

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

## VÝUKOVÁ POMŮCKA DEMONSTRUJÍCÍ PRINCIPY WIMAX SÍTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

DOMINIK BLÁHA

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

# **VÝUKOVÁ POMŮCKA DEMONSTRUJÍCÍ PRINCIPY WIMAX SÍTÍ**

WIMAX NETWORK EDUCATION TOOL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**DOMINIK BLÁHA**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. FRANTIŠEK ŠČUGLÍK, Ph.D.**

BRNO 2012

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce přibližuje základní principy technologie WiMAX a tedy i standardu IEEE 802.16. Jsou zde popsány základní techniky specifikované v tomto standardu na fyzické a linkové vrstvě ISO/OSI síťového modelu. Jedna kapitola je zde také věnována srovnání technologií LTE a WiMAX 1.5. Jiná kapitola přibližuje vývoj WiMAXu v USA a Rusku a situaci WiMAXu v ČR. K práci je přiložena animace vytvořená pro prostředí Adobe Flash, která tuto technologii demonstruje.

## **Abstract**

The scope of this thesis are basic principles of WiMAX technology and also the IEEE 802.16 standard. It describes essential techniques specified in this standard on physical and also on link layer of ISO/OSI network model. There is also one chapter that gives insight into comparison between LTE and WiMAX 1.5. Another chapter introduces us the situation of WiMAX in the USA, in the Russia and also in the Czech Republic. There is an Flash animation attached that depicts these principles.

## **Klíčová slova**

WiMAX, WiMAX Forum, IEEE, 802.16, Flash, výuková pomůcka, animace

## **Keywords**

WiMAX, WiMAX Forum, IEEE, 802.16, Flash, education tool, animation

## **Citace**

Dominik Bláha: Výuková pomůcka demonstrující principy WiMAX sítí, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2012

# Výuková pomůcka demonstrující principy WiMAX sítí

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Ščuglíka Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Dominik Bláha

14. května 2012

## Poděkování

Děkuji panu Ing. Františku Ščuglíkovi, Ph.D. za cenné rady během tvorby této práce. Dále děkuji svým nejbližším za podporu během tvorby této práce.

© Dominik Bláha, 2012.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Přehled širokopásmového bezdrátového přístupu</b>	<b>4</b>
2.1	2G	4
2.2	3G	4
2.3	4G	5
2.4	Wi-Fi	5
2.5	WiMAX	5
<b>3</b>	<b>Evoluční cesta standardu</b>	<b>6</b>
3.1	IEEE 802.16-2001	6
3.2	IEEE 802.16d-2004	6
3.3	IEEE 802.16e-2005	7
3.4	IEEE 802.16m-2011 (WiMAX 2)	7
3.5	Shrnutí vlastností technologie WiMAX	7
<b>4</b>	<b>Fyzická vrstva standardu IEEE 802.16</b>	<b>8</b>
4.1	SC — Single Carrier	9
4.2	SCa — Single Carrier na nižších frekvencích	10
4.3	OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplex	10
4.4	OFDMA — Orthogonal Frequency Division Multiple Access	12
4.5	SOFDMA — Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access	12
4.6	PUSC, FUSC a AMC	12
4.6.1	Downlink PUSC	13
4.6.2	Uplink PUSC	13
4.6.3	Downlink FUSC	13
4.6.4	AMC	14
<b>5</b>	<b>MAC vrstva standardu IEEE 802.16</b>	<b>15</b>
5.1	Konvergenční podvrstva (Convergency Sublayer)	16
5.2	Typy spojení	17
5.3	Automatic Repeat Request	17
5.4	Soupeření o vysílání (Contention resolution)	18
5.5	Připojení SS k síti resp. BS	18
5.5.1	Vyhledání a synchronizace s downlink kanálem	18
5.5.2	Získání downlink parametrů BS	18
5.5.3	Získání uplink parametrů BS	19
5.5.4	Výběr vhodné fyzické vrstvy (Ranging)	19

5.5.5	Dohodnutí dalších parametrů přenosu . . . . .	19
5.5.6	Autentizace stanice, tvorba klíčů . . . . .	19
5.5.7	Registrování stanice . . . . .	19
5.5.8	Inicializace IP . . . . .	19
5.6	Formáty PDU . . . . .	20
5.7	QoS ve standardu 802.16 . . . . .	21
5.8	Řídící zprávy . . . . .	23
5.9	Handover . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Bezpečnostní podvrstva standardu 802.16</b>	<b>25</b>
6.1	PKMv1 . . . . .	26
6.2	PKMv2 . . . . .	26
6.3	Šifrování datových paketů . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Pokročilé anténní techniky ve standardu 802.16</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>Srovnání technologií WiMAX a LTE</b>	<b>29</b>
<b>9</b>	<b>Budoucnost</b>	<b>31</b>
9.1	WiMAX v ČR . . . . .	31
<b>10</b>	<b>Problematika tvorby výukové pomůcky</b>	<b>33</b>
10.1	Kdo bude danou pomůcku využívat? . . . . .	33
10.2	Co chci uživateli pomůcky předat? . . . . .	33
10.3	Jak udělat pomůcku zajímavou? . . . . .	34
10.4	Jak dávkovat uživatelům znalosti? . . . . .	34
10.5	Jakou pomůcku vybrat? . . . . .	34
<b>11</b>	<b>Popis implementované výukové pomůcky</b>	<b>35</b>
11.1	Popis GUI aplikace . . . . .	36
<b>12</b>	<b>Závěr</b>	<b>38</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Technologie WiMAX, postavená na standardu IEEE 802.16, je v současnosti jednou z možností, jak poskytovat tzv. 3G a nově také 4G širokopásmový přístup k internetu. Tato práce rozebírá základní principy standardu 802.16 a dále také samotné technologie WiMAX. Zároveň slouží jako doplněk k výukové pomůcce, která je hlavním produktem samotné bakalářské práce.

K tomu je nutné jednak nastudovat standard IEEE 802.16 a jednak zvolit vhodný způsob zprostředkování nabitých znalostí uživateli této výukové pomůcky. V této práci se budu zabývat pouze topologií Point to Multipoint, protože principy sítě WiMAX lze na ní nejsrozumitelněji vysvětlit.

V první části práce je krátce shrnuta situace na poli 3G a 4G technologií. Následuje shrnutí vývoje standardu IEEE 802.16 a způsob certifikace produktů implementujících tento standard. Také určení klíčových vlastností této technologie.

V další části práce je podrobněji popsáno, jak vlastně technologie WiMAX funguje, dále pak zhodnocení jejích vyhlídek do budoucna a také současná situace technologie WiMAX v České republice. Zde popsané principy vychází z dokumentu shrnujícího standard 802.16 ve verzi e, viz [14, 13]. Pokud je tomu v některé části bakalářské práce jinak, je to uvedeno dle obvyklých pravidel citace.

V poslední části je potom shrnuto, jaké možné výukové pomůcky je možné využít. Dále zde uvádím proč jsem si zvolil zrovna tvorbu animace a jaká pozitiva tato možnost přináší.

K práci je přiložena aplikace spustitelná v prostředí Adobe Flash Player.

## Kapitola 2

# Přehled širokopásmového bezdrátového přístupu

Pokud se máme bavit o technologiích širokopásmového bezdrátového přístupu, je nutné si tyto nejdříve rozdělit. Konkrétně tedy na mobilní technologie a technologie zajišťující rozšíření připojení v určité oblasti, takzvané „last mile“ řešení. Do první kategorie patří GPRS, EDGE, CDMA, UMTS, UMTS HSPA a další. Do druhé kategorie patří Wi-Fi a také mnou dále popsany WiMAX, který ovšem není tak snadné zařadit, protože sice začal jako last mile řešení, ale od verze standardu 802.16e podporuje mobilitu a umožňuje spolupráci s jinými technologiemi a výměnu zákazníků mezi jednotlivými poskytovateli.

Tato kapitola čerpá z této publikace [10].

### 2.1 2G

Do této kategorie lze zařadit první globálně nasazené technologie podporující mobilní cestování uživatelů. Každý jistě zná zkratku GSM, čili Global System for Mobile Communication. Z GSM se později vyvinul také velice známý a u nás dodnes využívaný standard, EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). EDGE se někdy nazývá také 2,5G, protože je to další evoluce GSM a umožňuje tedy vyšší přenosové rychlosti, ale to je spíše marketingové pojmenování.

### 2.2 3G

3G je souhrnné pojmenování pro technologie splňující standard IMT-2000. Není jednoduché vyznat se v technologiích spadajících do škatulky 3G a ani to není cílem této práce. Ve zkratce mezi typické zástupce patří cdma2000 1x EV-DO či EV-DV (Data Optimized nebo Data and Voice). Dále sem lze zařadit technologii UMTS (Universal Mobile Telephony System) vycházející z technologie WCDMA.

Pro technologie, které splňují požadavky IMT-2000, ale zároveň je ještě nelze zařadit mezi 4G existuje opět pojmenování 3,5G či dokonce 3,75G. Mezi tyto technologie lze zařadit HSDPA či právě WiMAX až do verze standardu 802.16e. [7]



## 2.3 4G

Označení 4G je využito pro technologie splňující standard ITU IMT-Advanced. Požadavky tohoto standardu nejsou malé, zmíním například přenosovou rychlost pro statické uživatele či pomalu se pohybující až 1 Gbps a pro mobilní uživatele až 100 Mbps.[tamtéž]

Jako 4G byly už uznány dvě technologie WiMAX 2 na standardu 802.16m a LTE-Advanced.

## 2.4 Wi-Fi

Technologii Wi-Fi není třeba příliš popisovat, protože se s ní setkal jistě každý. Wi-Fi je určena do sítí o rozměrech LAN, nazývaných v tomto případě WLAN (Wireless LAN). Dosah jednoho AP je udáván až do 200 m, ale tato vzdálenost rychle klesá, pokud v cestě stojí překážky. O vývoj této technologie se stará mezinárodní nezisková organizace IEEE<sup>1</sup>, konkrétně je popsána standardem 802.11. O certifikaci produktů podporujících Wi-Fi a jejich vzájemnou interoperabilitu se stará organizace Wi-Fi Alliance<sup>2</sup>. V současnosti nejrozšířenější verze standardu je 802.11g, kterou však rychle nahrazuje verze 802.11n. Standard 802.11n přináší technologii MIMO, ve zkratce využívání více antén najednou, a s tím související vyšší přenosové rychlosti.

## 2.5 WiMAX

Technologie WiMAX je popsána standardem 802.16, který je opět spravován organizací IEEE. Tato technologie byla vyvinuta za účelem poskytnutí širokopásmového připojení k internetu bez použití kabelů či přímé viditelnosti do vzdálenosti až několika desítek km. Oproti Wi-Fi poskytuje lepší QoS, mobilitu uživatelů (jako u mobilních sítí) a možný provoz v licencovaných pásmech, což zaručuje menší rušení.

Na závěr této kapitoly umístím jednu malou informaci, která možná může někomu pomoci, zorientovat se. Pokud vidíte podobnost mezi technologiemi Wi-Fi, WiMAX, či dokonce Bluetooth, je to tím, že všechny tyto technologie vycházejí z dílny IEEE. Proto například jak u Wi-Fi, tak u Bluetooth a WiMAX je pro adresaci zařízení na linkové vrstvě použita MAC adresa. Pokud chceme tyto technologie porovnávat je důležité si uvědomit, že nejsou konkurenční, nýbrž doplňkové – tedy určené do jiných prostředí.

---

<sup>1</sup>Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>2</sup><http://www.wi-fi.org/>

## Kapitola 3

# Evoluční cesta standardu

Jak již bylo řečeno v předchozí části, WiMAX byl vyvinut pro nasazení tam, kde chcete mít garantovanou přenosovou rychlost a potřebujete větší oblast pokrytí, než poskytuje Wi-Fi. Tento scénář je ideální pro firmy, ale také poskytovatele, kteří chtějí poskytovat připojení k internetu v odlehlějších oblastech. Tomu odpovídá také dnešní situace na trhu v ČR, kdy velcí poskytovatelé neposkytují WiMAX služby jednotlivcům, ale školám či firmám.

