

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

KRITICKÉ PARAMETRY PRO BEZDRÁTOVÉ SÍTĚ WIFI A WIMAX

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

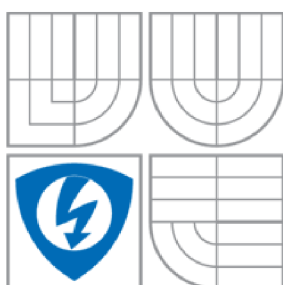
Ing. MILAN GREŠAR

BRNO 2015



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

KRITICKÉ PARAMETRY PRO BEZDRÁTOVÉ SÍTĚ WIFI A WIMAX

CRITICAL PARAMETERS FOR WIRELESS NETWORKS WIFI AND WIMAX

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. MILAN GREJAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV Filka, CSc.

BRNO 2015

ABSTRAKT

Práce bude zaměřena na problematiku kritických parametrů bezdrátových sítí WiFi a WiMAX. Bude realizována modelace sítě, na níž bude provedeno měření a zkoumány vlivy zatížení sítě na přenosovou kvalitu služeb (QoS) se zaměřením na VoIP. Na tomto modelu sítě bude simulován výpadek napájecího napětí a sledován jeho vliv na provoz po opětovném obnovení napájecího napětí. Cílem práce je prověřit míru propustnosti sítě při zachování kvality poskytovaných služeb a navrhnout ekonomicky přijatelné řešení problematiky související s výpadkem napájecího napětí přístupového bodu pro praktické využití v těchto sítích.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezdrátové sítě, WiFi, WiMAX, modelace sítě, přístupový bod AP, napájecí napětí, výpadek, QoS

ABSTRACT

My thesis will be aimed at problems of wireless networks WiFi and WiMAX. A modelling of network will be put into effect onto which the measurement will be implemented and the impacts of network load on the data transfer Quality of Service (QoS) will be examined with aiming at VoIP. On this network model a power failure will be simulated and the impacts of this failure after restoring the power supply will be monitored. The aim of this thesis is to check the rate of network throughput while preserving a providing service quality and to suggest an economically acceptable solution of the problems relating to feeding tension outage of the access point (AP) for a practical usage in these networks.

KEYWORDS

Wireless networks, WiFi, WiMAX, modelling of network, Access Point AP, power voltage, failure, QoS

GRENAR, M. *Kritické parametry pro bezdrátové sítě WiFi a WiMAX*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2015. 100 s. Disertační práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma „Kritické parametry pro bezdrátové sítě WiFi a WiMAX“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační 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 disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Upřímně děkuji vedoucímu disertační práce a svému školiteli prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za odborné vedení, za projevenou trpělivost a vstřícnost během mého doktorského studia, dále za účinnou metodickou a odbornou pomoc, podnětné návrhy a připomínky k oblasti zkoumaného tématu i za cenné rady při zpracování mé disertační práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD	13
1 BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE A PŘENOS DAT	17
1.1 Přenos dat v elektronických komunikacích	17
1.2 Bezdrátové technologie.....	18
1.3 Přehled využívání bezdrátových technologií v České republice v období 2009–2014	20
2 BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE WIFI A WIMAX	25
2.1 Princip bezdrátové technologie WiFi	25
2.2 Vývoj bezdrátové technologie WiFi	26
2.3 Přenos rádiového signálu bezdrátovou technologií WiFi	27
2.4 Typy bezdrátových sítí bezdrátových technologií WiFi a WiMAX	29
2.5 Standardy bezdrátových technologií WiFi a WiMAX	30
2.5.1 Přehled základních standardů IEEE 802.11 bezdrátové technologie WiFi	33
2.6 Zabezpečení bezdrátových sítí bezdrátových technologií WiFi a WiMAX	34
2.7 Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12.....	35
2.7.1 Rozdělení rádiového spektra v České republice	35
2.7.2 Rámcová charakteristika všeobecného oprávnění VO-R/12/09.2010-12	36
2.7.3 Správa kmitočtového spektra Českým telekomunikačním úřadem.....	38
2.7.4 Přehled využívání bezdrátových technologií WiFi a WiMAX v České republice.....	39
2.7.5 Monitoring bezdrátových technologií WiFi a WiMAX	39
2.8 Nejčastější případy porušování bezdrátových sítí bezdrátové technologie WiFi.....	41
2.8.1 Porušení v rámci celkově vyzářeného výkonu EIRP	

na kmitočtech 2,4 GHz	41
2.8.2 Porušení a neoprávněné užívání kmitočtů	48
2.8.3 Porušení provozu úmyslným zasíláním deautentizačních paketů.....	51
3 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE	53
3.1 Výzkumné šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX pomocí modelace a simulace	53
3.1.1 Stav nabízených služeb prostřednictvím bezdrátových sítí technologií WiFi a WiMAX v České republice.....	53
3.1.2 Modelace a simulace bezdrátových sítí technologií WiFi a WiMAX	54
3.1.3 Metodika experimentálního měření výpadků napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi a WiMAX.....	55
3.2 Analýza dat výzkumného šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi 2,4 GHz, 5 GHz a WiMAX 3,5 GHz.....	58
3.2.1 Bezdrátová technologie WiFi 2,4 GHz.....	58
3.2.2 Bezdrátová technologie WiFi 5 GHz.....	62
3.2.3 Bezdrátová technologie WiMAX 3,5 GHz.....	65
3.2.4 VoIP v bezdrátové technologii WiFi 5 GHz.....	68
3.3 Shrnutí výsledků výzkumného šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX pomocí modelace a simulace	69
3.3.1 Vyhodnocení experimentálního měření výpadků bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz	69
3.3.2 Vyhodnocení experimentálního měření výpadků bezdrátové technologie WiFi 5 GHz	70
3.3.3 Vyhodnocení experimentálního měření výpadků bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz	71
3.3.4 Vyhodnocení kvality přenosu VoIP v bezdrátové technologii WiFi 5 GHz.....	72
3.4 Návrh ekonomicky přijatelného řešení problematiky výpadku napájecího napětí AP pro praktické využití v bezdrátových technologiích WiFi a WiMAX	73
ZÁVĚR	76
Seznam symbolů, veličin a zkratek	80
Literatura	86

Vybraná odborná publikační a přednášková činnost autora v průběhu doktorského studia	95
Curriculum Vitae	97

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Grafické znázornění bezdrátových technologií dle parametrů – počet účastníků, rozsah signálem pokrytého území.	19
Obr. 1.2:	Grafické znázornění bezdrátových technologií u bezdrátových sítí.	21
Obr. 1.3:	Podíl širokopásmového přístupu dle jednotlivých technologických řešení (včetně přístupu v mobilní síti k 31. prosinci 2014).	22
Obr. 1.4:	Vývoj podílu širokopásmových přístupů dle jednotlivých technologických řešení na maloobchodním trhu se započítáním přístupů v mobilní síti.	23
Obr. 1.5:	Vývoj počtu účastníků využívajících <i>Internet v mobilu</i> v letech 2010–2014.	24
Obr. 1.6:	Vývoj počtu účastníků mobilního Internetu v letech 2010–2014.	24
Obr. 2.1:	Grafické znázornění jednotlivých komponentů bezdrátové technologie WiFi.	25
Obr. 2.2:	Grafické znázornění bezdrátové sítě technologie WMN.	26
Obr. 2.3:	Grafické znázornění sítě Ad-Hoc.	29
Obr. 2.4:	Jednoduchá infrastrukturní síť bezdrátové technologie.	30
Obr. 2.5:	Grafické znázornění rozdělení kanálů podle DSSS.	31
Obr. 2.6:	Orientační mapa s vyznačenými referenčními měřicími body a VRZ.	42
Obr. 2.7:	Spektrum signálů na MB1 – polarizace vertikální / polarizace horizontální.	43
Obr. 2.8:	Grafické znázornění monitoringu spektra signálů na MB2 – měřeno dne xxxx / dne yyyy.	43
Obr. 2.9:	Měření špičkové spektrální hustoty výkonu TX zařízení Planet WA-1911.	44
Obr. 2.10:	Měření celkového spektrálního výkonu TX zařízení Planet WA-1911.	45
Obr. 2.11:	Měření špičkové spektrální hustoty výkonu TX zařízení WL-1120 AP.	45
Obr. 2.12:	Měření celkového spektrálního výkonu TX zařízení WL-1120 AP.	46
Obr. 2.13:	Grafické znázornění spektra signálů VRZ před a po přeladění kmitočtu.	48
Obr. 2.14:	Data zaznamenaná přístrojem Mikrotik před přeladěním kmitočtu.	49
Obr. 2.15:	Data zaznamenaná přístrojem Mikrotik po přeladění kmitočtu.	49

Obr. 2.16:	Grafická ukázka záznamu rušení meteorologického radaru v reálném čase sítěmi RLAN.	50
Obr. 2.17:	Data měřicího přístroje Mikrotik o zasílání deautentizačních paketů způsobujících výpadky komunikace na AP.	51
Obr. 2.18:	Printscreen detailů deautentizačního paketu.	52
Obr. 3.1:	Grafické znázornění zapojení bezdrátové technologie Wifi a WiMAX při modelaci bezdrátové sítě.	55
Obr. 3.2:	Grafické znázornění zapojení bezdrátové technologie Wifi a WiMAX při simulaci výpadků AP a ÚZ a jejich variant.	58
Obr. 3.3:	Zapojení modelace sítě pro testování přenosu VoIP.	68
Obr. 3.4:	Grafické vyhodnocení časů náběhu WiFi sítě v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz.	70
Obr. 3.5:	Grafické vyhodnocení časů náběhu WiFi sítě v kmitočtovém pásmu 5 GHz.	71
Obr. 3.6:	Grafické vyhodnocení časů náběhu WiMAX sítě v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz.	72
Obr. 3.7:	Grafické vyhodnocení náběhu zprůměrovaných naměřených hodnot v jednotlivých sítích a variantách.	73
Obr. 3.8:	Blokové schéma PSC-60.	74
Obr. 3.9:	Ukázka vlastní realizace navrženého záložního zdroje – 12V s PSC-60.	74
Obr. 3.10:	Ukázka vlastní realizace navrženého záložního zdroje – 48V s AD-155.	75

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Přehled o přibližné velikosti útlumu různých stavebních materiálů	28
Tab. 2.2: Přehled základních standardů IEEE 802.11	33
Tab. 2.3: Technické parametry stanic	38
Tab. 2.4: Přehled naměřených a vypočítaných hodnot na VRZ.	48
Tab. 3.1: Přehled variant výpadků napájecího napětí AP a ÚZ.....	57
Tab. 3.2: Výsledky 1. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.	60
Tab. 3.3: Výsledky 2. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.	60
Tab. 3.4: Výsledky 3. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.	60
Tab. 3.5: Výsledky 4. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.	61
Tab. 3.6: Výsledky 5. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.	61
Tab. 3.7: Výsledky 6. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.	61
Tab. 3.8: Výsledky 1. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.	63
Tab. 3.9: Výsledky 2. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.	63
Tab. 3.10: Výsledky 3. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.	63
Tab. 3.11: Výsledky 4. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.	64
Tab. 3.12: Výsledky 5. varianty experimentálního měření výpadků napájecího	

	napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.	64
Tab. 3.13:	Výsledky 6. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.	64
Tab. 3.14:	Výsledky 1. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.	66
Tab. 3.15:	Výsledky 2. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.	66
Tab. 3.16:	Výsledky 3. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.	66
Tab. 3.17:	Výsledky 4. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.	67
Tab. 3.18:	Výsledky 5. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.	67
Tab. 3.19:	Výsledky 6. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.	67
Tab. 3.20:	Výsledky provedeného experimentu ke kvalitě telefonních hovorů – přenosu hlasu bezdrátovou technologií WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz.	69
Tab. 3.21:	Souhrnná tabulka zprůměrovaných naměřených hodnot v jednotlivých sítích a variantách.	72

ÚVOD

Zatímco před třiceti lety bylo největším problémem získat přístup k informacím obecně, dnes se jeví jako zásadní problém umět množství snadno dostupných informací a zdrojů v klasické i elektronické podobě kriticky a vhodným způsobem zpracovat, vybrat to podstatné, vyčlenit informace zavádějící, neúplné či přímo nepravdivé, a korektně pak pracovat pouze s informacemi původními, relevantním způsobem ověřenými a verifikovanými, informace jsou totiž všude kolem nás. Shromažďovat informace, údaje a data je jeden ze současných trendů moderní doby a nejmodernější technologie to umožňují takřka v neomezené míře. Už zdaleka tolik pozornosti však není věnováno kvalitě a verifikaci těchto informací, stejně tak skutečnosti, k čemu jsou tyto informace v teoretické i praktické rovině užívány, tj. proč a za jakým účelem byly pořízeny, jak budou využity a také jaká cena za tento „informační komfort“ je pravidelně uživatelem hrazena.

Dnešní optikou je vnímáno jako samozřejmost, že současné technologie nabízejí vedle specialistů i laické uživatelské veřejnosti nástroje s takovými kvalitativními i kvantitativními parametry, o nichž se předchozí generaci uživatelů v 70. a 80. letech 20. století ani nesnilo. Zapojení špičkových technologicky náročných zařízení, postupů, strategií a vůbec techniky v tom nejširším slova smyslu do pracovní i privátní sféry s sebou zákonitě a logicky nese i větší nároky již na její pořízení, stejně tak na následný provoz a zajištění stability specifických provozních podmínek, na provádění cyklické údržby spolu se servisní činností a průběžnými inovacemi. V neposlední řadě tento proces klade zvýšené nároky na lidský faktor, tj. příslušný personál musí být dostatečně kvalifikován, náležitě celoživotně vzděláván a průběžně proškolen.

Bouřlivý vývoj byl zaznamenán v posledních desetiletích na poli přenosu dat, jenž může být realizován různými způsoby konektivity.

Předmětem odborného zájmu této disertační práce budou v rámci bezdrátových přenosových sítí bezdrátové technologie WiFi (Wireless Fidelity) [11] a WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [65].

Hlavním stanoveným cílem předložené disertační práce je pomocí simulace výpadku napájecího napětí přístupového bodu (dále AP – Access Point) a koncového účastnického zařízení (dále ÚZ) na modelových bezdrátových sítích WiFi a WiMAX [95] ověřit aktuální stav těchto sítí a jejich vlastní činnost po opětovném obnovení napájecího napětí a uvedení do provozu a dále případné poškození těchto bezdrátových sítí. Následně je nutno navrhnout ekonomicky přijatelné vhodné řešení problematiky bezprostředně související s výpadkem napájecího napětí včetně zkoumání vlivu zatížení sítě na přenosovou kvalitu služeb se zvláštním zřetelem na VoIP (Voice over Internet Protocol) [4].

Jedním z typických rysů vývojových trendů v moderních komunikačních technologiích v současné době je jejich prolínání, vzájemná kompatibilita a zastupitelnost mobilních zařízení, což je nejvíce patrné u přenosu hlasu a dat.

Z hlediska technického řešení datové mobilní komunikace jsou již nyní k dispozici

přístupové body, jež umožňují primárně přijímat data pomocí technologie LTE (Long Term Evolution), a vytvářet tak potřebnou konektivitu pomocí bezdrátové technologie WiFi pro vícero mobilních zařízení ve veřejném, firemním i privátním prostoru prostřednictvím bezdrátových sítí.

Nynější strategické směřování vývoje mobilní komunikace, jež lze globálně vysledovat u předních nadnárodních společností zaměřujících se na tyto technologie, je maximální využití stávajících již vybudovaných a zároveň i nejrozšířenějších bezdrátových sítí, a to bezdrátové technologie WiFi a UMTS/LTE (Universal Mobile Telecommunication System / Long Term Evolution) na jednom mobilním zařízení. Mobilní zařízení není zapotřebí mechanicky přepínat mezi sítěmi a vlastní přepnutí mezi využívanými síťovými technologiemi je v něm realizováno plně automaticky.

Ke konkrétní realizaci tohoto strategického směru vývoje mobilní komunikace přistupují lídři nadnárodních firem různě.

Např. společnost Ericsson upřednostňuje službu WiFi Calling [53], jež zajišťuje prostřednictvím bezdrátové sítě WiFi využívání mobilního zařízení pro přenos hlasu ve veřejném, firemním i privátním sektoru v případě nedostatečného nebo zcela absentujícího pokrytí oblasti mobilním signálem operátory [53]. Operátorům, již disponují rychlými mobilními datovými sítěmi LTE se spuštěnou službou VoLTE (Voice over LTE)¹, dovoluje služba WiFi Calling využití libovolné sítě WiFi v dosahu mobilního zařízení. Telefonování přes WiFi sítě [4], [75] dnes umožňují tzv. chytré telefony se službou WiFi Calling, kdy jejich uživatelé nemusejí provádět žádnou doplňující instalaci dodatečných aplikací ani přenastavení softwarového vybavení těchto typů telefonů. Velkou výhodou využití služby WiFi Calling by v budoucnosti mohlo být uskutečňování cenově příznivých telefonních hovorů ze zahraničí, tj. eliminovat tak roamingový poplatek.

V současné době jsou při budování sítí využívány produkty rozličných výrobců i různých parametrů a rozdílné kvality a ceny. Výše uvedené skutečnosti a fakta představují logické argumenty a jasné důvody zájmu této práce o problematiku bezdrátové technologie WiFi.

Tato disertační práce se zabývá bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX a jejich kritickými parametry. Vzhledem k šíři vycíleného cíle disertačního úkolu je nutno v rámci první kapitoly provést teoretický vhled do problematiky bezdrátové technologie WiFi a WiMAX v kontextu bezdrátových sítí, přenosu dat, jejich klasifikace a krátkého nastínění vývoje těchto technologií až po současnost.

V druhé kapitole je nejprve traktován princip bezdrátových technologií WiFi a WiMAX na pozadí jejich vývoje v posledním čtvrtstoletí, podstata a technika přenosu rádiového signálu bezdrátovou technologií WiFi. Posléze jsou vymezeny jednotlivé typy bezdrátových technologií WiFi a WiMAX a popsány standardy bezdrátových technologií, jejich vzájemné srovnání z hlediska časové osy a otázka zabezpečení bezdrátových sítí bezdrátových technologií WiFi a WiMAX se zvláštním důrazem na parametry – bezpečnost přenášených dat, datová propustnost.

Poté je pozornost zaměřena na teoretický výklad k všeobecnému oprávnění VO-

¹ VoLTE je technologie, díky níž lze přenášet hlasové hovory přímo prostřednictvím sítě LTE.

R/12/09.2010-12 [20] a jeho rámcovou charakteristiku a metodiku rozdělení rádiového spektra v České republice. Stručně je popsána role Českého telekomunikačního úřadu jako správce a zároveň regulátora kmitočtového spektra v České republice. Jednou za základních povinností Úřadu je monitoring dodržování všeobecných a individuálních oprávnění k využívání kmitočtového spektra. Zároveň je podán přehled o využívání bezdrátových technologií WiFi a WiMAX u nás.

V závěrečné části druhé kapitoly se práce soustředí na tři nejčastější případy porušování všeobecného oprávnění VO-R/12/09.2010-12 u bezdrátových sítí bezdrátové technologie WiFi v praxi. V prvním případě je řešeno porušení celkového vyzářeného výkonu, konkrétně ekvivalentního izotropně vyzářeného výkonu neboli EIRP v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz. Další případ se týká neoprávněného užívání kmitočtů podnikateli v EK, tj. v elektronických komunikacích, a uživateli vysílacího rádiového zařízení neboli VRZ z řad firemní klientely i laické veřejnosti. V třetím příkladu je popsán nejzávažnější případ porušování VO-R/12/09.2010-12, a to rušení provozu bezdrátové sítě WiFi technologie jiným účastníkem, často konkurentem, úmyslným zasíláním deautentizačních paketů.

Třetí kapitola disertační práce je rozčleněna do čtyř podkapitol, jež jsou dále rozděleny do jedenácti dílčích oddílů. V této třetí kapitole jsou prezentovány výsledky výzkumného šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX a jejich kritických parametrů.

V první podkapitole třetí kapitoly jsou vymezeny cíle práce a realizovaného výzkumného šetření, a to modelovat síť bezdrátových technologií WiFi [97] a WiMAX [80], simulovat výpadek napájecího napětí přístupového bodu – AP nebo účastnického zařízení – ÚZ v modelové síti, experimentálně ověřit vliv zatížení sítě na přenosovou kvalitu služeb se zvláštním zřetelem k VoIP [76] a navrhnout vhodné řešení pro eliminaci přímých následků výpadků napájecího napětí bezdrátových technologií na provoz bezdrátových sítí.

Analýza dat výzkumného šetření je předmětem zájmu druhé podkapitoly, kdy jsou postupně analyzovány modelové situace, jež mohou nastat v reálném provozu v kmitočtových pásmech 2,4 GHz a 5 GHz bezdrátové technologie WiFi, v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz bezdrátové technologie WiMAX a při přenosu dat, tj. vliv zatížení sítě na přenosovou kvalitu telefonních hovorů – VoIP. Posléze je přistoupeno k experimentálnímu měření výše uvedených modelových situací.

Třetí podkapitola disertační práce se soustřeďuje na vyhodnocení realizovaných modelových měření výpadků při přenosu dat v bezdrátové síti, přičemž měření je prováděno postupně vždy v 6 variantách s četností 10 pokusů za provozu modelové sítě v kmitočtových pásmech 2,4 GHz a 5 GHz bezdrátové technologie WiFi, v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz bezdrátové technologie WiMAX a vyhodnocení kvality VoIP v bezdrátové technologii WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz.

Čtvrtá podkapitola je plně věnována poslednímu dílčímu cíli práce – návrhu ekonomicky přijatelného řešení problematiky související s výpadkem napájecího napětí a s kritickými parametry sítí bezdrátových technologií WiFi a WiMAX, sestavení tohoto vhodného zařízení a jeho následného ověření v provozu modelové bezdrátové sítě.

V závěru disertační práce jsou provedena dílčí shrnutí teoretických i experimentálních výsledků a na jejich základě jsou formulovány souhrnné závěry.

Nedílnou součástí předkládané práce je seznam odborné literatury a použitých pramenů. Práce je vybavena poznámkovým aparátem, seznamy obrázků, tabulek a seznamem symbolů a zkratk, usnadňujícími orientaci v disertační práci.

1 BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE A PŘENOS DAT

V této kapitole je podán základní přehled o přenosu dat a o bezdrátové technologii, konkrétně je ozřejměn princip přenosu datového signálu, historie a vývoj po současný stav bezdrátové technologie. Dále je provedena klasifikace bezdrátových sítí podle různých parametrů a je prezentován přehled o využívání bezdrátových technologií v České republice.

1.1 Přenos dat v elektronických komunikacích

Termínem přenos dat v rámci sdělovací techniky jako nástroje elektronické komunikace je označován akt neboli proces přenosu dat, tj. informací, sdělení či zpráv, od zdroje k příjemci dat. Přenos dat je realizován různými způsoby prostřednictvím rozličné škály nejrůznějších přenosových zařízení.

Používaná zařízení pro přenos dat nabízejí dva způsoby konektivity, a to pevnou nebo mobilní konektivitu, přičemž pevnou konektivitu lze realizovat napojením na metalické nebo optické přenosové vedení. Pro přenos dat je jako nejfrekventovanější typ přenosu v současné praxi využíváno přenosové sdělovací vedení, kdy je za tímto účelem využíván modem xDSL (xDSL – Digital Subscriber Line) a jeho různé vývojové řady, nabízející klasickou datovou Ethernet konektivitu².

O typu přenosu pomocí pevné konektivity lze konstatovat, že je považována za standardní. S příchodem nových technologií se zvyšuje přenosová rychlost, názvy však zůstávají zachovány stejné (Ethernet 10Mb/s, 100Mb/s, 1 Gb/s atd.) [70], [102].

Termínem bezdrátové připojení je označována datová síť, jež využívá k přenosu dat rádiové vlny. V podstatě se jedná o dvousměrné rádio založené na principu přijímač – vysílač na bázi bezdrátové technologie.

Z hlediska principu přenosu datového signálu bezdrátovou technologií [23] je možno klasifikovat dva druhy bezdrátového přenosu datového signálu. Kromě bezdrátových sítí využívajících k přenosu dat rádiový signál, jimiž se bude disertační práce zabírat podrobněji a jež jsou v teoretické i výzkumné rovině hlavním předmětem bádání v rámci disertačního úkolu, existují i bezdrátové sítě, jež přenos dat realizují pomocí optických spojů.

Přenos dat založený na optických spojích [75], [103] je ve srovnání s dalšími typy přenosu, neboť kromě již zmíněného přenosu dat rádiovým signálem lze zajistit přenos dat např. i po metalice či optice, mnohem více ovlivněn povětrnostními podmínkami, konkrétně deštěm, sněhem či mlhou, a ve srovnání s přenosem prostřednictvím rádiového signálu je vhodný na kratší vzdálenost. Přenosová vzdálenost je v tomto

² Ethernet podle Winklera „představuje standard ve vytváření lokálních sítí LAN. Byl vyvinut již v roce 1973 firmou Xerox a uveden na trh v roce 1980 firmou Intel, DEC a Xerox“ [98], v současnosti jsou jeho přenosové výkony neustále zvyšovány.

případě teoreticky vymezena maximální vzdáleností 10 km od optického spoje [92], [93], avšak jak ukázala praxe, přenos dat prostřednictvím optického spoje je plně funkční a komfortní do podstatně menší vzdálenosti ve srovnání s teoretickým vymezením, a to do vzdálenosti 2 km. Nezbytnou podmínkou pro přenos datového signálu pomocí optických spojů je přímá viditelnost mezi vysílači a přijímači signálu.

