jako $\mu_{\text{INTRA}} = \mu \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}}$, resp. $\mu_{\text{INTER}} = \frac{\mu}{\sqrt{M}}$ (jejich odvození viz literatura [1] – podrobněji popisující celou problematiku okolo modelování mobility; dále také [11], [14], [16]), dostáváme konečný tvar rovnice, který je možné považovat za výchozí pro analýzu signalizační režie:

$$C_{\text{SIGNAL}} = \frac{1}{SMR\sqrt{M}} [(\sqrt{M}-1)C_{\text{INTRA}} + C_{\text{INTER}}], \quad (4.4)$$

kde M udává počet podsítí, které jsou součástí jediné MAP domény.

Podle [1], [14], [15] a [16], se signalizační režie v sítích založených na protokolu IP přímo odvíjí od režie související s vlastním přenosem jednotlivých řídicích paketů (resp. signalizačních zpráv) danou sítí (tzv. *packet transmission cost*). Tato režie přenosu je, dle výše uvedených zdrojů, úměrná vzdálenosti, definované počtem hopů (tj. mezilehlých směrovačů v síti), mezi zdrojovým a cílovým uzlem, z čehož lze také usuzovat, že výsledná signalizační režie nutná pro místní aktualizaci vazby tak bude v zásadě nižší než při běžné (standardní) proceduře registrace nové adresy CoA [16]. Mimoto se má všeobecně za to, že režijní náklady potřebné pro přenos po bezdrátovém spoji (rozhraní) jsou obecně vyšší než režie při přenosu po drátovém (kabelovém) spoji, s čímž také korespondují jejich následující definice – v případě, datové komunikace po bezdrátovém spoji (tj. mezi MN a příslušným přístupovým bodem AP – pokud ten zároveň plní i funkci bezdrátového směrovače, jedná se pak přímo o přístupový směrovač AR pro daný mobilní uzel) je tato režie přenosu (řídicích) paketů popsána jako: $C_{MN,AR} = \kappa$, zatímco při zasílání paketů mezi dvojicí koncových uzlů X a Y prostřednictvím pevného drátového spoje uvedenou režii vyjadřuje vztah $C_{X,Y} = \tau \cdot d_{X,Y}$, kde κ , τ představují režijní náklady pro přenos jedné jednotky (tj. signalizační zprávy/paketu) po bezdrátovém, resp. drátovém spoji; $d_{X,Y}$ potom definuje vzdálenost (počet hopů) mezi touto dvojicí konkrétních síťových uzlů X a Y .

Konečné určení hodnot signalizační režie při aktualizaci vazby (C_{SIGNAL}) bude tedy vycházet především ze schémat popisujících průběh komunikace (výměny zpráv) během provádění handoveru u jednotlivých typů protokolů (viz obr. 3.2, 3.5, 3.6, 3.7 v předchozí kapitole práce) a z vlastních velikostí samotných signalizačních zpráv, které jsou uvedeny v tabulkách 3.1, 3.2 a 3.3, přičemž budou uvažovány celkové velikosti těchto řídicích paketů – tj. včetně pevného IPv6 záhlaví. Kromě výše uvedené režie při jejich přenosu se do tohoto stanovení však navíc promítne ještě tzv. *processing cost* (PC_X) neboli režie zpracování při jejich přijetí na daném uzlu X , jemuž jsou tyto zprávy adresovány.

Signalizační režie u MIPv6

Na základě teoretických informací, které byly v práci uvedeny, je zřejmé, že protokol *Mobile IPv6* (MIPv6) v sobě nezahrnuje žádné mechanismy hierarchické mobility a tudíž tak nijak nerozlišuje mezi přesuny mobilního uzlu MN mezi podsítěmi uvnitř a vně MAP domény (tj. intra a inter handovery). Výkonnost MIPv6 – přesněji

hodnoty jeho signalizační režie při aktualizaci vazby, jsou tedy totožné pro oba výše uvedené případy přechodů MN a dány následujícím vztahem (viz schéma MIPv6 handoveru obr. 3.2 a tabulka přenášených zpráv 3.1):

$$C_{\text{INTRA}}^{\text{MIPv6}} = C_{\text{INTER}}^{\text{MIPv6}} = (\text{RS} + \text{RA} + \text{NS} + \text{NA})C_{\text{MN,AR}} + 2PC_{\text{AR}} + C_{\text{BU}}, \quad (4.5)$$

kde C_{BU} představuje režijní náklady spojené se samotnou registrací nové dočasné adresy NCoA mobilního uzlu u svého domácího agenta HA a korespondujících uzlů CN – včetně testu zpětné směrovatelnosti (RR), (viz dále).

Celá rovnice (4.5) pak vystihuje probíhající signalizaci při MIPv6 handoveru podle obr. 3.2, kdy je nejprve mezi mobilním uzlem a jeho přístupovým směrovačem provedena výměna dané čtveřice zpráv (s režii jejich přenosu $C_{\text{MN,AR}}$) – tj. konkrétně AR od MN postupně přijme zprávy *Výzva směrovači* (RS) a *Výzva sousedovi* (NS), které je obě nucen zpracovat s režii $2PC_{\text{AR}}$ a následně na ně mobilnímu uzlu také odpovědět zprávou *Ohlášení směrovače* (RA), resp. i *Ohlášení souseda* (NA). Tímto tak MN získá svoji novou adresu CoA, kterou nyní ještě musí u HA a uzlů CN zaregistrovat, což v rovnici vystihuje prvek C_{BU} . Za předpokladu, že je potom celý proces *optimalizace cesty*, tak jak jej uvádí část 2.4, mezi MN a všemi jeho korespondujícími uzly vykonán vždy – což je v souladu se základními principy řešení mobility u všech protokolů *Mobile IPv6*, může být C_{BU} definován následovně:

$$C_{\text{BU}} = (\text{BU}_{\text{MN} \rightarrow \text{HA}} + \text{BAck}_{\text{HA} \rightarrow \text{MN}}) \underbrace{(C_{\text{MN,AR}} + C_{\text{AR,HA}})}_{\text{MN} \leftrightarrow \text{HA}} + PC_{\text{HA}} + N_{\text{CN}} \left[(\text{BU}_{\text{MN} \leftrightarrow \text{CN}} + \text{BAck}_{\text{CN} \rightarrow \text{MN}}) \underbrace{(C_{\text{MN,AR}} + C_{\text{AR,CN}})}_{\text{MN} \leftrightarrow \text{CN}} + PC_{\text{CN}} + C_{\text{RR}} \right], \quad (4.6)$$

přičemž takto specifikovaná režie při registraci dočasné adresy CoA (C_{BU}) je, kromě zde analyzovaného předání u MIPv6, společná také dalším protokolům jako např. FMIPv6, nebo také HMIPv6 a F-HMIPv6 pro případy inter handoverů mezi MAP doménami (viz dále).

První část rovnice (4.6) představuje proces registrace adresy CoA u domácího agenta HA mobilního uzlu, v rámci něhož mezi nimi dojde k zaslání dvou zpráv – *Aktualizace vazby* (BU) a *Potvrzení vazby* (BAck); druhá polovina rovnice pak odpovídá podobnému průběhu její registrace, ale tentokrát u jednotlivých

korespondujících uzlů CN, jejichž celkový počet je dán N_{CN} a kde C_{RR} symbolizuje signalizační režii v důsledku provádění testu zpětné směrovatelnosti danou jako:

$$\begin{aligned}
 C_{RR} = & (\text{HoTI}_{MN \rightarrow HA} + \text{HoT}_{HA \rightarrow MN}) \underbrace{(C_{MN,AR} + C_{AR,HA})}_{MN \leftrightarrow HA} \\
 & + (\text{HoTI}_{HA \rightarrow CN} + \text{HoT}_{CN \rightarrow HA}) C_{HA,CN} + (\text{CoTI} + \text{CoT}) \underbrace{(C_{MN,AR} + C_{AR,CN})}_{MN \leftrightarrow CN} \\
 & + 2(PC_{HA} + PC_{CN}).
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Uvedená rovnice (4.7) koresponduje s průběhem výměny signalizačních zpráv při metodě zpětné směrovatelnosti (RR) – tj. při ověřování přítomnosti MN na obou svých adresách (jak na domácí, tak i dočasné adrese CoA), viz podkapitola 2.4.2. Význam jednotlivých částí rovnice je možné odvodit na základě již zmiňovaného obrázku 3.2, který danou komunikaci popisuje – mobilní uzel během ní korespondujícímu uzlu zašle dvě zprávy o zahájení testu domácí, resp. dočasné adresy (zprávy HoTI a CoTI), na které CN reaguje odesláním vlastních testovacích zpráv HoT a CoT. V rovnici (4.7) je také zohledněn fakt, že zatímco výměnu zpráv CoTI a CoT je možné provést přímo mezi mobilním a korespondujícím uzlem, tak zprávy o zahájení a testu domácí adresy (HoTI a HoT) je nutné předat prostřednictvím domácího agenta HA. Režii při zpracování jednotlivých zpráv nakonec vyjadřuje poslední část rovnice, kdy domácí agent nejprve přijímá od MN zprávu *Zahájení testu domácí adresy*, kterou přeposílá uzlu CN, a následně opačným směrem na ni MN předává odpověď v podobě zprávy *Test domácí adresy* – tj. $2PC_{HA}$; korespondující uzel naproti tomu přijímá a zpracovává obě zprávy o zahájení testu příslušné adresy – tj. HoTI a CoTI, a proto tedy $2PC_{CN}$.

Signalizační režie u HMIPv6

Stejným způsobem, jakým probíhala analýza a stanovení signalizační režie při aktualizaci vazby u *Mobile IPv6* (MIPv6), lze nyní postupovat také v případě zbylých protokolů – zde konkrétně *Hierarchical Mobile IPv6*. Pro určení množství signalizace se však tentokrát zcela příznacně využije schéma průběhu handoveru HMIPv6 podle obrázku 3.5 společně s tabulkou velikostí signalizačních zpráv 3.2. Další rozdílností je fakt, že, vzhledem ke způsobu řešení mobility u protokolu HMIPv6, je třeba u něj již rozlišovat mezi oběma druhy předání MN uvnitř a mezi MAP doménami

a odpovídající režijní náklady pro tyto jednotlivé typy intra a inter handoveru proto lze definovat následovně:

$$C_{\text{INTRA}}^{\text{HMIPv6}} = (\text{RS} + \text{RA} + \text{NS} + \text{NA})C_{\text{MN,AR}} + (\text{LBU} + \text{LBAck}) \underbrace{(C_{\text{MN,AR}} + C_{\text{AR,MAP}})}_{\text{MN} \leftrightarrow \text{MAP}} + 2PC_{\text{AR}} + PC_{\text{MAP}}, \quad (4.8)$$

$$C_{\text{INTER}}^{\text{HMIPv6}} = C_{\text{INTRA}}^{\text{HMIPv6}} + C_{\text{BU}}. \quad (4.9)$$

První z obou rovnic – (4.8), označuje signalizační režii v důsledku přechodu MN mezi dvěma podsítěmi jediné MAP domény, kdy dochází pouze k registraci jeho nové linkové dočasné adresy LCoA u příslušného kotevního bodu MAP (viz obr. 3.5). Při druhém možném typu handoveru (tj. mezi MAP doménami) se, kromě LCoA, již mění také regionální dočasná adresa RCoA mobilního uzlu a ten je proto tentokrát nucen o změně adresy informovat už i domácího agenta a korespondující uzly – tj., jak je uvedeno v části 3.2.3, na průběh komunikace při intra handoveru MN naváže proces standardní registrace dočasné adresy (v tomto případě RCoA) u HA a uzlů CN, čemuž odpovídá prvek C_{BU} v rovnici (4.9).

Signalizační režie u FMIPv6

Rychlý handover podle protokolu *Mobile IPv6 Fast Handover*, viz část práce 3.3, je z větší části založen zejména na predikci (předvídání) možného brzkého přesunu mobilního uzlu mimo svoji stávající síť za účelem případné rychlé reakce na tyto nastalé události handoveru a to při využití všech dostupných informací přicházejících od spojové vrstvy – *L2 Trigger*.

Podle zdrojů [1] a [15] se potom konečné množství signalizační režie u protokolu FMIPv6 odvíjí od pravděpodobnosti, s jakou jsou tato blížící se provedení vlastního handoveru správně predikována. V reálu totiž může nastat hned několik situací, kdy, i přes indikaci nadcházejícího handoveru z vrstvy L2, ke skutečnému předání na síťové vrstvě (L3) vůbec nedojde – typicky nachází-li se mobilní uzel například v oblasti na hranici pokrytí signálem od několika přístupových bodů rozdílných podsítí, kdy je již také na spojové vrstvě detekována snižující se úroveň a kvalita stávajícího signálu od AP k němuž je MN právě přidružen – to vede k zahájení operací (výměně signalizačních zpráv) dle FMIPv6 pro přípravu samotného L3 handoveru, avšak mobilní uzel už ve svém dalším pohybu, který by znamenal až jeho

předání do jiné sítě, dále nepokračuje. V takovém případě je pak veškerá tato dříve provedená signalizace FMIPv6 zcela zbytečná a informace, které byly těmito zprávami získány a přeneseny, zůstávají nevyužity. Bude-li proto, podobně jako v [1] a [15], předpokládáno, že k vykonání handoveru na vrstvě L3 (bez jakýchkoliv výjimek) dojde vždy, pokud již mobilní uzel přijme od svého přístupového směrovače (PAR) zprávu *Rychlé potvrzení vazby* (FBAck), pak mohou být tímto způsobem jako neužitečné označeny konkrétně zprávy: RtSolPr, PrRtAdv, FBU, HI a HAck – viz obr. 3.6.

Na rozdíl od HMIPv6, se u protokolu FMIPv6 důsledky mobility MN nevztahují pouze na rámec dané přístupové sítě (AN), nýbrž mají globální dopad na všechny zúčastněné komunikující uzly (tj. HA i CN). Pro *Mobile IPv6 Fast Handover* tak platí tentýž předpoklad jako například pro MIPv6 a tedy, že hodnoty jeho signalizační režie jsou, bez ohledu na způsob, jakým se mobilní uzel mezi podsítěmi právě přesunuje – uvnitř nebo vně MAP domény, vždy totožné ($C_{\text{INTRA}} = C_{\text{INTER}}$). Na základě výše uvedeného a při uvažování pouze (častějšího) případu – tj. *prediktivního módu* FMIPv6 handoveru, potom je tato signalizační režie při aktualizaci vazby u protokolu FMIPv6 dána vztahem:

$$C_{\text{INTRA}}^{\text{FMIPv6}} = C_{\text{INTER}}^{\text{FMIPv6}} = P_s H_s^{\text{FMIPv6}} + (1 - P_s) H_f^{\text{FMIPv6}} + C_{\text{BU}}, \quad (4.10)$$

kde P_s udává pravděpodobnost správné predikce uskutečnění L3 handoveru; H_s^{FMIPv6} a H_f^{FMIPv6} představují režijní náklady v důsledku provádění operací rychlého handoveru dle FMIPv6 (tj. při stanovení nové CoA adresy mobilního uzlu, případně i vytvoření tunelu pro budoucí přeposílání paketů) v situacích, kdy skutečně dojde (s – *success*), resp. naopak nedojde (f – *fail*) k vykonání předání MN na vrstvě L3 (viz dále). C_{BU} , symbolizující režii při registraci dočasné adresy u HA a korespondujících uzlů, je stejné jako v předešlých případech a bylo odvozeno už dříve v rovnici (4.6).