Standard 802.16 pokrývá první dvě vrstvy ISO/OSI modelu síťové komunikace — fyzickou a linkovou. V praxi to znamená, že definuje způsob komunikace mezi terminálem koncového uživatele<sup>1</sup> a základnovou stanicí<sup>2</sup>. To je ovšem dosti málo k tomu, aby se nová technologie prosadila na trhu. O toto se tedy stará mezinárodní organizace WiMAX Forum[15] založená v červnu roku 2001 a tvořená především operátory a prodejci komunikačních technologií po celém světě. Konkrétně se tato organizace zabývá, podobně jako Wi-Fi Alliance zmíněná v předchozí kapitole, urychlením nasazení a rozšíření technologií WiMAX, spoluprací jejích členů a také certifikací produktů.<sup>3</sup>

V následujících podkapitolách vyjmenuji některé verze tohoto standardu, které jsou podle mého názoru důležité k pochopení vývoje standardu.

### 3.1 IEEE 802.16-2001

Toto je první verze standardu 802.16. V komerční sféře nebyla nikdy nasazena, ale i tak znamená velký krok vpřed. Tato verze definuje pracovní frekvenci na intervalu 10 až 66 GHz a fyzickou vrstvu Single Carrier. Jednotlivé fyzické vrstvy budou vysvětleny v následující kapitole. Nedefinuje ovšem žádné pokročilé anténní techniky ani ARQ.

### 3.2 IEEE 802.16d-2004

Tato verze standardu je dodnes využívána a je to také první verze, pro kterou byly certifikovány produkty. Nabízí větší výběr z fyzických vrstev: Single Carrier a, OFDM a OFDMA. Pracovní frekvence se oproti prvnímu standardu přesunula do intervalu pod 11 GHz. Verze d umožňuje využití pokročilých anténních technik jako Spatial Multiplexing či Space Time Coding.

---

<sup>1</sup>SS — Subscriber Station či MS — Mobile Station

<sup>2</sup>BS — Base Station

<sup>3</sup>The WiMAX Forum's primary goal is to accelerate the adoption, deployment and expansion of WiMAX technologies across the globe while facilitating roaming agreements, sharing best practices within our membership and certifying products. — Wimax Forum

### 3.3 IEEE 802.16e-2005

Důvod ke zvolení této verze je ten, že v současné době je to nejnovější verze, pro kterou jsou certifikovány produkty. Verze 802.16e zavádí koncept mobilního uživatele, tzv. MS – Mobile Station. Objevuje se zde definice Handoveru, což je předávání MS mezi sousedícími BS. Namísto klasické OFDMA se zde zavádí Scalable-OFDMA. Scalable-OFDMA v jednoduchosti standardizuje vlastnosti této fyzické vrstvy pro určité šířky kanálu (mezery mezi jednotlivými pomocnými nosnými atd., viz 4.5) a tím ulehčuje certifikaci jednotlivých produktů a jejich cenu. Pokud bychom posuzovali tuto verzi pouze na základě propustnosti či maximální rychlosti, tak ve srovnání s verzí d přiliš neobstojí.[11] Zavedení mobility uživatelů, šetřících režimů a komplexnější modulace se bohužel projevilo v těchto parametrech.

### 3.4 IEEE 802.16m-2011 (WiMAX 2)

Tato verze standardu je poměrně nová, vydána v roce 2011. Plánované nasazení prvních certifikovaných produktů je stanoveno na tento rok, tedy 2012. Jelikož byla tato verze schválena jako tzv. 4G, tedy splňuje požadavky standardu IMT-Advanced, lze očekávat zlepšení snad všech parametrů. Pro více informací odkáží čtenáře zde [17]. Jedním z požadavků IMT-Advanced je například udržení spojení MS s BS až do rychlosti 350 km/h či přenosová rychlost pro chodce až 1 Gbps viz [3]

### 3.5 Shrnutí vlastností technologie WiMAX

Technologie WiMAX využívá k šíření elektromagnetické vlny, konkrétněji mikrovlny. Dokáže fungovat na všech licencovaných frekvencích pod 11 GHz. V Evropě se využívá frekvence 3,5 GHz pro licencované pásmo a 5,8 GHz pro nelicencované pásmo. Dosah jedné BS činí zhruba 5-8 km při NLOS.

V novém standardu 802.16m lze technicky dosáhnout až 120Mb/s down a 60 Mb/s up ve městské zástavě při použití MIMO 4x2 (4 antény na BS a 2 na SS) a šířce kanálu 20 MHz. Technologie WiMAX implementuje QoS a je na výběr z pěti tříd služeb. Technologie WiMAX umožňuje autentizaci pomocí EAP či certifikáty – X.509. Dále je možné přenos šifrovat pomocí standardů AES či 3DES. Podporuje také pokročilé anténní techniky jako MIMO či AAS.

## Kapitola 4

# Fyzická vrstva standardu IEEE 802.16

Fyzická vrstva prošla od počátků tohoto standardu značným vývojem viz 4.1. Velkým milníkem bylo zavedení fyzické vrstvy na principu OFDM, později OFDMA, které je využívány dodnes a oproti fyzické vrstvě Single Carrier poskytují lepší spektrální účinnost.

Nejprve si ale vysvětlíme některé později použité termíny a zkratky:

**Frame** koncept rozdělení jednotlivých vysílání do časově omezených úseků

**Uplink** přenos od SS k BS

**Downlink** přenos od BS k SS; při architektuře Point-to-Multipoint probíhá vysílání broadcastově, tedy všechny SS v dosahu obdrží vysílaný signál

**Fyzický slot** alokační jednotka pro downlink

**Minislot** alokační jednotka pro uplink, skládá se z fyzických slotů; jeden minislot může být složen z 1 až  $2^7$  fyz. slotů

**TDD (Time Division Duplex)** rámec se rozdělí do podrámců, které za sebou následují v čase, a kde se v jednom přijímá downlink a v dalším je vyhrazen čas pro uplink

**FDD (Frequency Division Duplex)** uplink i downlink se odesílají současně, ale na jiné frekvenci

**Pomocná nosná (Subcarrier)** malá část z šířky pásma daného kanálu vyhrazená pro jeden symbol

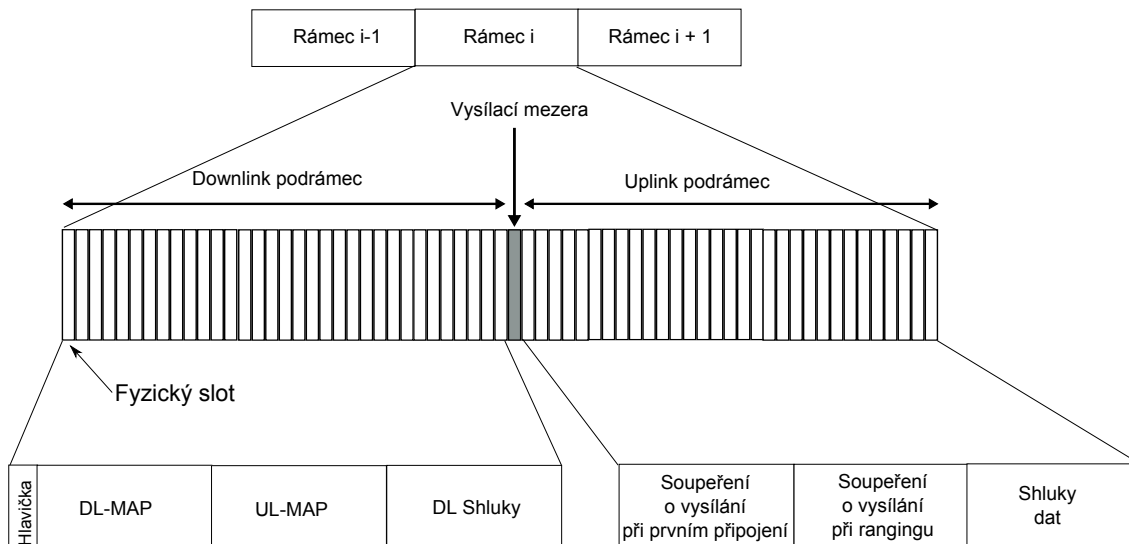
Jméno	Frekvence [GHz]	Viditelnost	Plánování
Wireless MAN SC	10-66	LOS	TDD/FDD
Wireless MAN SCa	2-11	NLOS	TDD/FDD
Wireless MAN OFDM	2-11	NLOS	TDD/FDD
Wireless MAN OFDMA	2-11	NLOS	TDD/FDD

Tabulka 4.1: Fyzické vrstvy standardu 802.16

## 4.1 SC — Single Carrier

Tato fyzická vrstva je pracuje buď v režimu 10 – 66 GHz. Přenos je rozdělen do rámců (frame), které mohou trvat 0.5, 1 a 2 ms. Podporuje jak TDD, tak FDD.

Na ilustraci 4.1 vidíte ukázkou toho, jak vypadá rámec při TDD. Rámec je rozdělen na dva podrámce (subframe) – jeden pro downlink a druhý pro uplink. Oba podrámce mají jiné využití a tudíž i jinou strukturu a obsah, který vzápětí popíši.



Obrázek 4.1: Rámec pro TDD plánování

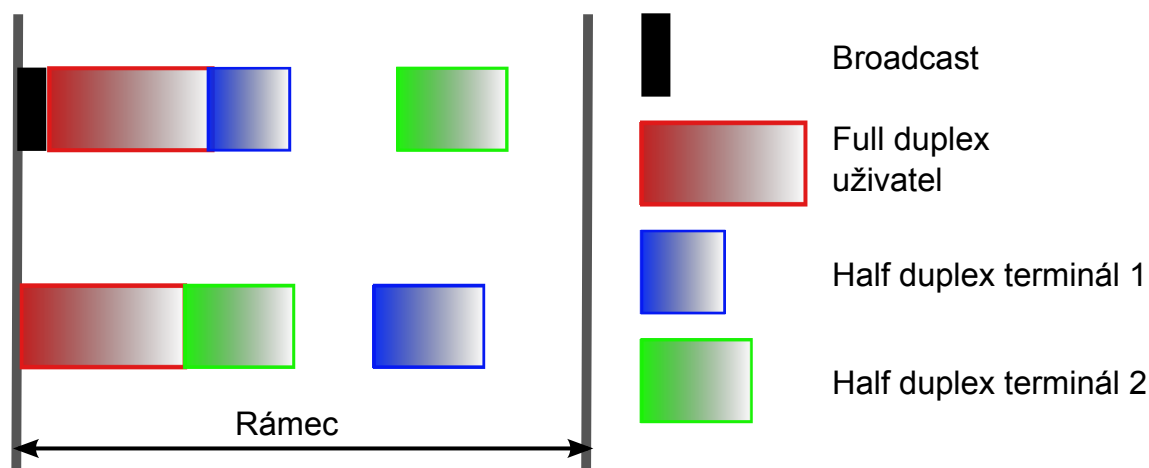
Podrámec pro downlink se skládá z hlavičky (Preamble), DL-MAP, UL-MAP a shluků dat (burst). DL-MAP obsahuje informace o datech v jednotlivých shlucích. Konkrétně jejich FEC, modulaci a také offset, tedy, kde se v podrámci nacházejí. Jednotlivé shluky dat mohou mít jinou modulaci a tím kompenzovat například zhoršující se počasí nebo jinou změnu v přenosovém médiu. UL-MAP definuje způsob odesílání dat pro uplink subframe, zejména minislots, ve kterých může daná SS odesílat data.

Podrámec pro uplink obsahuje sloty pro data, která chce SS odeslat na BS. Mimo tato data obsahuje navíc alokaci pro první přístup k BS (ranging) nebo požadavky o navýšení šířky pásma (bandwidth request).

Při využití FDD je situace velmi podobná, ale jednotlivé podrámce se odesílají většinou simultánně, tedy ve stejnou dobu, ale na jiné frekvenci. Avšak WiMAX má jednu vychytávku a to, že podporuje také stanice, které dokáží v jednu dobu jen přijímat nebo odesílat, jsou tedy v režimu half-duplex. Situace je znázorněna na ilustraci 4.2. Další změna oproti TDD je přidání hlavičky před každý data burst na downlinku, který je určen pro half-duplex stanice. Tyto stanice mohou mít potřebu odeslat data během příjmu. Díky tomu, že tyto data bursty jsou uvozeny hlavičkou, half-duplex stanice neztratí synchronizaci s BS.