V praxi byl opakovaně řešen případ výpadků laserového optického spoje, kdy problém s kvalitou přenosu byl způsoben tzv. sedáním nově postavené nemovitosti. To způsobovalo neustálé rozlaďování optického spoje, takže bylo nutno opětovně zaměřovat optickou trasu pro přenos dat a v krátkých časových sledech provádět korekci optické trasy.

Výhodou přenosu dat pomocí optických spojů je rychlá montáž vysílačů a přijímačů signálu a za druhou výhodu lze označit i nemožnost odposlechu na trase přenosu.

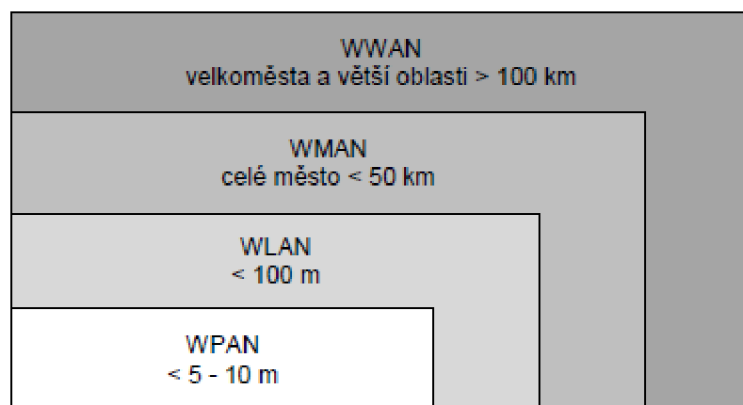
1.2 Bezdrátové technologie

Nyní bude proveden stručný teoretický vhled do problematiky bezdrátových technologií [83], [85].

Spoluautoři McCarthy a Weldon-Silviy ve své monografii [54, s. 254–255] popisují různé typy sítí dle konkrétních parametrů – počet účastníků, rozsah signálem pokrytého území. Definiují přitom různé typy sítí³ [84], [91], a to metropolitní bezdrátové síť, označované zkratkou WMAN neboli Wireless Metropolitan Area Networks [61], dále místní bezdrátové síť s názvem WLAN – Wireless Local Area Networks⁴, a osobní bezdrátové místní síť WPAN – Wireless Personal Area Networks [72]. Poslední jmenovaný název se však v praxi neujal, a tak jsou i osobní bezdrátové síť v současnosti označovány zkratkou WLAN [73]. Janeček a Bílý [46, s. 116] doplňují tento výčet typů bezdrátových sítí o bezdrátové směrové spoje, jež nazývají zkratkou FBWA – Fixed Broadband Wireless Access, a dále rozlišují bezdrátovou ultra širokopásmovou technologii pojmenovanou zkratkou UWB – Ultra Wideband. Carroll [12] na základě vybraných typových třídících parametrů v hierarchickém uspořádání navíc předsazuje před MAN bezdrátové síť tzv. bezdrátové velké oblastní síť s označením WWAN – Wireless Wide Area Networks. V doktorské práci je respektováno hierarchické uspořádání bezdrátových technologií WWAN, WMAN, WLAN a WPAN [46] – viz obr. 1.1.

³ Existují dva základní typy sítí – WAN neboli Wide Area Network a LAN neboli Local Area Network, kdy WAN „označuje velkou počítačovou síť celosvětového rozsahu, jejímž nejznámějším příkladem Internet. Síť WAN většinou propojují mnoho sítí LAN“ [98, s. 451] a LAN je „softwarové a hardwarové propojení několika počítačů. Smyslem je výměna dat mezi jednotlivými uživateli a společné využití hardwarových zdrojů“ [98, s. 207]. U LAN se většinou jedná o podnikové síť a síť státních a soukromých společností, organizací a institucí.

⁴ WLAN je Winklerem vymezena jako „bezdrátová lokální (místní) počítačová síť (Wireless LAN), která pro přenos dat používá rádiové spojení či technologii infračerveného záření“ [98, s. 457]. V praxi jsou využívány nejrůznější standardy, umožňující v závislosti na konkrétních rychlostech přenosu dat různý dosah.



Obr. 1.1: Grafické znázornění bezdrátových technologií dle parametrů – počet účastníků, rozsah signálem pokrytého území.

Především mobilní konektivita prochází v posledních desetiletích bouřlivým vývojem, jenž je podmiňován stupňujícími se nároky a požadavky na rychlost a množství přenášených dat – viz různé technologie pro bezdrátový přenos dat jako např.:

- CSD – Circuit Switched Data, přepojování okruhů;
- HSCSD – High Speed Circuit Switched Data, vysokorychlostní přepojování okruhů;
- GPRS – General Packet Radio Service, všeobecný balík radiokomunikačních služeb;
- EDGE – Enhanced Data Rates for Global Evolution, vylepšená propustnost pro globální evoluci;
- CDMA – Code Division Multiple Access, kódové dělení přístupových kanálů (a s variantou jako např. CDMA2000 (Code Division Multiple Access) 1xEV-DO (Evolution-Data Optimized) dle příslušné revize);
- UMTS – Universal Mobile Telecommunication System, další stupeň mobilní telefonie, označovaný jako 3G (third generation), tj. třetí generace GSM sítí (Groupe Spécial Mobile / Global System for Mobile Communications);
- HSDPA – High-Speed Downlink Packet Access, další stupeň mobilní telefonie, označovaný jako 3,5G, tj. třiapůltá generace GSM sítí;
- LTE – Long Term Evolution, v současnosti nejnovější stupeň mobilní telefonie, označovaný jako 4G (fourth generation), tj. čtvrtá generace mobilních sítí.

Technologie HSCSD „umožňuje díky sdružování kanálů v sítích GSM a GSM2+ datový přenos rychlostí až 57,6 Mbit/s“⁵ [98, s. 156]. U GPRS „není nikdy garantována rychlost spojení, protože GPRS využívá volné místo (slot) v síti GSM“ [98, s. 140],

⁵ Mbit/s – megabit za sekundu, jednotka přenosové rychlosti. V odborné literatuře je možno nalézt variantní označení této jednotky, a to značku Mbit/s, nebo Mb/s, popř. Mbps – z anglického sousloví bit per second, v této práci je užíváno označení jednotky přenosové rychlosti Mb/s.

přičemž hovory jsou upřednostňovány před datovými přenosy pomocí GPRS. EDGE přesněji značí „vylepšenou metodu modulace v sítích GPRS a HSCSD, umožňující třikrát až čtyřikrát rychlejší přenos dat“ [98, s. 106]. Konkrétněji CDMA představuje jednu z technologií „pro přenos signálů do sítí mobilních telefonů. Na rozdíl od GSM nebo TDMA⁶ jsou data šířena po celé šířce pásma, která je k dispozici. Vícenásobné hovory se překrývají na jednom kanálu a jsou označeny jednoznačným segmentem kódu“ [98, s. 54]. Winkler upřesňuje, že datový systém UMTS splňuje „požadavky ITU IMT 2000⁷, který dosahuje datové přenosové rychlosti až 23 Mbit/s“ [98, s. 427] a dodává, že „tuto přenosovou rychlost však nelze poskytovat celoplošně, nýbrž pouze v určitých budovách a takzvaných aktivních bodech (hotspot⁸)“ [98, s. 427].

Zkratky výše uvedených názvů moderních technologií pro přenos dat zároveň dokumentují fakt, že každá nová technologie a její průběžné inovace s sebou přinášejí i nový název, většinou tvořený abreviaturně z prvních písmen jednotlivých slov odborného sousloví. K mobilnímu přenosu dat je od počátku využívána tzv. technologie WiFi – Wireless Fidelity [8], [68], jež představuje i jeden z základních pilířů datové komunikace. WiFi technologií je „označení pro bezdrátová zařízení, která jsou navzájem kompatibilní“ [98, s. 453] a musí plně vyhovovat požadavkům standardu IEEE-802.11⁹. Základ bezdrátových přístupových sítí je tvořen přístupovými body, představujícími zároveň most mezi bezdrátovou technologií a pevným spojem (tj. kabelovou sítí – např. xDSL), jež zajišťuje jejich propojení, a představuje tak jednu z jeho nejdůležitějších funkcí.

Do takto řešené bezdrátové sítě [88], [89] je umožněn vstup dle konkrétních požadavků příslušných uživatelů [24]. Přístupové body tak vytvářejí oblasti – tzv. oblasti pokrytí signálem, v nichž je zajištěn přístup mobilních stanic. Jednotlivé oblasti se z důvodu zvýšení kvality pokrytí signálem nebo kvůli potřebě pokrýt signálem komplikované území či prostředí mohou částečně vzájemně překrývat, přičemž je pomocí technologií WLAN [23], [34] umožněno transparentní předávání mobilních stanic mezi jednotlivými přístupovými body.

1.3 Přehled využívání bezdrátových technologií v České republice v období 2009–2014

Ve výroční zprávě Českého telekomunikačního úřadu (dále ČTÚ) za rok 2010 [21] činí podíl širokopásmových přístupů k Internetu pomocí technologií WLL (Wireless Local Loop) – jako např. WiFi – FWA (Fixed Wireless Access) 25,7 %, a zaujímá tak 2. místo

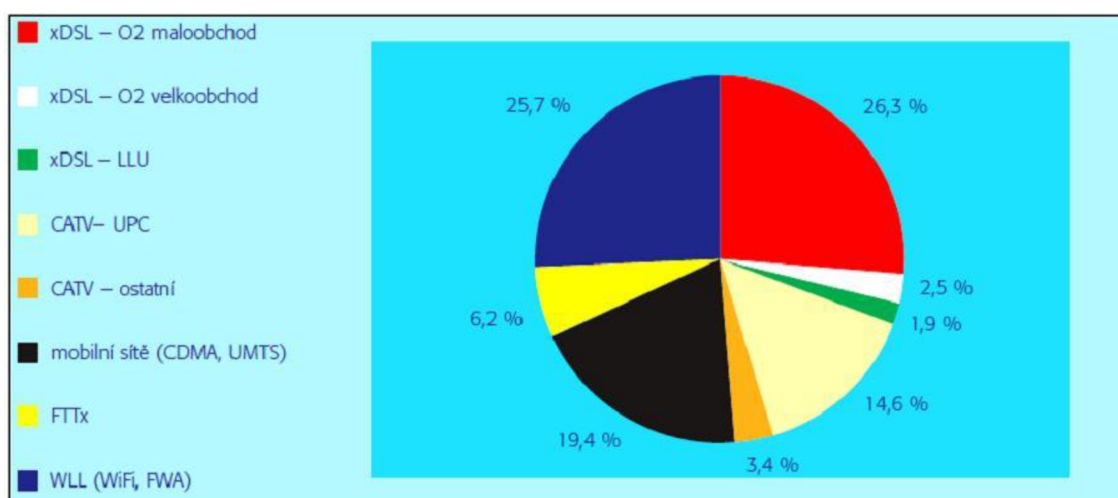
⁶ TDMA – Time Division Multiple Access – deterministická metoda přístupu k médiu pro sdílené sítě.

⁷ ITU IMT 2000 – International Telecommunication Union International Mobile Telecommunications 2000.

⁸ Hotspot – přístupový bod (Access Point – AP). V odborné literatuře je možno nalézt variantní označení přístupového bodu, a to zkratku AP neboli přístupový bod, popř. Hotspot/hotspot. V této práci je pro přístupový bod užíváno označení abreviaturou AP.

⁹ Bezdrátové technologie WiFi, jež vyhovují standardu IEEE-802.11 [54], jsou následně certifikovány.

v rámci všech provozovaných komunikačních technologií. Pro lepší představu je vhodné uvést, že technologie xDSL, tedy ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) a nově VDSL¹⁰ (Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line), jež obsadily 1. místo, zaujímají 28,8 % a mobilní sítě (CDMA, UMTS) se umístily na 3. místě a podíl z celého širokopásmového přístupu k Internetu u nich činí – 19,4 % – viz obr. 1.2. A teprve s odstupem na podílu širokopásmových přístupů větším než 10 % se za těmito výše uvedenými technologiemi z prvních třech míst pomyslného pořadí řadí další typy technologií jako např. přenos prostřednictvím kabelové televize CATV-UPC (Cable Television / United Pan-Europe Communications), přenos prostřednictvím optického vedení FTTx (Fiber to the x) a další.

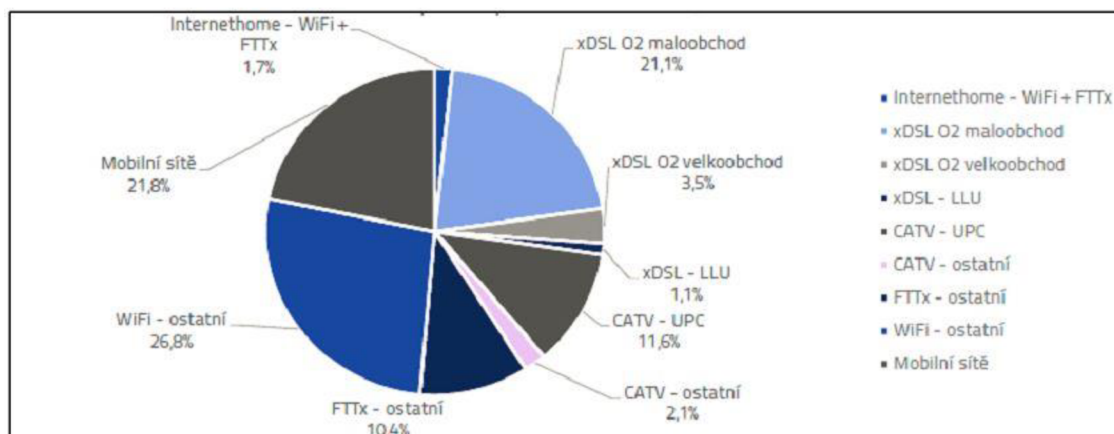


Obr. 1.2: Grafické znázornění bezdrátových technologií u bezdrátových sítí.

Z výroční zprávy ČTÚ z roku 2014 [22] je evidentní nárůst služeb poskytovaných prostřednictvím technologie WiFi a též nárůst podílu širokopásmových přístupů k Internetu poskytovaných pomocí mobilních sítí oproti údajům z roku 2010, což je doloženo i výsledky vzájemného porovnání těchto dat. Konkrétně WiFi, FWA (Fixed Wireless Access) zaujímala v roce 2010 25,7 % z celkového podílu širokopásmových přístupů k Internetu a v roce 2014 již 26,8 %, podíl mobilních sítí (CDMA, UMTS) činil v roce 2010 19,4 % a v roce 2014 to bylo 21,8 %. V roce 2014 jako nejrozšířenější technologie s nejvyšším podílem širokopásmových přístupů k Internetu byla vyhodnocena technologie WiFi, jež tak postoupila na 1. místo v pořadí bezdrátových technologií, a taktéž se o jedno místo vpřed v pořadí technologií poskytujících širokopásmový přístup k Internetu posunuly mobilní technologie, jež v roce 2014 zaujaly 3. místo v rámci celkového podílu jednotlivých technologií na širokopásmovém přístupu k Internetu. Z výše uvedených dat lze proto z hlediska dlouhodobých trendů a technologického směřování vyvodit dílčí závěr, že technologie xDSL, tj. ADSL a nově VDSL [98], ztratila své výhradní postavení v technologiích poskytujících širokopásmový přístup k Internetu a v současnosti není účastníky tak preferována a aktivně využívána, tudíž v roce 2014 se propadla z 1. na 2. místo v celkovém podílu

¹⁰ Pro VDSL (Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line) bývá v odborné literatuře užíváno též označení VHDSL, druhá generace systému pak VDSL2.

širokopásmového přístupu k Internetu. Nicméně její technologické možnosti ještě nejsou zcela vyčerpány a lze předpokládat, že tato technologie bude v příslušné modifikaci využívána i v budoucnu a určitý podíl na širokopásmovém přístupu k Internetu si zachová. Tento dílčí závěr je podporován i faktem, že v první polovině roku 2015 je realizován provoz v testovacím režimu technologie xDSL s vektoringem. Přehled podílu jednotlivých technologií na širokopásmovém přístupu k Internetu k datu 31. prosince 2014 je graficky doložen níže – viz obr. 1.3.

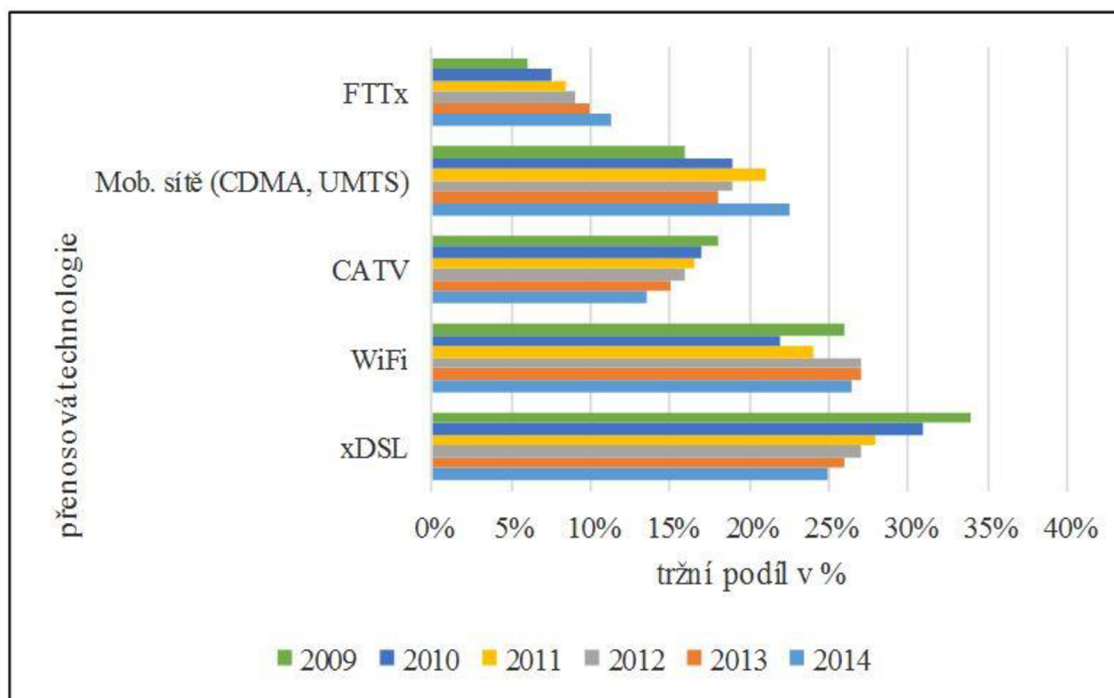


Pozn. *využito kvalifikovaných odhadů.

Obr. 1.3: Podíl širokopásmového přístupu dle jednotlivých technologických řešení (včetně přístupu v mobilní síti k 31. prosinci 2014).

Dlouhodobý vývoj technologií, jež poskytují širokopásmový přístup k Internetu dle jednotlivých technologických řešení na maloobchodním trhu se započítáním přístupů v mobilní síti, tj. v letech 2009–2014, je graficky znázorněn na obrázku – viz obr. 1.4.

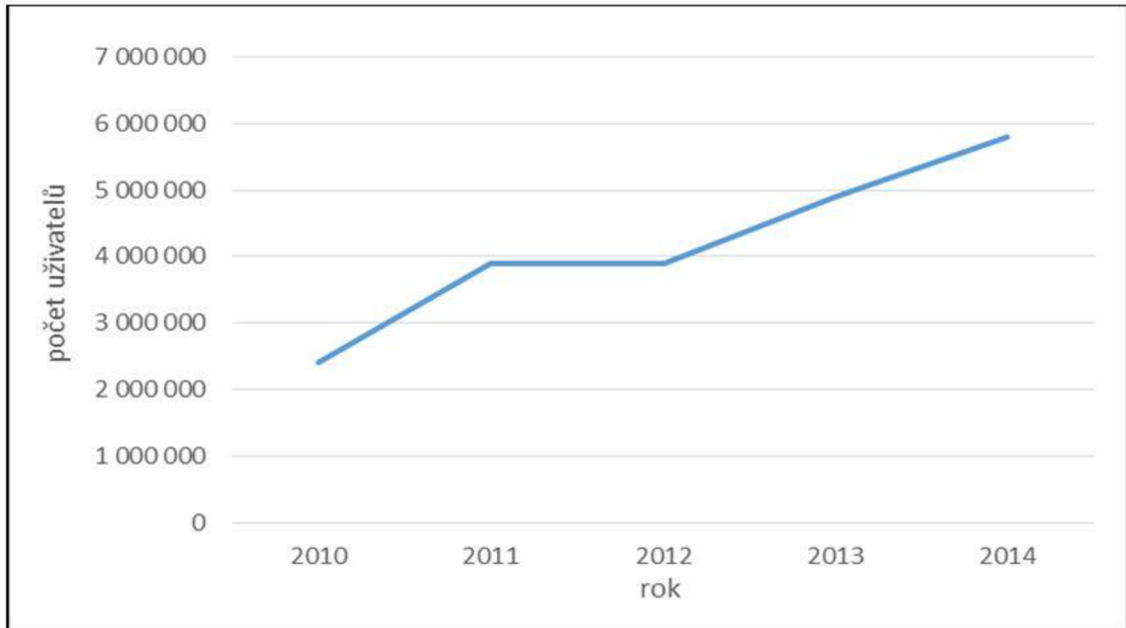
Na grafickém znázornění – viz obr. 1.4 – je jasně zobrazen pravidelný každoroční nárůst technologií FTTx [98], tj. optických přístupových sítí FTTx (Fiber to the X) ve sledovaném období v rozmezí let 2009–2014, umožňující z hlediska rychlosti a kvality nejlepší širokopásmový přístup k Internetu. Grafické znázornění jasně promítá přímý vliv nasazení jednotlivých technologií a jejich realizovaných modernizací na nárůst jejich podílu na širokopásmovém přístupu k Internetu technologií mobilního Internetu, tzv. Internetu v mobilu – viz data ve sloupcovém grafu s označením Mobilní sítě (CDMA, UMTS) na obr. 1.4.



Obr. 1.4: Vývoj podílu širokopásmových přístupů dle jednotlivých technologických řešení na maloobchodním trhu se započítáním přístupů v mobilní síti.

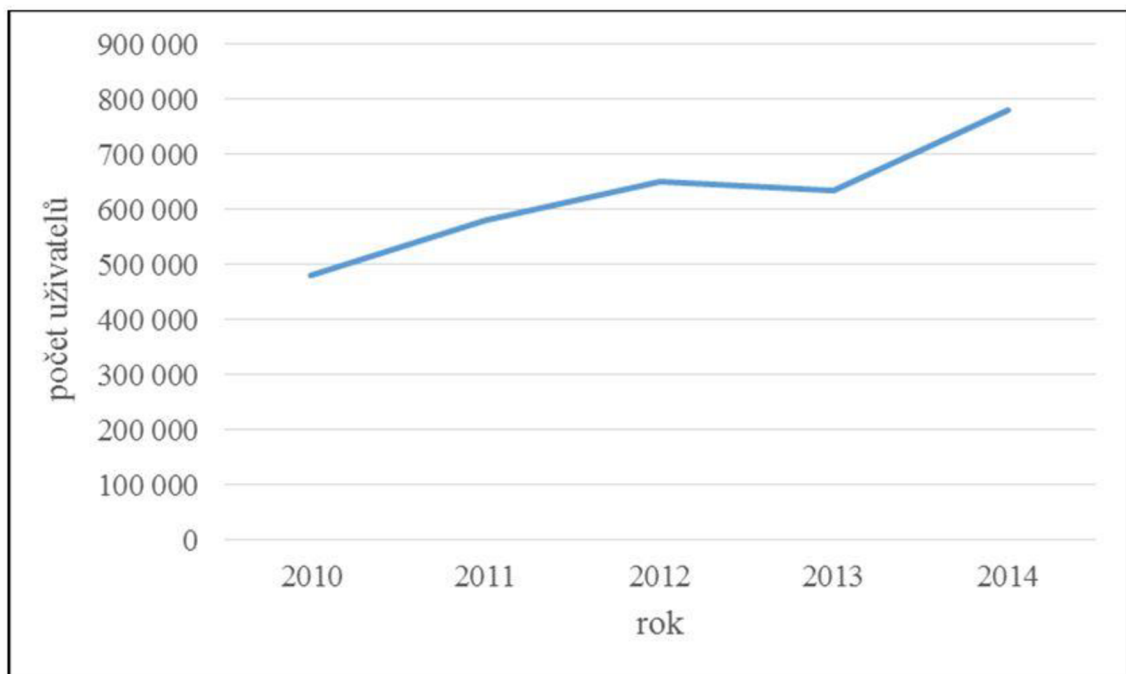
V současné době je nabízen mobilní internet telekomunikačními operátory dvěma způsoby, a to *Internet v mobilu* a mobilní *Internet pro notebooky pomocí USB modemu*. O neustále narůstajícím počtu uživatelů těchto typů bezdrátového připojení k Internetu svědčí údaje ve výroční zprávě ČTÚ [22]. Konkrétně v roce 2014 oproti roku 2013 došlo k nárůstu uživatelů využívajících *Internet v mobilu* o 22 %. Zvyšující se počet uživatelů dokládá i celkový přehled o využívání služby *Internet v mobilu* v letech 2010–2014 a zároveň tyto údaje dokumentuje výše uvedená výroční zpráva i graficky – viz obr. 1.5. Obdobný vývojový trend je registrován i u druhého způsobu poskytování konektivity *Internet pro notebooky pomocí USB¹¹ modemu* v sítích UMTS/LTE a CDMA, kdy ve sledovaných obdobích, tj. v roce 2013–2014, je zaznamenán nárůst počtu uživatelů o 20 % – viz obr. 1.6. Tento růst nelze považovat za konečný, poněvadž podíl tzv. chytrých telefonů, tabletů a podobných mobilních komunikačních zařízení se na českém trhu neustále zvětšuje.