Samotné vyjádření popsaných prvků H_s^{FMIPv6} a H_f^{FMIPv6} , s odkazem na schéma komunikace na obrázku 3.6, tabulku zpráv 3.3 a výše uvedené informace, je následující:

$$\begin{aligned} H_s^{\text{FMIPv6}} = & (\text{RtSolPr} + \text{PrRtAdv} + \text{FBU} + \text{FBAck})C_{\text{MN,PAR}} \\ & + (\text{HI} + \text{HAck} + \text{FBAck})C_{\text{PAR,NAR}} + \text{FNA} \cdot C_{\text{MN,NAR}} + 5PC_{\text{AR}}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} H_f^{\text{FMIPv6}} = & (\text{RtSolPr} + \text{PrRtAdv} + \text{FBU})C_{\text{MN,PAR}} + (\text{HI} + \text{HAck})C_{\text{PAR,NAR}} \\ & + 3PC_{\text{AR}}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Rovnice (4.11) tedy odpovídá celému průběhu FMIPv6 komunikace až po fázi, kdy jsou mobilnímu uzlu doručovány datové pakety přeposlané jeho předchozím implicitním přístupovým směrovačem (PAR) – tj. po odeslání zprávy *Rychlé ohlášení souseda* (FNA). Naproti tomu rce (4.12) vystihuje režii při přenosu zmíněných tzv. „nevyužitých“ signalizačních zpráv, pokud k uskutečnění L3 handoveru nakonec nedojde.

Signalizační režie u F-HMIPv6

Na základě velmi podobné úvahy, která je prakticky totožná jako v předchozí části při odvozování signalizační režie u FMIPv6, je umožněno tyto režijní náklady určit také pro protokol *Fast Handover for HMIPv6*, jenž je založen na stejných principech. Kromě toho však v sobě F-HMIPv6 ještě navíc zahrnuje také prvky podpory hierarchické mobility, díky čemuž se bude jeho výsledná analýza, v porovnání s předchozí pro FMIPv6, přeci jen mírně lišit. Hlavní rozdíl bude spočívat už v tom, že v případě F-HMIPv6 je třeba od sebe znovu odlišit situace, kdy MN provádí intra handover pouze mezi podsítěmi uvnitř MAP domény, nebo, kdy se již jedná o přesun až za hranice jeho stávající oblasti MAP (tj. inter handover). Definice signalizační režie při aktualizaci vazby u F-HMIPv6 pro obě jednotlivé možnosti jsou tedy následující:

$$C_{\text{INTRA}}^{\text{F-HMIPv6}} = P_s H_s^{\text{F-HMIPv6}} + (1 - P_s) H_f^{\text{F-HMIPv6}}, \quad (4.13)$$

$$C_{\text{INTER}}^{\text{F-HMIPv6}} = C_{\text{INTRA}}^{\text{F-HMIPv6}} + C_{\text{BU}}. \quad (4.14)$$

Použití druhé rovnice – (4.14), tak jak ji uvádí např. literatura [14], je umožněno za předpokladu, že je podporováno vzájemné přeposílání paketů mezi kotevním bodem MAP a novým přístupovým směrovačem NAR mobilního uzlu, který se však už nenalézá ve stejné části sítě (tj. v rámci příslušné MAP domény) jako uvedený kotevní bod a není proto ani pod jeho správou – daný bod MAP ale přesto má k dispozici potřebné informace pro to, aby s tímto směrovačem NAR mohl tunel pro přenos datových paketů určených MN sestavit – detailněji se těmito okolnostmi zabývá [17]. $H_s^{\text{F-HMIPv6}}$ a $H_f^{\text{F-HMIPv6}}$ jsou ve významu naprosto stejné s obdobnými prvky při analýze režie u protokolu FMIPv6 (viz výše), avšak vzhledem k tomu, že se zde vztahují na operace prováděné dle F-HMIPv6 (průběh signalizace viz obr. 3.7), bude jejich vlastní vyjádření poněkud jiné:

$$\begin{aligned}
H_s^{F-HMIPv6} = & (RtSolPr + PrRtAdv + FBU + FBAck) \underbrace{(C_{MN,PAR} + C_{PAR,MAP})}_{MN@PAR \leftrightarrow MAP} \\
& + (HI + HAck + FBAck)C_{MAP,NAR} + FNA \cdot C_{MN,NAR} \\
& + (LBU + LBAck) \underbrace{(C_{MN,NAR} + C_{NAR,MAP})}_{MN@NAR \leftrightarrow MAP} + 2PC_{AR} + 3PC_{MAP}, \quad (4.15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_f^{F-HMIPv6} = & (RtSolPr + PrRtAdv + FBU) \underbrace{(C_{MN,PAR} + C_{PAR,MAP})}_{MN@PAR \leftrightarrow MAP} \\
& + (HI + HAck)C_{MAP,NAR} + PC_{AR} + 2PC_{MAP}. \quad (4.16)
\end{aligned}$$

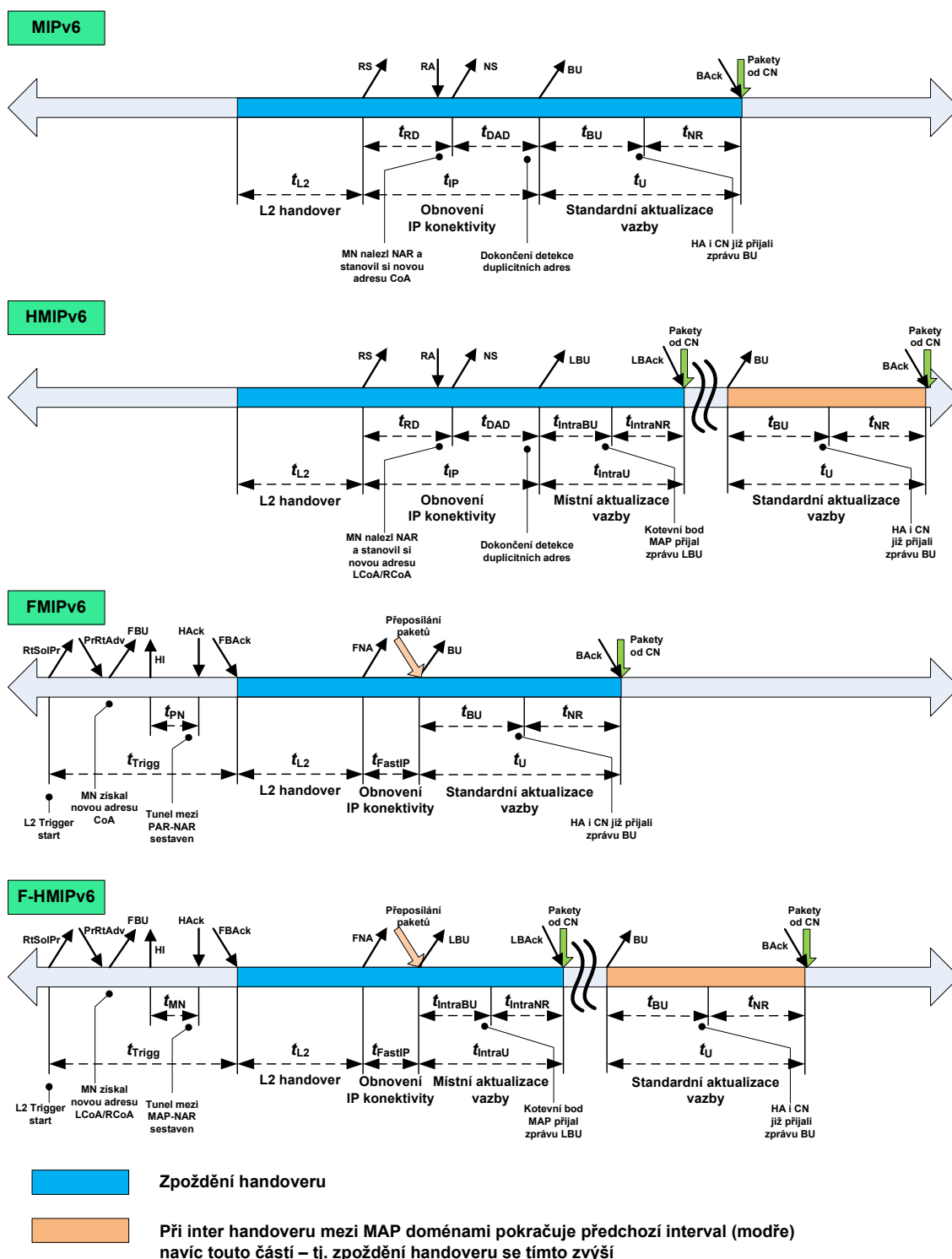
4.1.2 Režie při doručování paketů

Pod pojmem režie při doručování paketů (C_{PACKET}) si lze konkrétně představit náklady spojené s přenosem dat (datových paketů) mobilnímu uzlu během probíhající komunikační relace mezi ním a korespondujícími uzly CN, které vznikají v době provádění vlastního předání MN – tyto intervaly zpoždění při handoveru u jednotlivých typů protokolů znázorňuje obrázek 4.1 a budou podrobněji rozebrány později.

Od okamžiku, kdy totiž MN zahájí svůj přechod do jiné sítě, již není schopen dále přijímat žádná data na své stávající a do té doby platné dočasné adrese CoA, o čemž však protější komunikující strana (tj. uzly CN) nemají dosud žádné informace – svá data určená mobilnímu uzlu proto stále směřují na jeho původní adresu CoA, pro kterou mají uveden platný záznam ve své cache vazeb. Než tak MN s danými korespondujícími uzly dokončí proceduru aktualizace vazby, kterou je informuje o změně místa svého připojení k síti (tj. nové dočasné adrese NCoA), jsou veškerá tato již odeslaná data buď přímo ztracena – resp. tyto datové pakety jsou sice sítí přeneseny, ale mobilní uzel už se na dané cílové adrese nenalézá a ty jsou tak v místě svého určení zahozeny a nebo, jedná-li se o protokoly FMIPv6 či F-HMIPv6, které se snaží těmito ztrátám paketů zabránit (viz dříve), jsou patřičným uzlem PAR, resp. MAP, zachytávány a prostřednictvím vytvořeného tunelu přeposílány do místa nového připojení MN. Podobně, jako v [1], [15] a [17], je tedy možné tuto režii při doručování paketů mobilnímu uzlu v průběhu provádění operací handoveru definovat jako součet nákladů pro přenos a zpracování přeposílaných paketů ($C_{FORWARDING}$) s těmi, které jsou nakonec zahozeny a tím i ztraceny (C_{LOSS}), následovně:

$$C_{PACKET} = \delta C_{FORWARDING} + \epsilon C_{LOSS}, \quad (4.17)$$

kde δ a ϵ jsou váhovými činiteli, popisujícími a zvýrazňujícími efekt, při němž jsou datové pakety přeposílány k MN, nebo naopak přímo zahazovány.



Obr. 4.1: Časové diagramy průběhu handoveru u jednotlivých protokolů

Ještě před tím, než bude přistoupeno k samotnému stanovení těchto režijních nákladů pro každý z analyzovaných protokolů, je vhodné si nejprve přiblížit jednotlivé dílčí intervaly zpoždění, ke kterým v důsledku vykonávání procesu handoveru dochází – k tomuto účelu poslouží časové diagramy na obrázku 4.1 (viz výše), převzaté z [1], [11], [15], [19], podrobně popisující průběh předání MN u uvedených protokolů *Mobile IPv6*. Ze zobrazených časových přehledů je zřejmé, že celkové zpoždění při handoveru (na obr. 4.1 modrou barvou) lze rozdělit na tři základní samostatné části: zpoždění při předání MN na spojení vrstvě (t_{L2}), zpoždění při znovuoobnovení IP konektivity (t_{IP} , resp. t_{FastIP}) a zpoždění v důsledku provádění aktualizace vazby (t_U , resp. t_{IntraU}) – pozn.: pro následnou analýzu režie C_{PACKET} je u hierarchických protokolů HMIPv6 a F-HMIPv6 počítáno pouze s případy intra handoveru. Poslední dva zmíněné časové úseky (t_{IP} (t_{FastIP}) a t_U (t_{IntraU})) je možné rozčlenit ještě na další subintervaly odpovídající konkrétním prováděným operacím – jejich detailní popis se vztahuje k obsahu práce v části 4.2, věnované analýze zpoždění handoveru (viz tab. 4.1). Nyní bude plně postačující upřesnění, že zpoždění při obnovení IP konektivity odpovídá tomu, jak rychle je MN po provedení předání na vrstvě L2 schopen znovu odesílat IP pakety, zatímco zpoždění následkem vykonávání aktualizace vazby je doba, která trvá až do okamžiku, kdy mobilní uzel začne od CN přijímat první datové pakety směřující přímo na jeho novou dočasnou adresu NCoA.

Režie při doručování paketů u MIPv6

Nechť λ_p představuje, z pohledu analýzy, míru (množství) přicházejícího datového provozu – resp. paketů, pro MN od korespondujících uzlů (tzv. *packet arrival rate*), udávanou jako počet paketů za jednotku času. Potom je možné určení obou dílčích složek $C_{FORWARDING}$ a C_{LOSS} u celkové režie při doručování paketů (C_{PACKET}) založit na následující úvaze – tj. že tyto režijní náklady jsou dány jako součin zde právě definované intenzity příchozího provozu (λ_p), celkového času, po který je nutné tyto datové pakety k MN přeposílat, resp. kdy jsou zahazovány (tj. doby zpoždění handoveru), a vlastní režie na jejich přenos skrze konkrétní síťovou infrastrukturu (tedy režie přenosu).

Z kapitoly věnované *Mobile IPv6* (MIPv6), je zřejmé, že tento protokol (podobně také HMIPv6 – viz dále) neprovádí přeposílání jakýchkoliv datových paketů během probíhajícího handoveru MN a proto také: $C_{FORWARDING}^{MIPv6} = 0$. Veškerá tato data

(pakety), přicházející na dosavadní adresu CoA mobilního uzlu jsou tak ztracena, čemuž odpovídá rovnice:

$$C_{\text{LOSS}}^{\text{MIPv6}} = \lambda_p(t_{L2} + t_{IP} + t_U)(C_{\text{RO}}^{\text{MIPv6}} + C_{\text{nRO}}^{\text{MIPv6}}). \quad (4.18)$$

$C_{\text{RO}}^{\text{MIPv6}}$ a $C_{\text{nRO}}^{\text{MIPv6}}$, podobně jako v [11], představují režii pro přenos tohoto objemu dat jednak při využití optimalizace směrování (*route optimization* – RO), tedy přímé cesty mezi MN a CN, resp. naopak pokud dochází ke způsobu jejich komunikace, která je vedena prostřednictvím domácího agenta HA – tzv. trojúhelníkovému směrování (*non-route optimization* – nRO). Jejich vlastní vyjádření jsou pak následující:

$$C_{\text{RO}}^{\text{MIPv6}} = \omega \underbrace{(C_{\text{CN,PAR}} + C_{\text{PAR,MN}})}_{\text{CN} \rightarrow \text{MN}}, \quad (4.19)$$

$$C_{\text{nRO}}^{\text{MIPv6}} = (1 - \omega) \left[\underbrace{(C_{\text{CN,HA}} + C_{\text{HA,PAR}} + C_{\text{PAR,MN}})}_{\text{CN} \rightarrow \text{HA} \rightarrow \text{MN}} + PC_{\text{HA}} \right], \quad (4.20)$$

kde výše uvedený prvek ω v obou rovnicích (4.19) a (4.20) se snaží poměrově vystihnout (zachytit) právě situace, při nichž si mobilní a korespondující uzel potřebná data mezi sebou předávají buď přímo (tj. optimalizovaně) a nebo, když je toho zapotřebí a například nelze jinak, k tomu musejí využít služeb příslušného HA (méně častý případ).