Než mohou být data odeslána, je nutno provést následující úkony:

- Randomizace – upravení bitové posloupnosti dat tak, aby se v ní nenacházely dlouhé úseky „1“ či „0“; aplikuje se pouze na data, ne na hlavičku
- FEC (Forward Error Correction) – přidání dalších bitů k datům, aby mohl příjemce



Obrázek 4.2: Rámec pro FDD plánování

signálu vyhledat a případně opravit chyby vzniklé během přenosu; nejčastěji se využívá kódování Reed Solomon, Konvoluční kódy nebo Turbo kód

- Modulace — namapování dat určených k přenosu (modulační signál) na nosný signál; typy nosných signálů: QPSK, 16-QAM, 64-QAM

Standard 802.16 umožňuje modulovat každý data burst na jiný nosný signál. To umožňuje redukovat ztrátu integrity signálu vlivem velkého šumu či velké vzdálenosti od BS.

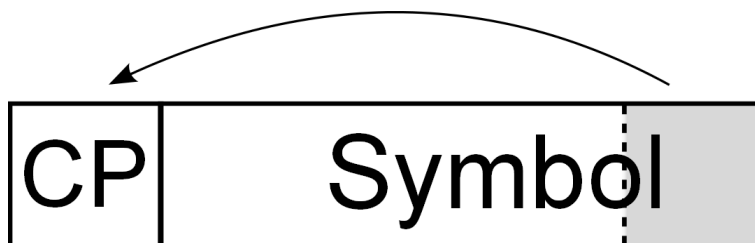
## 4.2 SCa — Single Carrier na nižších frekvencích

Tato fyzická vrstva pracuje na frekvencích pod 11 GHz, jak je patrné z tabulky 1. Operace pro TDD a FDD jsou stejné jako u SC. Mezi hlavní změny v této fyzické vrstvě patří možnost zapojit do vysílání dvě antény – technologie STC a AAS, dále pak odpadá nutnost přímé viditelnosti a modulace je obohacena o nosné signály BPSK a 256-QAM.

## 4.3 OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplex

OFDM operuje ve stejných frekvencích jak SCa, tedy pod 11 GHz, a stejně tak podporuje NLOS. Velikost rámce se může pohybovat od 2 ms až do 20 ms. Přenos funguje tak, že přidělená frekvence – kanál – se rozdělí na menší pomocné nosné (subcarrier). Zatímco v Single Carrier fyzické vrstvě byl rámec rozdělen do fyzických slotů, zde je rozdělen na jednotlivé pomocné nosné a symboly tak, že na těchto pomocných nosných se vysílají jednotlivé symboly, které jsou charakterizovány časem. Vysílá se tedy více symbolů naráz, ale je prodloužena doba vysílání symbolu. Tím se omezí negativní vliv odrazů na příjem signálu. U Single Carrier fungoval princip opačný – data se vysílala na jedné nosné (Proto název Single Carrier :))

Na ilustraci 4.3 je vidět časové rozložení vysílání jednoho symbolu. CP je Cyclic Prefix a slouží k omezení vlivu odrazů signálu během propagace médiem, tzv. Inter-Symbol Interference (ISI). Doba CP má různou velikost a udává se v poměru k času vysílání symbolu. Během doby CP se vysílá poslední část daného symbolu.



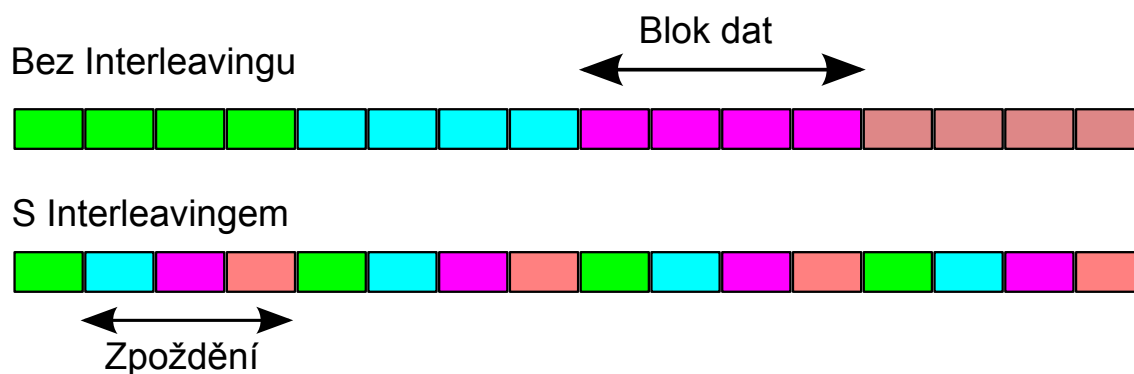
Obrázek 4.3: OFDM symbol

OFDM umožňuje rozdělit kanál na 256 pomocných nosných. Ovšem ne všechny pomocné nosné musí nutně přenášet data. Existují tři druhy těchto nosných:

- Datové
- Pilotní — slouží k synchronizaci kanálu a jeho měření; v OFDM je jich 8
- Nulové — nic se během nich nepřenáší

Příprava dat k odeslání se skládá ze stejných procesů jako při SC, ale přibyla fáze Interleaving:

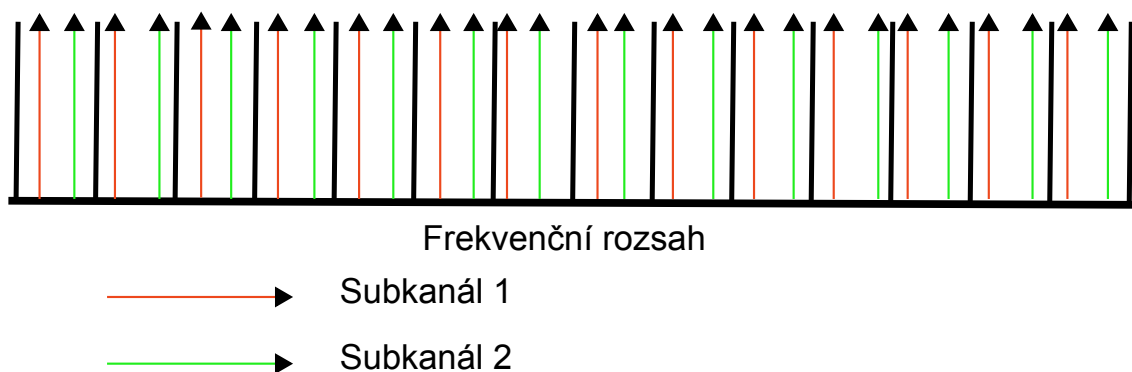
- Randomizace
- FEC
- Interleaving – distribuuje symboly z FEC na jednotlivé pomocné nosné tak, aby po sobě následující symboly nebyly namapovány na po sobě následující pomocné nosné, viz obrázek 4.4. Pokud nastane chyba, je větší šance, že se ji podaří opravit, protože se rozděluje na nesouvislé bloky dat.
- Modulace



Obrázek 4.4: Interleaving

## 4.4 OFDMA — Orthogonal Frequency Division Multiple Access

Tato fyzická vrstva rozšiřuje původní OFDM. Místo 256 má až 2048 pomocných nosných frekvencí. Dále lze zařadit určité pomocné nosné do jedné skupiny, jednomu uživateli. Takové skupiny se nazývají subkanály (Subchannel) viz Obrázek 4.5. Mapování jednotlivých subkanálů na pomocné nosné je blíže vysvětleno v kapitole AMC, PUSC a FUSC. Je to tedy fyzická vrstva, kde v downlinku může být subkanál vyhrazen jen pro určitého uživatele a při uplinku lze taktéž vyhradit subkanál pro určitou stanici.



Obrázek 4.5: Demonstrace rozdělení pomocných nosných do subkanálů

OFDMA fyzická vrstva rozšiřuje mechanismus MIMO, tedy použití více antén při přenosu, ze dvou na maximum 4 antén.

## 4.5 SOFDMA — Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access

WiMAX verze 802.16e využívá fyzickou vrstvu odvozenou od OFDMA, SOFDMA. Tato fyzická vrstva nabízí vylepšení v podobě škálovatelnosti jednotlivých kanálů. Znamená to, že na rezervovaném licenčním pásmu můžete provozovat několik kanálů o různé šířce a tedy různém počtu pomocných nosných viz 4.2. Nutno dodat, že tabulka je pouze ilustrační a ukazuje jednu z možností nastavení. Co je však patrné je to, že jednotlivé kanály mají některé parametry shodné: [8]

- Čas vyhrazený pro vysílání jednoho symbolu
- Mezery mezi pomocnými nosnými

## 4.6 PUSC, FUSC a AMC

Nejdříve je nutné vysvětlit si pojmy využívané v této podkapitole:

- Slot — minimální možná alokační jednotka; je definována dvoudimenzionálně vymezeným počtem pomocných nosných (frekvencí) a počtem symbolů (časem); přesná definice záleží na způsobu mapování a bude popsána níže



Parametr	Hodnoty			
Šířka kanálu [MHz]	1, 25	5	10	20
Počet pomocných nosných	128	512	1024	2048
Počet datových pomocných nosných	72	360	720	1440
Počet pilotních pomocných nosných	12	60	120	240
Počet nulových pomocných nosných	44	92	184	368
Počet subkanálů	2	8	16	32
Mezera mezi pomocnými nosnými	10,94 KHz			
Čas vyhrazený pro symbol	91,4 $\mu$ s			

Tabulka 4.2: Příklad nastavení fyzické vrstvy OFDMA

- Datový region — také dvoudimenzionální alokace, ale tentokrát v rovinách sousedících podkanálů a sousedících symbolů
- Segment — část množiny dostupných podkanálů
- Zóna — Posloupnost symbolů, která využívá stejnou způsob rozložení pomocných nosných (PUSC, FUSC, ...)

Pokud pomineme nulové pomocné nosné, využívají se ve WiMAXu dva typy pomocných nosných — datové a pilotní. K mapování těchto dvou typů na množinu pomocných nosných a jejich sdružování do podkanálů se využívají v základě tři postupy:

1. PUSC (Partial Usage of Subchannels)
2. FUSC (Full Usage of Subchannels)
3. AMC (Adaptive Modulation and Coding)

#### 4.6.1 Downlink PUSC

Nejprve se utvoří skupiny 14 sousedících pomocných nosných — cluster. Ze dvou clusterů se poté složí jeden podkanál. Jeden podkanál na vysílacím čase dvou symbolů poté tvoří jeden slot. [1]

#### 4.6.2 Uplink PUSC

Nejprve se vytvoří tzv. dlaždice (tile) maticí, kde jednu dimenzi tvoří 4 pomocné nosné a druhou 3 symboly (4 x 3). Z 6 takových dlaždic se vytvoří jeden subkanál. Z jednoho subkanálu nad třemi symboly se pak utvoří slot. Jedna ze tří pomocných nosných uvnitř dlaždice je pilotní.[tamtéž] V každé dlaždici jsou tedy 4 pilotní pomocné nosné.

#### 4.6.3 Downlink FUSC

Pomocné nosné jsou rozděleny do 48 skupin po 16 pomocných nosných. Subkanál je poskládán z pomocné nosné z každé skupiny. Jeden subkanál nad jedním symbolem tvoří slot. Uplink FUSC se nepoužívá. [tamtéž]

#### 4.6.4 AMC

Struktura této zóny je stejná jak pro uplink tak pro downlink. Základní jednotkou je zde tzv. koš (bin), který se skládá z 9 pomocných nosných, z nichž jedna je pilotní. Protože AMC je adaptivní, existují čtyři typy slotů:

- 6 x 1 – šest košů přes jeden symbol
- 2 x 3 – dva koše přes 3 symboly
- 3 x 2 – tři koše přes 2 symboly
- 1 x 6 – jeden koš přes 6 symbolů

## Kapitola 5

# MAC vrstva standardu IEEE 802.16

Linková vrstva obecně na rozdíl od fyzické definuje logickou komunikaci mezi sousedícími uzly sítě. Předně je důležité říci, že tato vrstva se dělí na další podvrstvy, kde každá obstarává jinou část komunikace.