¹¹ USB – Universal Serial Bus.



Obr. 1.5: Vývoj počtu účastníků využívajících *Internet v mobilu* v letech 2010–2014.

Na základě uvedených údajů a jejich grafických znázornění lze pro futurum předpokládat, že vývojový trend růstu počtu uživatelů bezdrátové komunikace bude i nadále pokračovat, a to díky zavedení v současnosti již rozpracované nové sítě 5G, tj. páté generace mobilních sítí, i díky nasazení v blízké budoucnosti do praxe nově vyvinutých technologií – jakou je např. technologie M2M (Machine-to-Machine) apod.

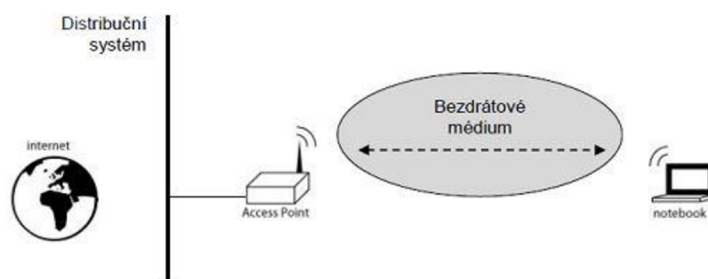


Obr. 1.6: Vývoj počtu účastníků mobilního Internetu v letech 2010–2014.

2 BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE WIFI A WIMAX

2.1 Princip bezdrátové technologie WiFi

Připojení prostřednictvím bezdrátové technologie WiFi [45], [49], [78] se realizuje pomocí tzv. AP (Access Point) neboli přístupového bodu a koncového účastnického zařízení (např. WiFi kartou v PC¹² apod.) [6], [7], kdy přístupový bod představuje bezdrátový hub, z něhož je signál kompletně šířen do celé bezdrátové sítě, a umožňuje propojit bezdrátovou síť s metalickou sítí – viz obr. 2.1.



Obr. 2.1: Grafické znázornění jednotlivých komponentů bezdrátové technologie WiFi.

Nevýhodou mobilního spojení pomocí bezdrátové technologie WiFi je vlastní dosah, poněvadž jako jednu z nezbytných podmínek pro kvalitní přenos je nutno zajistit přímou viditelnost mezi přijímací i vysílací anténou přenosového datového zařízení. Dalším parametrem, jenž bezprostředně na místě ovlivňuje kvalitu přijímaného signálu, je počasí. Jak konstatuje Horák, bezdrátová síť „*ve srovnání se sítí kabelovou je o něco pomalejší a méně bezpečná*“ [32, s. 14]. Ke kladům bezdrátové sítě lze zařadit fakt, že eliminuje možné komplikace kabelového zasíťování, a skutečnost, že instalace bezdrátové technologie zasíťování je ve srovnání s provedením kabeláže mnohem rychlejší a navíc ji lze často realizovat bez jakýchkoli stavebních zásahů a úprav prostředí (jako např. vedení kabeláže zasekáním do zdi či jejím zalištováním aj.) [72]. To v praxi umožňuje zhotoviteli zasíťování pružněji reagovat na konkrétní požadavky klienta ohledně pokrytí datovým signálem.

Datová konektivita bývá v praxi sdílena více koncovými uživateli. Bezdrátové WiFi připojení [69] je tak primárně určeno k zajištění datové konektivity v podobě veřejných přístupových bodů nejčastěji na nejrůznějších veřejných místech a prostranstvích, ve veřejně volně přístupných státních administrativních, správních a školních institucích a v jejich budovách, dále pak v kavárnách, restauracích, hotelech a také na letištích a v mezinárodních dopravních uzlech. Provozovatelé těchto přístupových bodů konkrétním uživatelům, hostům a svým klientům bezplatně umožňují přístup na internet prostřednictvím notebooků nebo tzv. chytrých telefonů.

¹² PC – Personal Computer.

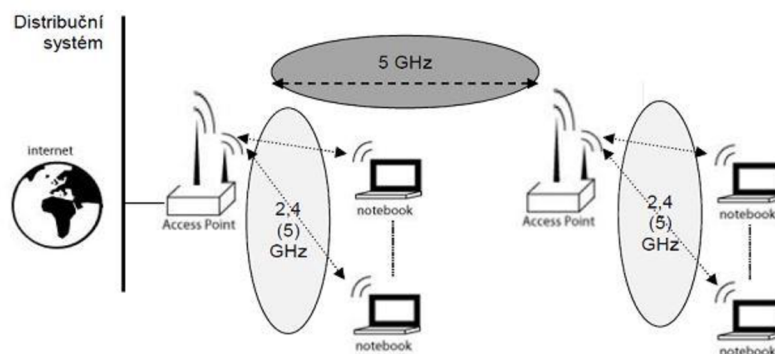
V neposlední řadě je tato technologie využívána k distribuci internetu v tzv. domácích sítích [33], [57], čímž je umožněno připojení více zařízení k internetu bez nutnosti realizovat (tj. „natahat“) po domě či bytě datovou tzv. strukturovanou kabeláž [33], [73].

Další varianta využití této technologie – bezdrátového připojení WiFi [62] – se nabízí v podnikatelské sféře jako primární zdroj datové komunikace koncového uživatele tam, kde nebyla datová komunikace vůbec dostupná, popř. jen velmi obtížně technicky a technologicky či za vysokých finančních nákladů na tzv. zasíťování realizovatelná pevná datová konektivita (např. xDSL) pro stávajícího koncového uživatele.

2.2 Vývoj bezdrátové technologie WiFi

Stejně jako v minulosti mnoho jiných rozličných systémů a technologií byla i technologie bezdrátové konektivity původně produktem vývoje zbraní pro armádu. První náznaky přenosové bezdrátové technologie byly zaregistrovány jako vedlejší produkt při řešení problémů se synchronizací již při sestavení a následném dalším vývoji dálkového řízení torpéd v německé armádě Wehrmacht za 2. světové války [100]. Po válce byla pak uvedená technologie patentována pod číslem 2.292.387 a tato patentová práva k využití technologie byla nabídnuta americkému námořnictvu. Ještě do konce války ve Vietnamu byla tato technologie pod názvem FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) přísně tajná. Až v roce 1994 organizace IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) vydala první standard bezdrátových sítí pod označením IEEE 802.11.

I vývoj bezdrátové technologie WiFi jde však neustále kupředu [1], [2]. Jeden z problémů sdílení datové konektivity je v současnosti možné částečně vyřešit za pomoci užití technologie WMN (Wireless Mesh Network) [1], [2], [96] zkráceně Mesh – viz obr. 2.2, kdy je použit AP router (Access Point Router – směrovač), jenž je vybaven dvěma samostatnými rádii. Jedno rádio pracuje na kmitočtu 5 GHz a slouží k vytvoření páteřního přenosového toku nebo k připojení klientů, druhé rádio pracuje na kmitočtu 2,4 GHz a zajišťuje připojení účastníků bezdrátové komunikace. Jednotlivé AP jsou mezi sebou navzájem propojeny, čímž je dorovnávána přenosová kapacita páteřního přenosu dat.



Obr. 2.2: Grafické znázornění bezdrátové sítě technologie WMN.

O oblíbenosti bezdrátové technologie WiFi [24] svědčí např. skutečnost, že ji ve své výbavě již zcela automaticky disponují mnohá současná komunikační zařízení a též je čím dál tím více vnímána i běžným uživatelem jako neodmyslitelná součást každodenního života.

2.3 Přenos rádiového signálu bezdrátovou technologií WiFi

Za největší výhodu bezdrátové mobilní komunikace [15], [66] využívající k přenosu dat rádiový signál je považován fakt, že se tento typ datového přenosu šíří i skrz různé překážky. Optimální podmínky pro nejkvalitnější přenos dat rádiovým signálem jsou zajištěny parametry – přímá viditelnost, volný prostor. I při tomto typu přenosu, tj. ve volném prostoru, dochází k útlumu rádiových vln, jenž je způsobován samotným průchodem atmosférou. Tento útlum je dán vztahem [50], [51]:

$$L_0 = 20 \times \log \left(\frac{4 \times \pi \times d}{\lambda} \right) , \quad (2.1)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

L_0 – ztráty způsobené průchodem atmosférou [dB];

d – vzdálenost mezi anténou vysílací a přijímací [m];

λ – vlnová délka [m].

Přenos rádiového signálu je ovlivňován těmito základními parametry – velikost odrazu, interference, difrakce [51], [66].

Při dopadu na překážku se část energie rádiové vlny odráží, část energie je absorbována překážkou a část rádiové vlny prostoupí skrz překážku. Velikost odrazu i absorpce je závislá na parametrech – úhel dopadu, tloušťka materiálu, elektrické vlastnosti materiálu tvořícího překážku.

Při použití všesměrových antén dochází především v bytové zástavbě u rádiového signálu k interferenci (tj. k vícecestnému šíření) [27] a k posunu fáze a útlumu rádiového signálu. Dalšími veličinami, jež ovlivňují rádiový přenos, je difrakce (tj. ohyb) vln kolem malých překážek a rozptyl signálu, k němuž dochází v případě, kdy je objekt menší než vlnová délka rádiového signálu. Příмым důsledkem rozptylu rádiového signálu je pak rozpad směrovosti šíření signálu, tj. dochází k rozptýlení signálu všemi směry.

Nejrůznější materiály překážek vykazují pro procházející rádiový signál různý útlum. Tento fakt je třeba mít na zřeteli. Na druhou stranu v případě šíření rádiového signálu vzdušnou cestou odpadá problém s přímou viditelností uživatelů a vysílače navzájem, což je nezbytnou podmínkou pro šíření rádiového signálu pomocí optické sítě.

Útlum průchodu rádiového signálu různými materiály překážek lze zjistit pomocí měření a výpočtem. Jak je doloženo v níže uvedeném vzorci pro výpočet ztráty signálu, velikost útlumu je dána vztahem [50], [51]:

$$L = 10 \times \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right), \quad (2.2)$$

v tomto vztahu jsou vyjádřeny proměnné:

L – ztráty vlivem překážky [dB];

P_1 – výkon vysílače [W];

P_2 – výkon v požadovaném místě za překážkou [W].

Útlum narůstá se zvyšujícím se kmitočtem.

Přehled o přibližné velikosti útlumu různých stavebních materiálů je zaznamenán v tabulce – viz tab. 2.1, přičemž měření bylo realizováno při umístění přijímače ve vzdálenosti 7 m od vysílače a s použitím směrových antén.

Tab. 2.1: Přehled o přibližné velikosti útlumu různých stavebních materiálů [50], [51].

Stavební materiál	Útlum [dB]
Železobetonový strop 450 mm	20
Železobetonový nosník 300mm	14
Cihlová zed' 150mm	7
Okna a dveře	2

Další důležitou veličinou, jež přímo ovlivňuje kvalitu přenosu rádiového signálu, je tzv. první Fresnelova zóna, jejímž prostřednictvím je přenášeno 90 % energie rádiové vlny a jež má tvar rotačního elipsoidu. Při narušení této zóny, jež může být způsobeno vzrostlou vegetací či nevhodnou výstavbou objektů, dojde ke snížení kvality rádiového přenosu, přičemž maximální zastínění by nemělo překročit 40 % první Fresnelovy zóny. Výpočet šířky Fresnelovy zóny lze provést podle vztahu [50], [51]:

$$F_n = \sqrt{\frac{n \times \lambda \times d_1 \times d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (2.3)$$

v němž proměnné vyjadřují:

F_n – poloměr n -té Fresnelově zóny v konkrétní vzdálenosti [m];

n – n tý řád Fresnelově zóny;

d_1, d_2 – vzdálenost překážky mezi vysílačem a přijímačem [m];

λ – vlnová délka [m].

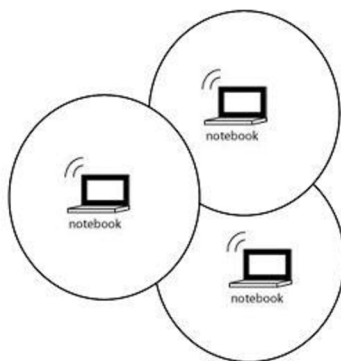
Jako konkrétní příklad aplikace výpočtu šířky pásma Fresnelovy zóny je uveden případ, kdy u rádiového přenosového signálu s vlnovou délkou 0,122 m, což je frekvence 2,45 GHz, je při vzdálenosti vysílačů 30 m šířka pásma Fresnelovy vlny v nejširším poloměru elipsy 0,95 m.

2.4 Typy bezdrátových sítí bezdrátových technologií WiFi a WiMAX

Bezdrátové sítě pro přenos datového signálu lze rozdělit na dva základní druhy, a to na bezdrátové mobilní sítě, jež umožňují uživateli volný pohyb v rámci jedné sítě i mezi sítěmi, a na pevné bezdrátové sítě, které uživateli tento pohyb neumožňují. U bezdrátových pevných stanic tzv. systém Point to Point (neboli bod – bod) se používá technologie rádiová nebo optická. U bezdrátové mobilní sítě tzv. systému Point to Multipoint (neboli bod – více bodů) se používá pouze technologie rádiová.

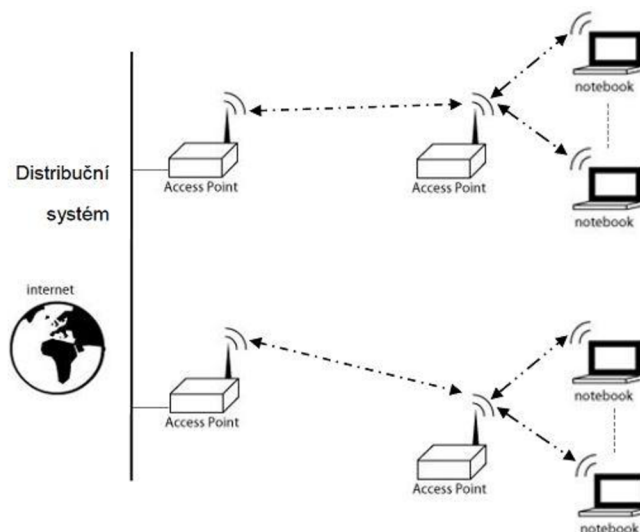
Základ pro bezdrátové mobilní sítě je tvořen sítí typu BSS (Basic Service Set), jež je určena pro skupinu účastníků spolu komunikujících, jejichž bezdrátová zařízení pro přenos rádiového signálu se musí vzájemně prolínat, tj. musí být zajištěn průnik signálu jejich bezdrátových zařízení. Tento typ komunikace uživatelů bezdrátových zařízení je dále členěn do dvou základních typů, a to Ad-Hoc a infrastrukturní sítě.

Ad-Hoc sítě jsou nezávislé sítě tzv. Peer-to-Peer (neboli rovný s rovným), kdy všichni uživatelé této sítě spolu komunikují přímo bez přístupového bodu a jejich zařízení musí být ve vzájemném dosahu. V rámci tohoto typu sítě je tak uplatněno pravidlo, že čím víc je uživatelů, tím je větší dosah této sítě – viz obr. 2.3. Celkový počet uživatelů této sítě se dělí o celou šířku rádiového pásma, a to v závislosti na standardu a vzdálenosti mezi uživateli. Přenos je realizován v režimu polovičního duplexu. Tento typ sítě je využíván pro osobní potřebu uživatelů jako síť personální – WPAN a pro spojení uživatelů se nejčastěji využívá technologie Bluetooth (doslovně modrozub) [29], [35] vyvinutý firmou Ericsson [46, s. 118].



Obr. 2.3: Grafické znázornění sítě Ad-Hoc.

Infrastrukturní sítě jsou tvořeny základními síťovými prvky – AP neboli přístupovými body (Access Point). AP má více funkcí. Jednou z jeho nejdůležitějších funkcí je komunikace mezi distribuční sítí [13] a bezdrátovou datovou sítí, jež je označována a nazývána mostem (Bridge). Bridge umožňuje také propojení více bezdrátových sítí – viz obr. 2.4, přičemž AP realizují všechny rádiové přenosové funkce (jako např. modulaci, demodulaci, kódování, dekódování a synchronizaci). Je-li propojena síť BSS přes AP do distribučního systému, je tato služba AP označována jako DSS (Distribution System Service) [46, s. 118].



Obr. 2.4: Jednoduchá infrastrukturní síť bezdrátové technologie.

2.5 Standardy bezdrátových technologií WiFi a WiMAX

Z důvodu sjednocení produktů výrobců bezdrátových sítí byla zahájena v roce 1990 jejich standardizace.

První standard bezdrátových sítí byl sestaven v roce 1997 pod označením IEEE 802.11 (IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers) [14], [36], [37], [67], [79]. V rámci tohoto standardu byly využívány dva druhy modulace. Standard disponoval rychlostí 1–2 Mb/s pouze ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz a podle konkrétní země zahrnoval až 14 kanálů [26], [48]. U standardu IEEE 802.11 [81], [94] jsou definovány pouze dvě nejnižší vrstvy OSI (Open System Interconnection – propojení otevřených systémů) [10], [64], [71], [86], [101] ze sedmi vrstev OSI, a to Physical Layer (fyzická vrstva) [9], [60] a Data Link Layer (linková vrstva). Podvrstva Data Link Layer je označována zkratkou MAC (Media Access Control – spojovací vrstva) [89]. Podvrstva MAC je tvořena souborem pravidel ohledně přístupu k prostředkům pro přenos dat. Podrobnosti o přenosu dat jsou ponechány na Physical Layer [99, s. 13]. Vrstvou Physical Layer [60] jsou přenášeny jednotlivé bity k uzlům, k nimž vede přímé spojení. U bezdrátových sítí se jedná o způsob přenášení dat rádiovým signálem prostřednictvím Physical Layer.

V IEEE 802.11 standardu [14], [79] byly specifikovány tři různé Physical Layer, a to dvě Physical Layer pro rádiový přenos a jedna Physical Layer pro infračervené záření.

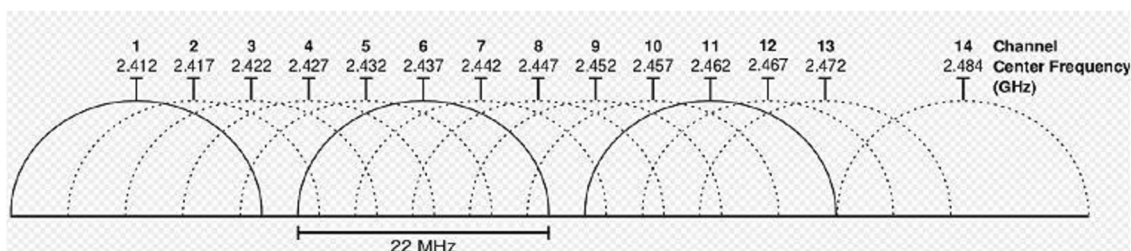
Pro rádiový přenos se jedná o tyto dvě Physical Layer:

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) využívá pásmo 2,4 GHz, jež je rozděleno pro většinu zemí na 75 či 79 rádiových kanálů o šířce 1 MHz z celkové frekvenční šířky 83,5 MHz, přičemž zbývajících asi 8,5 nebo 4,5 MHz z celkové frekvenční šířky plní funkci tzv. ochranného pásma. Ve Spojených státech amerických je oproti tomu z tamějších vydělených 85 možných kanálů

využíváno 79 kanálů, přičemž tento způsob vydělení rádiových kanálů je zároveň respektován po celém světě.

Princip FHSS je nazýván frekvenčním rozprostřením pásma [46, s. 122], zároveň bývá označován jako tzv. frekvenční přeskokování¹³ [99]. Při komunikaci prostřednictvím FHSS dochází ke změně kanálu podle předem domluvené sekvence, a je nutno zajistit synchronizaci rádiového přenosu. Za podstatnou výhodu této Physical Layer je možno považovat počet AP, jenž může pracovat v pásmu 2,4 GHz. Teoreticky je uváděn jako maximální počet AP 26 bodů, prakticky je situace jiná – komunikace je realizována ne více jak 15 AP.

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) využívá pásmo, jež je ve většině zemí rozděleno na 14 rádiových kanálů, ve Spojených státech amerických potom na 11 kanálů – viz obr. 2.5. Frekvenční pásmo je rozprostřeno do šířky 22 MHz. Této šířky je dosaženo tak, že bity jsou přenášeny jako sekvenční řetězce, nuly a jedničky jsou navzájem inverzní a je využito 11bitové rozprostírající se sekvence – tzv. Barkerova kódu. Princip DSSS je nazýván kódové rozprostření pásma [46, s. 123], další jeho označení je technika rozprostírání přímou posloupností [99].



Obr. 2.5: Grafické znázornění rozdělení kanálů podle DSSS.

V důsledku potřeby vyšší rychlosti vznikly v přímé návaznosti na původní standard IEEE 802.11 [37] v roce 1999 dva standardy.

První standard s označením IEEE 802.11a [38] využívá frekvenční pásmo 5,1–5,3 GHz a 5,725–5,825 GHz s teoretickou maximální rychlostí 54 Mb/s. Vzhledem ke zkušenostem s rušením v pásmu standardu IEEE 802.11 byla použita modulace OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ortogonální multiplex s dělením kmitočtu) [3], [30], [31] s využitím kontroly a opravy chyb FEC (Forward Error Correction – zpětná kontrola chyb).

Druhý standard IEEE 802.11b [39], [58], jenž používá modulaci DSSS a teoretickou rychlost maximálně 5,5 až 11 Mb/s ve frekvenčním pásmu 2,4 – 2,485 GHz s dosahem až 12 km bez překážek, byl vyvinut a označen jako vylepšená modifikace původního standardu IEEE 802.11 [37]. Kromě těchto vlastností přinesl inovovaný standard zvýšenou bezpečnost přenosu a dokonalejší management mobility včetně rádiových zdrojů a komplementární kódování CCK (Complementary Code Keying – komplementární kódování) [58], [59] s digitální kvadraturní modulací QPSK

¹³ Vedle označení FHSS – frekvenčního rozprostření pásma či tzv. frekvenčního přeskokování – bývá některými odborníky užíván i název frekvenční proskoky [99, s. 14].

(Quadrature Phase-shift keying – kvadrurní klíčování fázovým posuvem).

Do roku 2003 je datován vznik standardu IEEE 802.11g [40], [60] s modulací OFDM i DSSS, pracující ve frekvenčním pásmu 2,4–2,485 GHz shodném se standardem IEEE 802.11b [39]. Standard IEEE 802.11g má stejnou zpětnou kompatibilitu s předchozím standardem IEEE 802.11b, avšak je schopen navíc užívat různé rychlosti, a to konkrétně 1, 2, 5,5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mb/s. Pro zajištění zpětné kompatibility s předchozími standardy je použito systému rezervačního mechanismu RT/CTS (Request to Send / Clear to Send) vysílaného před rámcem s OFDM [31], jenž je spuštěn po připojení klienta s IEEE 802.11b k síti ve standardu IEEE 802.11g.

V roce 2004 vznikl standard IEEE 802.16 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) [14], [43], [65], jenž měl za úkol nahradit metalické vedení k účastnickým zařízením, tj. tzv. poslední míli.

Tento standard pracuje na principu Point-to-Multipoint v licencovaném pásmu 3,5 GHz s frekvenční šířkou pásma 10–66 GHz. Vylepšený standard IEEE 802.16a na rozdíl od původního IEEE 802.16 pak využívá pásmo 2–11 GHz s možností šíření signálu i bez přímé viditelnosti. Podle dosahu se dělí na 30–50 km při LOS (Line of Sight) za přímé viditelnosti, 1–2 km při NLOS (Non Line of Sight) bez přímé viditelnosti a do 500 m při použití uvnitř budov, přičemž dosah signálu závisí na typu použité antény (např. směrové či všesměrové). S modulací OFDM má teoretickou maximální rychlost až 70 Mb/s. Je zde možnost kódování BPSK (Binary Phase Shift Keying – binární klíčování fázovým posuvem), QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying – kvadrurní klíčování fázovým posuvem), 16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation) – 16-kvadrurní amplitudová modulace (jedná se v podstatě o 16bodový konstelační diagram) a 64-QAM (64-Quadrature Amplitude Modulation) – 64-kvadrurní amplitudová modulace. Volba typu kódování [5], [74] je dána potřebným odstupem signálu od šumu (SNR – Signal-to-Noise Ratio), a to při nízkém odstupě signálu od šumu, tj. SNR do 6 dB, je použito kódování BPSK a při vyšším odstupě signálu od šumu, tj. SNR – 22 dB, je využíváno vyšší kódování 64-QAM.

V roce 2005 vznikl standard IEEE 802.16e [44], jenž je určen pro přenos dat mobilních zařízení – tzv. mobilní WiMAX [52], [65]. Hlavní výhodou standardu IEEE 802.16e je umožnění sdílení přístupu s garancí QoS (Quality of Service – podpora kvality služeb) s pokročilým zabezpečením AES (Advanced Encryption Standard – standard pokročilého šifrování) a DES3 (Triple Data Encryption Standard – trojitý datový šifrovací algoritmus). Šířka kanálu může být nastavena v rozmezí 1–28 MHz.