Režie při doručování paketů u HMIPv6

Již bylo zmíněno, že protokol *Hierarchical Mobile IPv6*, stejně jako MIPv6, nezahrnuje mechanismy pro tunelování paketů k místu nového připojení MN do sítě – resp. na jeho novou dočasnou adresu NCoA. V důsledku toho vyplývá opět stejný závěr, který byl uveden už v předchozí části a tedy, že v rámci něj nedochází ke vzniku žádné režie nutné pro doručování paketů přeposílaných mobilnímu uzlu – tj. že $C_{\text{FORWARDING}}^{\text{HMIPv6}} = 0$. Celková výsledná režie při doručování dat MN v průběhu jeho handoveru (C_{PACKET}) je tak spjata jedině s náklady pro přenos těch paketů, jež budou vinou nemožnosti je MN doručit na jeho, v té chvíli již „nedostupnou“ adresu CoA, nakonec stejně ztraceny – tj. s hodnotou režie C_{LOSS} . Tu je potom, i dle odpovídajícího časového diagramu na obrázku 4.1, možné stanovit jako:

$$C_{\text{LOSS}}^{\text{HMIPv6}} = \lambda_p(t_{L2} + t_{IP} + t_{\text{IntraU}})(C_{\text{RO}}^{\text{HMIPv6}} + C_{\text{nRO}}^{\text{HMIPv6}}), \quad (4.21)$$

kde t_{IntraU} se vztahuje k intervalu zpoždění během místní aktualizace vazby prováděné pouze s daným kotevním bodem MAP – tedy jen pro uvažovanou situaci při intra handoveru MN, jak bylo uvedeno dříve. Lze přitom důvodně předpokládat, že tato hodnota bude v ideálním případě: $t_{\text{IntraU}} \leq t_U$.

Množství režie při samotném přenosu a zpracování uvedených datových paketů směřujících od CN k mobilnímu uzlu se stanoví podobně jako u protokolu MIPv6, ovšem s ohledem na fakt, že do vzájemné komunikace mezi oběma uzly nyní ještě vstupuje patřičný bod MAP, pomocí něhož si obě strany svá data předávají a který v souladu s principy hierarchické mobility přetváří veškerý případný pohyb MN vůči všem jeho korespondujícím uzlům na transparentní. Tyto přenosové náklady jsou proto v souladu s tím, co bylo právě řečeno, určeny následovně:

$$C_{\text{RO}}^{\text{HMIPv6}} = \omega \left[\underbrace{(C_{\text{CN,MAP}} + C_{\text{MAP,PAR}} + C_{\text{PAR,MN}})}_{\text{CN} \rightarrow \text{MAP} \rightarrow \text{MN}} + PC_{\text{MAP}} \right], \quad (4.22)$$

$$C_{\text{nRO}}^{\text{HMIPv6}} = (1 - \omega) \left[\underbrace{(C_{\text{CN,HA}} + C_{\text{HA,MAP}} + C_{\text{MAP,PAR}} + C_{\text{PAR,MN}})}_{\text{CN} \rightarrow \text{HA} \rightarrow \text{MAP} \rightarrow \text{MN}} + PC_{\text{HA}} + PC_{\text{MAP}} \right]. \quad (4.23)$$

Režie při doručování paketů u FMIPv6

V kontrastu s právě dokončenou analýzou režie C_{PACKET} u protokolů MIPv6 a HMIPv6 se nachází *Mobile IPv6 Fast Handover* (FMIPv6). Jedním z hlavních účelů, pro které byl tento protokol navržen, je totiž (mimo jiné) zamezit poměrně vysokým ztrátám paketů, vznikajícím v průběhu času, kdy mobilní uzel uskutečňuje svůj handover. Děje se tak tím, že namísto toho, aby byly tyto datové pakety určené MN prostým způsobem zahazovány, jako tomu bylo dosud, jsou po celou dobu, po kterou je MN na svojí dočasné adrese CoA nedosažitelný, jeho (stále ještě implicitním) směrovačem PAR přeposílány na místo, kam právě provádí svůj přesun – tj. ke směrovači NAR, tak, aby bylo možné mu je doručit ihned, jakmile toho bude opět schopen (viz část 3.3). Za předpokladu pouze prediktivního módu FMIPv6 handoveru, na který je práce více zaměřena a jehož schéma a odpovídající časový průběh jsou

vedeny na obrázku 3.6, resp. 4.1, je potom umožněno tuto režii při přeposílání (tunelování) dat mobilnímu uzlu definovat rovnicí:

$$C_{\text{FORWARDING}}^{\text{FMIPv6}} = \lambda_p(t_{L2} + t_{\text{FastIP}} + t_U)(C_{\text{RO}}^{\text{FMIPv6}} + C_{\text{nRO}}^{\text{FMIPv6}}). \quad (4.24)$$

Pro interval t_{FastIP} , který odpovídá době potřebné k obnovení připojení MN na síťové vrstvě (L3) u zmiňovaného prediktivního handoveru podle FMIPv6, platí, že: $t_{\text{FastIP}} \leq t_{\text{IP}}$. To sleduje fakt, že mobilní uzel si novou dočasnou adresu NCoA stanoví ještě před svým samotným předáním – tj. během času t_{Trigg} (*L2 Trigger*), viz obr. 4.1, čímž se, v porovnání s ostatními protokoly, které toto neumožňují, snižuje i celkové zpoždění při handoveru. Pro bližší upřesnění významu t_{FastIP} je vhodné zde využít tabulky 4.1 (viz dále).

Patříčná vyjádření prvků $C_{\text{RO}}^{\text{FMIPv6}}$ a $C_{\text{nRO}}^{\text{FMIPv6}}$ z rovnice (4.24) se opět odvíjí od způsobu, jakým jsou datové pakety v rámci rychlého (FMIPv6) handoveru mobilnímu uzlu doručovány – nejprve tedy s optimalizací cesty:

$$C_{\text{RO}}^{\text{FMIPv6}} = \omega \left[\underbrace{(C_{\text{CN,PAR}} + C_{\text{PAR,NAR}} + C_{\text{NAR,MN}})}_{\text{CN} \rightarrow \text{PAR} \rightarrow \text{NAR} \rightarrow \text{MN}} + PC_{\text{AR}} \right], \quad (4.25)$$

následně i v případech, kdy, ať už z jakéhokoliv důvodu, není možné tento druh přímé komunikace mezi uzly MN a CN použít:

$$C_{\text{nRO}}^{\text{FMIPv6}} = (1 - \omega) \left[\underbrace{(C_{\text{CN,HA}} + C_{\text{HA,PAR}} + C_{\text{PAR,NAR}} + C_{\text{NAR,MN}})}_{\text{CN} \rightarrow \text{HA} \rightarrow \text{PAR} \rightarrow \text{NAR} \rightarrow \text{MN}} + PC_{\text{HA}} + PC_{\text{AR}} \right]. \quad (4.26)$$

Mohlo by se nyní zdát, že u protokolu *Mobile IPv6 Fast Handover* díky jeho mechanismům ukládání přicházejících datových paketů do vyrovnávacích pamětí (*buffer*) a jejich následným přeposíláním mobilnímu uzlu (tunelem mezi směrovači PAR a NAR), k žádným ztrátám na datech nedochází – v ideálním případě, kdy jsou k dispozici také všechny dostatečné a efektivní paměťové prostředky je tomu skutečně tak. Nicméně, jak popisuje [1] a [15], si lze celkem snadno představit i situace, u nichž, i přes všechna tato opatření a snahu, ztráty paketů při handoveru přesto vznikají. Pokud se totiž MN pohybuje například velice rychle a zahájí tak své předání k novému bodu AP (tj. L2 handover) ještě před tím, než vůbec dojde k vytvoření onoho potřebného

obousměrného tunelu, potom mohou být veškeré pakety určené MN, které v té chvíli přicházející na PAR, ztraceny. Tomu by odpovídal stav na obrázku 4.1 (diagram FMIPv6), při kterém by byl pohyb mobilního uzlu až natolik rychlý, že samotná doba nutná pro sestavení tunelu k přenosu paketů od směrovače PAR k NAR (tj. t_{PN}), by byla větší než celková doba před zahájením vlastního handoveru L2 (tj. t_{Trigg}) – tedy: $t_{PN} > t_{Trigg}$, a proto by i všechny pakety v tomto konkrétním časovém rozmezí ($t_{PN} - t_{Trigg}$) byly tudíž ztraceny. Jestliže tak má dojít k celkovému úspěšnému provedení prediktivního FMIPv6 handoveru, je dále potřeba, aby k tomu byla zachována následující podmínka: $t_{PN} \leq t_{Trigg}$, (viz obr. 4.1), čímž je také, podle [1] a [15], možno tuto režii C_{LOSS} – paketů, které nebudou MN doručeny, přesně definovat následujícím vztahem:

$$C_{LOSS}^{FMIPv6} = \lambda_p \cdot \max\{(t_{PN} - t_{Trigg}), 0\} \cdot (C_{RO}^{FMIPv6} + C_{nRO}^{FMIPv6}), \quad (2.27)$$

přičemž ale v rámci této prováděné analýzy bude uvažován ideální případ, při kterém je hodnota těchto režijních nákladů nulová ($C_{LOSS}^{FMIPv6} = 0$).

Režie při doručování paketů u F-HMIPv6

Intuitivním spojením obou úvah, s jakými byla odvozena režie doručování paketů u protokolů *Hierarchical Mobile IPv6* a *Mobile IPv6 Fast Handover*, je docíleno určení této hodnoty C_{PACKET} také u *Fast Handover for HMIPv6* (F-HMIPv6).

Stejně, jako při HMIPv6, je i zde položen předpoklad vykonání jen intra handoveru MN uvnitř MAP domény, což souvisí s uvažováním hodnoty t_{IntraU} jakožto zpožděním vznikajícím pouze v rámci místní aktualizace vazby. Zbylá část analýzy pak už z větší části kopíruje stejný průběh, který byl proveden bezprostředně výše u protokolu FMIPv6. Tady se projeví jediná výraznější změna, jež s sebou přináší přítomnost kotevního bodu MAP, který tak působí rozdíl v tom, že tunel pro přeposílání paketů není sestavován mezi směrovači PAR a NAR, jako tomu bylo u FMIPv6, nýbrž právě mezi příslušným kotevním bodem MAP mobilního uzlu a jeho novým přístupovým směrovačem NAR – doba potřebná pro jeho ustanovení je zde definována jako t_{MN} . Od toho se následně odvíjí i samotná přenosová cesta, po níž jsou datové pakety MN doručovány (resp. tedy prvky $C_{RO}^{F-HMIPv6}$ a $C_{nRO}^{F-HMIPv6}$).

Pro analýzu režie při doručování paketů mobilnímu uzlu (C_{PACKET}) u protokolu F-HMIPv6 je proto možné určit tyto výchozí definice:

$$C_{\text{FORWARDING}}^{\text{F-HMIPv6}} = \lambda_p(t_{L2} + t_{\text{FastIP}} + t_{\text{IntraU}})(C_{\text{RO}}^{\text{F-HMIPv6}} + C_{\text{nRO}}^{\text{F-HMIPv6}}), \quad (4.28)$$

kde:

$$C_{\text{RO}}^{\text{F-HMIPv6}} = \omega \left[\underbrace{(C_{\text{CN,MAP}} + C_{\text{MAP,NAR}} + C_{\text{NAR,MN}})}_{\text{CN} \rightarrow \text{MAP} \rightarrow \text{NAR} \rightarrow \text{MN}} + PC_{\text{MAP}} \right], \quad (4.29)$$

$$C_{\text{nRO}}^{\text{F-HMIPv6}} = (1 - \omega) \left[\underbrace{(C_{\text{CN,HA}} + C_{\text{HA,MAP}} + C_{\text{MAP,NAR}} + C_{\text{NAR,MN}})}_{\text{CN} \rightarrow \text{HA} \rightarrow \text{MAP} \rightarrow \text{NAR} \rightarrow \text{MN}} + PC_{\text{HA}} + PC_{\text{MAP}} \right]. \quad (4.30)$$

Také podmínka pro korektní vykonání celého F-HMIPv6 handoveru (jeho časový průběh viz obr. 4.1), který současně bude při analýze uvažován a při němž je výsledná ztrátovost všech paketů nulová (tj. i $C_{\text{LOSS}}^{\text{F-HMIPv6}} = 0$), je prakticky totožná s tou u protokolu FMIPv6 – ideálně proto splňuje, že: $t_{\text{MN}} \leq t_{\text{Trigg}}$. Exaktně by potom byly tyto režijní náklady pro pakety ztracené během předání podle F-HMIPv6 dány rovnicí:

$$C_{\text{LOSS}}^{\text{F-HMIPv6}} = \lambda_p \cdot \max\{(t_{\text{MN}} - t_{\text{Trigg}}), 0\} \cdot (C_{\text{RO}}^{\text{F-HMIPv6}} + C_{\text{nRO}}^{\text{F-HMIPv6}}). \quad (4.31)$$

4.2 Zpoždění při handoveru

Zpoždění vznikající během handoveru je jev, který, jak již bylo několikrát naznačeno, výrazně negativně působí na kvalitu komunikace zejména u aplikací se striktními požadavky na parametry QoS. Podle [1], [19], [21], [22], [23] a dále informací, které byly v práci uvedeny, je tímto zpožděním při handoveru MN mezi různými IP sítěmi, neboli vlastně dobou jeho trvání, možné označit sumu (součet) jednotlivých dílčích intervalů zpoždění na vrstvách L2, resp. L3, síťové architektury, ke kterým vinou realizace obou typů handoverů dochází. Je přitom zřejmé, že vlastní mechanismy provedení předání MN odehrávající se na spojové vrstvě (L2) – tedy i zpoždění, jež při nich vzniká, nijak blíže nesouvisí s konkrétními funkcemi protokolu *Mobile IPv6* (MIPv6) a dalších, které tak na tyto nemají fakticky ani žádný vliv. Z tohoto důvodu proto nebude příslušný interval prodlevy t_{L2} podrobován ani žádnému dalšímu bližšímu zkoumání a bude na něj nahlíženo jen jako na celek. Namísto toho se analýza zaměří právě na zbylé dva úseky zpoždění – podle obrázku 4.1 tedy t_{IP} (t_{FastIP})

a t_U ($t_{\text{Intra}U}$), které mají naopak přímou návaznost na činnost protokolů *Mobile IPv6* a budou tudíž i podrobněji rozebrány. Pro lepší ozřejnění významu dále specifikovaných nových parametrů a také pro jejich hlubší položení do souvislostí s těmi, které už byly definovány při předchozí analýze režie C_{PACKET} (viz výše t_{IP} , t_U), je vhodné zde opět zmínit právě odkaz na obrázek 4.1, znázorňující všechny průběhy předání MN.

Za účelem analýzy a stanovení hodnot zpoždění při handoveru u jednotlivých typů protokolů (tj. D_{INTRA} – pro intra handover; D_{INTER} – pro inter handover) jsou formulovány tyto následující prvky: t_{RD} jako zpoždění při nalezení implicitního směrovače NAR (*Router Discovery – RD*) a t_{DAD} jako zpoždění v důsledku vykonání procedury detekce duplicitních adres DAD. V případě intervalu t_{RD} se vlastně jedná o časovou prodlevu, během níž mobilní uzel detekuje změnu místa svého připojení k síti – resp. tedy od NAR přijme zprávu *Ohlášení směrovače* (RA), přičemž do tohoto zpoždění je zahrnuta také doba potřebná pro určení jeho nové dočasné adresy NCoA, kdy je, podobně jako v [23], předpokládáno, že k tomuto mobilní uzel využije dostupných mechanismů její autokonfigurace, a proto není potřeba zde uvádět ani žádná další zpoždění, ke kterým by mohlo dojít například pokud by byl MN nucen využít její stavové konfigurace s pomocí informací od DHCPv6 serveru.