1. Podvrstva pro komunikaci s vyššími vrstvami (Service-specific Convergence Sublayer)  
Tato vrstva zajišťuje kompatibilitu s různými typy vyšších vrstev, jako IP či ATM, a třídí pakety podle SFID a CID.
2. MAC podvrstva (MAC Sublayer)  
Tato vrstva je mozkiem samotného standardu. Jejím úkolem je zajistit správné časování a alokaci v jednotlivých rámcích, dále vytvářet, měnit a rušit jednotlivé datové a řídicí toky. A samozřejmě také spravovat jednotlivé pakety přicházející z vyšších vrstev skrze vyšší podvrstvu.
3. Bezpečnostní podvrstva (Privacy Sublayer)  
Bezpečnostní podvrstva zajišťuje důvěrnost a nepopiratelnost vyměňovaných zpráv. Více informací o této podvrstvě je v kapitole Bezpečnostní podvrstva standardu 802.16.

Následuje výpis použitých zkratk a názvů, které je užitečné znát také v angličtině: [\[6\]](#)

**SDU (Service Data Unit)** Paket přicházející na MAC vrstvu z vyšších vrstev ISO/OSI viz obrázek [5.1](#)

**PDU (Protocol Data Unit)** Pakety vyměňované mezi sousedy v síti; každý uživatel může mít nastavenou jinou velikost PDU viz obrázek xx

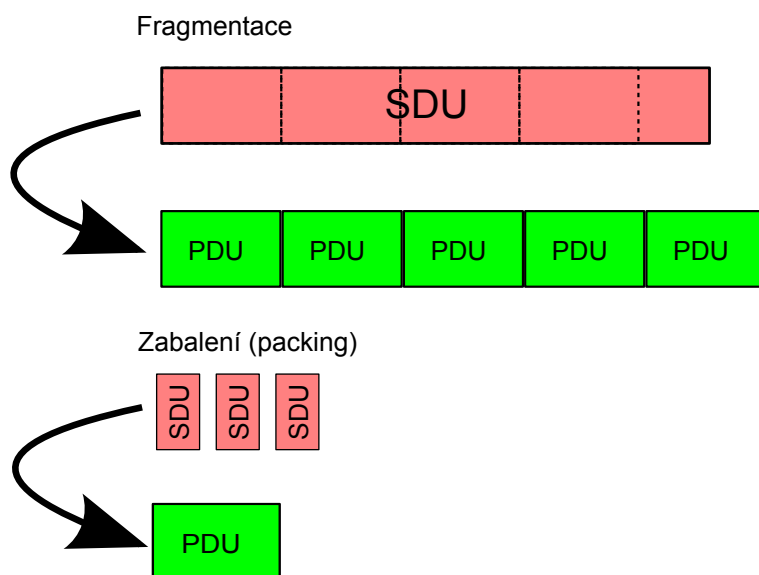
**CID (Connection ID)** 16 bitové číslo identifikující jednotlivá spojení mezi SS a BS; datová spojení jsou jednosměrná — každá SS obdrží minimálně jedno CID pro uplink a jedno pro downlink — všechna ostatní spojení, například řídicí, jsou obousměrná, takže stačí pouze jedno CID pro uplink i downlink

**SFID (Service Flow ID)** SFID identifikuje přidělený Služební tok (Service Flow) pro daný CID. Daný služební tok je charakterizovaný pomocí jednotlivých parametrů jako je maximální zpoždění, jitter apod. Každý služební tok obsahuje minimálně SFID a také směr (uplink či downlink).



Obrázek 5.1: Pakety mezi jednotlivými vrstvami

Je důležité zmínit, že PDU nemusí mít pevně stanovenou velikost, ale jeho velikost se může v čase měnit podle stavu okolního prostředí. Větší PDU znamená větší pravděpodobnost ztráty paketu, protože se vysílá větší množství dat, ale zároveň menší zátěž pro HW (ušetří se některé operace). Proto existují mechanismy pro úpravu SDU — fragmentace a zabalení, viz obrázek 5.2. Fragmentace slouží k rozdělení příliš velkého SDU. Takový SDU je rozdělen na několik PDU. Opakem je zabalení (Packing), kdy se několik menších SDU spojí do jednoho PDU. To, zda bude potřeba změnit velikost paketu závisí na dohodnutých parametrech mezi SS a BS.



Obrázek 5.2: Fragmentace a zabalení na Konvergenční podvrstvě

## 5.1 Konvergenční podvrstva (Convergency Sublayer)

Konvergenční podvrstva tvoří bránu mezi vyššími vrstvami ISO/OSI modelu a prostředím standardu 802.16. Jejím úkolem je klasifikace příchozích paketů — SDU na jednotlivé CID a přeposlání dále. Přiřazení CID k danému SDU v podstatě znamená, že mu přidělíme nějaké QoS parametry. Tato podvrstva může také zažádat o vytvoření nového servisního toku, o změnu daného servisního toku a také o zrušení servisního toku. Pokud to udělá, předá tuto informaci MAC podvrstvě a ta následně vygeneruje zprávy DSA, DSC či DSD nebo zamítne danou žádost.

Konvergenční podvrstva se logicky dělí na dvě části a to ATM a IP konvergenční podvrstvu. Tato podvrstva je tedy schopna komunikovat jak s IP, tak s ATM pakety.

## 5.2 Typy spojení

Komunikace mezi SS a BS je spojovaná (connection oriented), takže vyžaduje protokol pro navázání spojení — viz 5.5. Jednotlivá spojení jsou rozlišena pomocí CID. Spojení se dělí na dva základní typy:

**Řídící (Management)** Řídící spojení plní funkci řízení provozu mezi BS a SS. Podle priority přenášených zpráv se dělí na tři typy: Základní, Primární a Sekundární. Základní slouží k výměně krátkých zpráv náročných na zpoždění (zprávy pro nastavení fyzické vrstvy). Primární slouží k výměně delších a na zpoždění méně náročných zpráv. Sekundární spojení je volitelné a slouží k výměně nenáročných zpráv (DHCP,...) Každý tento typ řídicího spojení má vlastní obousměrný CID (stejný pro uplink i downlink).

**Datové** Slouží k přenášení dat. Každé spojení SS-BS má jeden CID pro downlink a jeden pro uplink. Z jedné SS může být zároveň navázáno více takových datových spojení. Každé takové spojení má vlastní CID a tudíž může mít i rozdílné QoS parametry.

## 5.3 Automatic Repeat Request

S tím souvisí mechanismus implementovaný na této vrstvě – ARQ, Automatic Repeat Request. Jak víte, tak ARQ je využíván v protokolu transportní vrstvy — TCP. Proto se velmi různí názory na to, zda je nutné implementovat ARQ již na úrovni linkové vrstvy. Z tohoto důvodu je ARQ ve standardu 802.16 volitelný pro každé spojení. [5]

Pro pořádek zde krátce popíši, jak tento mechanismus funguje. Data k odeslání jsou rozsekána na bloky, PDU, jejichž velikost byla dohodnuta během inicializace spojení. Tyto bloky mohou nabývat čtyř stavů:

- Neodeslán (not-sent)
- Odeslán (outstanding)
- Potvrzen (discarded)
- Čeká na znovudeslání (waiting-for-retransmission)

Nejdříve je paket ve stavu Neodeslán. Po odeslání přejde do stavu Odeslán, kde čeká na ACK (potvrzení od příjemce, že přišel), vypršení timeoutu nebo NACK (příjemce žádá o znovudeslání daného bloku, ARQ implementuje mechanismus selektivního potvrzování, selective acknowledgement system). Pokud je do vypršení timeoutu potvrzen, přejde do stavu 3, jinak přejde do stavu Čeká na znovudeslání. Ze stavu Čeká na znovudeslání se dostane buď do stavu Odeslán nebo Potvrzen v případě, že dostane ACK.

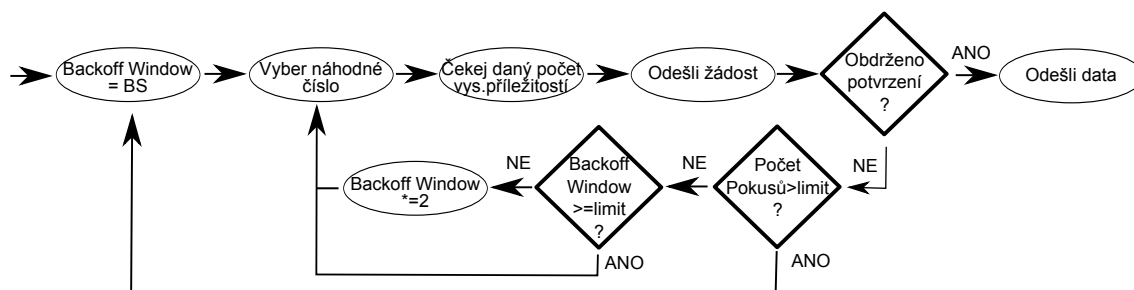
Pro urychlení komunikace a snížení provozu lze ACK či NACK posílat v jednom paketu s daty. Tento způsob zasílání řídicích zpráv spolu s daty se nazývá *piggybacking* a používá se také mimo mechanismus ARQ.

Standard 802.16 umožňuje použít rozšíření standardního ARQ a to HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request). HARQ využívá znovu odeslané pakety k možné opravě chybně přijatých dat. Zvyšuje se tím tedy šance na správné přijetí paketu. Tato metoda je vhodná do silně zarušených oblastí.

## 5.4 Soupeření o vysílání (Contention resolution)

Mechanismus soupeření o vysílání je ve WiMAXu využíván při inicializaci spojení a při žádosti SS o navýšení šířky pásma. Je zřejmé, že probíhá pouze na uplinku, protože downlink je dopředu plánovaný BS.

Algoritmus, který se při této příležitosti ve WiMAXu využívá (Truncated Binary Exponential Backoff Window) je popsán na obrázku 5.3. Počet příležitostí k vysílání a základní velikost Backoff okna (Backoff window) určuje BS. Při započetí soupeření si SS nastaví Backoff okno podle BS a zvolí si náhodné číslo z tohoto intervalu. Poté čeká tolik vysílacích příležitostí, jaké má číslo. Po této době odešle svůj požadavek. Pokud uspěje, odešle např. povolený počet dat. Pokud neuspěje a počet opakování odeslání žádosti přesáhl limit, daný paket k odeslání je zahozen a procedura pokračuje od začátku. Pokud SS nedostane potvrzení a může ještě znovu zkusit soupeření, zdvojnásobí Backoff okno a vybírá znovu náhodné číslo a opakuje postup. Pokud je hodnota Backoff okna na maximu, přeskočí se krok zvětšování Backoff okna.[5]



Obrázek 5.3: Diagram průběhu soupeření o vysílání

Pozn.: Po úspěšném přidělení pásma pro upload mohou být další žádosti poslány takzvaným kradením pásma (bandwidth stealing), kdy místo části naalokovaného pásma se odešle buď jako zpráva o navýšení pásma (BR PDU) nebo pomocí piggybackingu. Takové žádosti totiž přijdou na BS v naalokované části rámce, takže nepodléhají soupeření. [2]

## 5.5 Připojení SS k síti resp. BS

Jak již bylo zmíněno, tak standard 802.16 podporuje nativně QoS, to s sebou přináší mnoho výhod pro poskytovatele, ale také to zesložitňuje samotnou komunikaci. Připojení SS k síti se skládá z osmi kroků, ale jednoduše řečeno jde o synchronizaci fyzických vrstev, poté dohodnutí dalších parametrů spojení, následuje autentizace SS a poté připojení SS.

### 5.5.1 Vyhledání a synchronizace s downlink kanálem

SS prohledává všechny kanály z frekvenčního rozsahu pro downlink, dokud nenajde vyhovující kanál.

### 5.5.2 Získání downlink parametrů BS

SS vyhledá na daném kanálu DL-MAP a DCD zprávy. Pokud se SS nepodaří tyto zprávy vyhledat do vypršení timeoutu, SS se vrátí ke kroku 1.