Následně byl v roce 2009 sestaven standard s označením IEEE 802.11n [41] s teoretickou přenosovou rychlostí až 600 Mb/s, jehož reálná rychlost však činí 130Mb/s. Tento standard zlepšuje odolnost proti rušení, a to díky implementaci technologie tzv. chytrých antén MIMO (Multiple-Input Multiple-Output – více vstupů více výstupů). Tato technologie, má vyšší citlivost čipsetu (Chipset – skupina integrovaných obvodů neboli čipů) s několikanásobnými vysílači a vyšším počtem antén. Technologie antén MIMO byla vyvinuta již před 40 lety v Bellových laboratořích. Pracuje na fyzické vrstvě ISO/OSI modelu (International Organization for Standardization / Open System Interconnection) a bez problému ji využívají protokoly vyšších vrstev [64], [71] dále zdvojnásobuje šířku kanálu na 40 MHz. Při přenosu zvládá vícecestné šíření signálu, to znamená, že využívá i zpoždění odraženého signálu.

Hraniční nejvyšší počet použitých antén u technologie MIMO sice nebyl přímo stanoven, jak však ukázala praxe, bývá omezen na počet 16 antén pro venkovní provoz a 8 antén pro provoz vnitřní. Standard IEEE 802.11n je zpětně kompatibilní s předchozími standardy a umožňuje komunikovat jak v pásmu 2,4 GHz, tak i 5 GHz s využitím modulace OFDM.

V roce 2013 byl schválen standard IEEE 802.11ac [42], u něhož je oproti IEEE 802.11n šířka frekvenčního pásma kanálu v rozsahu od 20 MHz do 160 MHz. To znamená, že při šířce kanálu 80 MHz u jedné antény je na obou stranách spojení možno teoreticky dosáhnout rychlosti 433 Mb/s, tj. při 8 anténách je max. rychlost 3,47 Gb/s. Tento standard upřednostňuje komunikaci v pásmu 5 GHz, ale umí komunikovat i v pásmu 2,4 GHz.

Z výše uvedeného logicky vyplývá, že IEEE 802.11ac je kompatibilní se standardy IEEE 802.11b, IEEE 802.11g a IEEE 802.11n, navíc i s technologií Bluetooth [29], [35]. Používá modulaci 256-QAM (256-Quadrature Amplitude Modulation – 256-kvadrurní amplitudová modulace).

Ke zkvalitnění přenosu využívá standard IEEE 802.11ac technologii Beamforming (neboli tvarování paprsku), jež funguje na principu, že několik antén dokáže načasovat fáze signálu tak, aby se k cíli dostal signál co nejsilnější, byť třeba poskládaný z dílčích odrazů [87].

2.5.1 Přehled základních standardů IEEE 802.11 bezdrátové technologie WiFi

Nyní bude proveden souhrn nejdůležitějších základních standardů IEEE 802.11. V odborné literatuře je možné se setkat i s jiným označením původního standardu IEEE 802.11. Např. Zandlem je označován jako standard 802.1x [99, s. 133].

Přehled základních standardů IEEE 802.11 [79], [81] je níže uveden v tabulce – viz tab. 2.2.

Tab. 2.2: Přehled základních standardů IEEE 802.11 [50], [51].

Standard	Rok vydání	Pásmo [GHz]	Maximální rychlost [Mb/s]	Fyzická vrstva
původní IEEE 802.11	1997	2,4	2	DSSS a FHSS
IEEE 802.11a	1999	5	54	OFDM
IEEE 802.11b	1999	2,4	11	DSSS
IEEE 802.11g	2003	2,4	54	OFDM, DSSS
IEEE 802.11n	2009	2,4 nebo 5	600	MIMO OFDM
IEEE 802.11ac	2013	2,4 a 5	1000	MU-MIMO ¹⁴ OFDM

¹⁴ MU-MIMO – Multi-user MIMO.

S ohledem na současný stav a technické možnosti využívání sítí WiFi je nutno podotknout, že přehled není zdaleka vyčerpávající a kompletní. Do přehledu jsou zařazeny pouze hlavní základní standardy, jež výrazně ovlivnily rychlost přenosu, zabezpečení sítě i kvalitu přenosu dat a vzdálenost, tj. dosah při šíření dat. Všechny základní standardy IEEE 802.11 bezdrátových sítí WiFi pracují v režimu frekvenčního half-duplexu (polovičního duplexu) to znamená, buď data vysílají, nebo je přijímají.

2.6 Zabezpečení bezdrátových sítí bezdrátových technologií WiFi a WiMAX

V plnohodnotném a bezproblémovém provozu musí bezdrátové sítě bezdrátových technologií WiFi a WiMAX splňovat stejné funkce jako síťový Ethernet, a to včetně zabezpečení. Způsoby zabezpečení lze třídit podle dvou zásad, a to konkrétně dle:

1. řízení přístupu oprávněných uživatelů, jež je označováno jako autentizace [32, s. 56] nebo také autorizace [99, s. 125];
2. zabezpečení přenášených dat před odposlechem, jež je nazýváno kódováním [32, s. 56] či šifrováním [99, s. 125].

Řízení přístupu oprávněných uživatelů je možno realizovat pomocí identifikace sítě SSID (Service Set Identifier), jež je označována jako jedinečný název bezdrátové sítě s maximálním počtem 32 znaků, označujících všechny prvky sítě. AP je vysílána identifikace jedinečného názvu sítě v pravidelných intervalech cca 100 ms jako součást řídicího rámce bezdrátové sítě. Vysílání identifikace SSID je možno zrušit. V tom případě pak z důvodu nezobrazování názvu sítě nelze síť vyhledat a tudíž ani se k ní připojit.

Přístup oprávněných uživatelů může být řízen pomocí filtrování MAC adres, kdy každá bezdrátová karta je vybavena MAC adresou (Media Access Control – jedinečný identifikátor síťového zařízení) [98]. MAC adresa bývá označována také jako „fyzická adresa“. Operátorem či správcem sítě jsou zapsány adresy jednotlivých uživatelů do AP. Z výše uvedeného proto logicky vyplývá, že do takto zabezpečené sítě se nemůže přihlásit účastník, aniž by byl zapsán do AP. Za nevýhodu tohoto systému řízení přístupů oprávněných uživatelů pomocí MAC adres lze považovat situaci, kdy je tato síť početně velice rozsáhlá a dochází přitom k časté fluktuaci v odchodu a příchodu účastníků. Oproti tomu jako výhodu tohoto řízení je zapotřebí vyzdvihnout fakt, že se do takto ošetřené sítě pomocí MAC adres může přihlásit jen skutečně registrovaný uživatel s příslušnou zaregistrovanou adresou.

Zabezpečení přenášených dat před odposlechem je realizováno systémem WEP (Wired Equivalent Privacy – soukromí ekvivalentní drátovým sítím) [46]. WEP byl původně nasazen jako standard pro zabezpečení rádiové části sítě pro IEEE 802.11 [36], [81]. Pro technologie WEP je využívána pro šifrování přenosu šifra RC4. Autentizace je u zabezpečení pomocí systému WEP zajištěna prostřednictvím sdíleného klíče [46], kdy je na straně odesílatele odeslaná zpráva zašifrována náhodným klíčem a na přijímací straně za použití stejného klíče je posláze rozšifrována. Pro WEP klíč je definována délka 40 bitů, WEP klíč je zřetězen s 24-bitovým inicializačním vektorem. Tento inicializační vektor má za úkol zajistit, aby byl vytvořen unikátní zašifrovaný řetězec, nezávislý na ostatních řetězcích generovaných stejným klíčem. WEP klíč tedy pracuje

na symetrickém principu, kdy není ověřován samotný uživatel, nýbrž je prověřována MAC adresa jeho síťové karty.

Zabezpečení přenášených dat prostřednictvím bezdrátových sítí se neustále vyvíjí. V současné době je používáno zabezpečení přenášených dat [46], [74], jež je označeno jako zabezpečení WPA (WiFi Protected Access). Jedná se o softwarové řešení, jehož technická výhoda z důvodu neustálého vývoje spočívá v tom, že tento mechanismus nevyžaduje hardwarovou výměnu komponentů sítě pracujících s šifrovacím mechanismem RC4. WPA se sestává ze tří základních složek, a to:

- TKIP (Temporary Key Integrity Protocol – šifrovací integrální protokol), jenž je používán u WPA a je založen na algoritmu RC4 obdobně jako standard WEP. Zahrnuje 128-bitový dočasný klíč sdílený klientem a AP, MAC adresu klientského zařízení, dále 48-bitový inicializační vektor, jež nahrazuje v paketu číslo sekvence.
- MIC (Message Integrity Check – kontrola integrity zpráv), již je prováděna ochrana proti falešným AP zajištěním integrity dat.
- EAP (Extensible Authentication Protocol – rozšiřitelný autorizační protokol), jenž umožňuje vzájemnou autentizaci uživatelů i sítě a distribuce klíčů.

Zabezpečení přenášených dat prostřednictvím bezdrátových sítí se neustále vyvíjí a technicky zdokonaluje. V současné době je již používán WPA2¹⁵, jenž podporuje WPA. WPA2 obsahuje ve srovnání s WPA některá vylepšení, a to v šifrování a v kontrole integrity.

2.7 Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12

2.7.1 Rozdělení rádiového spektra v České republice

Významnými oblastmi odborné činnosti Českého telekomunikačního úřadu¹⁶ vedle rozhodování sporů mezi telekomunikačními operátory nebo občany a telekomunikačními operátory¹⁷ a kromě v této práci řešené problematiky všeobecných oprávnění jsou tyto stěžejní sféry: výkon státní správy v oblasti elektronických komunikací, zajištění technické spolupráce mezi podnikateli zajišťujícími sítě elektronických komunikací a podnikateli poskytujícími služby elektronických komunikací za účelem zachování bezpečnosti a integrity sítí a kvality služeb a zajištění ochrany v oblasti rozhlasového a televizního vysílání [17], a to hlavně vyhledávání zdrojů rušení signálu [16]. Neméně důležitým v rámci odborné působnosti se jeví podíl ČTÚ na tvorbě právních předpisů pro oblasti elektronických komunikací a poštovních služeb a jeho účast na připomínkových řízeních jako bylo např. projednání TTP

¹⁵ WPA2 – v současnosti používaná další generace WPA (WiFi Protected Access).

¹⁶ Český telekomunikační úřad (ČTÚ) je ústřední správní úřad pro výkon státní správy, včetně regulace v oblasti elektronických komunikací a poštovních služeb.

¹⁷ Další takovou činností je např. vydávání rozhodnutí o nároku poskytovatele univerzální služby na úhradu výše prokazatelné ztráty za poskytování této služby ZTP (zdravotní a tělesné postižení), VTA (veřejný telefonní automat).

(Technický plán přechodu zemského analogového televizního vysílání na zemské digitální televizní vysílání), nebo v současné příprava uvolnění kmitočtových pásem pro DVB-T2 (Digital Video Broadcasting Terrestrial 2).

Při výkonu své působnosti se ČTÚ řídí právními předpisy, obecně závaznými právními akty orgánů Evropských společenství a České republiky, mezinárodními smlouvami, jimiž je Česká republika vázána a které byly vyhlášeny ve Sbírce zákonů nebo ve Sbírce mezinárodních smluv, dále statutem Úřadu [63], usneseními vlády České republiky a opatřeními obecné povahy, jež v mezích zákona sám vydává.

Využívání rádiového spektra se na mezinárodní úrovni řídí Radiokomunikačním řádem ITU (International Telecommunication Union – Mezinárodní telekomunikační unie). Radiokomunikační řád ITU je v České republice aplikován dokumentem Plán přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka) [19], jenž určuje přidělení kmitočtových pásem jednotlivým radiokomunikačním službám. Při kmitočtovém plánování „*vychází ČTÚ rovněž z právních předpisů Evropské komise a z rozhodnutí a doporučení Konference evropských správ pošt a telekomunikací (CEPT)*“ [19], přičemž abreviatura CEPT je utvořena z názvu konference – slovního spojení ve francouzštině *Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications* (anglicky *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*).

ČTÚ v plánu využití rádiového spektra v České republice stanoví technické parametry a podmínky využití rádiového spektra radiokomunikačními službami. ČTÚ v plánu uvádí informace týkající se současného i budoucího vývoje využívání rádiového spektra, jsou-li tyto záměry známy a jsou-li dostatečně určité. Plán navazuje na plán přidělení kmitočtových pásem [19], [63].

Plán využití rádiového spektra v České republice je tvořen společnou částí plánu využití rádiového spektra a částmi plánu využití rádiového spektra pro kmitočtová pásma vymezená dolním a horním mezním kmitočtem. Mezní kmitočty odpovídají dělicím kmitočtům kmitočtových pásem uvedených v plánu přidělení kmitočtových pásem.

Přesné rozdělení kmitočtových¹⁸ pásem pro bezdrátovou technologii WiFi v České republice je normativně dáno, a to konkrétně oprávněním VO-R/12/09.2010-12 [20].

2.7.2 Rámcová charakteristika všeobecného oprávnění VO-R/12/09.2010-12

Ve všeobecném oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 [20], jsou stanoveny podmínky provozování přístrojů, vztahující se na využívání rádiových kmitočtů a provozování vysílacích rádiových zařízení pro širokopásmový přenos dat (dále jen „stanice“) fyzickými nebo právními osobami.

Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 stanoví tyto konkrétní podmínky:

- a) stanici lze provozovat bez individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů;

¹⁸ Vedle termínu *kmitočtové pásmo* bývá synonymně užíváno označení *frekvenční pásmo*.

- b) technické parametry stanic – viz tab. 2.3;
- c) stanice musí dodržet maximální vyzářený výkon EIRP¹⁹ (Equivalent Isotropically Radiated Power – ekvivalentní izotropně vyzářený výkon) a maximální střední spektrální hustotu při libovolné kombinaci výstupního výkonu vysílače a použité antény;
- d) stanice nesmějí být provozovány s přídatnými zesilovači vysokofrekvenčního výkonu a s převaděči;
- e) stanice v pásmech c a d musí být vybaveny automatickou regulací výkonu, jež průměrně poskytuje činitel potlačení rušení alespoň 3 dB oproti maximálnímu povolenému výstupnímu výkonu uvedených systémů. Není-li automatická regulace výkonu použita, snižuje se maximální povolený střední EIRP a tudíž i odpovídající mez střední hustoty EIRP pro pásma c a d o 3 dB;
- f) v pásmech c, d a f musí být použity takové techniky přístupu ke spektru a zmírnění rušení, jež poskytují přinejmenším rovnocenný účinek jako techniky popsané v harmonizovaných normách. Technologie potlačení rušení v pásmech c a d musí vyrovnávat pravděpodobnost výběru konkrétního kanálu ze všech dostupných kanálů, aby se v průměru zajistilo rovnoměrné rozprostření zátěže spektra a aby byl zajištěn provoz, slučitelný se systémy rádiového určování;
- g) stanice jsou provozovány na sdílených kmitočtech;
- h) provoz stanice nemá zajištěnu ochranu proti rušení způsobenému vysílacími rádiovými stanicemi jiné radiokomunikační služby provozovanými na základě individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů nebo jinými stanicemi pro širokopásmový přenos dat.

Technické parametry bezdrátových stanic jsou dány v tabulce – viz tab. 2.3.

Pozn.: Ekvivalentní izotropicky vyzářený výkon označovaný zkratkou EIRP je součin výkonu dodávaného do antény a jejího izotropního či absolutního zisku v daném směru – podrobnosti viz vyhláška č. 105/2010 Sb., o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka), Část II. Vymezení pojmů, Oddíl VI. Vlastnosti vysílání a rádiových zařízení [20].

¹⁹ EIRP – je celkový výkon, který by bylo nutné vyzářit izotropní anténou (vyzařuje do všech směrů prostoru stejně), aby bylo v daném směru dosaženo jisté intenzity záření. Používá se k vyjádření intenzity rádiového záření vysílaného směrem, kterým je anténa (typicky směrová) namířena.

Tab. 2.3: Technické parametry stanic.

Ozn.	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon	Maximální spektrální hustota EIRP	Další podmínky
a	2400,0–2483,5 MHz	100 mW EIRP	10 mW/1 MHz 100 mW/100 kHz	systemy s technikou DSSS nebo OFDM systemy s technikou FHSS
b	5150–5250 MHz	200 mW střední EIRP	10 mW/MHz (střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)	
c	5250–5350 MHz	200 mW střední EIRP.	10 mW/MHz (střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)	pouze pro použití uvnitř budovy
d	5470–5725 MHz	1 W střední EIRP	50 mW/MHz (střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)	—
e	17,1–17,3 GHz	100 mW střední EIRP	—	—
f	57–66 GHz	40 dBm střední EIRP	13 Bm/MHz (střední spektrální hustota)	stále venkovní instalace jsou vyloučeny

2.7.3 Správa kmitočtového spektra Českým telekomunikačním úřadem

Kmitočtové spektrum v rámci České republiky je spravováno Českým telekomunikačním úřadem, jenž pro tento účel vytvořil síť stacionárních neobsluhovaných monitorovacích stanic (dále SNMS) a dvě stacionární obsluhované monitorovací stanice (dále SOMS). Do těchto stanic jsou naměřená data cyklicky zasílána a průběžně zpracovávána. Jednotlivé oblastní odbory ČTÚ jsou z důvodu velké členitosti povrchu naší republiky vybaveny mobilními obsluhovanými monitorovacími stanicemi (dále MOMS) s měřicí technikou R&S (Rohde & Schwarz) [82] a výpočetní technikou HP (Hewlett-Packard), umožňující měření do 6 GHz. Kromě těchto MOMS jsou pro delší monitorování kmitočtů při nepravidelném výskytu rušení, popř. k monitoringu určitého území nepokrytého SNMS, k dispozici mobilní neobsluhované monitorovací stanice (dále MNMS out). Vozidla MOMS kromě jiného slouží k přesnému dohledání místa rušení nebo zjištění porušení kmitočtů daných v individuálních oprávněních nebo všeobecných oprávněních.

Často monitorovaným kmitočtovým pásmem vymezeným všeobecným oprávněním je ze strany ČTÚ již výše zmíněné oprávnění s označením VO-R/12/09.2010-12 [20]. Toto všeobecné oprávnění užívá technologie WiFi, těšící se v současné době v různých zařízeních u široké veřejnosti značné oblibě. Téměř každý uživatel používá technologii WiFi v notebooku, v tzv. chytrém telefonu různých výrobců, v routerech či v ADSL modemech pro pokrytí bytů či domů. Tato technologie neunikla pozornosti ani podnikatelům v elektronických komunikacích (dále EK), kteří technologii WiFi využívají především pro šíření širokopásmového internetu v obcích a městech po celé České republice.

V současné době je evidováno u ČTÚ pro jihomoravskou oblast přes 550 podnikatelů v EK, přičemž většina má zaevidovanou službu pro širokopásmový přenos internetu na kmitočtech 2,4 GHz a 5 GHz.

2.7.4 Přehled využívání bezdrátových technologií WiFi a WiMAX v České republice

Situace, jež v Česku nastala v kmitočtových pásmech 2,4 GHz a 5 GHz, nemá ve světě srovnání. Velký počet podnikatelů v EK (viz výše), se na tuto technologii zaměřil z prostých důvodů – není nutno platit žádné poplatky za užívání kmitočtů a používaná technologie je přitom cenově velmi dostupná.

Pásmo 2,4 GHz bylo hned ve svých začátcích a je i nadále v současnosti hojně využíváno. Notebooky, PC i tzv. chytré mobilní přístroje jsou uzpůsobeny pro komunikaci v tomto pásmu již z výroby a také podnikatelé v EK nabízejí uživatelům v tomto pásmu internetovou konektivitu. Z důvodu nízkého počtu kanálů a následného vzájemného rušení, postupně podnikatelé v EK přecházejí na 5 GHz. Právě nízký počet kanálů v pásmu 2,4 GHz totiž nutil podnikatele kvůli zajištění konektivity mezi AP a ÚZ zvyšovat vyzářený výkon, a následně tak rušit ostatní provozovatele v tomto pásmu.

Pásmo 5 GHz má sice víc kanálů, je však rozděleno – viz tab. 2.3 s technickými parametry stanic VO-R/12/09.2010-12 – na kmitočty pro použití pouze uvnitř budov a na kmitočty, jež lze využít mimo budovy. Podnikatelé v EK z neznalosti nebo nedostatku kanálů v pásmu určeném k využití mimo budovy užívají kmitočty určené pro použití uvnitř budov.

ČTÚ jako správce kmitočtového spektra monitoruje kmitočtové spektrum a vysílací rádiové zařízení (dále VRZ), jež na něm vysílají. Postupuje následovně: Průběžně provádí monitoring kmitočtového spektra. Zjistí-li ČTÚ v jeho rámci nedodržení parametrů VO-R/12/09.2010-12, následuje provedení kontroly a výzva k nápravě, tj. k odstranění zjištěných nedostatků, a zároveň je Úřadem zahájeno správní řízení.

2.7.5 Monitoring bezdrátových technologií WiFi a WiMAX

Při monitoringu bezdrátových technologií WiFi a WiMAX je velmi důležité dobře zvolit referenční měřicí body, v nichž bude provedeno měření intenzity elektromagnetického pole. Tato místa musí být jednoznačně definována pro možnou následnou kontrolu (město, ulice, u domu číslo popisné a evidenční, výška antény).

Anténa, kterou je prováděn monitoring, musí s ohledem na zajištění maximální objektivit dat získaných měřením splňovat jisté požadavky. Je nutno, aby anténa byla umístěna:

- v přímé viditelnosti měřené VRZ;
- v ose zářeného svazku;
- v hlavním směru záření.

K detekci a identifikaci sítí WiFi jsou používána zařízení N – Stream Mikrotom, Mikrotik RouterBoard RB433.

K měření v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz se používají měřicí soupravy, sestávající se z kalibrované antény s definovanou anténní korekcí, napáječe a měřicího přístroje, jenž je v předepsaných intervalech kalibrován. Používá se napáječ se známými vlastnostmi (útlumem) pro kmitočtové pásmo měřených signálů.

K vlastnímu měření jsou používány tyto měřicí přístroje:

- analyzátor spektra R&S FSQ8;
- analyzátor spektra R&S FSH6.

Nejčastěji jsou k měření využívány tyto antény:

- všesměrová vertikální Alvarion;
- panelová DCom ZZS 5G;
- 5 GHz Alfa 12 dBi;
- směrová anténa 5 GHz;
- R&S HL 040, Andrew T 2400.

Jako další komponenty měřicí soustavy jsou využívány:

- nízkošumový zesilovač DCom LNA 250406;
- směrová vazba CD-202-402-10N.

Vlastní měření výkonu je možno realizovat dvěma způsoby:

1. Přes směrovou odbočnici zapojenou mezi anténou a vlastním zařízením je připojen měřicí přístroj FSH6. Výkon v kanále je buď vypočítán z naměřených hodnot, nebo je měřen přímo přes výkonovou sondu.
2. V případě, kdy není možné využít první způsob měření (např. z důvodu nedostupnosti VRZ nebo integrace antény do krytu VRZ – tzv. outdoor provedení), je použit výpočet výkonu. Tento způsob získání dat byl verifikován, jeho přesnost byla prokázána shodou s naměřenými hodnotami. Českým telekomunikačním úřadem bylo provedeno několik testů výkonu a intenzity elektromagnetického pole, v jejichž rámci byly porovnávány vypočítané a naměřené hodnoty dle dvou vzorců. První vzorec pro výpočet výkonu je dán vztahem [28]:

$$\text{EIRP} = P + b - G + L, \quad (2.4)$$

v němž jsou vyjádřeny proměnné:

- P naměřený výkon signálu (v celé šířce OBW);
- b útlum kabelu anténa – analyzátor;
- G zisk měřicí antény (dBi);
- L útlum šíření ve volném prostoru (viz vztah 2.1).

Testové hodnoty byly dále porovnány dle druhého vzorce pro výpočet intenzity elektrického pole, jenž je dán vztahem [28]:

$$E = 10 \log P - 20 \log r + 77, \quad (2.5)$$

V němž jsou vyjádřeny proměnné:

- E intenzita elektrického pole;
- r vzdálenost.

Testováním bylo jasně potvrzeno, že naměřené i vypočítané hodnoty výkonů jsou relevantní.

Měřicí přístroje, jimiž je prováděno měření, jsou pravidelně kalibrovány v souladu s platnými normami a závaznými předpisy.

2.8 Nejčastější případy porušování bezdrátových sítí bezdrátové technologie WiFi

V této podkapitole disertační práce bude přistoupeno k vymezení, měření a následnému řešení tří konkrétních situací z praxe, v jejichž rámci často dochází k porušování oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz – 66 GHz.

2.8.1 Porušení v rámci celkově vyzářeného výkonu EIRP na kmitočtech 2,4 GHz

V první situaci z praxe je řešeno porušení v rámci celkově vyzářeného výkonu EIRP na kmitočtech 2,4 GHz. Na orientační mapě – viz obr. 2.6 – jsou spolu s referenčními měřicími body (MB – měřící bod, v tomto případě jsou tyto body na orientační mapě označeny jako MB1 – měřící bod 1 a MB2 – měřící bod 2) vyznačena stanoviště kontrolovaných VRZ.

Tento monitoring slouží ke kontrole, nebyl-li před vlastním kontrolním měřením na VRZ po oznámení termínu plánované kontroly ČTÚ provozovateli změněn či jinak upraven EIRP VZR (přičemž nezbytným předpokladem kontrolního měření je ze strany ČTÚ sdělení stanoveného termínu kontroly provozovateli VRZ).