Z obrázku 4.1 dále plyne, že, kromě právě definovaných t_{RD} a t_{DAD} , vystupují v rámci celkového zpoždění handoveru ještě také další dva intervaly, kterými jsou t_{BU} (resp. $t_{\text{Intra}BU}$) a t_{NR} (resp. $t_{\text{Intra}NR}$). O bližší upřesnění jejich významu se potom snaží tabulka 4.1 na následující straně, co je však třeba nyní uvést je ale to, že vlastní velikosti hodnot těchto intervalů se již odvíjí od transportního zpoždění při přenosu signalizačních zpráv vztahujících se k příslušné operaci prováděné v průběhu handoveru a to mezi dvěma konkrétními síťovými uzly – tj. na jimi vymezenou vzdálenost. Toto zpoždění při přenosu signalizační zprávy (řídícího paketu) o průměrné velikosti S je, dle [20], možné formulovat jako součet jejího přenosového zpoždění (tzv. *transmission delay*) a zpoždění na daném spoji (tzv. *link delay*) – bude-li tak obecně tato zpráva v síti přenášena mezi uzly X a Y , může být uvedené zpoždění definováno následovně:

$$t_{X,Y}(S) = d_{X,Y} \left(\frac{S}{BW_{\text{Wired}}} + l_{\text{Wired}} + D_{\text{Router}} \right), \quad (4.32)$$

kde BW_{Wired} značí přenosovou kapacitu drátového (kabelového) spoje – podíl mezi ní a velikostí zprávy S odpovídá právě zmiňovanému přenosovému zpoždění [23]; l_{Wired}

představuje zpoždění na lince (drátovém spoji) a D_{Router} je doba potřebná k provedení zpracování a směrování paketů na jednotlivých směrovačích v cestě mezi uzly X a Y .

Tab. 4.1: Podrobné vyjádření a popis jednotlivých zpoždění při handoveru

Vyjádření dílčích intervalů zpoždění			
PARAMETR		DEFINICE	POPIS
Zpoždění obnovení IP konektivity	t_{IP}	$t_{\text{IP}} = t_{\text{RD}} + t_{\text{DAD}}$	U handoveru podle MIPv6, resp. HMIPv6, je třeba, aby MN po provedení předání na vrstvě L2 nejprve vyhledal svůj nový přístupový směrovač NAR (tj. přijal od něj zprávu RA); ze získaných prefixů sítě určil svoji novou dočasnou adresu CoA a následně provedl kontrolu její duplicity (DAD)
	t_{FastIP}	$t_{\text{FastIP}} = 2t_{\text{MN,NAR}}$	Pro schémata předání dle FMIPv6 a F-HMIPv6 se jedná pouze o prodlevu, kdy MN po vykonání L2 handoveru odešle svému NAR zprávu FNA, kterou jej informuje o své přítomnosti na nové adrese CoA/LCoA, a okamžikem, kdy jsou MN od NAR doručeny první preposlané pakety
Zpoždění procesu aktualizace vazby	t_{U}	$t_{\text{U}} = 2(t_{\text{MN,HA}} + t_{\text{MN,CN}}) + t_{\text{RR}}$ ($t_{\text{U}} = t_{\text{BU}} + t_{\text{NR}}$)	V rámci globální aktualizace vazeb (tj. u MIPv6 a FMIPv6 vždy; u schémat předání podle HMIPv6, F-HMIPv6 jen v případech inter handoverů mezi MAP doménami) musí MN provést výměnu dvojice zpráv BU a BACk se svým domácím agentem HA a přes proceduru zpětné směrovatelnosti (RR) také s korespondujícím uzlem(uzly) CN
	t_{IntraU}	$t_{\text{IntraU}} = 2t_{\text{MN,MAP}}$ ($t_{\text{IntraU}} = t_{\text{IntraBU}} + t_{\text{IntraNR}}$)	U schémat handoverů s podporou hierarchické mobility (tj. HMIPv6 a F-HMIPv6) spočívá místní aktualizace vazeb při intra handoveru uvnitř MAP domény pouze ve vzájemné výměně zpráv LBU a LBACk mezi mobilním uzlem MN a jeho kotevním bodem MAP
Dále jsou pro upřesnění uvedeny jednotlivé dílčí složky, z nichž se skládají výše uvedené intervaly zpoždění při procesu aktualizace vazby (t_{U} a t_{IntraU})			
Zpoždění doručení zpráv o aktualizaci vazby BU/LBU	t_{BU}	$t_{\text{BU}} = 2t_{\text{MN,HA}} + t_{\text{RR}} + t_{\text{MN,CN}}$	Zpoždění od obnovení IP konektivity mobilního uzlu MN až po okamžik, kdy je zpráva aktualizace vazby BU doručena také korespondujícímu uzlu(uzlům) CN (domácí agent HA zprávu BU přijme a také potvrdí ještě před zahájením procedury RR – tj. zde $2t_{\text{MN,HA}}$)
	t_{IntraBU}	$t_{\text{IntraBU}} = t_{\text{MN,MAP}}$	Zpoždění od obnovení IP konektivity mobilního uzlu MN po okamžik, kdy je zpráva místní aktualizace vazby LBU doručena kotevnímu bodu MAP
Zpoždění procesu zpět. směrovatelnosti	t_{RR}	$t_{\text{RR}} = 2(t_{\text{MN,HA}} + t_{\text{HA,CN}} + t_{\text{MN,CN}})$	Procedura zpětné směrovatelnosti (RR) spočívá v zaslání dvojice zpráv HoTI a CoTI korespondujícímu uzlu; CN následně mobilní stanici MN na tyto zprávy odpoví odesláním testovacích zpráv HoT a CoT. Přičemž CoTI a CoT lze mezi MN a CN přenášet přímo; zprávy HoTI a HoT je třeba tunelovat prostřednictvím domácího agenta HA
Zpoždění přijetí prvních paketů na nové adrese CoA	t_{NR}	$t_{\text{NR}} = t_{\text{CN,MN}}$	Interval od doručení zprávy aktualizace vazby BU uzlu(uzlům) CN, resp. i HA, do doby, než mobilní uzel MN získá jejich potvrzení – tedy od CN přijme zprávu BACk (HA tuto zprávu MN potvrdil již dříve – v rámci t_{BU}) Zároveň jsou MN od tohoto okamžiku doručovány také první pakety přímo na jeho novou dočasnou adresu CoA
	t_{IntraNR}	$t_{\text{IntraNR}} = t_{\text{MAP,MN}}$	Toto zpoždění odpovídá časovému intervalu mezi přijetím zprávy LBU kotevním bodem MAP a doručením jejího potvrzení LBACk mobilnímu uzlu MN. MN, stejně jako v předešlém případě, od této chvíle již přijímá pakety přímo na své nové dočasné adrese LCoA

Je zjevné, že v okamžiku, kdy bude jedním z koncových uzlů (X nebo Y) sám mobilní uzel MN, potom se výše popsany tvar rovnice (4.32) příčným způsobem změni na:

$$t_{MN,X}(s) = \underbrace{\left(\frac{s}{BW_{Wless}} + l_{Wless}\right)}_{\text{bezdrátový spoj}} + (d_{MN,X} - 1) \underbrace{\left(\frac{s}{BW_{Wired}} + l_{Wired} + D_{Router}\right)}_{\text{drátový (kabelový) spoj}}. \quad (4.33)$$

Význam prvků BW_{Wless} a l_{Wless} přitom zůstává stejný jako v předešlé rovnici (4.32), pouze s tím rozdílem, že tyto zde charakterizují příslušné vlastnosti u bezdrátového spoje (rozhraní).

Na základě všech těchto informací je tedy již možné analyzovat jednotlivá zpoždění, ke kterým během handoveru u protokolů *Mobile IPv6* dochází. [21] tato zpoždění popisuje jako interval mezi přijetím posledních dat na stávající dočasné adrese CoA mobilního uzlu po okamžik, kdy MN dorazí první datový paket prostřednictvím jeho nového připojení k síti – tj. od směrovače NAR, přičemž tento děj je tedy provázen i dočasným přerušením všech právě probíhajících služeb. Při bližším pohledu na průběh rychlých handoverů podle FMIPv6 a F-HMIPv6 (viz obr. 4.1), je zjištěno, že první přeposílané pakety jsou MN v těchto případech doručovány již poměrně brzy po dokončení samotného předání na vrstvě L2 – přesněji ihned poté, co mobilní uzel zprávou *Rychlé ohlášení souseda* (FNA) oznámí NAR svoji přítomnost. Doba, během níž tímto dochází k onomu přerušení příchozích datových relací, je tedy relativně krátká a v některých zdrojích, jako je [1] a [19], je právě tato považována i za celkové zpoždění při daném rychlém handoveru MN.

Představíme-li si však nyní aplikaci, jakou je například VoIP, pak výše uvedená úvaha nemůže být takto, bez výhrad, aplikována. Tento typ hlasové služby totiž běžně a také zcela zřejmě předpokládá „plnohodnotnou“ komunikaci uživatelů oběma směry – tedy jak k mobilnímu uzlu, tak i od něj (tj. ke korespondujícím uzlům), což v souvislosti s tím, co uvádí část práce 2.5 (tj. že CN přijímá od MN pouze ta data, pro jejichž zdrojové adresy má ve své cache vazeb uveden platný záznam) je možné až poté, co mobilní uzel u příslušného CN, případně u bodu MAP (jedná-li se o protokol F-HMIPv6) dokončí proces aktualizace vazby – resp. tak od nich přijme její potvrzení (BAck/LBAck). Tato odůvodnění proto vedou k tomu, že v rámci následující prováděné analýzy bude za celkové zpoždění při handoveru (i u FMIPv6 a F-HMIPv6) označen celý interval od zahájení L2 předání MN až po samotné přijetí příslušné zprávy o

potvrzení vazby – tj. úseky na obrázku 4.1 označené modrou, případně červenou, barvou.

Zpoždění při handoveru MIPv6

Při uvedeném postupu, který je založen na odpovídajícím průběhu z obr. 4.1 a který ještě dále upřesňují vyjádření v tabulce 4.1, je možné pro zpoždění během handoveru u protokolu *Mobile IPv6* (MIPv6) vyvodit následující:

$$D_{\text{INTRA}}^{\text{MIPv6}} = D_{\text{INTER}}^{\text{MIPv6}} = t_{L2} + \underbrace{t_{RD} + t_{DAD}}_{t_{IP}} + \underbrace{2(t_{MN,HA} + t_{MN,CN})}_{t_U} + t_{RR}. \quad (4.34)$$

Z uvedené rovnice (4.34) také plyne, že způsob provedení předání u MIPv6 zůstává, bez ohledu na druh přesunu MN (uvnitř oblasti MAP – intra; mezi MAP doménami – inter), stále stejný a tudíž ani doba potřebná k jejich vykonání se v obou případech nijak nemění (tj. $D_{\text{INTRA}}^{\text{MIPv6}} = D_{\text{INTER}}^{\text{MIPv6}}$). Sám význam jednotlivých prvků i celé rovnice (4.34) by měl být již také znám a není proto nutné, aby zde byl znovu více rozebírán.

Zpoždění při handoveru HMIPv6

Naprosto stejným a jednoduchým způsobem, jako v předešlé části (výše), se lze dopracovat i k definicím intervalů zpoždění pro protokol *Hierarchical Mobile IPv6*. U HMIPv6 je potřeba jen znovu připomenout, že přednosti hierarchické mobility – konkrétně možnost provést pouze místní aktualizaci vazby, se u něj projevují jedinečně tehdy, když se mobilní uzel přesunuje mezi dvěma podsítěmi stejné MAP domény. V opačných situacích (tj. inter handoveru) jeho výkonnost (zpoždění) „padá“ na úroveň běžného MIPv6, kdy je nutné provést standardní registraci nové adresy CoA (resp. zde RCoA) u domácího agenta a uzlů CN – navíc, tato celková doba zpoždění při handoveru se v takovém případě, v porovnání s protokolem MIPv6, stává ještě vyšší a to z jediného prostého důvodu, kterým je fakt, že MN musí provést tyto registrace své dočasné adresy (adres) obě – nejprve prostřednictvím místní aktualizace vazby u bodu MAP, následně jejím standardním průběhem i u uzlů HA a CN (viz část 3.2). Lze proto definovat, že:

$$D_{\text{INTRA}}^{\text{HMIPv6}} = t_{L2} + \underbrace{t_{RD} + t_{DAD}}_{t_{IP}} + \underbrace{2t_{MN,MAP}}_{t_{\text{IntraU}}}, \quad (4.35)$$

$$D_{\text{INTER}}^{\text{HMIPv6}} = D_{\text{INTRA}}^{\text{HMIPv6}} + \underbrace{2(t_{MN,HA} + t_{MN,CN})}_{t_U} + t_{RR}. \quad (4.36)$$

Pro upřesnění – uvedená rovnice (4.36) tak odpovídá spojení modrého a červeného intervalu z diagramu průběhu HMIPv6 handoveru zobrazeného na obrázku 4.1.

Zpoždění při handoveru FMIPv6

Při rychlém handoveru dle protokolu *Mobile IPv6 Fast Handover* je výchozí situace opět stejná jako u základního MIPv6 – tj. že standardní proces aktualizace vazby při registraci nové dočasné adresy NCoA mobilního uzlu je zde vykonán vždy, když dojde ke změně místa jeho připojení do sítě (proto $D_{\text{INTRA}}^{\text{FMIPv6}} = D_{\text{INTER}}^{\text{FMIPv6}}$). Jak dále popisuje [1], hodnota tohoto zpoždění u FMIPv6 je značně závislá na množství dostupných informacích – resp. na tom, zda-li má PAR k dispozici všechna potřebná data o novém přístupovém směrovači NAR, k němuž MN předpokládá svůj přesun, či nikoliv. Je také důležité, v kterém okamžiku mobilní uzel vůbec přijme zpět potvrzující zprávu FBack – tedy to, jedná-li se pak o prediktivní, nebo reaktivní mód rychlého předání MN (viz část práce 3.3). Posledním důležitým faktorem, který ještě může do celkové doby trvání FMIPv6 handoveru promluvit, je špatná vzájemná synchronizace mezi oběma mechanismy L2 a L3 handoveru – jinými slovy (s odkazem na odpovídající diagram z obr. 4.1), pokud by docházelo k prodlevě mezi přijetím posledního paketu (konkrétně zprávy FBack) prostřednictvím stávajícího připojení MN (tj. od směrovače PAR) a vlastním zahájením jeho předání na spojové vrstvě, potom by bylo nutné do analýzy patřičným způsobem zahrnout i tento vznikající interval. Bude-li však předpokládán ideální případ (prediktivního) handoveru podle obrázku 4.1, kdy ani nic podobného nenastává, může být toto zpoždění u protokolu FMIPv6 dáno takto:

$$D_{\text{INTRA}}^{\text{FMIPv6}} = D_{\text{INTER}}^{\text{FMIPv6}} = t_{L2} + \underbrace{2t_{\text{MN,NAR}}}_{t_{\text{FastIP}}} + \underbrace{2(t_{\text{MN,HA}} + t_{\text{MN,CN}})}_{t_U} + t_{\text{RR}}. \quad (4.37)$$