### 5.5.3 Získání uplink parametrů BS

SS vyextrahuje z UCD zprávy parametry uplinku. Pokud uplink nevyhovuje, vrací se SS ke kroku 2. Pokud je uplink na daném kanálu vyhovující, je synchronizace linkových vrstev dokončena a SS může začít odesílat PDU na BS. Po dokončení tohoto kroku má SS dostatek informací o fyzické vrstvě BS k tomu, aby mohla navázat kontakt a zkusit se připojit k BS.

### 5.5.4 Výběr vhodné fyzické vrstvy (Ranging)

Tato část probíhá tzv. Soupeřením o vysílání, které je popsáno výše, a kterému je vyhrazen určitý čas v uplink podřámci. Je to proto, že SS ještě není zaregistrována na BS a tudíž nemá naalokovaný prostor pro uplink. SS vysílá RNG-REQ zprávy na BS a podle zpráv RNG-RSP, kterými odpovídá BS, si nastavuje vysílací výkon a časový posun vysílání. Časový posun kompenzuje vzdálenost SS od BS. Po skončení Ranging části má SS přiděleny CID pro řídicí spojení.

### 5.5.5 Dohodnutí dalších parametrů přenosu

V této fázi probíhá pomocí zpráv SBC-REQ (SS) a SBC-RSP (BS) nastavování přenosu podle možností BS a SS. SS zde tedy deklaruje, co všechno implementuje. Nastavuje se zde například schopnost piggybackingu, možné modulační kódy fyzické vrstvy, počty nosných při použití SOFDMA, počet a způsob použití antén při MIMO, způsob řízení spootřeby, nastavení typu ARQ, možnosti bezpečnostní vrstvy, možnosti Handoveru apod.

### 5.5.6 Autentizace stanice, tvorba klíčů

V této části se SS autentizuje BS buď pomocí soukromého klíče (X.509) nebo pomocí EAP. Po úspěšné autentizaci následuje tvorba klíčů, která vychází ze zvolené autentizační metody. Tyto klíče jsou pak rozdistribuovány mezi BS a SS pomocí protokolu PKMv2.

### 5.5.7 Registrování stanice

SS odešle zprávu REG-REQ, ve které specifikuje především verzi IP, maximální počet spojení na downlinku a na uplinku, parametry ARQ či nastavení Handoveru. BS odpoví zprávou REG-RSP, která obsahuje potvrzení parametrů SS a případně CID sekundárního řídicího spojení. Pokud SS obdrží tuto zprávu, je úspěšně registrován na BS. Pokud se jedná o *spravovanou SS*<sup>1</sup>, stáhne si v tomto kroku nastavení služeb z konfiguračního serveru pomocí zprávy TFTCP-CPLT. Pokud ne, požádá si o nové QoS služby pomocí zprávy DSA-REQ.

### 5.5.8 Inicializace IP

SS získá pomocí sekundárního řídicího spojení IP adresu z DHCP serveru nebo obdrží MIP (Mobile IP) pomocí mechanismu, který je mimo rozsah této práce.

---

<sup>1</sup>Managed SS – konfigurace QoS služeb pro danou SS je udržována na serveru za BS, typický scénář pro poskytovatele

## 5.6 Formáty PDU

Základní struktura PDU paketu je vidět na obrázku 5.4. Paket se tedy skládá z obecné hlavičky, payloadu a CRC. CRC je volitelná část, zatímco zbývající dvě jsou samozřejmě povinné. Pokud je v hlavičce nastaveno šifrování, šifrují se pouze data, tedy payload, hlavička a případně CRC zůstávají nešifrované.

Obecná hlavička	Payload	CRC
-----------------	---------	-----

Obrázek 5.4: Struktura PDU paketu

Standard definuje tři typy hlavičky:

- Obecnou hlavičku (Generic Header)
- Signalizační hlavičku 1. typu (signaling header type 1)
- Signalizační hlavičku 2. typu (signaling header type 1)

Na obrázcích 5.5, 5.6 a 5.7 jsou vidět struktury jednotlivých hlaviček.

HT=0 (1)	EC (1)	Typ (6)				RSV (1)	CI (1)	EKS (2)	RSV (1)	Délka MSB (2)
Délka MSB (8)						CID MSB (8)				
CID LSB (8)						HCS (8)				

Obrázek 5.5: Obecná hlavička PDU paketu

Obecná hlavička se využívá jak na uplinku, tak na downlinku a může uvádět jak řídicí zprávy, tak data. Pole EC<sup>2</sup> zde určuje, zda se bude payload šifrovat či ne.

Pole HT<sup>3</sup> značí, zda se jedná obecnou hlavičku, nebo signalizační. Obecná hlavička má vždy nastaven tento bit na 1. Pole Typ slouží k indikování použití různých typů podhlaviček (subheader). Pole CI<sup>4</sup> indikuje použití CRC, pole EKS<sup>5</sup> je pro sekvenční číslo TEK klíče (viz 6), HCS<sup>6</sup> je sekvence pro kontrolu integrity hlavičky.

Signalizační hlavička 1. typu se využívá pouze na uplinku. Nenásleduje za ní payload ani CRC. Podle hodnoty v poli Type se rozlišuje několik typů této hlavičky. Může sloužit například k žádání o navýšení přenosového pásma (Bandwidth Request), řízení spotřeby aj.

<sup>2</sup>Encryption Control (překlad Ovládání šifrování)

<sup>3</sup>Header Type (překlad Typ hlavičky)

<sup>4</sup>CRC Indicator (překlad CRC indikátor)

<sup>5</sup>Encryption Key Sequence (překlad Sekvenční číslo šifrovacího klíče)

<sup>6</sup>Header Check Sequence (překlad Sekvence pro kontrolu hlavičky)



HT=1 (1)	EC=0 (1)	Typ (3)	Obsah hlavičky MSB (11)										
Obsah hlavičky LSB (8)								CID MSB (8)					
CID LSB (8)								HCS (8)					

Obrázek 5.6: První signalizační hlavička PDU paketu

HT=1 (1)	EC=1 (1)	Typ (1)	Obsah hlavičky MSB (13)										
Obsah hlavičky (16)													
Obsah hlavičky LSB (8)								HCS (8)					

Obrázek 5.7: Druhá signalizační hlavička PDU paketu

Signalizační hlavička 2. typu se využívá pouze na OFDMA fyzické vrstvě na uplinku a slouží k informování (Feedback) BS o stavu fyzické vrstvy, kanálu apod. Jako u předchozí za ní nenásleduje ani payload ani CRC.

## 5.7 QoS ve standardu 802.16

QoS je jedna z hlavních věcí, kvůli kterým je WiMAX tak známý. Význam QoS je zřejmý. Přináší poskytovatelům schopnost garantovat šířku pásma, zpoždění a jiné parametry přenosu. Přitom mechanismy QoS probíhají již na linkové vrstvě, což s sebou přináší vyšší rychlost, než kdyby probíhaly například na směrovací vrstvě či ještě výše v ISO/OSI modelu síťové komunikace.

Provoz na uplinku i downlinku se třídí do takzvaných toků služeb (Service Flow), každý směr zvlášť. Každý takový tok je charakterizován množinou QoS parametrů a identifikátorem SFID (Service Flow ID). Pokud má tok přiřazen CID, znamená to, že je aktivní, či minimálně má naalokovány zdroje pro případný přenos. Toky se mohou nacházet ve třech stavech:

**Poskytované (Provisioned)** Obsahuje parametry, které jsou definovány poskytovatelem. Pro žádný parametr zatím není naalokován zdroj, není aktivní ani nemá přiřazen CID

**Alokovaný (Admitted)** Tok má naalokovány zdroje pro parametry a přiřazen CID spojení, ale není aktivní

**Aktivní (Active)** Tok má naalokovány zdroje pro parametry, přiřazen CID spojení a toto spojení je aktivní

Standard 802.16e definuje tyto třídy služeb:[18]

Zkratka	Název	Využití	QoS parametry
UGS	Unsolicited Grant Service	VoIP	maximální přenosová rychlost maximální zpoždění tolerovatelný jitter politika přenosu
rtPS	Real-Time Polling Service	Streaming Audio/Video	maximální přenosová rychlost maximální zpoždění minimální rezervovaná přenosová rychlost politika přenosu
ertPS	Extended Real-Time Polling Service	VoIP s detekcí aktivace <sup>7</sup>	maximální přenosová rychlost maximální zpoždění minimální rezervovaná přenosová rychlost politika přenosu
nrtPS	Non-Real-Time Polling Service	FTP	maximální přenosová rychlost priorita provozu minimální rezervovaná přenosová rychlost politika přenosu
BE	Best Effort	Přenos dat HTTP	maximální přenosová rychlost priorita provozu politika přenosu

Tabulka 5.1: Přehled QoS tříd služeb

Následuje vysvětlení některých QoS parametrů tříd provozu:

**Maximální přenosová rychlost (Maximum sustained traffic rate)** udává maximální rychlost, kterou mohou být odesílána data daného datového toku. Jednotkou je počet bitů za vteřinu. Nepočítá s overheadem, např. CRC či MAC hlavičky

**Maximální zpoždění (Maximum latency)** specifikuje maximální dobu mezi přijetím SDU paketu na linkové vrstvě jedné stanice a příchodem na sousední stanici. Jednotkou je ms.

**Tolerovatelný jitter (Tollerated jitter)** specifikuje maximální jitter. Jitter je rozdíl mezi zpožděním dvou paketů v jednom směru<sup>8</sup>. Jednotky jsou uváděny v ms.

**Minimální rezervovaná přenosová rychlost (Minimum reserved traffic rate)** minimální přenosová rychlost, jakou by měla být schopna BS vždy přidělit. Udává se opět v bitech za vteřinu

**Priorita toku (Traffic priority)** udává prioritu dané služby. Pokud budeme porovnávat dvě stejné služby, tak právě priorita rozhodne, která bude mít lepší podmínky pro přenos.

<sup>8</sup><http://www.ietf.org/rfc/rfc3393.txt>

**Politika přenosu (Request/Transmission policy)** umožňuje nastavit parametry tvorby PDU dané služby. Například zda se může použít fragmentace, piggybacking, CRC aj.

## 5.8 Řídící zprávy

Tyto zprávy se nacházejí v payloadu PDU, hned za hlavičkou PDU. Jsou jednou z hlavních složek standardu, protože řízení přístupu, rychlostí a datových toků jednotlivých stanic je základ celého standardu. Je to to, čím se odlišuje od podobných technologií. Tabulka 5.2 shrnuje některé zprávy, s nimiž jsme se již setkali, nebo ještě setkáme v této práci.

Zkratka	Název	Typ spojení	Popis
UCD	Uplink Channel Descriptor	Broadcast	Je odesílána periodicky a definuje parametry fyzické vrstvy pro daný kanál uplinku.
DCD	Downlink Channel Descriptor	Broadcast	Je odesílána periodicky a definuje parametry fyzické vrstvy pro daný kanál downlinku.
UL-MAP	Uplink Access Definition	Broadcast	Alokuje vysílací čas pro dané SS, dále také čas pro soupeření o vysílání.
DL-MAP	Downlink Access Definition	Broadcast	Popisuje rozložení jednotlivých shluků v daném rámci
RNG-REQ	Ranging Request	Soupeření / Základní řídicí	Slouží k nastavení správného časového offsetu při vysílání a nastavení vysílacího výkonu. Po navázání spojení je pravidelně odesílána pro aktualizaci daných hodnot.
REG-REQ	Registration Request	Primární řídicí	Obsahuje zejména informace o vyšších vrstvách a upřesnění spojení (IP verze, max. Počet uplink a downlink spojení, Vendor-info, ARQ,...)
PKM-REQ	Privacy Key Management Request	Primární řídicí	Slouží k autentizaci a autorizaci stanic a distribuci šifrovacích klíčů
DSA-REQ	Dynamic Service Addition Request	Primární řídicí	Slouží k přidání nového service flow. Může iniciovat jak BS, tak SS.
DSC-REQ	Dynamic Service Change Request	Primární řídicí	Slouží k úpravě service flow. Může iniciovat jak BS, tak SS.
DSD-REQ	Dynamic Service Deletion Request	Primární řídicí	Slouží k odstranění service flow. Může iniciovat jak BS, tak SS.