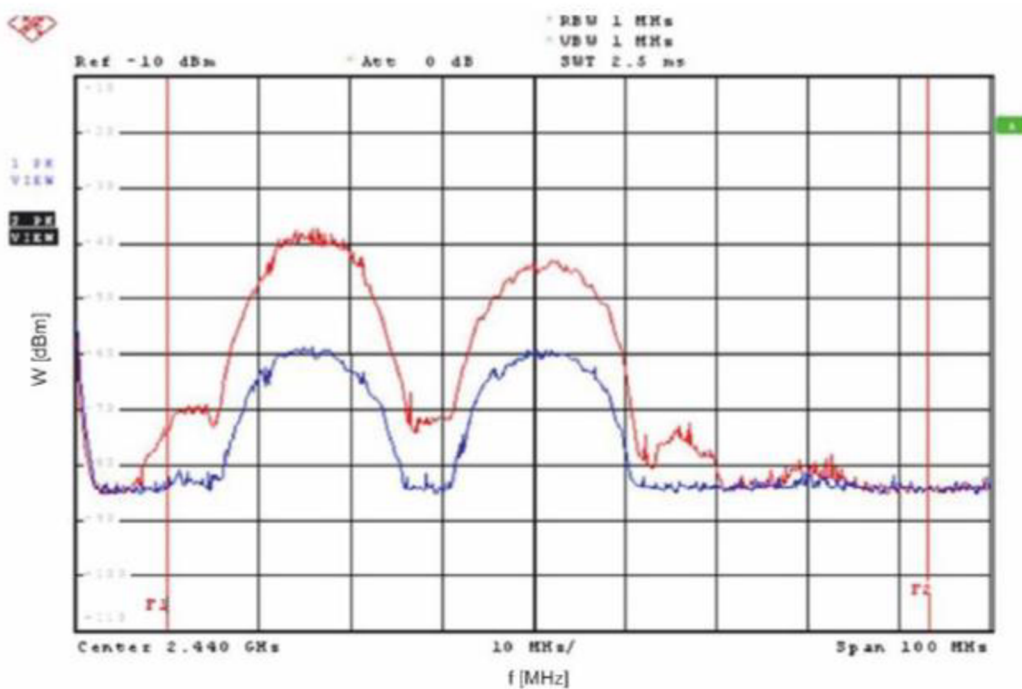
Obr. 2.6: Orientační mapa s vyznačenými referenčními měřicími body a VRZ.

Parametry umístění měřených zařízení:

- Planet WA-1911 umístěno na adrese tř. D. hrdinů 27.
- WL-1120 AP umístěno na adrese tř. D. hrdinů 36.

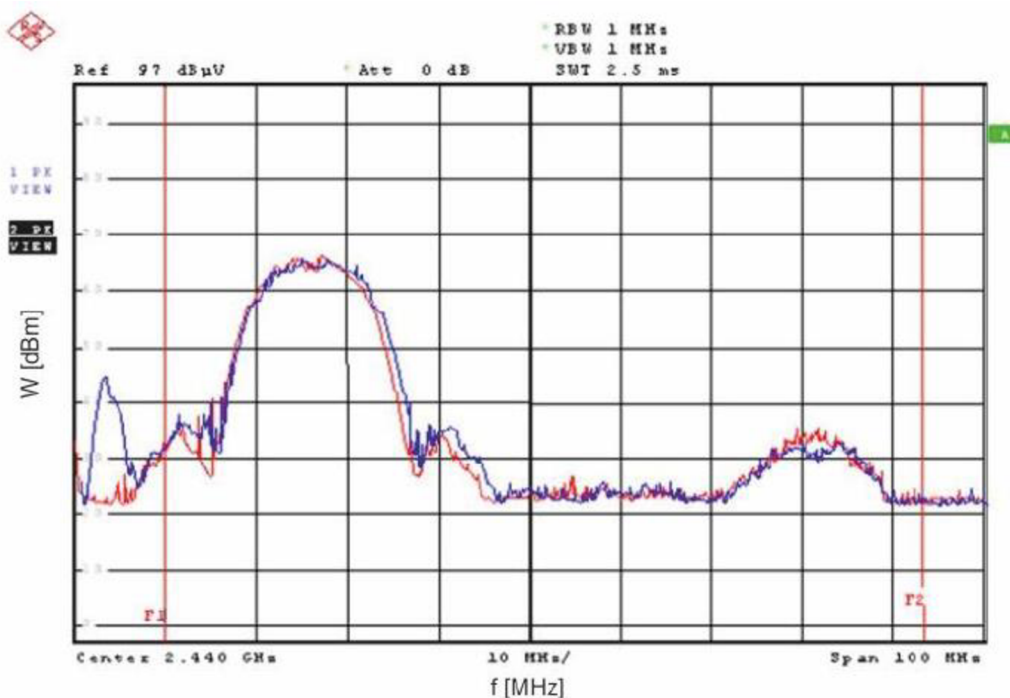
Naměřené hodnoty z referenčních měřicích bodů celkově vyzářeného výkonu EIRP na kmitočtech 2,4 GHz jsou graficky znázorněny níže – viz obr. 2.7 a obr. 2.8.

Těsně před zahájením měření celkově vyzářeného výkonu EIRP na kmitočtech 2,4 GHz na VRZ byl proveden monitoring spektra na obou MB. Grafické znázornění tohoto realizovaného monitoringu na bodě MB2 je zobrazeno níže – viz obr. 2.7. Výsledky, získané monitoringem, jsou na obr. 2.8 zapsány ve tvaru prvního monitoringu dne xxxx a monitoring těsně před vlastní realizovanou kontrolou – dne yyyy. Obdobně bude realizován monitoring v bodě MB1.



Pozn. Červeně je znázorněna horizontální polarizace a modře vertikální polarizace.

Obr. 2.7: Spektrum signálů na MB1 – polarizace vertikální / polarizace horizontální.



Pozn. Červeně je znázorněn monitoring dne xxxx, modře monitoring dne yyyy.

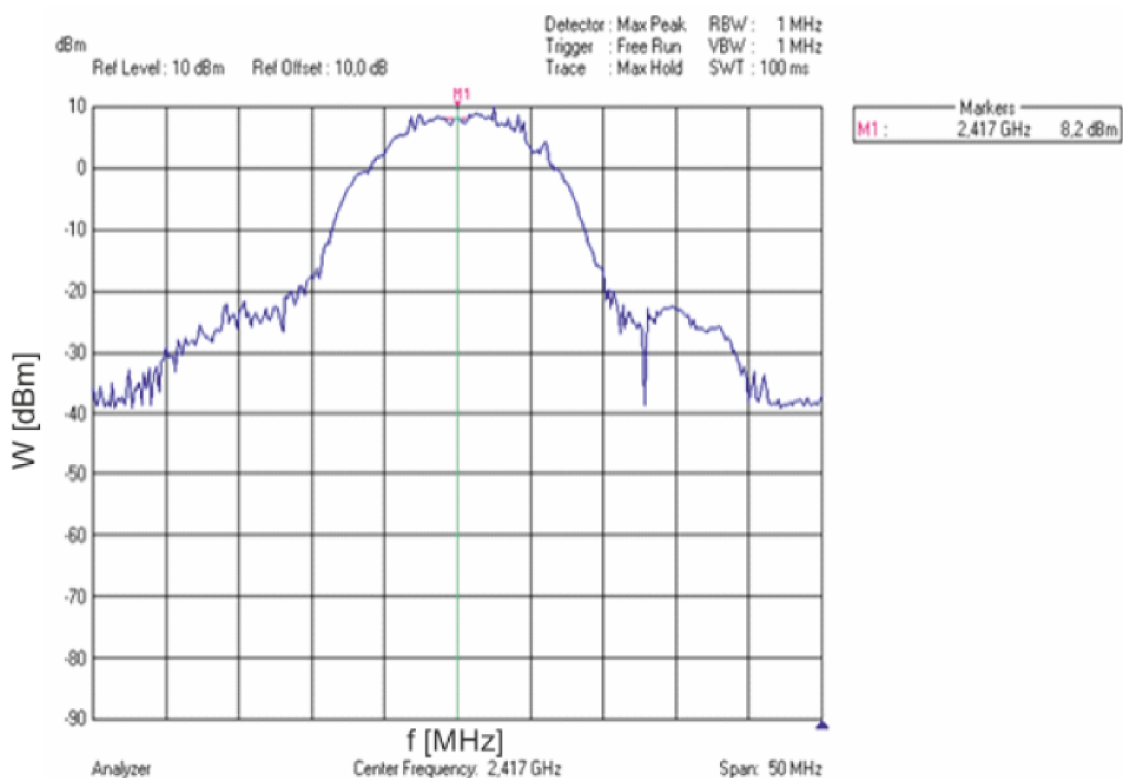
Obr. 2.8: Grafické znázornění monitoringu spektra signálů na MB2 – měřeno dne xxxx / dne yyyy.

Jak je doloženo v grafickém znázornění – viz obr. 2.8 – porovnání obou

monitoringů, tj. monitoringu před kontrolním měřením a monitoringu v den kontroly, ukazuje, že nedošlo k žádné změně v celkově vyzařovaném výkonu (EIRP), tudíž monitoringem VRZ je zachycen skutečný provozní stav zařízení (tj. ze strany provozovatele VRZ nebyla provedena žádná „korekce“ EIRP).

Následně je realizováno kontrolní měření přímo na VRZ. Následující grafická znázornění ukazují naměřená data, jež byla zaznamenána spektrálními analyzátory R&S FSQ8 a R&S FSH6, s následným výpočtem k určení úrovně vyzářeného výkonu – viz obr. 2.9, obr. 2.10, obr. 2.11, obr. 2.12.

Na obr. 2.9 je graficky znázorněno měření špičkové hustoty výkonu měřeného zařízení Planet WA-1911. Obr. 2.10 dokumentuje grafické znázornění měření celkového spektrálního výkonu TX zařízení Planet WA-1911. Na obr. 2.11 je graficky znázorněno měření špičkové hustoty výkonu měřeného zařízení WL-1120 AP. Obr. 2.12 zobrazuje grafické znázornění měření celkového spektrálního výkonu TX zařízení WL-1120 AP.



Obr. 2.9: Měření špičkové spektrální hustoty výkonu TX zařízení Planet WA-1911.



Obr. 2.10: Měření celkového spektrálního výkonu TX zařízení Planet WA-1911.



Obr. 2.11: Měření špičkové spektrální hustoty výkonu TX zařízení WL-1120 AP.



Obr. 2.12: Měření celkového spektrálního výkonu TX zařízení WL-1120 AP.

Z naměřených hodnot z kontrolního měření na VZR je proveden výpočet celkově vyzářeného výkonu EIRP na kmitočtech 2,4 GHz, čímž je verifikováno dodržení či porušení podmínek VO-R/12/09.2010-12.

Nyní je uveden zkrácený záznam z měření a výpočtu celkově vyzářeného výkonu EIRP:

Měřené zařízení Planet WAP-1911

Druh: RLAN²⁰ 802.11b Wireless Acces Point
 Druh vysílání: DSSS, 80MOG1DXN

Anténa

Druh: všesměrová
 Typ antény: model MSA-12PF
 Výška nad zemí: 7 m
 Polarizace / klopení: V
 Hlavní směr záření: -°
 Zisk (údaj výrobce): 12²¹ dBi
 Útlum napájecí cesty: 2,0 dB

²⁰ RLAN – Radio Local Area Network.

²¹ dBi – decibel izotropní.

Naměřené a vypočítané hodnoty

Výstupní výkon vysílače:	-12,0 dBW ²²
špičkový EIRP (výpočet):	-12,0 + 12,0 – 2,0 = -2,0 dBW
špičková spektr. hustota výkonu:	-21,8 dBW/1MHz
šp. spektrální hustota EIRP:	-21,8 + 12,0 – 2,0 = -11,8 dBW/ 1 MHz
Kmitočet:	2417 MHz

Měřené zařízení WL-1120 AP

Druh:	RLAN 802.11b Wireless Acces Point
Druh vysílání:	DSSS, 120KG1DAN

Anténa

Druh:	všesměrová
Typ antény:	model MSA-12PF
Výška nad zemí:	15 m
Polarizace / klopení:	V
Hlavní směr záření:	-°
Zisk (údaj výrobce):	12 dBi
Útlum napájecí cesty:	2,0 dB

Naměřené a vypočítané hodnoty

Výstupní výkon vysílače:	-5,0 dBW
špičkový EIRP (výpočet):	-5,0 + 12,0 – 2,0 = 5,0 dBW
špičková spektr. hustota výkonu:	-14,2 dBW/1MHz
šp. spektrální hustota EIRP:	-14,2 + 12,0 – 2,0 = -4,2 dBW/ 1 MHz
Kmitočet:	2417 MHz

Přehled naměřených hodnot měření celkově vyzářeného výkonu EIRP na kmitočtech 2,4 GHz na VRZ, tj. měření špičkové hustoty výkonu měřených zařízení Planet WA-1911 a WL-1120 AP a měření celkového spektrálního výkonu těchto měřených zařízení je uveden v tabulce – viz tab. 2.4.

²² dBW – decibel na watt.

Tab. 2.4: Přehled naměřených a vypočítaných hodnot na VRZ.

Typ VRZ	EIRP (dBW)	S_{EIRP}^{23} (dBW/1MHz)
Planet WAP-1911	-2,0	-11,8
WL-1120 AP	5,0	-4,2

Výkony v VO-R/12/09.2010-12 jsou stanoveny takto:

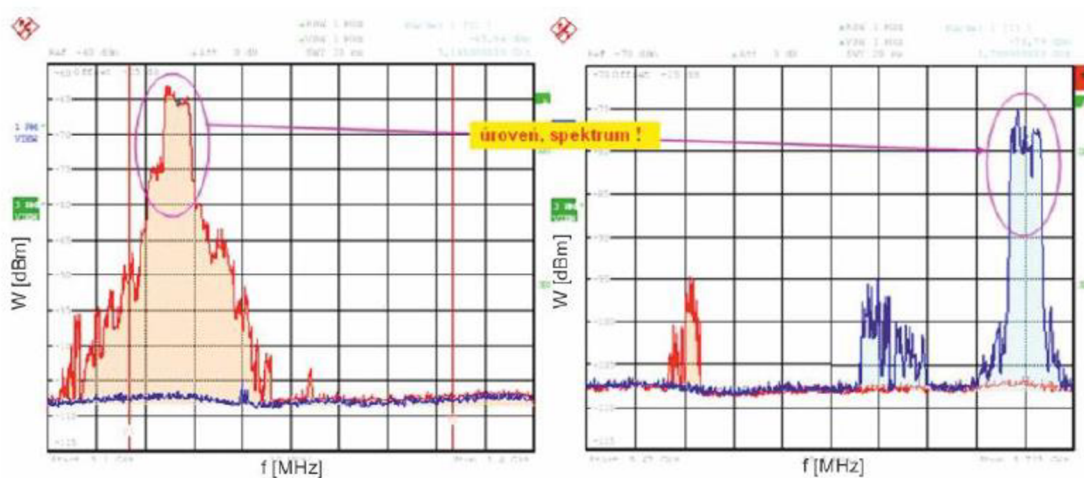
- celkový vyzářený výkon EIRP: max. -10 dBW;
- špičková spektr. hustota výk.: max. -20 dBW/1MHz.

Daty a hodnotami měření a výpočtů doloženými ve výše uvedené tabulce je prokázáno, že kontrolovaná VRZ nesplňují podmínky VO-R/12/09.2010-12.

2.8.2 Porušení a neoprávněné užívání kmitočtů

Porušení z důvodu využívání kmitočtů v kmitočtovém pásmu 5150-5350, jenž je určeno všeobecným oprávněním č. VO-R/12/09.2010-12 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz pro použití pouze uvnitř budov, vně budov je v praxi dalším častým deliktem [25].

Na následujících záznamech z provedených měření jsou zachycena spektra signálů, měřená ve vzdálenosti cca 100 m od stanoviště VRZ – viz obr. 2.13.



Pozn. Červeně je znázorněno spektrum kmitočtu před přeladěním, modře po přeladění.

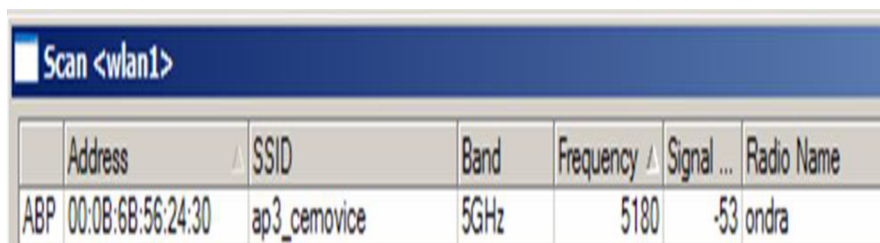
Obr. 2.13: Grafické znázornění spektra signálů VRZ před a po přeladění kmitočtu.

Informace z printscreenů měřicího přístroje Mikrotik spolu s naměřenými hodnotami měřicího přístroje (např. měřicí přístroj R&S FSH6) jsou užívány jako

²³ S_{EIRP} – špičková spektrální hustota výkonu.

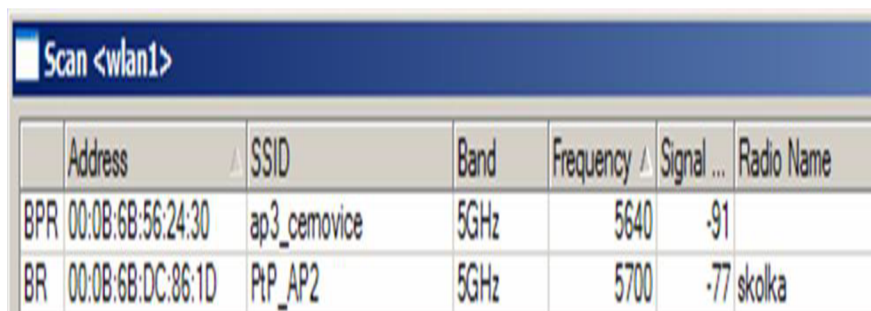
důkazní materiál ve vedeném správním řízení k deliktu porušení užívání kmitočtu dle VO-R/12/09.2010-12.

Na printscreenech uvedených níže – viz obr. 2.14, obr. 2.15 – je uvedena adresa a kmitočet VRZ, jež jsou zaznamenány měřicím přístrojem Mikrotik s MAC adresami a SSID sítí RLAN, před a po přeladění kmitočtu.



	Address	SSID	Band	Frequency	Signal ...	Radio Name
ABP	00:0B:6B:56:24:30	ap3_cemovice	5GHz	5180	-53	ondra

Obr. 2.14: Data zaznamenaná přístrojem Mikrotik před přeladěním kmitočtu.



	Address	SSID	Band	Frequency	Signal ...	Radio Name
BPR	00:0B:6B:56:24:30	ap3_cemovice	5GHz	5640	-91	
BR	00:0B:6B:DC:86:1D	PIP_AP2	5GHz	5700	-77	skolka

Obr. 2.15: Data zaznamenaná přístrojem Mikrotik po přeladění kmitočtu.

Náprava porušení využívání kmitočtů v kmitočtovém pásmu 5150-5350, jež je určeno pro vysílání uvnitř budov, je podmíněna přeladěním kmitočtu. To znamená, že VRZ vysílající na kmitočtu 5 180 MHz bylo přeladěno na frekvenci 5 600 MHz, a bylo tak uvedeno do souladu s všeobecným oprávněním VO-R/12/09.2010-12.

Další problém spočívá ve využívání kmitočtového spektra určeného pro meteorologickou službu během vysílání radaru meteorologické služby, a to z nedbalosti nebo po výpadku AP s následným automatickým naladěním na toto pásmo²⁴ [90].

Dle Rozhodnutí Výboru pro elektronické komunikace ECC/DEC²⁵(04)08 – viz Rozhodnutí ECC z 12. listopadu 2004 o harmonizovaném použití kmitočtových pásem 5 GHz pro začleňování bezdrátových přístupových systémů včetně lokálních rádiových sítí (RLAN) – jsou VRZ pro zajištění kompatibility se zařízeními rádiového určování, tj. radiolokátory pracujícími ve stejném pásmu, vybavena funkcí dynamické volby kmitočtu (DFS – Dynamic Frequency Selection).

²⁴ Vysílání radaru meteorologické služby je upřednostněno před jiným druhem vysílání, a to bezvýhradně. Využívání kmitočtového spektra určeného pro meteorologickou službu je možné pouze v době, kdy tento radar nevysílá. Nedodržení tohoto pravidla je vnímáno jako porušení veřejného oprávnění a takto realizované vysílání je hodnoceno jako zdroj rušení spektra radarového signálu.

²⁵ ECC/DEC – Electronic Communications Committee / Decision.

RLAN zařízení jsou určena k provozu v těchto dílčích pásmech:

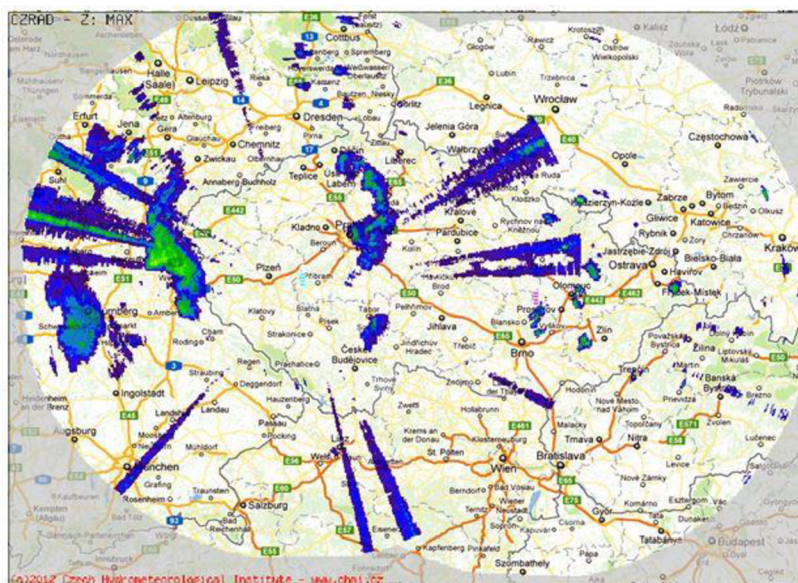
- 5 150 MHz až 5 350 MHz (pásmo 5 GHz);
- 5 470 MHz až 5 725 MHz (pásmo 5 GHz);
- 5 725 MHz až 5 875 MHz (pásmo 5,8 GHz);

přičemž zjišťování radaru není požadováno v pásmu 5 150 MHz až 5 250 MHz.

Evropský telekomunikační normalizační institut (ETSI – European Telecommunications Standards Institute) vydal pro tento typ zařízení dvě normy, jež definují základní požadavky – mezi nimi i funkci DFS. Normy je možno označit za harmonizované, určené k pokrytí ustanovení článku 3.2 (efektivní využití spektra) Směrnice 1999/5/EC. Poslední verze těchto norem v současné době jsou:

- ETSI EN 301 893 V1.5.1 (2008-12)
Širokopásmové rádiové přístupové sítě – Vysokovýkonná RLAN 5 GHz – harmonizovaná EN pokrývající základní požadavky článku 3.2 Směrnice 1999/5/EC.
- ETSI EN 302 502 V1.2.1 (2008-07)
Širokopásmové rádiové přístupové sítě – Pevné širokopásmové datové přenosové systémy v pásmu 5,8 GHz – harmonizovaná EN, pokrývající základní požadavky článku 3.2 Směrnice 1999/5/EC.

Stav rušení meteorologického radaru lze v reálném čase sledovat na internetových stránkách [77], na nichž jsou zobrazeny vizualizace nefiltrovaných radarových dat (RLAN) sítí rušících radar – viz obr. 2.16.



Obr. 2.16: Grafická ukázka záznamu rušení meteorologického radaru v reálném čase sítěmi RLAN.

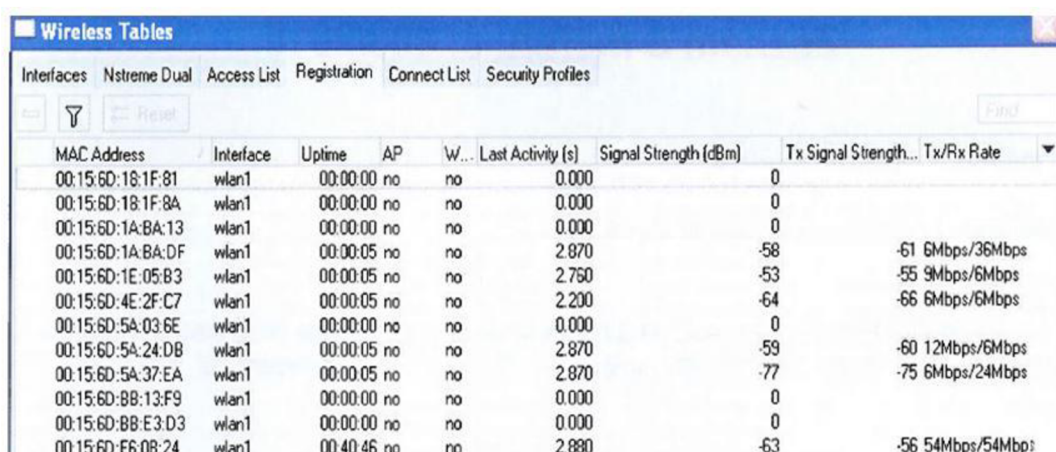
2.8.3 Porušení provozu úmyslným zasíláním deautentizačních paketů

Za v pořadí třetí příklad častého porušení provozu WiFi je považován delikt, kdy je podnikatelem v EK při provozování bezdrátové sítě WiFi prováděno rušení provozu konkrétní WiFi sítě. K této situaci v praxi dochází v menších městech nebo v obcích s větším počtem obyvatel, v nichž souběžně působí několik podnikatelů v EK. Omezený počet možných zákazníků a velká vzájemná konkurence způsobují, že podnikatelé v EK před klienty nejen že ústně haní konkurenci, ba často i záměrně poškozují provoz bezdrátové sítě konkurenčního podnikatele v EK jen z toho důvodu, aby potenciálním klientům „dokázali“, že jejich síť je stabilnější a kvalitnější než ta konkurenční.