Zpoždění při handoveru F-HMIPv6

Fast Handover for HMIPv6 v sobě tedy slučuje přednosti jak protokolu FMIPv6 – v podobě krátkého intervalu potřebného k obnovení IP konektivity MN na vrstvě L3 (díky možnosti „předkonfigurace“ dočasné adresy CoA), tak i HMIPv6, který mobilnímu uzlu zase umožňuje v případech, kdy je to vhodné (tj. intra handoverů), registrovat u bodu MAP pouze změnu linkové dočasné adresy LCoA. Na druhou stranu si s sebou ale F-HMIPv6 přináší také stejnou degradaci své výkonnosti celkového zpoždění při předání, u nichž naopak dochází k inter handoveru MN, kterou tak má

společnou právě s protokolem *Hierarchical Mobile IPv6*. Oproti běžnému HMIPv6 bude však i v těchto situacích F-HMIPv6 přesto dosahovat lepších vlastností a to díky tomu, že se u něj projeví právě výše zmíněné funkce protokolu *Mobile IPv6 Fast Handover*. Dle obrázku a tabulky 4.1 jsou proto definice pro jeho zpoždění následující:

$$D_{\text{INTRA}}^{\text{F-HMIPv6}} = t_{L2} + \underbrace{2t_{\text{MN,NAR}}}_{t_{\text{FastIP}}} + \underbrace{2t_{\text{MN,MAP}}}_{t_{\text{IntraU}}}, \quad (4.38)$$

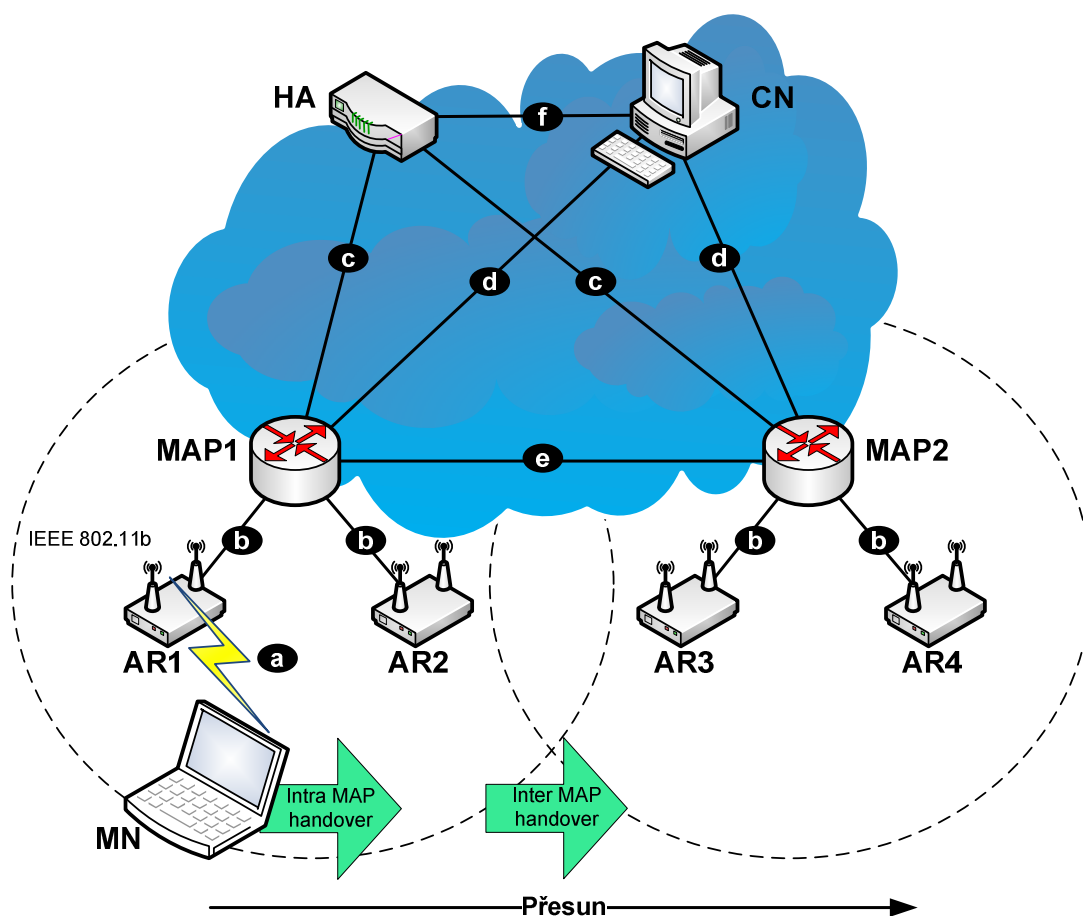
$$D_{\text{INTER}}^{\text{F-HMIPv6}} = D_{\text{INTRA}}^{\text{F-HMIPv6}} + \underbrace{2(t_{\text{MN,HA}} + t_{\text{MN,CN}})}_{t_{\text{U}}} + t_{\text{RR}}. \quad (4.39)$$

5. ZHODNOCENÍ VÝKONNOSTI JEDNOTLIVÝCH PROTOKOLŮ – SCHÉMAT HANDOVERŮ

Hlavní náplní následující kapitoly bude prezentace dosažených výsledků získaných aplikací právě navržené analytické metody na jednotlivá srovnávaná schémata handoverů protokolů *Mobile IPv6*. Ty zde budou vsazeny do kontextu „vzorového“ modelu topologie sítě s přesně definovanými parametry a vlastnostmi (viz dále), na kterém bude ohodnocení jejich výkonnosti založeno.

5.1 Topologie sítě a parametry použité pro analýzu

Uvedenou topologii použitou pro účely analýzy zachycuje následující obrázek 5.1. Model byl převzat z [1], [14] a [17] a jeho základ tvoří čtveřice přístupových směrovačů AR1 až AR4, mezi jejichž podsítěmi se mobilní uzel postupně přesunuje.



Obr. 5.1: Topologie sítě použitá pro analýzu

Je přitom předpokládáno, že v této přístupové části sítě je využito technologie Wi-Fi a tedy, že tyto dílčí podsítě v modelu vystupují jako jednotlivé WLAN dle standardu IEEE 802.11b, čemuž i odpovídá uvažovaná maximální teoretická přenosová kapacita bezdrátového spoje 11 Mbit/s (viz níže tabulka 5.1).

Tab. 5.1: Seznam parametrů použitých pro analýzu

Parametry modelu pro analýzu		
SYMBOL (značka)	HODNOTA	POPIS PARAMETRU
a	1	Vzdálenost (resp. počet hopů) mezi mobilním uzlem MN a přístupovým směrovačem ARx ($d_{MN,AR}$) – tj. bezdrátový spoj (rozhraní) mezi MN a PAR/NAR
b	2	Vzdálenost (počet hopů) mezi přístupovým směrovačem ARx a kotevním bodem MAPx ($d_{AR,MAP}$)
c	6	Vzdálenost (počet hopů) mezi domácím agentem HA a kotevním bodem MAPx ($d_{HA,MAP}$)
d	4	Vzdálenost (počet hopů) mezi korespondujícím uzlem CN a kotevním bodem MAPx ($d_{CN,MAP}$)
e	6	Vzdálenost (počet hopů) mezi kotevními body MAP1 a MAP2 ($d_{MAP1,MAP2}$)
f	6	Vzdálenost (počet hopů) mezi domácím agentem HA a korespondujícím uzlem CN ($d_{HA,CN}$)
M	2	Počet podsítí (resp. zde přímo přístupových směrovačů AR) v rámci jedné MAP domény
τ	1	Režie pro přenos jedné jednotky (signalizační zpráva/paket) po drátovém (kabelovém) spoji
κ	10	Režie pro přenos jedné jednotky (signalizační zpráva/paket) po bezdrátovém spoji (rozhraní)
PC_{AR}	800	Režie zpracování signalizační zprávy/paketu přístupovým směrovačem ARx
PC_{HA}	2400	Režie zpracování signalizační zprávy/paketu domácím agentem HA
PC_{CN}	400	Režie zpracování signalizační zprávy/paketu korespondujícím uzlem CN
PC_{MAP}	1200	Režie zpracování signalizační zprávy/paketu kotevním bodem MAPx
P_s	0,9	Pravděpodobnost správné predikce uskutečnění L3 handoveru
δ	0,2	Váhový čítel popisující (zvýrazňující) efekt přeposílání (tunelování) paketů k MN
ϵ	0,8	Váhový čítel popisující (zvýrazňující) efekt zahazování paketů
ω	0,8	Váhový čítel popisující přenos paketů mezi MN a CN s/bez využití optimalizace cesty
λ_p	10 paket/s	Míra (množství) přicházejících datových paketů pro MN (intenzita přichozího provozu)
λ_s	0,01	Míra (množství) přichozích datových (komunikačních) relací pro MN – resp. počet přichozích žádostí o zahájení spojení od CN uzlů za 1 sekundu
T_{SUB}	10 – 250 s	Čas, po který mobilní uzel MN setrvá v dané podsíti (tj. v oblasti pokrytí příslušného ARx)
t_{L2}	100 ms	Zpoždění v důsledku předání (handoveru) mobilního uzlu MN na spojové vrstvě L2
t_{RD}	120 ms	Zpoždění při nalezení nového implicitního přístupového směrovače – resp. při detekci změny místa připojení mobilního uzlu MN
t_{DAD}	120 ms	Zpoždění vlivem provádění procedury DAD (detekce duplicitních adres)
S	93 B	Průměrná velikost signalizační zprávy
BW_{Wless}	11 Mbit/s	Přenosová kapacita bezdrátového spoje (rozhraní)
BW_{Wired}	100 Mbit/s	Přenosová kapacita drátového (kabelového) spoje
I_{Wless}	2 ms	Zpoždění na bezdrátovém spoji (rozhraní)
I_{Wired}	0,5 ms	Zpoždění na drátovém (kabelovém) spoji
D_{Router}	0,001 ms	Zpoždění na jednotlivých mezilehlých směrovačích v síti (Internetu)

Z obrázku 5.1 je potom dále vidět to, že tyto přístupové směrovače ARx jsou daným způsobem sdruženy pod správu dvou rozdílných kotevních bodů MAP1 a MAP2, čímž také spadají i do různých oblastí MAP domén (vyobrazeny čárkovanou

čarou) – použitá topologie tím představuje jednoduchý model sítě, ve kterém dochází jak k situacím intra, tak také inter handoverů mobilního uzlu, což je z pohledu výsledků prováděné analýzy žádoucí. Na druhou stranu, pro protokoly neimplementující hierarchickou mobilitu, jsou uvedené funkce obou kotevních bodů MAP zcela bezpředmětné a tyto se pro ně tedy jeví jen jako běžné mezilehlé směrovače v síti.

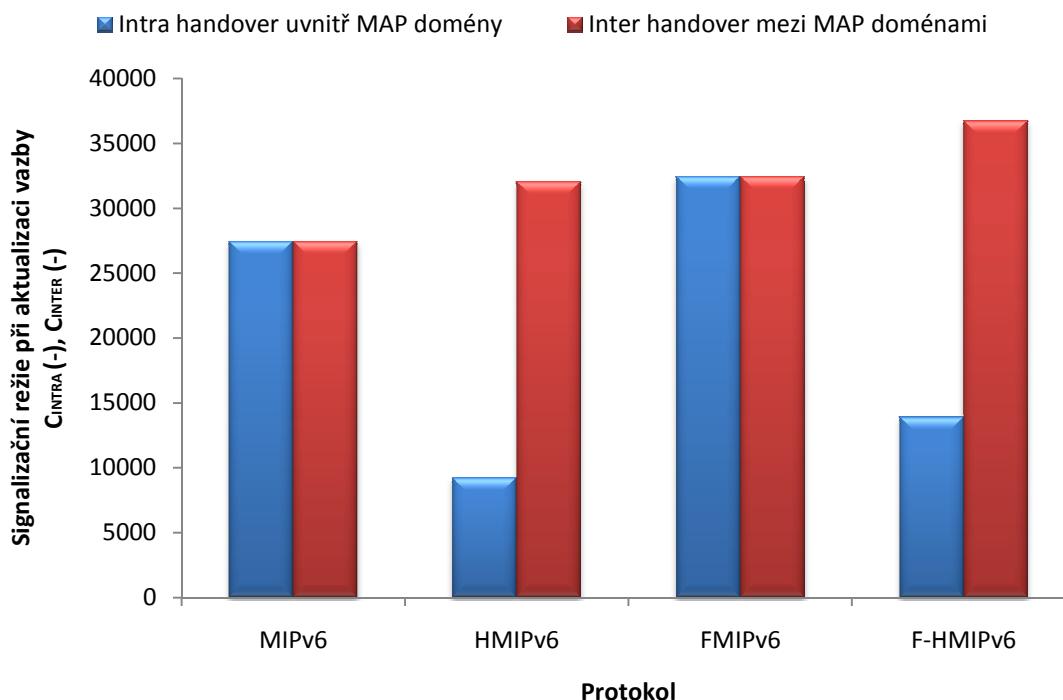
V případě spojení mezi jednotlivými uzly (na obr. 5.1 označeny písmeny *a* až *f*) se, s jedinou výjimkou *a* – tj. rádiového spoje mezi MN a jeho implicitním směrovačem (tím může být v daný okamžik kterýkoliv jeden ze zmíněných ARx), fyzicky nejedená o přímé dvoubodové spoje mezi danými síťovými prvky. Naopak tato spojení zde symbolizují komplexní cestu sítí, jejichž vzdálenost je charakterizována počtem mezilehlých uzlů nalézajících se mezi oběma danými entitami, přes které je tak přenášena jejich vzájemná komunikace (tj. data). Podobně jako v [1] a [14] lze tyto spoje, co se týče kapacity a zpoždění, považovat za plně duplexní (*full-duplex*) a vlastní hodnoty těchto i všech zbylých parametrů užitých pro výkonnostní analýzu protokolů *Mobile IPv6* shrnuje výše uvedená tabulka 5.1. Většina v ní uvedených prvků potom nese své typické hodnoty, které jim byly definovány na základě informací obsažených v literaturách [1], [14], [15], [19], [20], [21] a [23].

5.2 Výsledky analýzy

Signalizační režie při aktualizaci vazby dle typu prováděného handoveru

První výsledný graf na obrázku 5.2 ukazuje vzájemné srovnání jednotlivých protokolů z pohledu jejich náročnosti na množství signalizační režie při aktualizaci vazby pro oba možné typy prováděného handoveru MN. Z grafu je vidět, že výrazně nejlepších vlastností, avšak pouze pro případ intra handoveru uvnitř MAP domény, v tomto ohledu dosahují oba hierarchické protokoly (tj. *Hierarchical Mobile IPv6* a *Fast Handover for HMIPv6*), čímž tak splňují hlavní účel, pro který byly oba navrženy (resp. především pak HMIPv6). Jak již bylo několikrát uvedeno, hlavní výhodou hierarchické mobility je totiž možnost v příhodných situacích provádět pouze místní aktualizaci vazby linkové dočasné adresy LCoA mobilního uzlu u kotevního bodu MAP, což, jak je ostatně z grafu vidět, vede k jasnému snížení režijních nákladů nutných k provedení aktualizace vazby. Jako vůbec nejlepší se pak při vzájemném srovnání HMIPv6 a F-HMIPv6 jeví *Hierarchical Mobile IPv6*. Toto je způsobeno tím,

že druhý z obou protokolů – *Fast Handover for HMIPv6*, v sobě navíc ještě implementuje také mechanismy pro provedení rychlého handoveru s minimálními ztrátami paketů dle vlastností FMIPv6, jehož funkce také zahrnuje, což právě způsobuje mírné zvýšení jeho režijních nákladů v porovnání s běžným HMIPv6.