Tabulka 5.2: Výběr z řídicích zpráv standardu

## 5.9 Handover

Pod pojmem Handover se chápá situace, kdy je MS připojen k jiné BS, než u které byl dosud. Děje se tak zejména v případě, kdy se MS blíží k hranici kam dosáhne signál z BS a zažádá o přepojení k BS s lepším signálem v daném místě. Další případ může být ten, že jiná BS v dosahu může poskytnout lepší QoS.

Protože je Handover definován až od verze standardu 802.16e, a protože má prakticky smysl jen pro mobilní uživatele, rozhodl jsem se použít jinou zkratku pro terminál klienta a to MS (Dříve SS).

Standard 802.16e definuje tři typy Handoveru[4]:

- Tvrdý Handover (Hard Handover)
- Fast BS switching (FBSS)
- Macro Diversity Handover (MDHO)

Popíšeme si průběh tzv. Tvrdého handoveru, který je nejjednodušší a dobře se na něm ilustruje princip samotného handoveru.

1. Skenování — MS může skenovat buď na vlastní pěst nebo použít informace o sousedech od obsluhující BS
2. Asociace — V této části se MS pokouší provést postup připojování k potenciální cílové BS až do bodu Ranging (viz 5.5). Protože Ranging probíhá na nerezervované části uplink subrámcce, může MS požádat svou obsluhující BS o asistenci a v tom případě by obsluhující BS měla zajistit alokování místa v uplinku potenciální cílové BS. Asociace se provádí za účelem získání informací o okolních BS. Získané informace si MS ukládá a periodicky aktualizuje. Později je může využít k vybrání nejvhodnější BS k Handoveru.
3. Inicie Handoveru — MS je buď donuceno obsluhující BS nebo se sama rozhodne připojit k cílové BS.
4. Připojení k cílové BS — MS využije informace získané asociací s cílovou BS a zkusí se k ní připojit. Připojení probíhá jako obecné připojování MS k BS, avšak lze zkrátit, pokud si cílová a aktuální BS vymění informace o MS. Teoreticky lze přeskočit zbývající fáze připojování, tzn. Od Ranging výše.
5. Přeposlání dat — Po připojení přijme MS data, která byla během handoveru přeposílána na cílovou BS, a nastaví IP konektivitu.

Jak jsem již zmínil existují ještě další dvě varianty handoveru. Obě spojuje jeden termín — Diversity Set. Diversity set je množina BS s dobrým signálem vůči MS. Všechny BS v množině Diversity Set dané MS jsou informovány o tomto členství.

Při použití MDHO se snaží MS komunikovat se všemi BS v Diversity Setu najednou. Oproti tomu při použití FBSS komunikuje MS vždy pouze s jednou BS (Anchor BS) z Diversity Setu, ale má dohodnut postup rychlé změny BS v rámci Diversity Setu.

## Kapitola 6

# Bezpečnostní podvrstva standardu 802.16

Bezpečnostní podvrstva zajišťuje důvěrnost<sup>1</sup> a nepopiratelnost<sup>2</sup>. Podle standardu 802.16 ve verzi e, jsou šifrovány pouze datové datagramy. Bezpečné komunikace je dosaženo těmito kroky:

1. Autentizace (X.509 či EAP)
2. Vytvoření a distribuce klíčů (PKMv2)
3. Šifrování a integrita dat (AES či 3DES)

Zkratky použité v kapitole:

**SA (Security Association)** množina bezpečnostních informací, které sdílí BS a jeden nebo více SS za účelem bezpečné komunikace. Definuje bezpečnostní parametry přenosu, např. Šifrovací klíče a algoritmy. Každá stanice má minimálně jedno SA, které slouží pro definici zabezpečení řídicích zpráv a jehož SAID je rovno Primárnímu CID. Další SA vznikají na základě počtu datových toků.

**SAID (Security Association Identifier)** číslo identifikující jednotlivé SA.

**TEK (Traffic Encryption Key)** klíč sloužící k šifrování datových zpráv. Odvozuje se z náhodného čísla vygenerovaného BS a poté zašifrovaného příslušným TEK algoritmem.

**GTEK (Group Traffic Encryption Key)** klíč použitý k šifrování datových zpráv zasílaných multicastově.

**AK (Authorization Key)** klíč vygenerovaný procesem autentizace a autorizace SS.

**KEK (Key Encryption Key)** klíč odvozený z AK. Slouží k šifrování TEK, GKEK, ... při posílání po síti.

**GKEK (Group Key Encryption Key)** klíč používaný k šifrování GTEK v multicastrových zprávách.

---

<sup>1</sup>obsah zprávy nebyl přečten nikým jiným než adresátem

<sup>2</sup>zpráva nebyla podvržena

## 6.1 PKMv1

Protokol pro správu klíčů ve verzi 1 se dnes již nepoužívá. Jednak nereflexuje požadavky na podporu EAP, protože autentizace probíhá pouze na základě certifikátů a dále v něm byly zjištěny některé nedostatky, které by mohly být využity k napadení sítě. Mezi tyto nedostatky patří například pouze jednosměrná autentizace SS vůči BS, která může vést k podvržení BS třetí stranou[12]. Následuje slovní popis průběhu protokolu.

SS nejdříve odešle pomocí zprávy PKM-REQ svůj certifikát na BS, čistě informativně. Ihned poté odešle další zprávu PKM-REQ, která obsahuje opět certifikát, dále také podporované šifrovací algoritmy a primární SAID, které je stejné jako primární CID. BS ověří SS a případně odpoví zprávou PKM-RSP. Tato odpověď obsahuje současný AK šifrovaný veřejným klíčem SS, sekvenční číslo daného AK, životnost AK a výčet SAID, které může SS využít. AK je nutné neustále obnovovat. O obnovu se stará SS opakováním postupu, ale bez odeslání úvodní informativní zprávy. Žádání o nový AK nedochází k přerušení služby, protože v jednom okamžiku jsou platné dva přepřívající se AK (současný a nový).

## 6.2 PKMv2

Protokol PKM ve verzi 2 přidává podporu EAP. To s sebou přináší jednak výhody větší interoperability s jinými technologiemi, ale zároveň komplexnější řešení samotného protokolu. Protokol PKMv2 lze rozdělit na tyto fáze [9]:

1. Autentizace — SS se může autentizovat buď pomocí EAP, kombinace EAP + X.509 nebo čistě pomocí X.509.
2. Generování AK — autentizací obdrží jak BS, tak SS klíč PAK (X.509) či PMK (EAP) podle zvolené autentizace. Algoritmem Dot16KDF, kterému za vstup slouží zmíněné klíče, BSID<sup>3</sup> a SS MAC, vytvoří obě strany AK klíč.
3. Generování a distribuce TEK — Tato část probíhá takzvaným třicestným handshakem (Three-way handshake). Integrita zasílaných zpráv je dosažena použitím HMAC/CMAC klíčů odvozených z AK. BS odešle zprávu SS obsahující náhodné číslo NBS, sekvenční číslo AK klíče. SS odpoví zprávou obsahující NBS, NMS, sekvenční číslo AK klíče a podporované šifrovací profily. BS ověří NBS a poté vygeneruje a odešle dva TEK klíče (dva kvůli obnovování), GKEK a GTEK zašifrované pomocí KEK. Po obdržení zprávy SS ověří NMS a začne používat přijaté klíče.

Popíši zde způsob autentizace pomocí EAP:

1. EAP autentizace SS vůči AAA serveru (Authentication, Autorization, Accounting)
2. Rozšíření 512-bit MSK na SS a BS
3. Tvorba 160-bit PMK a 160-bit EIK na SS i BS zároveň. Tyto klíče se získají ořezáním MSK klíče.
4. Volitelná autentizace uživatele — integrita zajištěna pomocí EIK. Zde se může autentizovat přímo uživatel dané SS.
5. Obě stanice — SS i BS, vytvoří stejný 160-bit AK algoritmem Dot16KDF z PMK, SS MAC a BS ID

---

<sup>3</sup>Base Station Identifier

## 6.3 Šifrování datových paketů

Šifrování dat může probíhat algoritmy DES či AES. Použití algoritmů DES se nedoporučuje, protože jsou považovány za slabé. Proto se dnes využívají verze AES, mezi které patří[9]:

- AES-CBC
- AES-CTR — je považován za silnější než CBC, protože je jednodušší na implementaci a nabízí paralelní zpracování
- AES-CCM — je považován za nejbezpečnější, protože rozvíjí CBC o možnost ověřit autenticitu šifrovaných zpráv

## Kapitola 7

# Pokročilé anténní techniky ve standardu 802.16

Pokročilé anténní techniky se ve standardu 802.16 objevily již na fyzické vrstvě Single Carrier ve verzi a. Od té doby patří k běžné výbavě každé verze standardu a tedy i fyzické vrstvy. Pod označení pokročilá anténní technika spadají 3 pojmy: Beamforming, Space Time Coding a Spatial Multiplexing.

Beamforming je technologie využívající tzv. „chytrých“ antén, kdy za pomoci soustavy takových antén je BS schopna zaměřit se určitým směrem a v tomto směru značně vylepšit kvalitu signálu a také jeho dosah. Tuto technologii musí ovšem podporovat jak SS, tak BS, protože s sebou přináší problémy správy požadavků na připojení k síti a navýšení pásma v sektorech, kam není BS v dané chvíli zaměřena, protože tyto požadavky není možno dopředu naplánovat.

STC neboli Space Time Coding je způsob odesílání, kdy je do odesílání zapojeno více antén, přičemž se zvyšuje spolehlivost daného vysílání. V praxi je přes médium vysláno stejné množství dat, ale další antény slouží k duplikaci jednotlivých signálů a tedy i zvýšení pravděpodobnosti, že příjemce obdrží daný signál neporušený. Nedochází však přímo k duplikaci, ale na druhé anténě je vyslán komplexně sdružený signál. Tato technika je někdy nazývána také matice A (matrix A). Její formální zápis vypadá takto:

$$A = \begin{bmatrix} S_i & -\overline{S_{i+1}} \\ S_{i+1} & \overline{S_i} \end{bmatrix}$$

Spatial Multiplexing je postup opačný k STC. Slouží k navýšení přenosové rychlosti daného kanálu. Postup je jednoduchý. Na jedné anténě je vyslán symbol 1, na další symbol 2. Při použití dvou antén je tedy navýšena přenosová rychlost dvojnásobně. Tato technika se nazývá matice B (matrix B). Její formální zápis vypadá následovně:

$$B = \begin{bmatrix} S_i \\ S_{i+1} \end{bmatrix}$$



## Kapitola 8

# Srovnání technologií WiMAX a LTE

Do pomyslné krabice s názvem 3G lze zařadit mnoho standardů. V době psaní této práce lze již usoudit, které standardy mají budoucnost, a které ne. Mluvím o standardech usilujících o certifikaci na IMT-Advanced, tedy 4G. V současnosti se o toto označení ucházejí LTE-Advanced a WiMAX.

Existuje mnoho prací, kde se srovnávají technologie LTE a WiMAX. Ovšem ve většině se porovnává zcela neporovnatelné. Většina prací totiž srovnává LTE, které vyšlo na přelomu let 2008/2009 a WiMAX 1.0, který vyšel roku 2005. Je jasné, že rozdíly zejména v rychlostech budou obrovské. Proto jsem zvolil práci, která srovnává LTE a WiMAX 1.5, který vyšel roku 2009 (802.16e-2009). Následuje tabulka 8.1 převzatá z této práce [16]:

Parametr	Hodnota LTE		Hodnota WiMAX	
Duplex	FDD		FDD	
Šířka kanálu	2x20 MHz		2x20 MHz	
BS antény	2x2 MIMO		2x2 MIMO	
Modulace downlinku	64QAM		64QAM	
Kódování downlinku	5/6		5/6	
Maximální přenosová rychlost kanálu na downlinku	144 Mbps		144,4 Mbps	
SS antény	1x2 SIMO		1x2 SIMO	
Modulace uplinku	16QAM	64QAM	16QAM	64QAM
Kódování uplinku	3/4	5/6	3/4	5/6
Maximální přenosová rychlost kanálu na uplinku	43,2 Mbps	72 Mbps	82,9 Mbps	138,2 Mbps

Tabulka 8.1: srovnání LTE a WiMAX 1.5

Co se týče typů fyzických vrstev, tak obě technologie využívají SOFDMA na downlinku, ale na uplinku využívá LTE SC-FDMA. SC-FDMA má nižší Peak to Average Power Ratio

(PAPR), což v praxi znamená, že má menší spotřebu energie z baterie, což je u mobilních uživatelů velmi ceněná vlastnost.