Šetření deliktu tohoto typu a jeho měření jsou velice časově náročná, poněvadž podnikatelé v EK se snaží svou pokleslou činnost zastít nejrůznějšími manipulacemi a úhybnými manévry.

Pro lepší názornost proto bude nyní uveden jeden konkrétní případ z běžné praxe. Podnikatel v EK nahlásil ČTÚ rušení provozu sítě s tím, že se jedná o rušení nepravidelné, dlouhodobé a projevující se častým odpojováním stávajících klientů WiFi sítě od příslušného AP. Tím zákonitě docházelo ke zhoršování, opakovanému přerušování a dokonce i znemožnění služby přístupu k Internetu.

Šetřením na místě deliktu a analýzou výsledků tohoto šetření, provedenou pracovníky ČTÚ, bylo následně úmyslné rušení dokázáno. Navíc bylo jasně prokázáno, že tyto deautentizační pakety byly vysílány vysílacími rádiovými zařízeními se zdrojovými MAC adresami shodnými s MAC adresami AP rušené sítě. Bylo tudíž průkazně a nade vše pochybnost dokázáno, že podnikatel, jenž provozoval rušící VRZ, toto zařízení opakovaně záměrně přeladřoval v pásmu 5 GHz na kanály, na nichž byly provozovány AP stěžovatele – podnikatele v EK, takže tímto systematickým vysíláním deautentizačních paketů zásadním a nežádoucím způsobem ovlivňoval a paralyzoval činnost WiFi sítě stěžovatele. Data, zaznamenaná měřicím přístrojem Mikrotik, o zasílání deautentizačních paketů způsobujících výpadky komunikace na AP jsou doložena printscreenem – viz obr. 2.17.



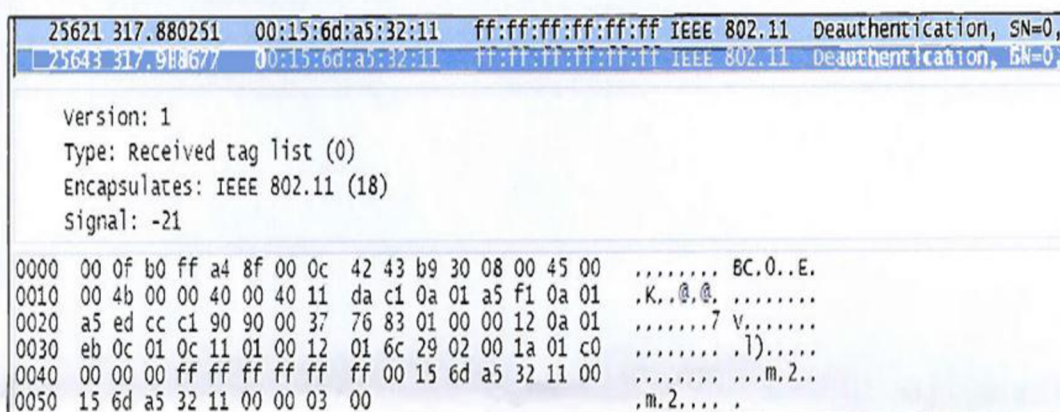
MAC Address	Interface	Uptime	AP	W...	Last Activity (s)	Signal Strength (dBm)	Tx Signal Strength... Tx/Rx Rate
00:15:6D:18:1F:81	wlan1	00:00:00	no	no	0.000	0	
00:15:6D:18:1F:8A	wlan1	00:00:00	no	no	0.000	0	
00:15:6D:1A:BA:13	wlan1	00:00:00	no	no	0.000	0	
00:15:6D:1A:BA:DF	wlan1	00:00:05	no	no	2.870	-58	-61 6Mbps/36Mbps
00:15:6D:1E:05:B3	wlan1	00:00:05	no	no	2.760	-53	-55 9Mbps/6Mbps
00:15:6D:4E:2F:C7	wlan1	00:00:05	no	no	2.200	-64	-66 6Mbps/6Mbps
00:15:6D:5A:03:6E	wlan1	00:00:00	no	no	0.000	0	
00:15:6D:5A:24:DB	wlan1	00:00:05	no	no	2.870	-59	-60 12Mbps/6Mbps
00:15:6D:5A:37:EA	wlan1	00:00:05	no	no	2.870	-77	-75 6Mbps/24Mbps
00:15:6D:8B:13:F9	wlan1	00:00:00	no	no	0.000	0	
00:15:6D:8B:E3:D3	wlan1	00:00:00	no	no	0.000	0	
00:15:6D:F6:08:24	wlan1	00:40:46	no	no	2.880	-63	-56 54Mbps/54Mbps

Obr. 2.17: Data měřicího přístroje Mikrotik o zasílání deautentizačních paketů způsobujících výpadky komunikace na AP.

Na obr. 2.17 je ve sloupci Uptime udána doba připojení klienta, jež koresponduje

s intervalem odesílání deautentizačních paketů. Delší doba připojení posledního klienta je způsobena pravděpodobně horší rádiovou viditelností směrem ke zdroji deautentizačních paketů.

Pro dohledání zdroje vysílání těchto deautentizačních paketů a následné zevrubné analýze dat získaných měřením v rámci místního šetření byla použita metoda zaznamenávání paketů pomocí zařízení typu Mikrotik (se směrovou anténou pro určení azimutu s maximální hodnotou přijímaného výkonu) – viz obr. 2.18. Toto zařízení bylo nastaveno na vysílací kmitočet příslušného rušeného AP a zasílalo přijímané pakety k okamžité analýze do Open source software Wireshark za účelem analýzy síťového provozu.



Pozn.: hodnota přijímaného výkonu na vstupu rádiového zařízení v době místního šetření činí 21 dBm.

Obr. 2.18: Printscreen detailů deautentizačního paketu.

Na základě získaných dat i díky provedené analýze provozu bezdrátové sítě WiFi bylo zjištěno, že dochází k odpojování klientů pomocí deautentizačních paketů od zařízení se stejnou zdrojovou MAC adresou jako má příslušný AP.

Každý s těchto tři výše uvedených příkladů deliktů, tj. jejich ověřování a prokazování měřením, je řešen ve správním řízení vedeném na příslušné oblasti ČTÚ podle místa zaevidování konkrétního oznámení o podnikání v EK právnické osoby (PO) nebo fyzické osoby podnikající (FOP), jež deliktu dopustila.

3 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

V prvních dvou kapitolách disertační práce byl traktován současný stav komunikace prostřednictvím bezdrátových sítí se zaměřením na sítě WiFi a WiMAX, přenos dat a princip přenosu dat bezdrátovými technologiemi, popis typů bezdrátových technologií, jejich standardů a historie vzniku.

Dále se práce zaměřila na problematiku rozdělení rádiového spektra v České republice a jeho správu. Zároveň byla vymezena role a postavení regulátora, tj. ČTÚ, v rámci správy kmitočtového spektra v České republice a byla podána rámcová charakteristika všeobecného oprávnění VO-R/12/09.2010-12.

Posléze bylo přistoupeno na základě vymezení legislativního rámce a teoretického výkladu s příslušným komentářem k analýze nejčastějších případů porušování oprávnění VO-R/12/09.2010-12 pro širokopásmový přenos dat prostřednictvím bezdrátových sítí v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz při provozu bezdrátové technologie WiFi v běžné praxi s uvedením aplikovaných postupů a konkrétních způsobů měření pro každé konkrétní šetření.

Nyní bude vyloženo výzkumné šetření kritických parametrů pro bezdrátové sítě bezdrátových technologií WiFi a WiMAX a ozřejměn design realizovaného výzkumu.

3.1 Výzkumné šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX pomocí modelace a simulace

3.1.1 Stav nabízených služeb prostřednictvím bezdrátových sítí technologií WiFi a WiMAX v České republice

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách disertační práce, v současné době je v České republice velké množství podnikatelů v elektronických komunikacích (EK), kteří v rámci své podnikatelské činnosti nabízejí vedle poskytování Internetu také další doplňkové služby jako např. VoIP (Voice over Internet Protocol) či IPTV (Internet Protocol Television) čili televizní vysílání přes internetový protokol.

Z důvodu finančních úspor a snížení provozních nákladů však někteří podnikatelé v EK neinvestují do již realizovaných sítí žádné finanční prostředky a nepodporují jejich inovaci a modernizaci. To znamená, že neprovádějí výměnu starých typů AP a účastnických zařízení za nové s novými a bezpečnějšími technologiemi podporujícími nové doplňkové služby. Tyto doplňkové služby někteří podnikatelé v EK nabízejí uživatelům na stávajících zařízeních různých generací a s různými variantami standardu IEEE 802.11x bezdrátové technologie WiFi, a využívají tak v maximální možné míře možnosti kompatibility nových zařízení se staršími komponenty bezdrátových sítí. V tuto chvíli tak dochází k situaci, že technicky zastaralé bezdrátové sítě pro některé poskytované služby nejsou ve všech funkcích plně homogenní. Nicméně i přes tento fakt jsou v rámci příslušných bezdrátových sítí některými podnikateli v EK nabízeny

služby, jež dobře fungují jen při minimální zátěži celé bezdrátové sítě. Jakmile dojde k vyšší přenosové zátěži sítě, tak dochází k výpadkům poskytování služeb či k různým omezením plnohodnotného provozu nabízených služeb, což snižuje komfortnost poskytovaných služeb a zároveň vyvolává pochopitelnou nevoli na straně uživatele.

V této souvislosti je třeba otevřeně poukázat na velkou míru nezodpovědnosti takovýchto podnikatelů v EK při poskytování služby VoIP, když z výše uvedených důvodů nelze zajistit spojení s telefonními centry tísňového volání, tj. s linkou mezinárodního integrovaného záchranného systému na telefonním čísle 112, Policie České republiky – 158, s linkou záchranné zdravotnické služby první pomoci – 155 či hasičského sboru – 150, v závažných životních situacích, a telefonní tísňové volání tak není uskutečněno buď vůbec, nebo je realizováno pouze nekvalitní či přerušované spojení. Pokud by měly být v této souvislosti pojmenovány bezprostřední příčiny podobných selhání některých bezdrátových sítí, jednalo by se ve většině případů o nedodržení technických parametrů jako např. o absenci komponentů bezdrátové sítě s prioritací provozu hlasu, tj. tzv. QoS (Quality of Service), nebo o situaci, kdy po výpadku napájecího napětí komponentů bezdrátové sítě nedojde k jejímu opětovnému automatickému uvedení do provozu schopného stavu.

Na základě výše uvedených faktů lze odvodit, že k nejdůležitějším parametrům bezdrátových sítí náleží tyto parametry:

- datová propustnost, tj. maximální velikost dat, jež může protéci bezdrátovými sítěmi za příslušný časový úsek²⁶;
- bezpečnost dat přenášených prostřednictvím bezdrátových sítí.

3.1.2 Modelace a simulace bezdrátových sítí technologií WiFi a WiMAX

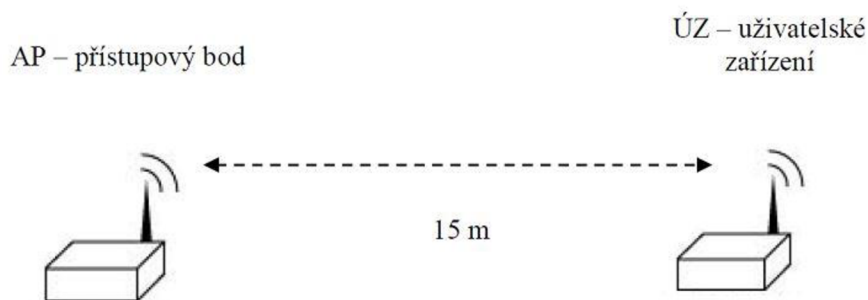
Obnovení funkčnosti bezdrátových sítí po výpadku napájecího napětí AP nebo ÚZ, což lze označit za jeden z největších problémů těchto technologií, je předmětem zájmu této práce. Problematika bezdrátových sítí WiFi a WiMAX je v současnosti v teoretické i praktické rovině bádání řazena k aktuálním tématům. V disertační práci jsou stanoveny tyto cíle:

1. Modelovat sítě bezdrátových technologií WiFi a WiMAX.
2. Simulovat výpadek napájecího napětí AP nebo ÚZ a zjistit po opětovném obnovení napájecího napětí vliv výpadku a kritických parametrů na provoz sítí bezdrátových technologií WiFi a WiMAX.
3. Experimentálně ověřit v modelové síti vliv zatížení sítě na přenosovou kvalitu služeb se zvláštním zřetelem k VoIP.
4. Navrhnout ekonomicky přijatelné řešení problematiky související s výpadkem napájecího napětí a kritickými parametry sítí bezdrátových technologií WiFi a WiMAX, a to ve formě záložního zdroje.

²⁶ Maximální velikost dat průtoku bezdrátových sítí je udávána za 1 sekundu.

Nyní budou v rámci výzkumné části projektu disertační práce přehledně traktovány jednotlivé úkony výzkumného šetření k problematice bezdrátových sítí a technologií WiFi a WiMAX a jejich kritických parametrů pomocí výzkumných metod modelace a simulace.

Experimentálním šetřením byla provedena modelace sítě bezdrátové technologie WiFi – viz obr. 3.1. Poté byla uskutečněna řízená simulace výpadků napájecího napětí bezdrátové technologie WiFi v kmitočtových pásmech 2,4 GHz a 5 GHz a bezdrátové technologie WiMAX v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz.



Obr. 3.1: Grafické znázornění zapojení bezdrátové technologie Wifi a WiMAX při modelaci bezdrátové sítě.

3.1.3 Metodika experimentálního měření výpadků napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi a WiMAX

V rámci experimentálního šetření bylo simulováno několik variant výpadků napájecího napětí AP nebo uživatelského zařízení, jež mohou nastat při provozu bezdrátových sítí technologií WiFi a WiMAX. Tyto varianty jsou následně popsány.

Metodika měření:

1. varianta

Simulace výpadku napájecího napětí AP, napájecí napětí ÚZ je neustále v provozu, komunikace mezi AP a ÚZ je z důvodu výpadku napájecího napětí AP přerušena. Spojení mezi AP a ÚZ je přerušeno po dobu 5 minut. Následně po 5 minutách přerušeno spojení mezi AP a ÚZ je obnoveno napájecí napětí AP a zároveň je měřen potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a opětovné zajištění přenosu dat. Tento nutný časový interval pro obnovení komunikace mezi AP a ÚZ je zanesen do přehledové tabulky. Simulace výpadku napájecího napětí AP byla provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

2. varianta

Simulace výpadku napájecího napětí ÚZ, napájecí napětí AP je neustále v provozu, komunikace mezi ÚZ a AP je z důvodu výpadku napájecího napětí ÚZ přerušena. Spojení mezi ÚZ a AP je přerušeno po dobu 5 minut. Následně po 5 minutách přerušeno spojení mezi ÚZ a AP je obnoveno napájecí napětí ÚZ a zároveň je měřen potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi ÚZ a AP a opětovné zajištění přenosu dat. Tento nutný časový interval pro

obnovení komunikace mezi ÚZ a AP je zanesen do přehledové tabulky. Simulace výpadku napájecího napětí ÚZ byla provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

3. varianta

Simulace výpadku napájecího napětí AP, tj. AP je vyřazeno z provozu, s následným výpadkem napájecího napětí ÚZ po 5 minutách, tj. ÚZ je po 5 minutách od výpadku napájecího napětí AP vyřazeno z provozu. Komunikace mezi AP a ÚZ je po výpadku napájecího napětí AP přerušena, spojení mezi AP a ÚZ je přerušeno po dobu 5 minut. Následně po 5 minutách přerušeno spojení mezi AP a ÚZ je obnoveno napájecí napětí AP a po 5 minutách po obnovení napájecího napětí AP je obnoveno napájecí napětí ÚZ. Od obnovení napájecího napětí ÚZ je měřen potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat. Tento nutný časový interval pro obnovení komunikace mezi AP a ÚZ je zanesen do přehledové tabulky. Simulace výpadku napájecího napětí AP a po 5 minutách realizovaného výpadku napájecího napětí ÚZ a opětovného uvedení AP a ÚZ do provozu v pořadí AP a ÚZ byla provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

4. varianta

Simulace výpadku napájecího napětí AP, tj. AP je vyřazeno z provozu, s následným výpadkem napájecího napětí ÚZ po 5 minutách, tj. ÚZ je po 5 minutách od výpadku napájecího napětí AP vyřazeno z provozu. Komunikace mezi AP a ÚZ je po výpadku napájecího napětí AP přerušena, spojení mezi AP a ÚZ je přerušeno po dobu 5 minut. Následně po 5 minutách přerušeno spojení mezi AP a ÚZ je obnoveno napájecí napětí ÚZ a po 5 minutách po obnovení napájecího napětí ÚZ je obnoveno napájecí napětí AP. Od obnovení napájecího napětí AP je měřen potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat. Tento nutný časový interval pro obnovení komunikace mezi AP a ÚZ je zanesen do přehledové tabulky. Simulace výpadku napájecího napětí AP a po 5 minutách realizovaného výpadku napájecího napětí ÚZ a opětovného uvedení AP a ÚZ do provozu v pořadí ÚZ a AP byla provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

5. varianta

Simulace výpadku napájecího napětí ÚZ, tj. ÚZ je vyřazeno z provozu, s následným výpadkem napájecího napětí AP po 5 minutách, tj. AP je po 5 minutách od výpadku napájecího napětí ÚZ vyřazeno z provozu. Komunikace mezi ÚZ a AP je po výpadku napájecího napětí ÚZ přerušena, spojení mezi AP a ÚZ je přerušeno po dobu 5 minut. Následně po 5 minutách přerušeno spojení mezi AP a ÚZ je obnoveno napájecí napětí AP a po 5 minutách po obnovení napájecího napětí AP je obnoveno napájecí napětí ÚZ. Od obnovení napájecího napětí ÚZ je měřen potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat. Tento nutný časový interval pro obnovení komunikace mezi AP a ÚZ je zanesen do přehledové tabulky. Simulace výpadku napájecího napětí ÚZ a po 5 minutách realizovaného výpadku napájecího napětí AP a opětovného uvedení AP a ÚZ do provozu v pořadí AP a ÚZ byla provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

6. varianta

Simulace výpadku napájecího napětí ÚZ, tj. ÚZ je vyřazeno z provozu, s následným výpadkem napájecího napětí AP po 5 minutách, tj. AP je po 5 minutách od výpadku napájecího napětí ÚZ vyřazeno z provozu. Komunikace mezi ÚZ a AP je po výpadku napájecího napětí ÚZ přerušena, spojení mezi AP a ÚZ je přerušeno po dobu 5 minut. Následně po 5 minutách přerušeno spojení mezi AP a ÚZ je obnoveno napájecí napětí ÚZ a po 5 minutách po obnovení napájecího napětí ÚZ je obnoveno napájecí napětí AP. Od obnovení napájecího napětí AP je měřen potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat. Tento nutný časový interval pro obnovení komunikace mezi AP a ÚZ je zanesen do přehledové tabulky. Simulace výpadku napájecího napětí ÚZ a po 5 minutách realizovaného výpadku napájecího napětí AP a opětovného uvedení ÚZ a AP do provozu v pořadí ÚZ a AP byla provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

Tyto varianty výpadků napájecího napětí AP a ÚZ jsou souhrnně zpracovány v tabulce – viz tab. 3.1.

Pozn. Šedě je v tab. 3.1 vybarveno pole označující výpadky napájecího napětí AP a ÚZ a zapojení napájecího napětí AP a ÚZ v různých variantách.

Tab. 3.1: Přehled variant výpadků napájecího napětí AP a ÚZ.

Varianta	Výpadek napájecího napětí				Zpětné připojení napájecího napětí			
	AP	ÚZ	AP výpadek po 5 minutách	ÚZ výpadek po 5 minutách	AP	ÚZ	Zapojení AP, následně zapojení ÚZ	Zapojení ÚZ, následně zapojení AP
1. varianta								
2. varianta								
3. varianta								
4. varianta								
5. varianta								
6. varianta								

V rámci snížení odchylky chybovosti bylo u každé varianty provedeno 10 měření a následně byla z těchto 10 naměřených hodnot vypočítána průměrná hodnota.

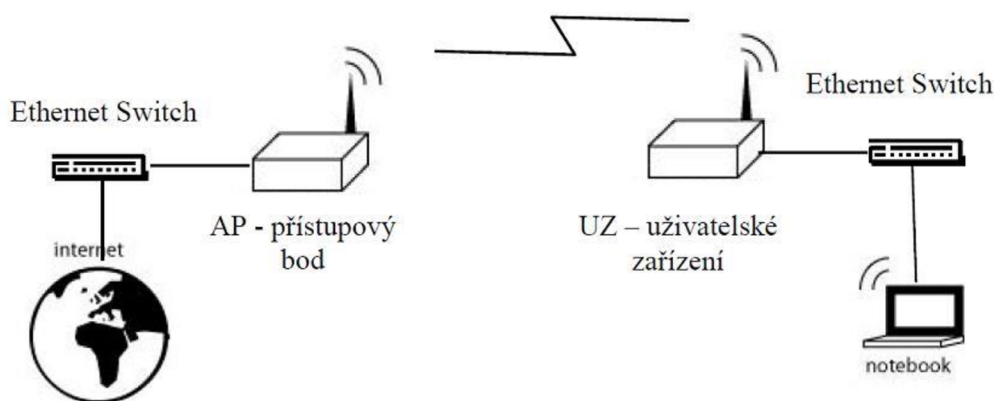
V rámci disertační práce bylo dále experimentálně ověřeno, jaký vliv má v modelové bezdrátové síti na přenosovou kvalitu hlasových služeb VoIP zatížení bezdrátové technologie WiFi.

Pro měření výpadků bezdrátové sítě a technologie WiFi a WiMAX byla použita tato zařízení:

- TL-WR340GD;
- Zcomax WA-2204A-TXv;

- NanoStation M5 Loco;
- NanoBridge M5;
- Nanostation M3;
- elektronické digitální stopky UNI 80b/6 EXT;
- Mikrotik cloud core router CCR- 1036;
- Mikrotik cloud core router CRS 125;
- VoIP PAP 2T.

Zapojení bezdrátové technologie WiFi a WiMAX při simulaci výpadků AP a ÚZ a jejich variant je znázorněno v grafické podobě na obrázku – viz obr. 3.2.



Obr. 3.2: Grafické znázornění zapojení bezdrátové technologie WiFi a WiMAX při simulaci výpadků AP a ÚZ a jejich variant.

3.2 Analýza dat výzkumného šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi 2,4 GHz, 5 GHz a WiMAX 3,5 GHz

3.2.1 Bezdrátová technologie WiFi 2,4 GHz

U přenosu dat bezdrátovou technologií WiFi pro kmitočtové pásmo 2,4 GHz byl jako AP použit produkt TL-WR340GD společnosti TP-LINK TECHNOLOGIES CO., LTD, jehož parametry splňují kritéria standardu IEEE 802.11g. Produkt TL-WR340GD umožňuje naladění kmitočtového pásma 2,4 GHz s maximální přenosovou rychlostí až 54 Mb/s a využívá šifrování WEP/WPA/WPA2.

U přenosu dat bezdrátovou technologií WiFi pro kmitočtové pásmo 2,4 GHz bylo jako ÚZ použito produktu Zcomax WA-2204A-TX společnosti ZCOMAX TECHNOLOGIES, INC. Produkt Zcomax WA-2204A-TX plně vyhovuje dvěma standardům, a to IEEE 802.11b a IEEE 802.11g, takže umožňuje naladění obou kmitočtových pásem – 2,4 GHz a 5 GHz, přičemž pro účely realizovaného měření je zapotřebí pásmo 2,4 GHz. Produktem Zcomax je užíváno šifrování WEP/WPA/WPA2,

jež je shodné s šifrováním AP.

Postupně bylo v rámci výzkumného šetření experimentálně změřeno všech 6 variant možných výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ. Pozornost byla soustředěna na potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat. Důraz byl kladen především na opětovné nabytí plné funkčnosti bezdrátové sítě WiFi.

S ohledem na zajištění maximální objektivity realizovaného experimentálního měření parametrů modelové bezdrátové sítě v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz byla každá z celkem 6 variant měření provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

Parametry modelové bezdrátové sítě WiFi v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz:

IP ²⁷ adresa AP:	192.168.1.1
IP adresa účastníka:	192.168.1.2
Zařízení AP:	TL-WR340GD
Zařízení účastníka:	Zcomax WA-2204A-TX
Verze firmware:	4.7.11.build 101102rel.60376N
Verze firmware:	V1.4.1.EV1.1
Mac adresa VF AP:	00:02:72:85:49:A0
Mac adresa VF účastníka:	00:02:72:85:47:A2
Vysílací frekvence:	2,412 GHz
Vysílací výkon:	7 dBm
DSF:	vypnuté
Šifrování:	vypnuté
Airmax:	vypnuté
Úroveň signálu u účastníka:	-38 dBm
Průměrná latence spoje:	1 ms bez zatížení
Watch dog:	vypnuté

Výsledky provedeného experimentálního měření, tj. 6 variant, možných výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ byly zaneseny do příslušných tabulek – viz tab. 3.2, tab. 3.3, tab. 3.4, tab. 3.5, tab. 3.6, tab. 3.7.

²⁷ IP – Internet Protocol [70].