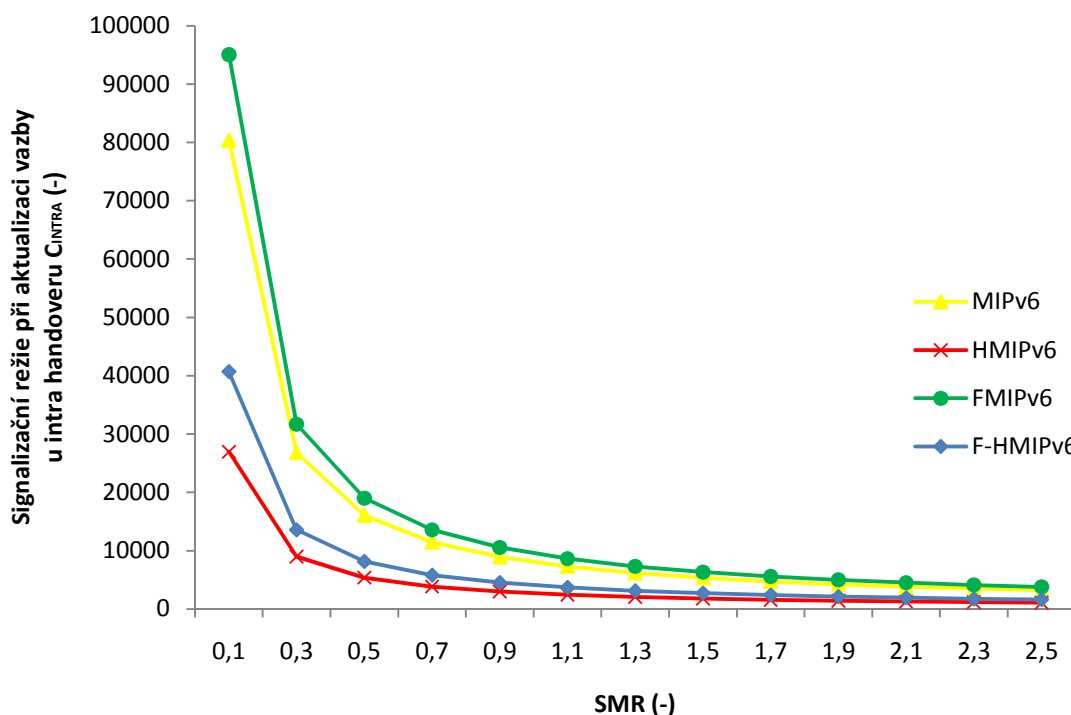
Obr. 5.2: Množství signalizační režie při aktualizaci vazby podle typu handoveru

Veškeré přednosti hierarchických protokolů naopak mizí v okamžiku, kdy mobilní uzel při svém předání současně přechází i mimo stávající oblast MAP (tj. inter handover). V těchto situacích je třeba, aby MN aktualizoval vazby svých nových dočasných adres LCoA a RCoA nejen u bodu MAP, ale také u domácího agenta HA a korespondujících uzlů CN (resp. zde jen vazbu pro adresu RCoA). Přednosti HMIPv6 i F-HMIPv6 se tím znatelně eliminují a jejich celkové vlastnosti se v tomto ohledu stávají dokonce ještě horšími než u zbylých protokolů MIPv6 a FMIPv6 (viz obr. 5.2).

Co se týče protokolu *Mobile IPv6 Fast Handover*, tak tento si při vzájemném srovnání s ostatními, co do režijní náročnosti, nevede nikterak dobře. Jeho hlavní priority jsou však zcela jiné – zejména jde o minimalizaci zpoždění a ztrátovosti paketů během handoveru, které jsou u něj „vykoupeny“ právě jeho vyšší signalizační režii.

Vliv SMR na signalizační režii při aktualizaci vazby C_{INTRA}

Následující graf (viz obr. 5.3) znázorňuje, jakým způsobem u jednotlivých protokolů *Mobile IPv6* dochází ke změnám hodnot signalizační režie při aktualizaci vazby u intra handoveru mobilního uzlu uvnitř MAP domény, vlivem měnícího se činitele *Session to Mobility Ratio* (SMR). Uvedený graf tak vlastně nepřímo popisuje závislost této signalizační režie na mobilitě uzlu MN.



Obr. 5.3: Vliv SMR na signalizační režii při aktualizaci vazby C_{INTRA}

Z grafu je zřejmé, že hodnoty režie C_{INTRA} mají klesající trend se zvyšujícím se SMR – jinými slovy to znamená, že při malém poměru SMR je míra mobility MN (μ) relativně větší než množství příchozích datových relací (λ_s), což přímo plyne z jeho definice (viz část 4.1.1). Mobilní uzel tedy v daných okamžicích velice často mění svoji aktuální síť a v důsledku těchto četných handoverů jsou úměrně tomu vysoké i režijní náklady spojené s jejich provedením – mj. také režie C_{INTRA} . Naopak, od chvíle, kdy se onen poměr mezi oběma členy obrací a λ_s začíná převyšovat mobilitu μ (tj. $SMR > 1$), což ve významu znamená, že doba strávená mobilním uzlem v jednotlivých podsítích se postupně prodlužuje (T_{SUB} se měnila v rozmezí 10 až 250 s – viz tab. 5.1), se tak četnost prováděných handoverů MN výrazně snižuje, tím tedy i množství zasílaných

signalizačních zpráv a hodnoty signalizační režie proto postupně dále klesají – přesněji se asymptoticky blíží k 0. Tého by bylo dosaženo v okamžiku, kdy by mobilní uzel prakticky neprováděl žádný přechod mimo svoji stávající podsít' a jeho mobilita by proto byla nulová.

V grafu na obrázku 5.3 je také opět možné vidět, zejména pak v jeho první polovině, kdy je míra mobility uzlu MN poměrně vysoká, podobné rozdíly v množství signalizační režie mezi hierarchickými protokoly a zbylou dvojicí MIPv6 a FMIPv6, jaké bylo možné zaznamenat už v předešlém grafu na obr. 5.2. Stejně jako v předchozím případě se i zde, u HMIPv6 a F-HMIPv6, projevují jejich zjevné přednosti a totiž snaha co nejvíce omezit režijní náklady spojené s vlastním vykonáváním handoveru. Proto také protokoly MIPv6 a FMIPv6, které mezi jednotlivými typy předání mobilního uzlu (tj. intra a inter) nerozlišují (též viz graf na obr. 5.2), vykazují výrazně vyšší hodnoty režie.

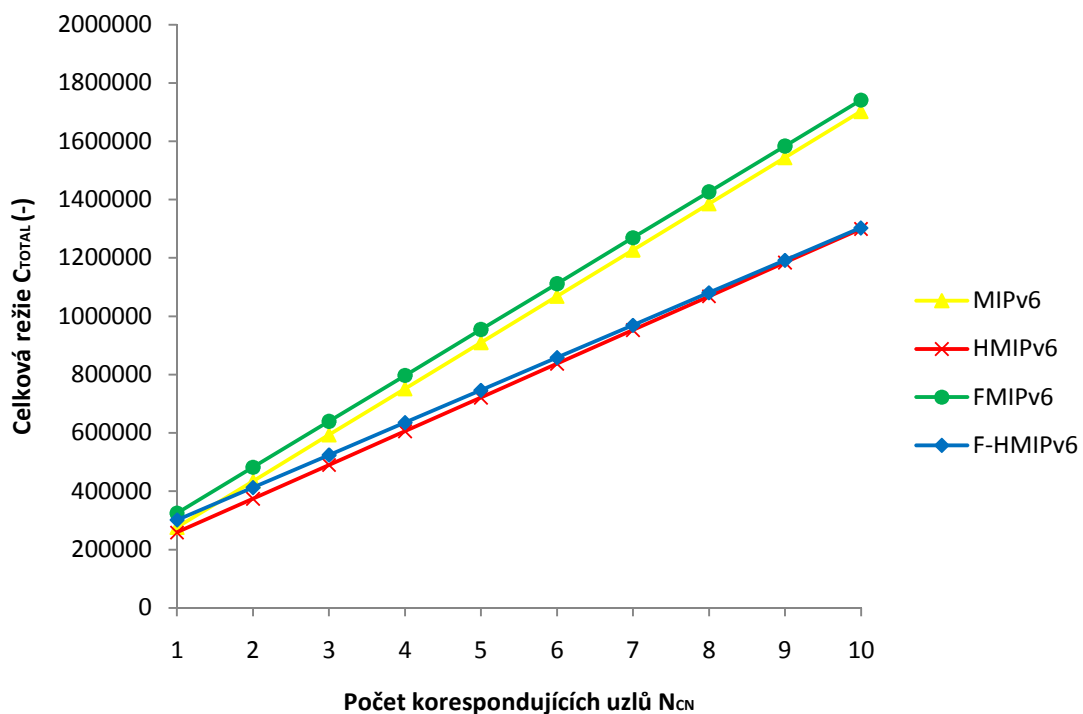
Celková režie při handoveru mobilního uzlu v závislosti na počtu CN

Graf na obr. 5.4 zobrazuje celkové množství režie při handoveru (C_{TOTAL}) v závislosti na počtu korespondujících uzlů, s nimiž MN během svého předání komunikuje. Jednotlivé průběhy grafu vypovídají o tom, že hodnota celkové režie C_{TOTAL} vzrůstá lineárně se zvyšujícím se počtem těchto uzlů CN a to pro všechny analyzované protokoly. Strmější průběh však znovu vykazují oba protokoly *Mobile IPv6* (MIPv6) a *Mobile IPv6 Fast Handover* (FMIPv6), u kterých tak dochází k celkově vyššímu nárůstu obou dílčích složek C_{TOTAL} – tj. signalizační režie při aktualizaci vazby C_{SIGNAL} a režie při doručování paketů C_{PACKET} (viz rovnice (4.1)).

Nejvýrazněji se pod tento fakt potom podepisuje signalizační režie C_{SIGNAL} , jenž je, dle rce. (4.2), tvořena součtem režijních nákladů při intra i inter handoveru MN. Zde zcela logicky nastává hlavní příčina, proč hierarchické HMIPv6 a F-HMIPv6 ve svých vlastnostech znovu překonávají zbylé dva protokoly. Ze samé podstaty provedení místní aktualizace vazby (tj. při intra handoveru) totiž jasně vyplývá, že tato nemá žádnou přímou návaznost na celkový počet korespondujících uzlů, s nimiž v době provedení předání probíhá komunikace. Místní aktualizaci vazby totiž mobilní uzel vykonává vždy pouze se svým stávajícím kotevním bodem MAP a tudíž ani hodnoty signalizační režie C_{INTRA} nutné k jejímu provedení se i přes rostoucí počet CN nijak nemění a zůstávají stále stejné. Toto už ovšem neplatí pro druhý možný typ přesunu MN – tj. inter handover mimo oblast jeho MAP domény. V tomto případě již vzniká přímá závislost

mezi režijními náklady C_{INTER} a množstvím korespondujících uzlů, protože mobilní uzel zde už musí o změně své dočasné adresy CoA (resp. RCoA) informovat jednotlivě každý z daných CN. Vezme-li se nyní v úvahu, že jak MIPv6 tak ani FMIPv6 principy hierarchické mobility nezahrnují a naopak musejí výše uvedený postup při „globální“ aktualizaci vazby se všemi CN uplatňovat vždy, pak zcela zákonitě musí docházet k tomu, že jejich celková režie roste rychleji než u HMIPv6 a F-HMIPv6.

V menší míře se na nárůstu celkové režie při handoveru MN (C_{TOTAL}) podílí také druhá složka – tj. režie C_{PACKET} , její konečný význam zde ale, v porovnání s popisovanou C_{SIGNAL} , není tak značný a bude lépe se na ni zaměřit samostatně v následující části (viz dále).



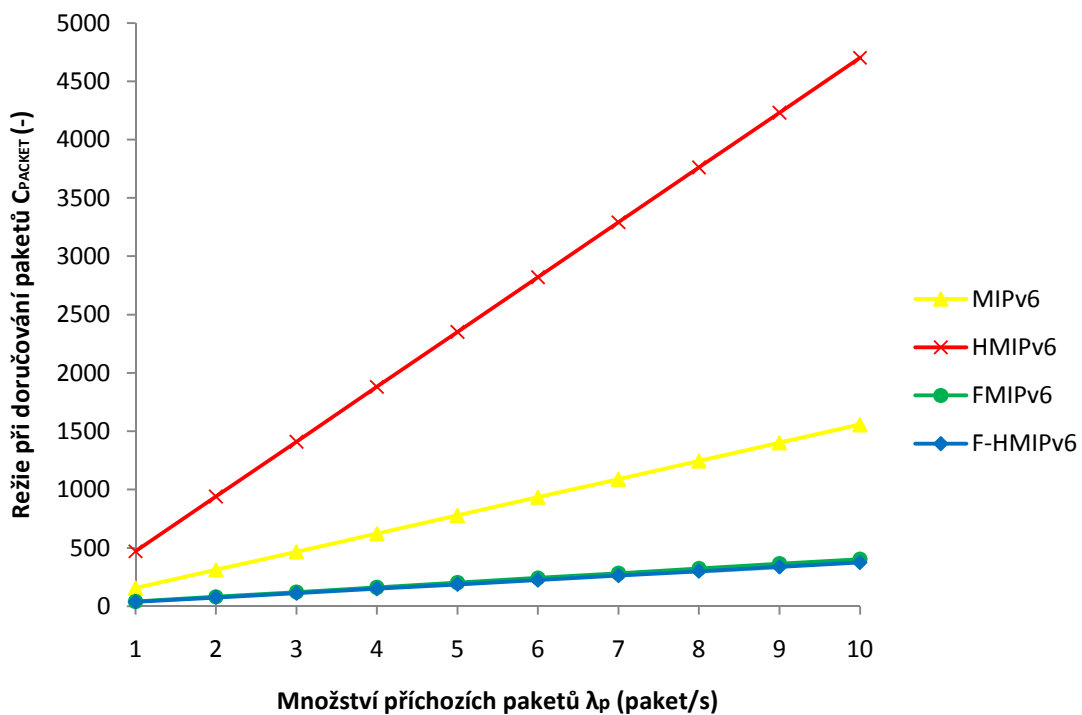
Obr. 5.4: Závislost celkové režie handoveru na počtu korespondujících uzlů CN

Vliv množství přichozích paketů na režii při jejich doručování MN (C_{PACKET})

Jak potvrzuje graf na obrázku 5.5, jako výrazně nejnáročnější, co se nákladů na doručování paketů (C_{PACKET}) týče, se jeví *Hierarchical Mobile IPv6*. To je z větší části zapříčiněno zejména tím, že pro přeposílání těchto datových paketů od CN mobilnímu uzlu je u tohoto protokolu pokaždé potřeba využít služeb kotevního bodu MAP, který tak na jednu stranu vnáší do mobility uzlu MN transparentnost, ale na druhou stranu

také tím, jak musí veškerá tato přicházející data vždy nejprve přijmout, zpracovat a až následně odeslat na aktuální adresu LCoA mobilního uzlu, způsobuje i nemalé zvýšení potřebných režijních nákladů na jejich doručení. Tento nežádoucí jev se pak ještě více znásobí ve chvíli, kdy ke směrování mezi MN a CN není využito optimalizace cesty a do komunikace vstupuje navíc domácí agent HA (tzv. trojúhelníkové směrování). HA potom vykonává ve své podstatě stejnou činnost jako výše popsany kotevní bod MAP, pouze s tím, že pakety pro MN přijímá od korespondujících uzlů, opatřuje je patřičnou regionální dočasnou adresou RCoA a až poté je přeposílá k MAP – režie při jejich doručování tím tedy nadále roste.

Dalším faktorem, který HMIPv6 v tomto ohledu řadí až na poslední místo je i to, že *Hierarchical Mobile IPv6*, na rozdíl od druhého z obou hierarchických protokolů – *Fast Handover for HMIPv6*, u kterého by jinak docházelo k naprosto stejné situaci, neuplatňuje techniku přeposílání paketů mobilnímu uzlu v době, kdy tento vykonává svůj handover. Namísto toho jsou veškerá jemu určená data v průběhu tohoto intervalu předání, vinou jejich nedoručení, ztracena. Také tento fakt je totiž při analýze zohledněn – konkrétně prvky δ a ϵ v rovnici (4.17), a výsledkem potom tedy je následující graf (viz obr. 5.5) a z něj vyplývající závěry.