Srovnání nástupců těchto technologií je obtížnější, protože jsou velice čerstvé – WiMAX 2 schválen roku 2011. Jelikož nejsou tyto technologie – WiMAX 2 a LTE-Advanced — ještě nasazeny v praxi, bylo by jakékoli porovnávání ztrátou času. Jisté je jedno, obě se ucházejí o dosažení požadavků standardu IMT-Advanced a ty jsou následující[3]:

- Globální roaming
- Maximální zpoždění při jednom uživateli a jednom datovém streamu a malém paketu: 10ms
- Mobilita uživatele až do 350 km/h
- Přejít uživatele z idle do aktivního stavu: méně než 100 ms
- Maximální přenosová rychlost pro stacionární uživatele 1 Gbps
- Maximální přenosová rychlost pro mobilní uživatele 100 Mbps aj.

## Kapitola 9

# Budoucnost

Blízkou budoucností je nasazení technologie WiMAX 2, která je založena na standardu 802.16m, do praxe. Nasazení WiMAXu 2 se plánuje na tento rok, tedy 2012.

V současné době má WiMAX v podstatě jediného konkurenta – LTE. Nedávný vývoj naznačuje, že velcí poskytovatelé mobilních služeb přecházejí k LTE.

Jako příklad uvedu firmu Sprint. V roce 2008 začala tato firma jako první v USA poskytovat tzv. 4G mobilní internet (což byl skvělý marketingový tah) právě skrze technologii WiMAX<sup>1</sup>. Ostatní poskytovatelé čekali na vydání technologie LTE. V dnešní době se děje pravý opak. V říjnu roku 2011 totiž společnost Sprint oznámila, že hodlá další investice směřovat do nasazení technologie LTE-Advanced<sup>2</sup>. Což jí mimochodem zajistí opět prvenství v USA v poskytování nejmodernějšího 4G, teď už doopravdy 4G. Bohužel Sprint byl jeden z velkých poskytovatelů připojení k internetu na bázi WiMAX ve světě.

Další příklad může být ruský poskytovatel Yota, který se v roce 2010 rozhodl ukončit poskytování WiMAXu a přesunout své uživatele na technologii LTE<sup>3</sup>.

Úbytek v řadách poskytovatelů je bohužel krok do hrobu, protože pokud bude méně lidí využívat WiMAX technologie, bude i méně výrobců zařízení implementující tuto technologii a to by mohlo znamenat zvýšení cen.

### 9.1 WiMAX v ČR

Co se týče budoucnosti technologie WiMAX v České republice, tak to příliš slibně nevypadá, ačkoli WiMAX je tu již nasazen. Společnost České Radiokomunikace provozuje několik vysílačů s WiMAX technologií. Avšak WiMAX využívá jen tzv. Fixed scénář, čili pouze za účelem přivedení konektivity do určitého místa, kdy klientská stanice není v pohybu. Využívá verze standardu 802.16d<sup>4</sup>. Na obrázku 9.1 je mapa infrastruktury společnosti České Radiokomunikace, kde je vidět také umístění jednotlivých vysílačů.

Avšak pro zájemce, kteří by chtěli síť WiMAX v České republice lokálně provozovat jsou dveře otevřené. V současné době jsou na českém trhu k dostání WiMAX produkty jak pro licenční pásmo (3,5 GHz), tak pro bezlicenční pásmo (5 GHz). Co se týče verzí standardů, tak lze zakoupit produkty postavené jak na 802.16d, tak 802.16e.

---

<sup>1</sup>[http://newsroom.sprint.com/press\\_kits.cfm?presskit\\_id=2](http://newsroom.sprint.com/press_kits.cfm?presskit_id=2)

<sup>2</sup>[http://newsroom.sprint.com/press\\_kits.cfm?presskit\\_id=19](http://newsroom.sprint.com/press_kits.cfm?presskit_id=19)

<sup>3</sup><http://www.reuters.com/article/2010/05/21/yota-lte-idUSLDE64K1V920100521>

<sup>4</sup><http://www.radiokomunikace.cz/cz/download/smlouva-ws-wimax.pdf>

## MAPA INFRASTRUKTURY ČESKÝCH RADIOKOMUNIKACÍ



Obrázek 9.1: Mapa WiMAX vysílačů společnosti České Radiokomunikace

## Kapitola 10

# Problematika tvorby výukové pomůcky

Zásadní věc, kterou je třeba si uvědomit je význam slova výuková pomůcka. Je to nástroj pro studenty, který jim má pomoci pochopit danou problematiku a zároveň nástroj pro učitele, kterému usnadní práci. Je to tedy doplněk k výuce.

Pokud chceme vytvořit takovou výukovou pomůcku, která bude fungovat a své uživatele zaujme a něčemu přiučí, je potřeba zamyslet se nad následujícími body:

- Kdo bude danou pomůcku využívat?
- Co chci uživateli pomůcky předat?
- Jak udělat pomůcku zajímavou?
- Jak dávkovat uživatelům znalosti?

Poté, co si zodpovíme tyto otázky, můžeme zvolit metodu, jakou budeme danou pomůcku implementovat.

### 10.1 Kdo bude danou pomůcku využívat?

Otázka cílového publika dané pomůcky je velice důležitá. Je důležité vědět, jaké znalosti budou mít její uživatelé a podle toho formulovat informace, které jim chceme prostřednictvím pomůcky předat. Vědomosti uživatele jsou totiž základ, na kterém musí tvůrce výukové pomůcky postavit svoji práci. Pokud mineme svojí práci cílové publikum, čili bude práce příliš složitá či naopak příliš jednoduchá, publikum zůstane nezaujato a nic nového se nenaučí.

### 10.2 Co chci uživateli pomůcky předat?

Co vlastně budu uživatele učit? Pokud ho budu učit algoritmus, bylo by dobré vyhnout se zbytečné „vatě“ a vysvětlit co nejjednodušeji jeho princip. Naopak, pokud ho budu učit teorii, která není v praxi příliš uchopitelná, není nutné zabíhat do detailů. I když je téma, které daná pomůcka rozebírá pro tvůrce zajímavé, studentovi už tak zajímavé přijít nemusí. Pokud je uživatel zavalen spoustou nesouvisejícího textu, je velká šance, že pomůcku prostě přestane využívat a v tom okamžiku pomůcka selhává a přestává plnit svůj účel.

### 10.3 Jak udělat pomůcku zajímavou?

Předně pomůcka nemá uživatele pobavit, jejím úkolem je předat informace. Při tvorbě výukové pomůcky – animace – jsem se zaměřil na dva body. Předávat informace co nej-jednodušeji a zapojit uživatele do běhu aplikace. První bod je jasný. Jednoduché věci se snadno chápou.

Druhý bod má velký vliv na zajímavost pomůcky. Pokud se zamyslíme nad dvěma scénáři. První scénář je animace, která běží sama a uživatel jen sleduje obrázky, které mu nabízí. Druhý scénář je animace, která člení problematiku do celků, které spouští sám uživatel, může se mezi nimi libovolně pohybovat a případně je zopakovat. Je zřejmé, že druhý scénář je mnohem zajímavější a zároveň udržuje uživatelskou pozornost.

### 10.4 Jak dávkovat uživatelům znalosti?

Tento bod se odvíjí od typu výukové pomůcky. Pokud zvolíme prezentaci, je limitujícím faktorem velikost jednotlivých slajdů. Pokud pdf dokument, je to rozměr dokumentu. V mém případě se jedná o animaci a zde je limitující faktor rozměr plátna, na kterém se děj odehrává. Limity tedy určí rámec, do kterého vpravíme obsah pomůcky.

### 10.5 Jakou pomůcku vybrat?

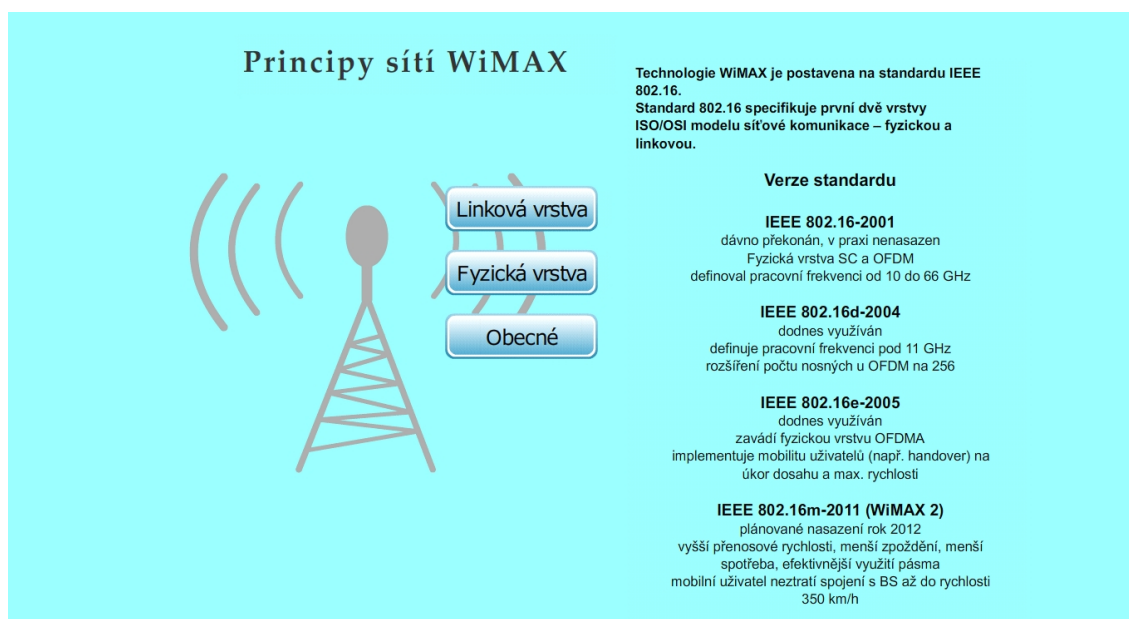
Existuje mnoho druhů výukových pomůcek, od demonstrativních aplikací přes videa a animace až po komplexní e-learningový systém, na VUT je to Moodle.

Jak jsem již zmínil, pro implementaci výukové pomůcky popisující principy WiMAX sítě jsem zvolil animaci. Animace umožňuje zaznamenat pohyb a tedy také zachytit vývoj a tím lépe popsat daný problém. Další důvod je ten, že animace je zajímavý prvek, který jistě zpestří výuku, která probíhá vesměs textově doprovázena mluveným slovem.

## Kapitola 11

# Popis implementované výukové pomůcky

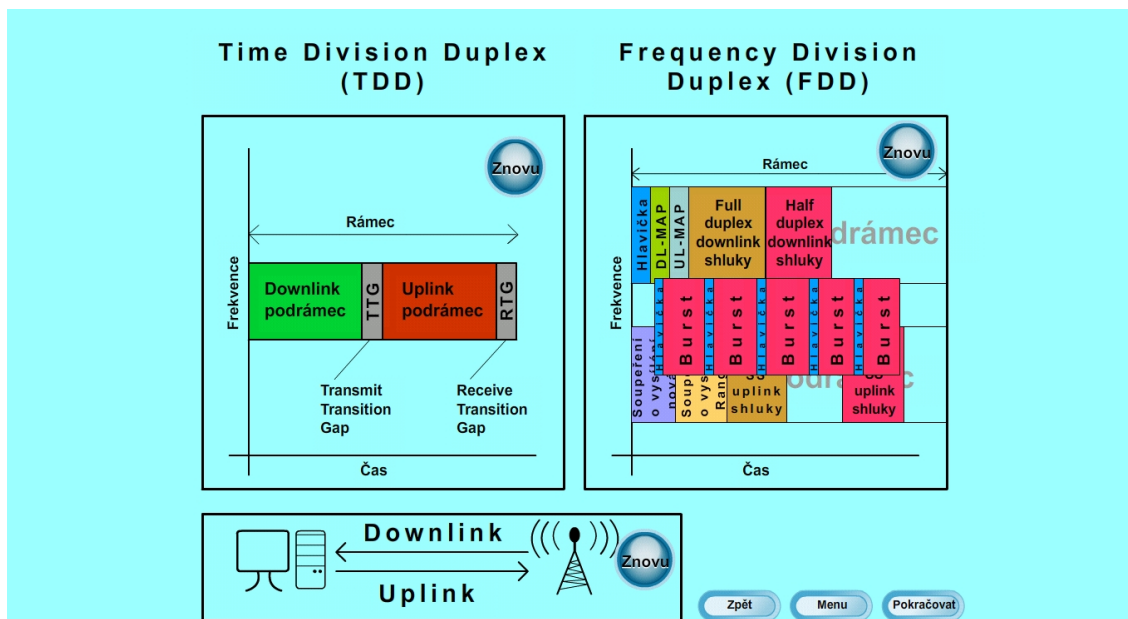
Výuková pomůcka se skládá ze čtyř částí. Hlavní menu, fyzická vrstva, linková vrstva a sekce Ostatní. V hlavním menu se nacházejí tlačítka, která vedou na jednotlivé vrstvy ISO/OSI modelu a také tlačítko vedoucí do sekce Ostatní. Na pravé straně se nachází obecný popis standardu IEEE 802.16 viz [11.1](#).