Tab. 3.2: Výsledky 1. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	1,07	1,08	1,05	1,09	1,08	1,11	1,09	1,06	1,11	1,04
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.3: Výsledky 2. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	1,36	1,28	1,33	1,32	1,37	1,33	1,29	1,39	1,36	1,33
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.4: Výsledky 3. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP										
Následný výpadek (po 5 minutách) napájecího napětí ÚZ, zapojeno napájecí napětí AP a následně ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	1,07	1,09	1,06	1,1	1,11	1,08	1,06	1,12	1,07	1,09
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.5: Výsledky 4. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP										
Následný výpadek (po 5 minutách) napájecího napětí ÚZ, zapojeno napájecí napětí ÚZ a následně AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	1,38	1,35	1,33	1,39	1,36	1,32	1,33	1,35	1,36	1,39
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.6: Výsledky 5. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ										
Následný výpadek (po 5 minutách) napájecího napětí AP, zapojeno napájecí napětí AP a následně ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	1,07	1,09	1,06	1,08	1,04	1,11	1,08	1,13	1,08	1,05
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.7: Výsledky 6. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ										
Následný výpadek (po 5 minutách) napájecího napětí AP, zapojeno napájecí napětí ÚZ a následně AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	1,21	1,30	1,20	1,18	1,20	1,21	1,18	1,21	1,22	1,21
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

3.2.2 Bezdrátová technologie WiFi 5 GHz

U přenosu dat bezdrátovou technologií WiFi pro kmitočtové pásmo 5 GHz byl jako AP použit produkt NanoStation M5 Loco společnosti Ubiquiti Networks, Inc., jehož parametry splňují kritéria dvou standardů, a to standardu IEEE 802.11a a IEEE 802.11n. Produkt NanoStation M5 Loco umožňuje naladění kmitočtového pásma 5 GHz s maximální přenosovou rychlostí až 150 Mb/s.

U přenosu dat bezdrátovou technologií WiFi pro kmitočtové pásmo 5 GHz bylo jako ÚZ použito produktu NanoBridge M5 společnosti Ubiquiti Networks, Inc. Produkt NanoBridge M5 plně vyhovuje standardu IEEE 802.11n a umožňuje naladění kmitočtového pásma 5 GHz.

Postupně bylo v rámci výzkumného šetření experimentálně změřeno všech 6 variant možných výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ. Pozornost byla soustředěna na potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat. Důraz byl kladen především na opětovné nabytí plné funkčnosti bezdrátové sítě WiFi.

S ohledem na zajištění maximální objektivitu realizovaného experimentálního měření parametrů modelové bezdrátové sítě v kmitočtovém pásmu 5 GHz byla každá z celkem 6 variant měření provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

Parametry modelové bezdrátové sítě WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz:

IP adresa AP:	192.168.1.20
IP adresa účastníka:	192.168.1.21
Zařízení AP:	NanoStation M5 Loco
Zařízení účastníka:	NanoBridge M5
Verze firmware:	5.3.5
Mac adresa VF AP:	00:27:22:6E:9B:F7
Mac adresa VF účastníka:	
Vysílací frekvence:	5500 MHz
Vysílací výkon:	11 dBm
DSF:	zapnuté
Šifrování:	žádné
Airmax:	zapnuto
Úroveň signálu u účastníka:	-30 dBm
Průměrná latence spoje:	1 ms bez zatížení
Watch dog:	vypnutý

Výsledky provedeného experimentálního měření, tj. 6 variant, možných výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ byly zaneseny do příslušných tabulek – viz tab. 3.8, tab. 3.9, tab. 3.10, tab. 3.11, tab. 3.12, tab. 3.13.

Tab. 3.8: Výsledky 1. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,34	1,25	0,32	0,32	1,24	0,29	0,28	1,27	1,25	0,29
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.9: Výsledky 2. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno /min	0,32	0,31	0,28	0,34	0,28	0,33	0,31	0,29	0,32	0,29
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.10: Výsledky 3. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP										
Následný výpadek (po cca 3 min.) napájecího napětí ÚZ, zapojeno napájecí napětí AP a následně ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno /min	0,32	0,31	0,33	0,29	0,33	0,34	0,32	0,28	0,33	0,34
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.11: Výsledky 4. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP										
Následný výpadek (po cca 3 min.) napájecího napětí ÚZ, zapojeno napájecí napětí ÚZ a následně AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,32	0,32	0,31	0,27	0,33	0,28	0,31	0,33	0,29	0,314
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.12: Výsledky 5. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ										
Následný výpadek (po cca 3 min.) napájecího napětí AP, zapojeno napájecí napětí AP a následně ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,32	0,28	0,31	0,31	0,32	0,31	0,33	0,32	0,29	0,33
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.13: Výsledky 6. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiFi 5 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ										
Následný výpadek (po cca 3 min.) napájecího napětí AP, zapojeno napájecí napětí ÚZ a následně AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,31	0,33	0,31	0,32	0,27	0,32	0,34	0,3	0,32	0,33
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

3.2.3 Bezdrátová technologie WiMAX 3,5 GHz

U přenosu dat bezdrátovou technologií WiMAX pro kmitočtové pásmo 3,5 GHz byl jako AP i ÚZ použit produkt UBNT NanoStation M3 společnosti Ubiquiti Networks, Inc., jehož parametry splňují kritéria standardu IEEE 802.16. Produkt UBNT NanoStation M3 umožňuje naladění kmitočtového pásma 3,5 GHz s maximální přenosovou rychlostí až 300 Mb/s.

Postupně bylo v rámci výzkumného šetření experimentálně změřeno všech 6 variant možných výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ. Pozornost byla soustředěna na potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat. Důraz byl kladen především na opětovné nabytí plné funkčnosti bezdrátové sítě WiMAX.

S ohledem na zajištění maximální objektivity realizovaného experimentálního měření parametrů modelové bezdrátové sítě v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz byla každá z celkem 6 variant měření provedena opakovaně s četností 10 pokusů.

Parametry modelové bezdrátové sítě WiMAX v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz:

IP adresa AP:	192.168.1.20
IP adresa účastníka:	192.168.1.21
Zařízení AP:	Nanostation M3
Zařízení účastníka:	Nanostation M3
Verze firmware:	XM.V5.6.2.27929.150716.1201
Mac adresa VF AP:	00:27:22:44:DE:A1
Mac adresa VF účastníka:	00:27:22:44:DE:12
Vysílací frekvence:	3459 MHz
Vysílací výkon:	14 dBi
DSF:	ne
Šifrování:	ne
Airmax:	ne
Úroveň signálu u klienta:	-24 dBm
Průměrná latence spoje:	1ms bez zatížení
Watch dog:	ne

Výsledky provedeného experimentálního měření, tj. 6 variant, možných výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ byly zaneseny do příslušných tabulek – viz tab. 3.14, tab. 3.15, tab. 3.16, tab. 3.17, tab. 3.18, tab. 3.19.

Tab. 3.14: Výsledky 1. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,48	0,72	0,41	0,69	0,45	0,76	0,43	0,43	0,70	0,44
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.15: Výsledky 2. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,37	0,36	0,38	0,37	0,35	0,39	0,40	0,34	0,39	0,38
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.16: Výsledky 3. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP										
Následný výpadek (po cca 3 min.) napájecího napětí ÚZ, zapojeno napájecí napětí AP a následně ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,39	0,40	0,37	0,37	0,36	0,33	0,36	0,39	0,41	0,37
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.17: Výsledky 4. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.

Výpadek napájecího napětí AP										
Následný výpadek (po cca 3 min.) napájecího napětí ÚZ, zapojeno napájecí napětí ÚZ a následně AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,36	0,37	0,35	0,39	0,36	0,32	0,33	0,36	0,37	0,39
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3.18: Výsledky 5. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ										
Následný výpadek (po cca 3 min.) napájecího napětí AP, zapojeno napájecí napětí AP a následně ÚZ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,36	0,34	0,33	0,37	0,39	0,37	0,36	0,33	0,37	0,36
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

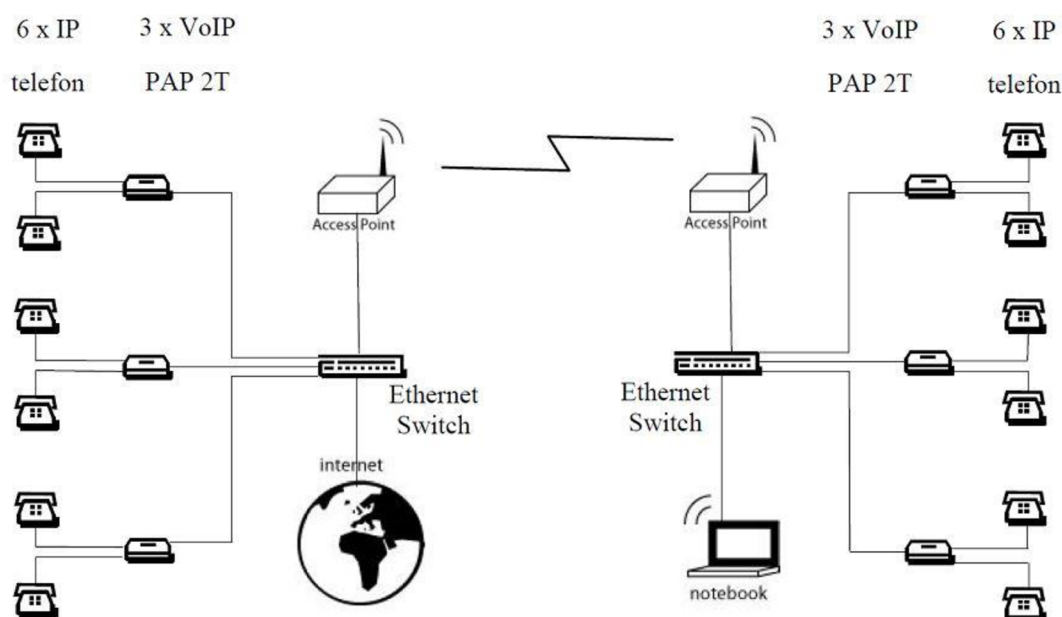
Tab. 3.19: Výsledky 6. varianty experimentálního měření výpadků napájecího napětí a zpětného zapnutí napájecího napětí AP a ÚZ bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz.

Výpadek napájecího napětí ÚZ										
Následný výpadek (po cca 3 min.) napájecího napětí AP, zapojeno napájecí napětí ÚZ a následně AP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spojení obnoveno / min	0,31	0,33	0,31	0,32	0,34	0,32	0,34	0,32	0,32	0,33
Spojení obnoveno ANO/NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

3.2.4 VoIP v bezdrátové technologii WiFi 5 GHz

Experimentálně byl v modelové síti prověřen vliv zatížení sítě na přenosovou kvalitu služeb prostřednictvím VoIP, tj. kvalitu telefonních hovorů – přenosu dat. Bezdrátová technologie sítě WiFi byla modelována v kmitočtovém pásmu 5 GHz. Bezdrátová technologie sítě WiFi byla obousměrně zatížena, následně byly do WiFi sítě postupně přidávány hlasové kanály a poslechem byla ověřována kvalita telefonních hovorů – přenosu hlasu.

Tímto experimentem byl ověřen maximální počet hlasových kanálů bez slyšitelného zkreslení, tj. snížené srozumitelnosti či úplné nesrozumitelnosti některých pasáží hovorů, popř. výpadků přenosu hlasu na modelové bezdrátové síti – viz obr. 3.3.



Obr. 3.3: Zapojení modelace sítě pro testování přenosu VoIP.

Parametry modelové bezdrátové sítě WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz:

IP adresa AP:	192.168.1.20
IP adresa účastníka:	192.168.1.21
Zařízení AP:	NanoStation M5 Loco
Zařízení účastníka:	NanoBridge M5
Verze firmware:	5.3.5
Mac adresa VF AP:	00:27:22:6E:9B:F7
Mac adresa VF účastníka:	00:27:22:6E:7D:E2
Vysílací frekvence:	5500 MHz
Vysílací výkon:	11 dBm

DSF:	zapnuté
Šifrování:	žádné
Airmax:	zapnuto
Úroveň signálu u klienta:	-30 dBm
Průměrná latence spoje:	1ms bez zatížení
Watch dog:	vypnuto

Výsledky provedeného experimentu ke kvalitě telefonních hovorů – přenosu hlasu byly zaneseny do tabulky – viz tab. 3.20.

Tab. 3.20: Výsledky provedeného experimentu ke kvalitě telefonních hovorů – přenosu hlasu bezdrátovou technologií WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz.

Datová propustnost mezi AP a ÚZ	Počet hlasových kanálů	Kvalita hovoru
RX: 32,6Mb/s TX: 42,8Mb/s	0	bezproblémová
RX: 32,5Mb/s TX: 42,6Mb/s	1	bezproblémová
RX: 32,2Mb/s TX: 42,4Mb/s	2	bezproblémová
RX: 32Mb/s TX: 42,2Mb/s	3	bezproblémová
RX: 31,6Mb/s TX: 41,9Mb/s	4	výpadky v hovorech
RX: 31,2Mb/s TX: 41,4Mb/s	5	opakované přerušování všech hovorů, nesrozumitelnost některých pasáží hovorů

3.3 Shrnutí výsledků výzkumného šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX pomocí modelace a simulace

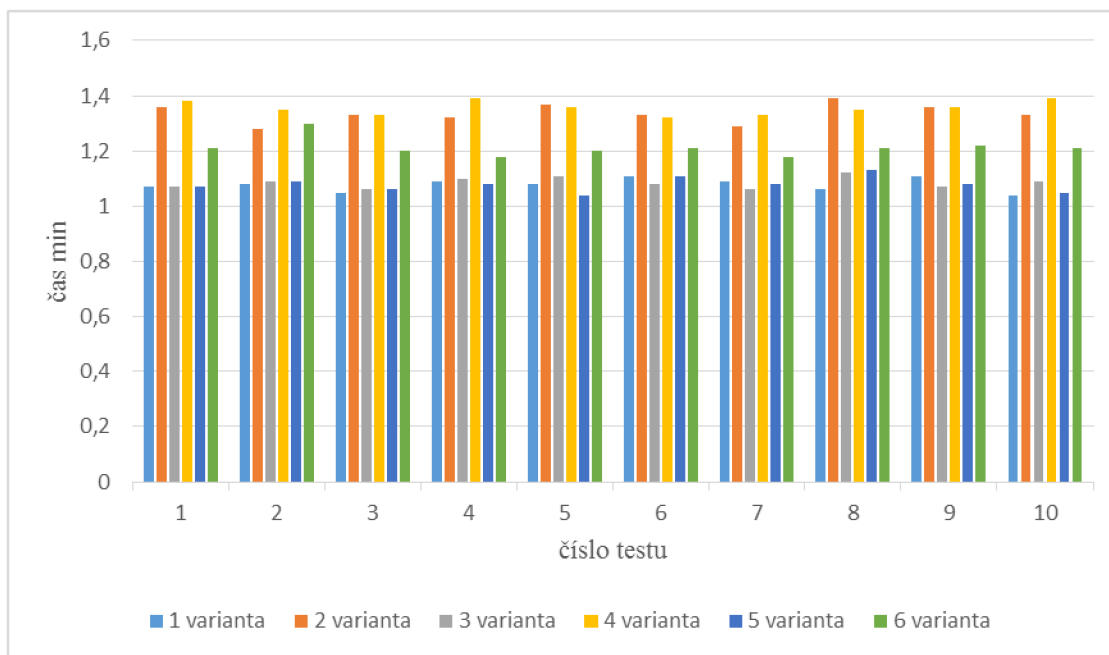
3.3.1 Vyhodnocení experimentálního měření výpadků bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz

Z výsledků získaných experimentálním měřením výpadků bezdrátové technologie WiFi 2,4 GHz vyplývá, že potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat u simulované modelové bezdrátové sítě ve všech 6 variantách měření s četností 10 pokusů a při vzdálenosti 15 m mezi AP a ÚZ je větší než 1,04 min a zároveň nepřesahoval hodnotu 1,39 min. To znamená, že i na tak

krátkou vzdálenost (jako je 15 m) bez překážek nebylo pro obnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat u simulované bezdrátové sítě dosaženo času s hodnotou nižší než 1 min.

Při kombinaci výpadku napájecího napětí a zpětného uvedení do plnohodnotného provozu jednotlivých zařízení AP a ÚZ byl zapotřebí časový interval s nejvyšší hodnotou u varianty 2 a 4.

Grafické vyhodnocení časů náběhu WiFi sítě v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz je k dispozici na obrázku níže – viz obr. 3.4.



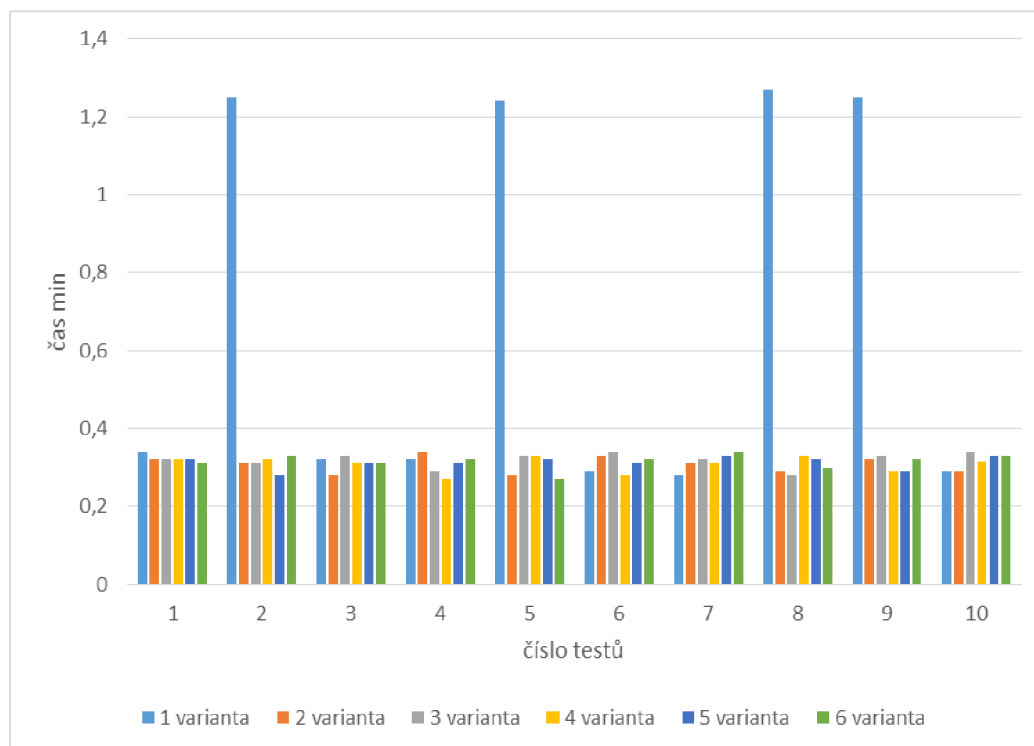
Obr. 3.4: Grafické vyhodnocení časů náběhu WiFi sítě v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz.

3.3.2 Vyhodnocení experimentálního měření výpadků bezdrátové technologie WiFi 5 GHz

Výsledky získané experimentálním měřením výpadků bezdrátové technologie WiFi 5 GHz ukazují, že potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat u simulované modelové bezdrátové sítě ve všech 6 variantách měření s četností 10 pokusů a při vzdálenosti 15 m mezi AP a ÚZ je větší než 0,28 min a zároveň nepřekročil hodnotu 1,27 min.

Největší rozdíly v časech spojení byly v rámci experimentu naměřeny v 1. variantě měření, kdy docházelo k výpadkům napájecího napětí pouze u AP. Tyto velké časové rozdíly byly zapříčiněny automatickým skenováním všech povolených kanálů. Navíc čas potřebný na provedení skenování byl v přímé závislosti na stavu AP a na časovém intervalu potřebném k provedení skenování jednotlivých kanálů s cílem nalezení kanálu, na němž vysílá ÚZ.

Grafické vyhodnocení časů náběhu WiFi sítě v kmitočtovém pásmu 5 GHz je zobrazeno na obrázku níže – viz obr. 3.5.



Obr. 3.5: Grafické vyhodnocení časů náběhu WiFi sítě v kmitočtovém pásmu 5 GHz.

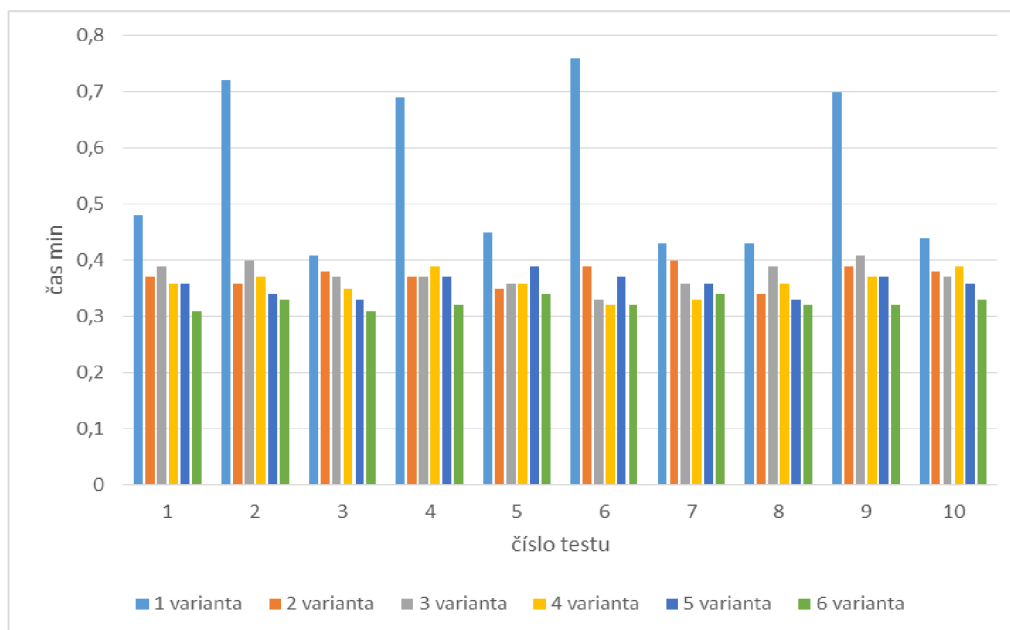
3.3.3 Vyhodnocení experimentálního měření výpadků bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz

Na základě výsledků získaných experimentálním měřením výpadků bezdrátové technologie WiMAX 3,5 GHz lze vyvodit, že potřebný časový interval pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat u simulované modelové bezdrátové sítě ve všech 6 variantách měření s četností 10 pokusů a při vzdálenosti 15 m mezi AP a ÚZ je větší než 0,32 min a zároveň nepřesáhl hodnotu 0,76 min.

Rozptyl naměřených hodnot je dán stavem AP a časovým intervalem potřebným k provedení skenování jednotlivých kanálů s cílem nalézt kanál, na němž vysílá ÚZ.

Časový interval potřebný pro znovuoobnovení komunikace mezi AP a ÚZ a pro opětovné zajištění přenosu dat oproti bezdrátové technologii WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz je u sítě WiMAX v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz kratší díky začlenění do sítě WiMAX vývojově modernějších bezdrátových technologií. Experimentální měření opětovného obnovení provozu v simulované modelové síti po výpadku bezdrátové technologie WiMAX v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz prokázalo dosažení nejlepších hodnot kritických parametrů.

Grafické vyhodnocení časů náběhu WiMAX sítě v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz je znázorněno na obrázku níže – viz obr. 3.6.



Obr. 3.6: Grafické vyhodnocení časů náběhu WiMAX sítě v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz.

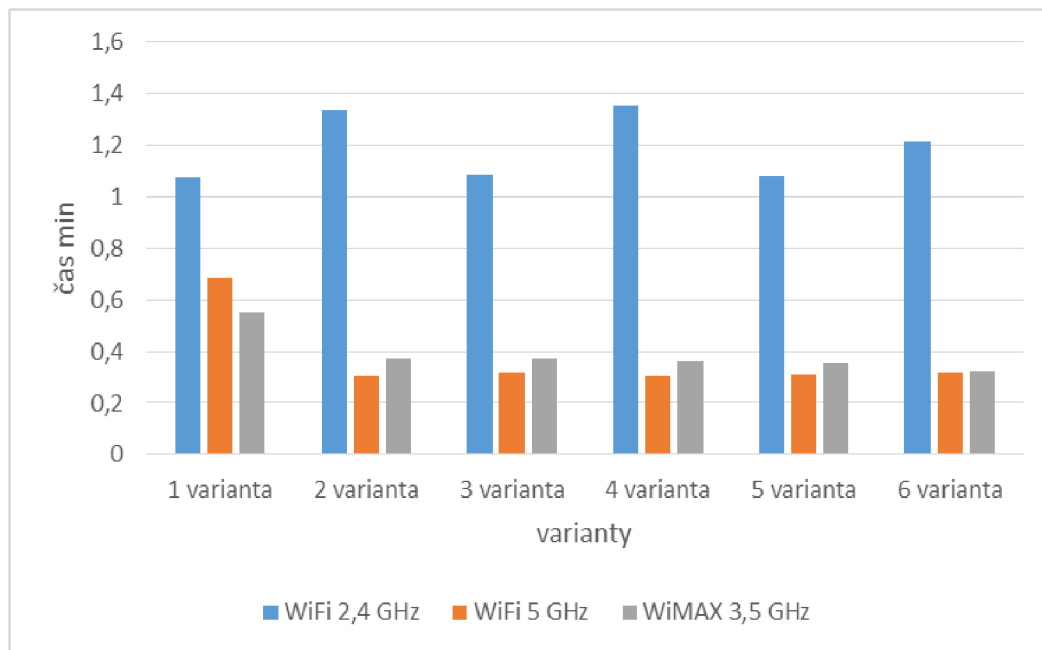
3.3.4 Vyhodnocení kvality přenosu VoIP v bezdrátové technologii WiFi 5 GHz

Při konstantních přenosech RX 32Mb/s a TX 42 Mb/s probíhaly bez problémů 3 telefonní hovory – přenos hlasu, u 4 telefonních hovorů – přenosu hlasu byly zaznamenány opakované nepravidelné výpadky telefonních hovorů – přenosu hlasu. Při 5 telefonních hovorech – přenosu hlasu bylo zaregistrováno opakované přerušování u všech telefonních hovorů – přenosu hlasu, snížená kvalita telefonních hovorů – přenosu hlasu projevující se sníženou srozumitelností či úplnou nesrozumitelností některých pasáží hovorů.