Obr. 5.5: Vliv množství příchozích paketů na režii při jejich doručování

Z uvedeného grafu na obrázku 5.5 (výše) je zřejmé, že oba protokoly pro rychlý handover – tj. *Mobile IPv6 Fast Handover* i *Fast Handover for HMIPv6*, v tomto ohledu svými vlastnostmi překonávají běžné MIPv6 a HMIPv6 a jsou tedy i více efektivní a účinné při větším nárůstu příchozího provozu na MN (λ_p). To je, jak popisuje [1], činí vhodnějšími pro provoz (real-time) aplikací probíhajících v reálném čase.

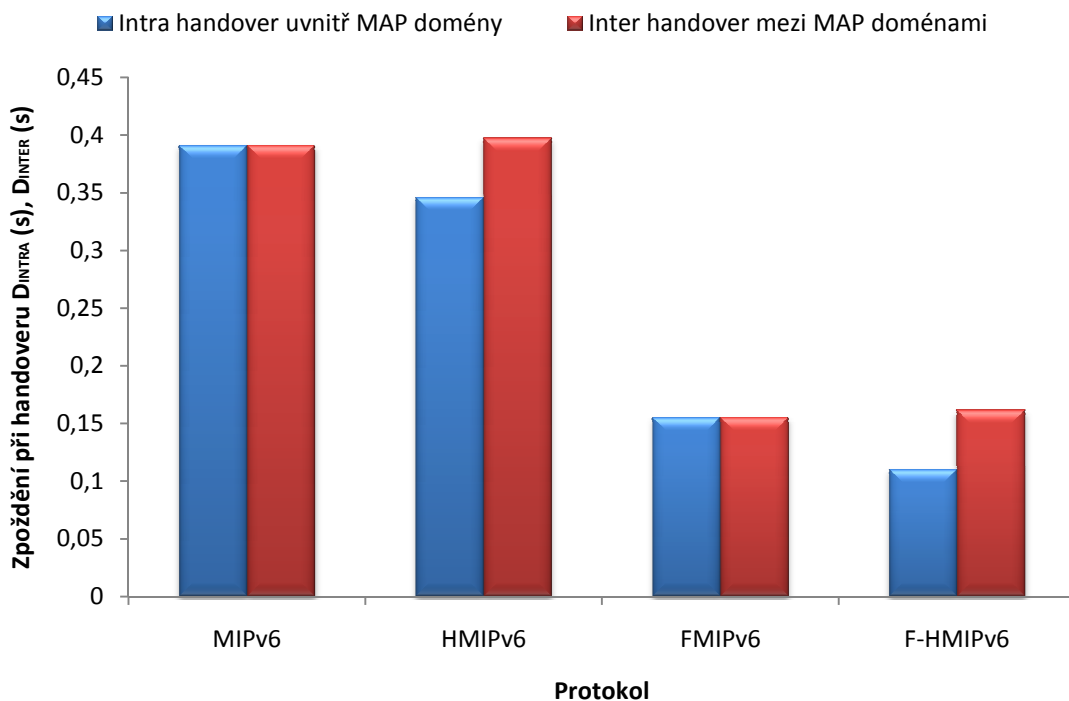
Nakonec ale i přesto, že protokol HMIPv6 z tohoto srovnání nevychází příliš dobře, tak pokud k němu budou připočteny také jeho dosažené výsledky při snižování množství signalizační reže, potom se, z hlediska celkových nákladů na provedení handoveru (tj. C_{TOTAL}), stále jeví (společně s F-HMIPv6) jako vůbec nejlepší (viz graf na obr. 5.4). Kompromis pak představuje běžný protokol *Mobile IPv6* (MIPv6), který sice neimplementuje žádné mechanismy přeposílání dat k MN během handoveru, ale také pro doručování paketů nevyužívá (s výjimkou HA při neoptimalizovaném směrování) ani žádného dalšího středového uzlu, jakým by byl např. kotevní bod MAP.

Srovnání zpoždění handoveru u jednotlivých protokolů

Níže zobrazený graf (viz obr. 5.6) nabízí hodnoty zpoždění při handoveru (resp. doby jeho trvání) u analyzovaných protokolů *Mobile IPv6*. Tyto hodnoty jsou zde uvedeny pro oba možné nastalé typy předání mobilního uzlu, a proto se nabízí nejen jejich vzájemné srovnání mezi protokoly jako takovými, ale je umožněno zde porovnat také rozdílné vlastnosti ve zpoždění při obou druzích intra a inter handoveru u každého protokolu jednotlivě.

Jak je vidět z grafu, zdaleka nejlepších výsledků dosahují oba protokoly s podporou rychlého předání (tj. FMIPv6 a F-HMIPv6), jejichž hodnoty zpoždění se pohybují kolem hranice 150 ms, resp. v případě intra handoveru u protokolu *Fast Handover for HMIPv6* potom dokonce ještě méně – přibližně 110 ms. Oba protokoly se tím snaží dostat svému hlavnímu účelu a splnit tak požadavky na provoz aplikací citlivých na zpoždění, jakými je například VoIP, u které je právě tato hodnota (150 ms) považována za hraniční pro její fungování. Hlavní důvod, proč zbylé dva MIPv6 a HMIPv6 za *Mobile IPv6 Fast Handover* a *Fast Handover for HMIPv6* až o tolik zaostávají je ten, že mechanismy rychlého handoveru znatelně zkracují zejména interval pro znovuoobnovení IP konektivity mobilního uzlu – neboli tedy prodlevu při konfiguraci a ověření duplicity (DAD) nové dočasné adresy MN (to se u nich děje ještě před samotným započítáním předání). F-HMIPv6 při intra handoveru k tomuto „přidává“

navíc ještě kratší interval provedení místní aktualizace vazby a výsledkem potom je jeho vůbec nejkratší časová prodleva ze všech analyzovaných protokolů. Naopak, při přesunu mobilního uzlu mezi MAP doménami (tj. inter handoveru), vinou nutné dvojí aktualizace vazby – místní u kotevního bodu a standardní s uzly HA a CN, jeho zpoždění, v porovnání s FMIPv6, mírně narůstá. Stejný trend, který byl právě popsán u FMIPv6 a F-HMIPv6, pak lze pozorovat také mezi protokoly *Mobile IPv6* a *Hierarchical Mobile IPv6*, kde HMIPv6, díky implementované podpoře hierarchické mobility, dosahuje lepších hodnot během intra handoveru a naopak za MIPv6 zaostává v okamžiku inter handoveru MN.



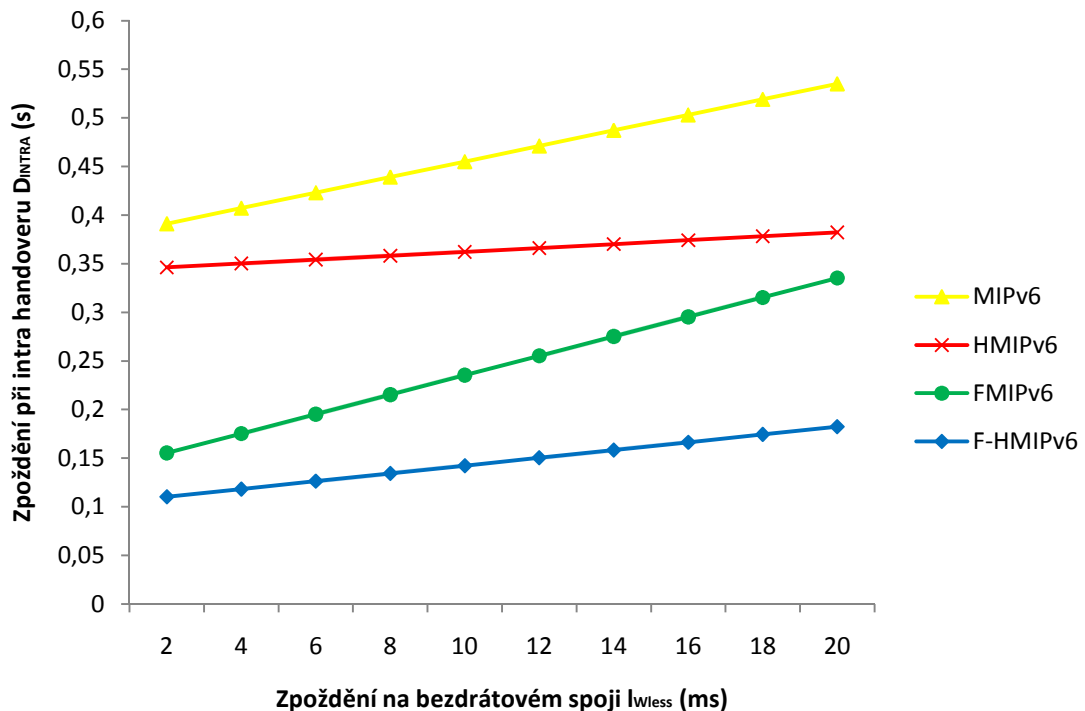
Obr. 5.6: Zpoždění při handoveru u jednotlivých protokolů

Za povšimnutí stojí také fakt, že při analýze bylo uvažováno se zpožděním při předání MN na spojové vrstvě (L2) s hodnotou 100 ms (viz tab. 5.1). Jejím prostým odečtením od celkové doby trvání rychlého handoveru u protokolů FMIPv6 a F-HMIPv6 (tj. vzato 150 ms) je možné určit, že vlastní prodleva způsobená mechanismy L3 handoveru zde tedy netvoří ani polovinu z celého intervalu zpoždění. Pokud by proto došlo k výraznému zvýšení prodlevy při předání MN na vrstvě L2 – podle zdrojů [21] a [23] se tato pohybuje v rozmezí 100 až 300 ms, pak by ani použité funkce

protokolů *Mobile IPv6 Fast Handover* a *Fast Handover for HMIPv6* nebyly schopny zaručit dodržení všech podmínek pro provoz interaktivních aplikací citlivých na zpoždění. Toto je však otázka, kterou je třeba řešit na úrovni druhé (spojové) vrstvy síťové architektury a přímo se tedy nevztahuje k probírané problematice zajištění IP mobility.

Vliv zpoždění bezdrátového spoje na celkové zpoždění při intra handoveru

V grafu na obrázku 5.7 je zachycen rostoucí trend zpoždění při intra handoveru (D_{INTRA}) u jednotlivých protokolů *Mobile IPv6*, k němuž dochází vlivem zvyšujícího se zpoždění na bezdrátovém spoji (rozhraní) mezi mobilním uzlem a jeho stávajícím implicitním směrovačem ARx.



Obr. 5.7: Vliv zpoždění bezdrátového spoje na celkové zpoždění intra handoveru

Je vidět, že D_{INTRA} se u všech protokolů zvyšuje úměrně s touto latencí bezdrátového spoje, když nejstřednější nárůst vykazují, jako již po několikáté – v případech intra handoveru MN, protokoly MIPv6 a FMIPv6. Jejich zvýšenou citlivost na tyto změny ve zpoždění l_{Wless} lze odůvodnit poměrně větším množstvím signalizace, kterou je nutné u nich, během procesu standardní aktualizace vazby, tímto spojením vždy

přenášet. V porovnání s hierarchickými HMIPv6 a F-HMIPv6 (při jejich místní aktualizaci vazby) se pak jedná především o signalizaci spojenou s vykonáním procedury testu zpětné směrovatelnosti (RR), ale nejen ji.

Nejlépe si potom, podobně jako při předešlém srovnání (viz graf na obr. 5.6), vede *Fast Handover for HMIPv6*, který už tak velmi malé zpoždění, umožněné principy rychlého handoveru dle FMIPv6, navíc kombinuje i s výše zmíněnými přednostmi hierarchické mobility (podle protokolu HMIPv6).

6. ZÁVĚR

Diplomová práce se svým obsahem zaměřuje na analýzu a prozkoumání možností podpory mobilních zařízení v podání nové nastupující generace síťového protokolu IPv6. Dnešní rychlý rozvoj Internetu a jeho služeb, společně s enormním nárůstem počtu uživatelů bezdrátových technologií, má totiž za následek silnou konvergenci tíhnoucí právě směrem k nasazení IPv6, u něhož se očekává, že by měl představovat „páteř“ fungování všech (nebo alespoň většiny) budoucích bezdrátových, ale i pevných, komunikačních sítí. Tato práce se tedy i proto věnuje konkrétně problematice a jednotlivým funkcím protokolu *Mobile IPv6* (MIPv6), který je přímou součástí uvedené specifikace IPv6 a je definován dokumentem RFC 3775. Mobilita začleněná přímo v jádru tohoto protokolu by totiž měla hrát roli jednoho z nejvýznamnějších činitelů při jeho prosazování v praxi, kdy se již nelze opírat pouze o argumentaci v podobě výrazného navýšení adresního prostoru.

Společně se samotným návrhem MIPv6 postupně došlo i k vývoji a vzniku celé řady jeho dalších rozšíření (resp. protokolů), jejichž hlavním úkolem je zlepšit některé z jím poskytovaných vlastností a funkcí, jako jsou například doba zpoždění a ztrátovost paketů během handoveru, či snížení celkového objemu signalizace nutné k jeho provedení. Několika těmito novými rozšiřujícími schématy předání mobilního uzlu – přesněji *Hierarchical Mobile IPv6* (HMIPv6), *Mobile IPv6 Fast Handover* (FMIPv6) a *Fast Handover for HMIPv6* (F-HMIPv6), se potom práce také více zabývá a to v návaznosti na stanovení jejich výkonnosti s ohledem na měnící se hodnoty různých parametrů souvisejících s mobilitou a provozem v síti, což je umožněno díky provedenému návrhu metody analýzy této skupiny protokolů *Mobile IPv6*. Cílem uvedené analýzy přitom není označit zde jeden z těchto protokolů jako nejlepší, ale spíše snaha o to poukázat na přednosti a naopak odhalit možné nedostatky jednotlivých z nich, které jsou ovlivněny právě danými podmínkami v síti.

Na základě vyhodnocení dosažených výsledků se jako velmi perspektivní jeví F-HMIPv6, který v sobě sdružuje vlastnosti obou dalších srovnávaných protokolů HMIPv6 a FMIPv6 a co do zpoždění a s ním spojené možné ztrátovosti paketů při handoveru, překonává všechny zbývající protokoly (tj. MIPv6, HMIPv6 i FMIPv6). Nicméně, jeho lepší výkonnost je u něj, v určité míře, provázena poměrně vyšší implementační náročností, která se projevuje, mimo jiné, i větším množstvím signalizační režie, v porovnání například s *Hierarchical Mobile IPv6*.

Navíc, jak popisuje [1], je velice složité předpovědět, který z protokolů *Mobile IPv6* bude nakonec tím dominantním a nejvíce využívaným typem, protože každý z nich je charakteristický svými určitými vlastnostmi, které většinou korespondují s hlavním účelem jeho vzniku. Do konečného rozhodování o nasazení konkrétního protokolu zajišťujícího IP mobilitu promlouvají v neposlední řadě také náklady spojené s jeho zavedením a následným provozováním, protože zdaleka ne vždy, je dnes tím jediným kritériem právě jen otázka výkonnosti – ve většině případů se tedy bude jednat spíše o kompromis mezi všemi výše uvedenými aspekty.