Obrázek 11.1: Ukázka menu implementované aplikace

Fyzická vrstva je pro přehlednost rozdělena na tři oddělené scény. V první scéně se nachází jednotlivé typy fyzických vrstev. Následuje scéna popisující časové rozložení vysílání uplinku a downlinku uvnitř jednoho rámce při FDD a TDD, viz [11.2](#). Poslední scéna se zaměřuje na kroky nutné k odeslání signálu a a Pokročilé anténní techniky.

Sekce Linková vrstva popisuje jednak jednotlivé podvrstvy linkové vrstvy a jejich základní funkci a jednak QoS, Handover a další procesy, které jsou blíže popsány v části této práce tomu věnované. Při návrhu jsem se snažil zachytit podstatu funkce linkové vrstvy a to



Obrázek 11.2: Ukázka jedné scény z popisu fyzické vrstvy

je řízení komunikace mezi SS a BS. Proto jsou zde oba tyto prvky sítě WiMAX zobrazeny a jednotlivé procesy jsou zasazeny do kontextu komunikace těchto dvou entit.

Poslední sekce Ostatní shrnuje principy, které není možné zasadit do kontextu ISO/OSI modelu. Jsou to topologie a také architektura samotných sítí WiMAX.

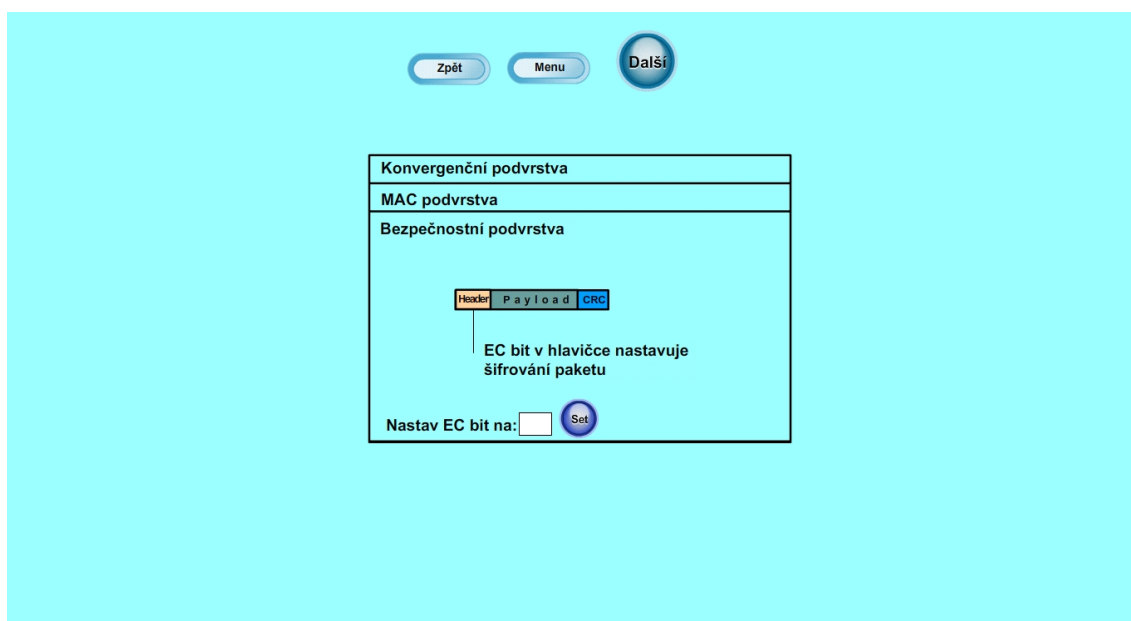
## 11.1 Popis GUI aplikace

Při návrhu uživatelského rozhraní aplikace jsem se zaměřil na co nejjednodušší ovládání. Jak je vidět na obrázku 11.2, uživatel se přesunuje mezi scénami pomocí tří tlačítek. Další/Pokračovat, Zpět a Menu. Tyto tři ovládací prvky bohatě stačí k ovládání aplikace.

Můj další cíl byl zapojit uživatele do průběhu aplikace. Na obrázku 11.3 je vidět okno vyžadující zásah uživatele, aby mohla animace pokračovat. Musí zadat buď 1 nebo 0 v závislosti na tom, zda chce daný paket zašifrovat či ne. Uživatel tím jednak získá znalost, že WiMAX takovou funkci implementuje, zároveň zjistí, že se šifruje pouze payload a nakonec také, že šifrování se nastavuje v hlavičce paketu pomocí bitu EC.

Další důležitý prvek v ovládání je tlačítko Znovu. Toto tlačítko je implementováno v každé dílčí animaci a slouží k opětovnému přehrání dané animace. Tlačítko je zde ze dvou důvodů. Za prvé jsou animace záměrně rychlejší, aby byl uživatel nucen je přehrát znovu a za druhé některé animace probíhají paralelně, takže je uživatel nemá šanci stihnout sledovat.





Obrázek 11.3: Ukázka zapojení uživatele

## Kapitola 12

# Závěr

Animace jako výuková pomůcka má opodstatnění zejména díky své názornosti. Jestliže bereme za obecnou pravdu tvrzení, že obrázek vydá za tisíc slov, tak já připojuji tvrzení, že animace vydá za tisíc obrázků, což je nadsázka, ale vystihuje to podstatu mého chápání animace při výuce.

Cílem této aplikace není vysvětlovat detailní vlastnosti této technologie, ale poskytnout základní přehled o jejím fungování. Proto jsem zvolil takovou míru abstrakce, aby jednotlivé animace byly dobře čitelné a snadno pochopitelné. Aplikace tedy přibližuje uživateli základní principy fyzické a linkové vrstvy a dále přehled o verzích standardu 802.16 a topologiích. V neposlední řadě jsem navrhl uživatelské rozhraní tak, aby uživatele aplikace zbytečně nerušilo a zároveň splňovalo základní požadavky na jednoduché ovládání. Mnou vytvořená aplikace se zaměřuje na topologii Point to Multipoint, případně Point to Point, protože jsou v ní jasně rozpoznatelné základní procesy charakteristické pro tuto technologii.

# Literatura

- [1] Bhandare, T.: LTE and WiMAX Comparison. 2008, [online], [cit 4.5.2012].  
URL [http://ieee802.org/16/docs/01/80216-01\\_58r1.pdf](http://ieee802.org/16/docs/01/80216-01_58r1.pdf)
- [2] CICONETTI, C.; LENZINI, L.; MINGOZZI, E.: A bandwidth request reiteration mechanism for IEEE 802.16 wireless networks. 2010.  
URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11276-009-0165-2>
- [3] ITU Radiocommunication Sector: Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s). 2008, [online], [cit 1.5.2012].  
URL [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2134-2008-PDF-E.pdf)
- [4] Jerjees, Z.; Al-Raweshidy, H.; Al-Banna, Z.: Optimized Handover Schemes over WiMAX. In *Wireless and Mobile Networking*, ročník 308, editace J. Wozniak; J. Konorski; R. Katulski; A. Pach, Springer Boston, 2009, ISBN 978-3-642-03840-2, s. 332–346.  
URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03841-9\\_30](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03841-9_30)
- [5] LABIOD, H.; AFIFI, H.; SANTIS, C. D.: *Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee and WiMAX*. Dordrecht: Springer, 2007, ISBN 978-1-4020-5396-2, 316 s.
- [6] MARKS, R.; aj.: The 802.16 WirelessMAN MAC: It's Done, but What Is It? 2001, [online], [cit 1.5.2012].  
URL [http://ieee802.org/16/docs/01/80216-01\\_58r1.pdf](http://ieee802.org/16/docs/01/80216-01_58r1.pdf)
- [7] Park, Y.; Adachi, F.: Overview of Mobile Communication. In *Enhanced Radio Access Technologies for Next Generation Mobile Communication*, editace Y. Park; F. Adachi, Springer Netherlands, 2007, ISBN 978-1-4020-5532-4, s. 1–37.  
URL [http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-5532-3\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-5532-3_1)
- [8] PRASAD, R.; VELEZ, F. J.: *WiMAX Networks Techno-Economic Vision and Challenges*. Dordrecht: Springer, 2010, ISBN 978-90-481-8752-2, 488 s., [online], [cit 18.4.2012].  
URL <http://www.springerlink.com/content/978-90-481-8752-2/>
- [9] SCARFONE, K.; TIBBS, C.; SEXTON, M.: Guide to Securing WiMAX Wireless Communications. 2010, [online], [cit 22.4.2012].  
URL <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-127/sp800-127.pdf>
- [10] SCHILLER, J.: *Mobile Communications*, ročník 2. Boston: Addison-Wesley, 2003, ISBN 0-321-12381-6, 492 s.

- [11] Senza Fili Consulting: Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks. 2005, [online], [cit 22.4.2012].  
URL [http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Applications\\_for\\_802.16-2004\\_and\\_802.16e\\_WiMAX\\_networks\\_final.pdf](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Applications_for_802.16-2004_and_802.16e_WiMAX_networks_final.pdf)
- [12] Shon, T.; Choi, W.: An Analysis of Mobile WiMAX Security: Vulnerabilities and Solutions. In *Network-Based Information Systems, Lecture Notes in Computer Science*, ročník 4658, editace T. Enokido; L. Barolli; M. Takizawa, Springer Berlin / Heidelberg, 2007, ISBN 978-3-540-74572-3, s. 88–97.  
URL [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74573-0\\_10](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74573-0_10)
- [13] The Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE Std 802.16<sup>TM</sup>-2004. 2004, [online], [cit 4.5.2012].  
URL <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2004.pdf>
- [14] The Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE Std 802.16e<sup>TM</sup>-2005 and IEEE Std 802.16<sup>TM</sup>-2004/Cor 1-2005. 2006, [online], [cit 4.5.2012].  
URL <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16e-2005.pdf>
- [15] WiMAX Forum. [online].c 1999–2004 [cit 18.4.2012].  
URL <http://www.wimaxforum.org/>
- [16] WiMAX Forum: WiMAX<sup>TM</sup>, HSPA+, and LTE: A Comparative Analysis. 2009, [online], [cit 20.4.2012].  
URL [http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document\\_library/wimax\\_hspa+and\\_lte\\_111809\\_final.pdf](http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/wimax_hspa+and_lte_111809_final.pdf)
- [17] WiMAX Forum: WiMAX and the IEEE 802.16m Air Interface Standard - April 2010. 2010, [online], [cit 5.4.2012].  
URL [http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document\\_library/wimax\\_802.16m.pdf](http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/wimax_802.16m.pdf)
- [18] WiMAX Forum: WiMAX<sup>®</sup> VoIP Solutions for 4G Networks. 2010, [online], [cit 20.4.2012].  
URL [http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document\\_library/WMF-M14-v01\\_WiMAX-VoIP-Solutions.pdf](http://www.wimaxforum.org/sites/wimaxforum.org/files/document_library/WMF-M14-v01_WiMAX-VoIP-Solutions.pdf)