LITERATURA

- [1] MAKAYA, Christian, PIERRE, Samuel. An Analytical Framework for Performance Evaluation of IPv6-Based Mobility Management Protocols. *IEEE Transactions on Wireless Communications* [online]. 2008, vol. 7, no. 3 [cit. 2009-11-24], s. 972-983. Dostupný z WWW: <http://www.ieeeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4472015>. ISSN 1536-1276.
- [2] WU, Xinyi, NIE, Gang. Comparison of different mobility management schemes for reducing handover latency in Mobile IPv6. In *2009 International Conference on Industrial Mechatronics and Automation*. Chengdu, 2009. s. 256-259. Dostupný z WWW: <http://www.ieeeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?tp=&arnumber=5156609&isnumber=5156538>. ISBN 978-1-4244-38.
- [3] SATRAPA, Pavel. *IPv6 : Internetový protokol IPv6*. 2. vyd. Praha, c2008. 357 s. CZ.NIC. Dostupný z WWW: <<http://knihy.nic.cz/ipv6/>>. ISBN 978-80-904248-0-7.
- [4] PUŽMANOVÁ, Rita. Mobilní IPv6 v sítích WiMAX. *WiMAX.cz : vše o bezdrátové technologii WiMAX* [online]. 2008 [cit. 2009-11-24]. Dostupný z WWW: <http://www.wimax.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=229&Itemid=33>.
- [5] KOODLI, Rajeev S., PERKINS, Charles E. *Mobile Inter-networking with IPv6 : Concepts, Principles, and Practices*. Hoboken (New Jersey): Wiley-Interscience, c2007. 365 s. ISBN 978-0-471-68165-6.
- [6] JOHNSON, D. B., PERKINS, C. E., ARKKO, J. *Mobility support in IPv6*. The Internet Engineering Task Force RFC 3775, June 2004.
- [7] SOLIMAN, H., et al. *Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management (HMIPv6)*. The Internet Engineering Task Force RFC 4140, August 2005.
- [8] KOODLI, R. *Mobile IPv6 Fast Handovers*. The Internet Engineering Task Force RFC 5568, July 2009.
- [9] HASEEB, Shariq, ISMAIL, Ahmad Faris. Handoff latency analysis of mobile IPv6 protocol variations. *Computer Communications* [online]. 2007, vol. 30, is. 4 [cit. 2009-11-24], s. 849-855. Dostupný z WWW: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1225001>>. ISSN 0140-3664 .
- [10] GRECH, Sandro, PONCELA, Javier, SERNA, Pedro. An Analysis of Mobile IPv6 Signaling Load in Next Generation Mobile Networks. *IFIP International*

- Federation for Information Processing* [online]. 2005, vol. 162 [cit. 2009-11-24], s. 71-82. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/f147875q36u22u16/>>. ISSN 1861-2288.
- [11] GUAN, Jianfeng, et al. Implementation and analysis of proxy MIPv6. *Wireless Communications and Mobile Computing* [online]. 2009, vol. 9999, no. 9999 [cit. 2009-11-24]. Dostupný z WWW: <<http://www3.interscience.wiley.com/journal/122600749/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>>.
- [12] GUAN, Jianfeng, et al. Design and implementation of light-weight mobile multicast for fast MIPv6. *Computer Communications* [online]. 2009, vol. 32, is. 3 [cit. 2009-11-24], s. 552-559. Dostupný z WWW: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1502915>>. ISSN 0140-3664.
- [13] JUNG, HeeYoung, et al. A Scheme for Supporting Fast Handover in Hierarchical Mobile IPv6 Networks. *ETRI Journal* [online]. 2005, vol. 27, no. 6 [cit. 2009-11-24], s. 798-801. Dostupný z WWW: <<http://etrij.etri.re.kr/Cyber/serverlet/BrowseAbstract?vol=27&num=6&pg=798>>.
- [14] ZHANG, Li Jun, PIERRE, Samuel. Evaluating the Performance of Fast Handover for Hierarchical MIPv6 in Cellular Networks. *Journal of Networks* [online]. 2008, vol. 3, no. 6 [cit. 2009-11-24], s. 36-43. Dostupný z WWW: <<http://www.academypublisher.com/jnw/vol03/no06/jnw03063643.pdf>>. ISSN 1796-2056.
- [15] PACK, Sangheon; CHOI, Yanghee. Performance Analysis of Fast Handover in Mobile IPv6 Networks. *Lecture Notes in Computer Science : Personal Wireless Communications*. September 2003, vol. 2003, no. 2775, s. 679-691. Dostupný také z WWW: <http://mmlab.snu.ac.kr/publications/docs/pwc2003_shpack.pdf>. ISSN 1611-3349.
- [16] PACK, Sangheon; CHOI, Yanghee. A Study on Performance of Hierarchical Mobile IPv6 in IP-Based Cellular Networks. *IEICE Trans. Commun.* March 2004, vol. E87-B, no. 3, s. 462-469. Dostupný také z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.4.9978&rep=rep1&type=pdf>>.
- [17] LEE, Kyunghye; MUN, Youngsong. An Efficient Macro Mobility Scheme Supporting Fast Handover in Hierarchical Mobile IPv6. *Lecture Notes in Computer Science : Computational Science and Its Applications – ICCSA 2005*.

- May 2005, vol. 2005, no. 3480, s. 408-417. Dostupný také z WWW: <www.springerlink.com/index/PDCHMYPE6VEFC5U4.pdf>. ISSN 1611-3349.
- [18] REAZ, Abu S, et al. Signalling cost analysis of SINEMO: seamless end-to-end network mobility. *Mobility In The Evolving Internet Architecture : Proceedings of first ACM/IEEE international workshop on Mobility in the evolving internet architecture*. 2006, s. 37-42. Dostupný také z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.76.2056&rep=rep1&type=pdf>>.
- [19] KOODLI, Rajeev; PERKINS, Charles E. Fast Handovers and Context Transfers in Mobile Networks. *ACM Computer Communication Review* [online]. October 2001, vol. 31, no. 5, [cit. 2010-04-23]. Dostupný z WWW: <<http://ccr.sigcomm.org/archive/2001/oct01/ccr-200109-koodli.pdf>>. ISSN 0146-4833.
- [20] PACK, Sangheon; KWON, Taekyoung; CHOI, Yanghee. Adaptive Local Route Optimization in Hierarchical Mobile IPv6 Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* [online]. August 2007, vol. 6, no. 8, [cit. 2010-04-23]. Dostupný z WWW: <http://mmlab.snu.ac.kr/publications/docs/ALRO_WCNC.pdf>. ISSN 1536-1233.
- [21] AN, Yoon Young, et al. Reduction of Handover Latency Using MIH Services in MIPv6. *AINA 2006* [online]. March 2006, vol. 02, [cit. 2010-04-23]. Dostupný z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=38D11FF573558C28D78FFD0CF687EA65?doi=10.1.1.127.136&rep=rep1&type=pdf>>. ISSN 1550-445X.
- [22] JEONG, Jongpil; CHUNG, Min Young; CHOO, Hyunseung. Low Latency and Cost Effective Handoff Based on PBF Scheme in Hierarchical Mobile IPv6. *High Performance Computing and Communications : Lecture Notes in Computer Science*. 2006, vol. 4208/2006, s. 700-709. Dostupný také z WWW: <www.springerlink.com/index/D4554077W9438153.pdf>. ISSN 0302-9743.
- [23] GWON, Youngjune; KEMPF, James; YEGIN, Alper. *Scalability and Robustness Analysis of IPv6 Mobility Protocols* [online]. 2008 [cit. 2010-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.docomolabs-usa.com/pdf/PS2003-124.pdf>>.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

BW_{Wired}	přenosová kapacita drátového (kabelového) spoje
BW_{Wless}	přenosová kapacita bezdrátového spoje (rozhraní)
C_{BU}	režie při registraci dočasné adresy CoA u domácího agenta a korespondujících uzlů
$C_{\text{FORWARDING}}$	režie při přenosu a zpracování datových paketů přeposílaných k MN
C_{INTER}	signalizační režie při aktualizaci vazby pro inter handover mezi MAP doménami
C_{INTRA}	signalizační režie při aktualizaci vazby pro intra handover uvnitř MAP domény
C_{LOSS}	režie při přenosu a zpracování datových paketů, které nemohou být MN doručeny a jsou ztraceny
C_{nRO}	režie přenosu datových paketů mezi uzly MN a CN při využití trojúhelníkového způsobu směřování pomocí domácího agenta HA
C_{PACKET}	režie při doručování paketů mobilnímu uzlu (MN)
C_{RO}	režie přenosu datových paketů mezi uzly MN a CN při využití optimalizace cesty
C_{RR}	režie v důsledku provádění testu zpětné směrovatelnosti (RR)
C_{SIGNAL}	průměrná signalizační režie při aktualizaci vazby
C_{TOTAL}	celková režie handoveru
$C_{X,Y}$	režie při přenosu signalizační zprávy/paketu mezi dvěma uzly v síti X a Y
D_{INTER}	celkové zpoždění při inter handoveru MN
D_{INTRA}	celkové zpoždění při intra handoveru MN
D_{Router}	zpoždění na jednotlivých směrovačích v síti – vlivem zpracování a směřování paketů
$d_{X,Y}$	vzdálenost (počet hopů) mezi dvojicí síťových uzlů X a Y
δ	váhový činitel popisující (zvýrazňující) efekt přeposílání datových paketů k MN
$E(N_{\text{INTER}})$	průměrný počet přístupových sítí (v rozdílných MAP doménách), mezi kterými MN provádí (inter) handover mezi MAP doménami
$E(N_{\text{INTRA}})$	průměrný počet podsítí, mezi nimiž MN provádí (intra) handover uvnitř MAP domény

ϵ	váhový činitel popisující (zvýrazňující) děj, při kterém nemohou být datové pakety MN doručeny a jsou tak zahazovány
H_f	signalizační režie pro případ, kdy ke skutečnému provedení handoveru na síťové vrstvě (L3) nedojde
H_s	signalizační režie při uskutečnění L3 handoveru
κ	režie pro přenos jedné jednotky (signalizační zpráva/paket) po bezdrátovém spoji (rozhraní)
l_{Wired}	zpoždění na drátovém spoji (lince)
l_{Wireless}	zpoždění na bezdrátovém spoji (rozhraní)
λ_p	míra (množství) příchozích datových paketů pro MN
λ_s	míra (množství) příchozích datových (komunikačních) relací pro MN – resp. počet žádostí o zahájení spojení od CN uzlů za 1 sekundu
M	počet jednotlivých podsítí v rámci jediné MAP domény
μ	mobilita MN (míra s jakou mobilní uzel průměrně přechází mezi jednotlivými podsítěmi)
μ_{INTER}	mobilita, při které MN se samotným handoverem do jiné sítě provádí i přechod mezi MAP doménami
μ_{INTRA}	mobilita, s níž se MN přesunuje mezi jednotlivými podsítěmi, ale nepřekročí přitom oblast stávající MAP domény
N_{CN}	počet korespondujících uzlů CN (s platným záznamem v cache vazeb pro daný MN) s nimiž mobilní uzel komunikuje
ω	váhový činitel, který poměrově vyjadřuje, kdy je/není při přenosu datových paketů mezi uzly MN a CN využito optimalizace cesty
P_s	pravděpodobnost správné predikce vykonání L3 handoveru
PC_X	režie při zpracování přijaté signalizační zprávy (paketu) na uzlu X
S	průměrná velikost signalizační zprávy (řídícího paketu)
τ	režie pro přenos jedné jednotky (signalizační zpráva/paket) po drátovém (kabelovém) spoji
T_{SUB}	čas (doba), po který MN setrvá v dané podsíti před provedením dalšího přesunu (resp. handoveru)
t_{BU}	zpoždění při doručení zprávy <i>Aktualizace vazby</i> (BU) domácímu agentovi HA a korespondujícím uzlům CN
t_{DAD}	zpoždění vlivem provádění procedury detekce duplicitních adres DAD

t_{FastIP}	zpoždění při znovuoobnovení IP konektivity MN u rychlého handoveru podle protokolu FMIPv6, resp. F-HMIPv6
t_{IntraBU}	zpoždění při doručení zprávy <i>Místní aktualizace vazby</i> (LBU) kotevnímu bodu MAP
t_{IntraNR}	zpoždění před přijetím zprávy <i>Místní potvrzení vazby</i> (LBAck) od kotevního bodu MAP
t_{IntraU}	zpoždění v důsledku provádění místní aktualizace vazby
t_{IP}	zpoždění při znovuoobnovení IP konektivity MN
t_{L2}	zpoždění při předání MN na spojové vrstvě (L2)
t_{MN}	doba potřebná k sestavení tunelu pro přeposílání paketů mezi kotevním bodem MAP a novým přístupovým směrovačem NAR
t_{NR}	zpoždění před přijetím zprávy o potvrzení vazby (BAck) od uzlu CN a současně příchodu prvních paketů na novou CoA (<i>New Receive</i> – NR)
t_{PN}	doba potřebná k sestavení tunelu pro přeposílání paketů mezi směrovači PAR a NAR
t_{RD}	zpoždění při nalezení nového implicitního přístupového směrovače NAR
t_{RR}	zpoždění při vykonávání procedury testu zpětné směrovatelnosti RR
t_{Trigg}	interval od začátku <i>L2 Trigger</i> (tj. příchodu prvních informací o blížícím se handoveru) po zahájení předání MN na spojové vrstvě (L2)
t_{U}	zpoždění v důsledku provádění standardní aktualizace vazby
$t_{\text{X,Y}}$	zpoždění při přenosu signační zprávy velikosti <i>S</i> mezi dvojicí síťových uzlů <i>X</i> a <i>Y</i>

AH	A uthentication H eader
AN	A ccess N etwork
AP	A ccess P oint
AR	A ccess R outer
ARP	A ddress R esolution P rotocol
BAck	B inding A cknowledgement
BSSID	B asic S ervice Set I Dentifier
BTS	B ase T ransceiver S tation
BU	B inding U ppdate
CMR	C all to M obility R atio

CN	C orrespondent N ode
CoA	C are o f A ddress
CoT	C are- o f T est
CoTI	C are- o f T est I nit
DAD	D uplicate A ddress D etection
DHCPv6	D ynamic H ost C onfiguration P rotocol v ersion 6
ESP	E ncapsulating S ecurity P ayload
FA	F oreign A gent
FBAck	F ast B inding A cknowledgement
FBU	F ast B inding U ppdate
F-HMIPv6	F ast Handover for H MIPv6
FMIPv6	M obile I Pv6 F ast Handover
FNA	F ast N eighbor A dvertisement
HA	H ome A gent
HACK	H andover A cknowledgement
HI	H andover I nitiate
HMIPv6	H ierarchical M obile I Pv6
HoT	H ome T est
HoTI	H ome T est I nit
ICMP	I nternet C ontrol M essage P rotocol
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers
IP	I nternet P rotocol
IPsec	I nternet P rotocol s ecurity
LBAck	L ocal B inding A cknowledgement
LBU	L ocal B inding U ppdate
LCoA	O n-link C are- o f A ddress
L2(3)	L ayer 2 (L ayer 3)
MAC	M edia A ccess C ontrol
MAP	M obility A ncor P oint
MBWA	M obile B roadband W ireless A ccess
MIPv6(v4)	M obile I Pv6 (M obile I Pv4)
MN	M obile N ode
NA	N eighbor A dvertisement
NAR	N ew A ccess R outer

NCoA	New Care-of Address
NDP	Neighbor Discovery Protocol
NGWN	Next-generation Wireless Networks
NS	Neighbor Solicitation
PAR	Previous Access Router
PDA	Personal Digital Assistant
PrRtAdv	Proxy Router Advertisement
QoS	Quality of Service
RA	Router Advertisement
RCoA	Regional Care-of Address
RFC	Request for Comments
RR	Return Routability
RS	Router Solicitation
RtSolPr	Router Solicitation for Proxy Advertisement
SMR	Session to Mobility Ratio
VoIP	Voice over Internet Protocol
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network