Souhrnné vyhodnocení všech výsledků experimentálních měření výzkumného šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi 2,4 GHz, 5 GHz a WiMAX 3,5 GHz je uvedeno v tabulce – viz tab. 3.21 a v grafickém znázornění – viz obr. 3.7.

Tab. 3.21: Souhrnná tabulka zprůměrovaných naměřených hodnot v jednotlivých sítích a variantách.

Síť	1 varianta	2 varianta	3 varianta	4 varianta	5 varianta	6 varianta
WiFi 2,4 GHz	1,078	1,336	1,085	1,356	1,079	1,212
WiFi 5 GHz	0,685	0,307	0,319	0,3074	0,312	0,315
WiMAX 3,5 GHz	0,551	0,373	0,375	0,36	0,358	0,324



Obr. 3.7: Grafické vyhodnocení náběhu zprůměrovaných naměřených hodnot v jednotlivých sítích a variantách.

Experimentální měření ukázala, že u moderních WiFi zařízení pracujících v pásmu 5 GHz bylo ve všech kombinacích výpadku napájecího napětí vždy navázáno spojení s následným přenosem dat.

Největší rozdíly v časech spojení jsou v prvním měření, kdy vypadávalo napájecí napětí pouze u AP, což bylo způsobeno skenováním všech povolených kanálů, tudíž záleželo na tom, v jakém stavu se AP nacházel a jak dlouho musel skenovat, než našel kanál, na němž vysílá ÚZ.

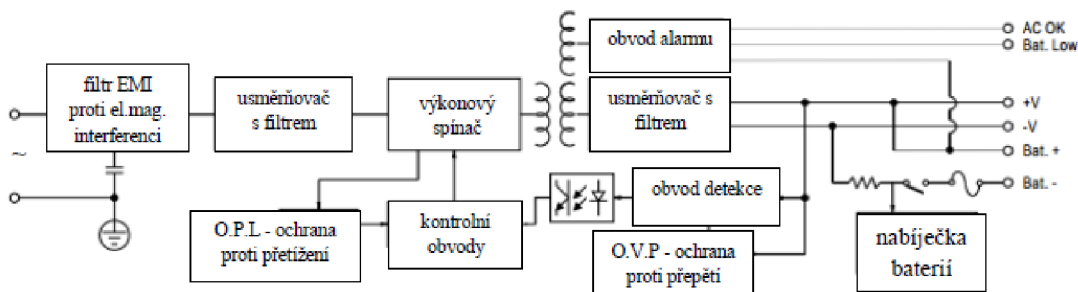
Tato měření byla v rámci simulované modelové sítě realizována za optimálních podmínek. V praxi však toto podmínkové optimum nelze kompletně garantovat, a tak se do měřicího procesu zákonitě promítají různé proměnné, jež ovlivňují podmínky měření.

3.4 Návrh ekonomicky přijatelného řešení problematiky výpadku napájecího napětí AP pro praktické využití v bezdrátových technologiích WiFi a WiMAX

Při testech bylo prokázáno, že největším problémem, tj. kritickým parametrem, pro přístupový AP je kolísavé napájecí napětí, kdy je napájecí napětí několikrát zapnuto a vypnuto. V tomto případě se AP dostane nepravidelně do nedefinovatelného stavu a je nutno provést fyzický restart. Z tohoto důvodu je nezbytné zálohovat přístupový bod.

Jako technicky nejjednodušší, ale zároveň i nejdražší, forma zálohy se jeví použití UPS (Uninterruptible Power Supply / Source) záložního zdroje pro napětí 220 V. Z tohoto důvodu se používají napájecí moduly, umožňující připojení záložních baterií podle potřebné zátěže od firmy Meanwell Power supply.

Pro zařízení, kdy je potřebné napájecí napětí od 9 V do 24 V, je navrženo a v praxi ověřeno použití modulu 60 W Single Output with Battery Charger (UPS Function) PSC-60 [55], jehož blokové schéma je k dispozici níže – viz obr. 3.8.



Obr. 3.8: Blokové schéma PSC-60.

Následující obrázek – viz obr. 3.9 – zachycuje fyzickou realizaci zdroje 12 V včetně připojení modulů PoE (Power over Ethernet), jenž umožňuje napájecí napětí koncového zařízení po datovém kabelu a záložních baterií. Z důvodu zahřívání při maximálním výkonu je zdroj chlazen ventilátorem.



Obr. 3.9: Ukázka vlastní realizace navrženého záložního zdroje – 12V s PSC-60.

Pro zařízení, kdy je potřebné napájecí napětí 48 V, je navrženo a v praxi ověřeno použití modulu 155 W Single Output with Battery Charger (UPS Function) AD-155 [56], jehož fyzická realizace je zdokumentována na obrázku níže – viz obr. 3.10.



Obr. 3.10: Ukázka vlastní realizace navrženého záložního zdroje – 48V s AD-155.

4 ZÁVĚR

Rozvoj techniky je zaznamenáván ve všech oblastech lidské činnosti. V průběhu posledního století některé technické a přírodovědné obory zaznamenaly bouřlivý rozvoj a od základu změnily předmět i celkové vlastní směřování. Jako zářný příklad lze uvést dynamický vývoj v oblasti telekomunikačních technologií. Na úplném počátku bylo relé a elektromagnetické spojovací pole v analogových telefonních ústřednách, jejichž spínací prvky byly z důvodu urychlení vytvářeného spojení posléze nahrazeny křížovými spínači. S příchodem digitální technologie byla provedena zásadní změna v oblasti přenosové techniky – ústředna se sestávala z procesoru řízení a karet pro jednotlivé typy rozhraní k připojení konkrétních komponentů. I digitální technologie byla však modifikována. V současnosti je užívána IP telefonie.

Cílem předložené disertační práce bylo prozkoumat v teoretické i praktické rovině na bázi bezdrátových sítí problematiku bezdrátových technologií WiFi v kmitočtových pásmech 2,4 GHz a 5 GHz a WiMAX v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz a jejich kritických parametrů.

V současné době je k dispozici poměrně bohatá nabídka odborné literatury v klasické i elektronické podobě, jež se soustřeďuje na problematiku předkládané disertační práce. Z tohoto důvodu byl pro potřeby práce proveden výběr základních odborných pramenů a zdrojů, na něž je práce odborně vystavena a z jehož pojetí a přístupu k problematice bezdrátových sítí a technologií WiFi a WiMAX těží.

První fáze řešení úkolu disertační práce byla zaměřena na uvedení do problematiky, tj. na teoretický výklad, účel a využití bezdrátové komunikace prostřednictvím bezdrátových technologií WiFi a WiMAX. Ve stručnosti byly popsány klíčové body vývoje přenosu dat na principu bezdrátových sítí a zároveň prokázány nejvýznamnější vývojové trendy bezdrátových technologií, tj. neustálý kvantitativní nárůst účastníků využívajících mobilní datové služby a překotný technologický rozvoj, jenž se promítá do propojování jen zdánlivě nesourodých moderních komunikačních technologií pro určitou poskytovanou službu (např. u přenosu hlasu a dat). Typickým dalším rysem současnosti je posilování mobility účastníka komunikačního procesu a vzájemné sdílení dat. Technologické inovační a aktualizací procesy se neustále zrychlují – viz např. nástup technologie DVB-T2, nebo uvedení do provozu mobilním operátorem T-Mobile do konce roku 2016 nové sítě Sigfox, jež pokryje datovým signálem Českou republiku, a zajistí tak distribuce služby M2M. Zároveň byl v disertační práci nastíněn přehled o využívání bezdrátových technologií v České republice v období 2009–2014 a byly ozřejměny parametry přenosu rádiového signálu, jež bezprostředně ovlivňují datovou propustnost. Důraz v této fázi teoretického pojednání o bezdrátových technologiích WiFi a WiMAX v rámci bezdrátových sítí byl kladen i na jejich další kritický parametr, jenž představuje úroveň zabezpečení přenášených dat.

V druhé kapitole předkládané práce je pozornost soustředěna nejprve na problematiku standardu IEEE 802.11 pro bezdrátovou technologii WiFi a jeho následné varianty jako např. IEEE 802.11g či IEEE 802.11n. Poté se tato kapitola zabývá tematikou v České republice závazného všeobecného oprávnění VO-R/12/09.2010-12

a podrobněji se věnuje konkrétním případům jeho porušování v praxi, a to porušení celkově vyzářeného výkonu EIRP, neoprávněnému užívání kmitočtů v rozporu s VO-R/12/09.2010-12 a záměrnému rušení provozu bezdrátové technologie WiFi prostřednictvím zasilání deautentizačních paketů. Krátce je přiblížena funkce ČTÚ ve vztahu k dodržování platné legislativy a závazných norem formou monitoringu v oblasti rozdělení kmitočtového spektra v České republice.

Stěžejní, v pořadí třetí, kapitola disertační práce se zabývá výzkumným šetřením k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX. V rámci metodiky výzkumného šetření byly zvoleny výzkumné metody, a to simulace a modelace bezdrátové sítě pro bezdrátovou technologii WiFi v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz a 5 GHz a pro bezdrátovou technologii WiMAX v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz a experimentální posouzení kvality přenosu VoIP v bezdrátové technologii WiFi 5 GHz a postup pro realizaci jednotlivých experimentálních měření a jejich metodika.

V první podkapitole jsou nejprve přehledně zobrazeny výsledky experimentálního měření výpadků bezdrátové technologie WiFi v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz, jež byly zaznamenány do přehledových tabulek, posléze jsou měření získaná data podrobena obsahové analýze a poté byly porovnány jednotlivé varianty měření. Celkově bylo postupně provedeno 6 sérií variantního měření s četností 10 pokusů pro každou variantu. Z důvodu užití dnes již technicky zastaralého koncepčního řešení tohoto typu přenosu dat dochází i bez ohledu na „stáří“ konkrétních produktů plnicích funkci AP a ÚZ k obnově činnosti obou zařízení po výpadku napájecího napětí ve srovnání s modernější koncepcí přenosu dat prostřednictvím bezdrátové technologie WiMAX v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz. Kromě toho kvalita poskytovaných služeb pomocí WiFi bezdrátové technologie v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz, jež je zasažena výpadkem napájecího napětí, je ovlivňována parametry vzdálenost mezi AP a ÚZ a výskytem či absencí fyzických překážek.

Opakovanými sériemi měřicích pokusů bylo prokázáno, že časový interval pro opětovné uvedení do provozu po přerušení napájecího napětí zařízení AP a ÚZ a pro obnovení vzájemné komunikace mezi AP a ÚZ se pohybuje v rozmezí 1,04 min až 1,39 min. Analýza získaných dat a vyhodnocení měření potřebného časového intervalu do zpětného uvedení AP a ÚZ do provozu po výpadku napájecího napětí v modelové bezdrátové síti prokázaly, že pozitivum tohoto typu realizace bezdrátové sítě technologií WiFi v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz spočívá v jeho prokázané spolehlivosti. Touto spolehlivostí je rozuměna skutečnost, že ve všech 6 variantách s četností 10 měřicích pokusů byla obnovena komunikace, tj. přenos dat mezi AP a ÚZ byl opětovně navozen. Za negativum je zapotřebí označit velikost časového intervalu potřebného pro opětovné obnovení komunikace mezi AP a ÚZ. Experimentální šetření jasně prokázalo nejvyšší hodnoty u tohoto sledovaného kritického parametru – potřebného časového intervalu na opětovné uvedení do provozu bezdrátové technologie WiFi v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz v důsledku obnovení napájecího napětí obou zařízení.

Měřicí pokusy 6 variantních situací po přerušení napájecího napětí zařízení AP a ÚZ v modelové bezdrátové síti technologie WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz potvrdily, že časový interval pro opětovné uvedení do provozu po přerušení napájecího napětí zařízení AP a ÚZ a pro obnovení vzájemné komunikace mezi AP a ÚZ se pohybuje v rozmezí 0,28 min až 1,27 min. Analýzou získaných dat a vyhodnocením

měření potřebného časového intervalu do zpětného uvedení AP a ÚZ do provozu po výpadku napájecího napětí v modelové bezdrátové síti bylo zjištěno, že za výhodu této koncepce přenosu dat pomocí bezdrátové technologie WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz je třeba považovat kratší časový interval na její obnovu činnosti po výpadku napájecího napětí u obou zařízení AP a ÚZ ve srovnání s výsledky získanými měřeními v modelové bezdrátové síti WiFi v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz. Příčinou poměrně velkého rozptylu v naměřených časech, potřebných pro opětovné uvedení do provozuschopného stavu zařízení AP a ÚZ, je automatické skenování všech povolených kanálů přístupovým bodem a vyhledávání frekvence, na níž vysílá ÚZ. Tuto naměřenou hodnotu zkresluje navíc stav AP a jeho momentální poloha, z jejíž úrovně zahájí AP skenování.

Vyhodnocením výsledků experimentálních měření 6 variant s četností 10 pokusů bylo doloženo, že u přenosu dat v modelové síti prostřednictvím bezdrátové technologie WiMAX v kmitočtovém pásmu 3,5 GHz nebyl doložen žádný negativní projev v rámci kritických parametrů, tj. v datové propustnosti a v bezpečnosti přenášených dat. Ve srovnání s výsledky měření opětovného uvedení do provozu po výpadku napájecího napětí u AP a ÚZ v různých vzájemných sledech v modelové síti u bezdrátové technologie WiFi v kmitočtovém pásmu 2,4 GHz i u bezdrátové technologie WiFi 5 GHz byl potřebný časový interval na znovu uvedení AP a ÚZ do provozu na nejnižších hodnotách, tj. od 0,32 min do 0,76 min. Bezdrátová technologie WiMAX se od obou testovaných typů bezdrátové technologie WiFi liší technickým řešením a celkovou koncepcí, tj. u technologie WiMAX není realizováno skenovací vyhledávací proces, nýbrž je pevně nastavena na individuálně přidělený kmitočet. Za nespornou výhodu tohoto systémového řešení přenosu dat bezdrátovou technologií WiMAX je třeba uvést, že technologie je už svou podstatou prosta možnosti rušení na kmitočtu, v němž vysílá. A nelze opomenout ani skutečnost, že přidělenému kmitočtu je poskytována stálá ochrana i ze strany ČTÚ. Jistou nevýhodou bezdrátové technologie WiMAX vysílající v přiděleném kmitočtu v rámci kmitočtového pásma 3,5 GHz představuje skutečnost, že je poskytnutí těchto přidělených kmitočtů ze strany ČTÚ zpoplatněno.

Realizace výzkumného šetření k problematice přenosu dat bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX pomocí modelace a simulace, opakované provedení měřicích pokusů na modelové síti, analýza dat získaných těmito experimentálními měřeními, komplexní vyhodnocení naměřených hodnot a jejich následné porovnání prokázaly, že bezdrátová technologie WiMAX z hlediska kritických parametrů vykazuje nejlepší dosažené výsledky v oblasti měřeními prokázané časové prodlevy, potřebné po přerušení napájecího napětí mezi AP a ÚZ k obnovení komunikace mezi AP a ÚZ.

V posledních oddílech příslušných podkapitol byl podroben testování přenosu hlasu pomocí VoIP v bezdrátové technologii WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz. V rámci ověřování kvality realizovaných přenosů hlasu byla posuzována srozumitelnost, částečná či úplná nesrozumitelnost hovorů či některých jejich pasáží. Při této zkoušce kvality telefonních hovorů byla vypojena služba QoS. Následně byl simulován v modelové síti datový provoz o velikosti RX 32Mb/s a TX 42 Mb/s, posléze bylo přistoupeno k vytváření telefonních hovorů pomocí bezdrátové sítě WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz a zároveň probíhalo testování kvality přenosu hlasu poslechem. Počet realizovaných telefonních hovorů byl postupně navyšován až do

situace, kdy se negativně při poslechu začalo projevovat snížení jejich kvality, to znamená, že došlo k částečnému snížení srozumitelnosti či k celkovému zamezení srozumitelnosti u některých pasáží probíhajících hovorů. Testování poslechem prokázalo, že snížená kvalita telefonních hovorů byla manifestována u 4 souběžných telefonních hovorů, při 5 uskutečněných telefonních hovorech bylo poslechem zaznamenáno opakované přerušování u všech telefonních hovorů a snížená kvalita hovoru, vedoucí k částečné či úplné nesrozumitelnosti sdělení.

Tímto posledním výzkumným šetřením v řadě experimentálních měření byla u bezdrátových zařízení bez služby QoS potvrzena přímá závislost velikosti přenosu dat v modelové bezdrátové síti pomocí technologie WiFi v kmitočtovém pásmu 5 GHz na četnosti a kvalitě uskutečněných telefonních hovorů.

Souhrnné vyhodnocení výsledků všech těchto experimentálních měření bylo obdobně jako jednotlivá dílčí shrnutí zpracováno do přehledných tabulek a grafických znázornění, zároveň byl podán kritický rozbor výsledků.

V poslední podkapitole práce byl vypracován návrh, jak snížit nežádoucí projevy kritických parametrů při přenosu dat v modelové síti bezdrátovými technologiemi WiFi a WiMAX. Jako konkrétní a ekonomicky vhodné řešení minimalizace provozně nepříznivých následků výpadků AP a ÚZ pro provoz bezdrátové sítě a současně jako plně vyhovující způsob zajištění potřebného napájecího napětí pro technologii WiFi byl navržen jednoduchý a cenově dostupný záložní zdroj.

Konkrétní technické řešení záložního zdroje bylo navrženo se zvláštním zřetelem k dostupnosti jednotlivých potřebných komponentů a k jejich nízké cenové hladině a při plném dodržení podmínky zachování výkonové variability a možnosti volby časového intervalu pro zálohování bezdrátových zařízení. Tento návrh záložního zdroje byl následně zkonstruován a poté bylo provedeno jeho testování. Za účelem verifikace navrženého postupu bylo realizováno ověření funkčnosti sestaveného zdroje v provozu modelové bezdrátové sítě a, jinými slovy, byla tak testována plná funkčnost zdroje i vhodnost řešení navrženého opatření.

Nabyté souhrnné výsledky experimentálního měření, vyvozené závěry z realizovaného výzkumného šetření, návrh a sestavení záložního zdroje i průběh jeho testování v provozu modelové bezdrátové sítě prokazatelně potvrdily vhodnost navrženého řešení.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ADSL	Asymmetric digital subscriber line
AES	Advanced Encryption Standard
AP	Access Point
AP router	Access Point router
b	útlum kabelu
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSS	Basic Service Set
CATV-UPC	Cable television / United Pan-Europe Communications
CEPT	Conférence européenne des administrations des postes et des télécommunications / European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CCK	Complementary Code Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
CSD	Circuit Switched Data
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
d	vzdálenost mezi anténou vysílací a přijímací
d ₁ , d ₂	vzdálenost překážky mezi vysílačem a přijímačem
dB	decibel
dBi	decibel izotropní
dBm	decibel na miliwatt
dBW	decibel na watt
DVB-T2	Digital Video Broadcasting Terrestrial 2
DES3	Triple Data Encryption Standard
DFS	Dynamic Frequency Selection

DSS	Distribution System Service
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
E	intenzita elektrického pole
EAP	Extensible Authentication Protocol
ECC	Electronic Communications Committee
ECC/DEC	Electronic Communications Committee / Decision
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
EIRP	equivalent isotropically radiated power
F_n	poloměr n-té Fresnelově zóny v konkrétní vzdálenosti
EK	elektronické komunikace
FBWA	Fixed Broadband Wireless Access
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FOP	fyzická osoba podnikající
FWA	Fixed Wireless Access
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FTTx	Fiber to the x
G	zisk
Gb/s	gigabit/sekunda / Gigabyte per second
GHz	Gigahertz
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Groupe Spécial Mobile / Global System for Mobile Communications
GSM2+	Global System for Mobile Communications 2+
HP	Hewlett-Packard
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ISO/OSI	International Organization for Standardization / Open System Interconnection
ITU	International Telecommunication Union
ITU IMT 2000	International Telecommunication Union International Mobile Telecommunications 2000
L	ztráta vlivem překážky
L ₀	ztráta způsobená průchodem atmosférou
LAN	Local Area Network
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
m	metr
MB	měřicí bod
MB1	měřicí bod 1
MB2	měřicí bod 2
MAC	Media Access Control
Mb/s	megabit/sekunda / Megabyte per second
MHz	Megahertz
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MIC	Message Integrity Check
MNMS out	mobilní neobsluhovaná monitorovací stanice
MOMS	mobilní obsluhovaná monitorovací stanice
min	minuta
ms	minisekunda
MU-MIMO	Multi-user MIMO
mW	miliwatt
M2M	Machine-to-Machine

n	ntý řád Fresnelově zóny
NLOS	Non Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Open System Interconnection
P	naměřený výkon signálu
P_1	výkon vysílače
P_2	výkon v požadovaném místě za překážkou
PC	Personal Computer
PO	právnícká osoba
PoE	Power over Ethernet
QoS	Quality of Service
r	vzdálenost
R&S	Rohde & Schwarz
RLAN	Radio Local Area Network
RT/CTS	Request to Send / Clear to Send
S_{EIRP}	špičková spektrální hustota výkonu
SNMS	stacionární neobsluhovaná monitorovací stanice
SOMS	stacionární obsluhovaná monitorovací stanice
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SSID	Service Set Identifier
TDMA	Time Division Multiple Access
TKIP	Temporary Key Integrity Protocol
TTP	Technický plán přechodu
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UMTS/LTE	Universal Mobile Telecommunication System / Long Term Evolution
UPS	Uninterruptible Power Supply / Source

USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra Wideband
ÚZ	účastnické zařízení
VDSL	Very-high-bit-rate digital subscriber line
VO	Všeobecné oprávnění
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLTE	Voice over LTE
VRZ	vysílací rádiové zařízení
VTA	veřejný telefonní automat
W	Watt
WAN	Wide Area Network
WEP	Wired Equivalent Privacy
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Networks
WLL	Wireless Local Loop
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WMN	Wireless Mesh Network
WPA	WiFi Protected Access
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WWAN	Wireless Wide Area Networks
xDSL	Digital Subscriber Line
ZTP	zdravotní a tělesné postižení
1xEV-DO	1x Evolution-Data Optimized
3G	third generation / třetí generace
4G	fourth generation / čtvrtá generace
5G	5th generation / pátá generace

16-QAM	16-Quadrature Amplitude Modulation
64-QAM	64-Quadrature Amplitude Modulation
256-QAM	256-Quadrature Amplitude Modulation
λ	vlnová délka

LITERATURA

- [1] AGGELOU, George. *Wireless Mesh Networking – with 802.16 and ZigBEE*. New York: McGraw-Hill Professional, 2009. ISBN 0-07-159428-0.
- [2] AKYILDIZ, Ian F. a Xudong WANG. A Survey on Wireless Mesh Networks. *IEEE Radio Communications (Communications Magazine)*, September 2005, pp. 523–30.
- [3] ALAKRISHNAN, Jaiganesh a Anand DABAK. A Multi-Band OFDM System for UWB Communication. *Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003 IEEE Conference on*, 16–19 Nov. 2003, pp.354–358. ISBN 0-7803-8187-4.
- [4] BARCO. *Bezdrátové WiFi sítě s multiservisní podporou* [online]. © 2010 [cit. 4. dubna 2011]. Dostupné z: <http://wireless.barco.cz/?id=reseni&sel=2>
- [5] BARKEN, Lee. *Wi-Fi: jak zabezpečit bezdrátovou síť*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0346-3.
- [6] BITTO, Ondřej. *333 tipů a triků pro notebook*. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-3231-9.
- [7] BLACK, Uyless. *Computer Networks Protocol Standards and Interface*. New Jersey: Prentice-Hall, 1999. ISBN 0-13-090861-4.
- [8] BOISSEAU, Marc, DEMANDE, Michel a Jean-Marie MUNIER. *High Speed Networks*. West Sussex (England, UK): John Wiley & Sons Ltd., 1994. ISBN 0-471-95109-9.
- [9] BOULMALF, Mohammed, SOBH, Amine a Shakil AKHTAR. Physical Layer Performance of 802.11g WLAN. *Proceedings of the Applied Telecommunication Symposium 2004*, 2004, pp. 175–178. ISBN 1-56555-276-8.
- [10] BOUŠKA, Petr. *OSI model. Samuraj-cz*. [online]. 5. března 2007 [cit. 5. listopadu 2012]. Dostupné z: <http://www.samuraj-cz.com/clanek/osi-model/>
- [11] BRISBIN, Shelly. *Wi-Fi: postavte si svou vlastní wi-fi síť*. Praha: Neokortex, 2003. ISBN 80-86330-13-3.
- [12] CARROLL, Brandon. *Bezdrátové sítě Cisco: autorizovaný výukový průvodce*. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-2884-8.
- [13] COMTEL. *Velmi stručný a řadu důležitých věcí zcela opomíjející úvod do problematiky bezdrátových sítí dle standardu IEEE 802.11* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechniky, 2000 [cit. 12. září 2011]. Dostupné z: <http://www.comtel.cz/files/download.php?id=1738>

- [14] COOKLEV, Todor. *Wireless Communication Standards: A Study of IEEE 802.11, 802.15, 802.16*. New York: Standards Information Network / IEEE Press, 2004. ISBN 073814066X.
- [15] ČAPEK, Jan. *Rádiové spojení IZS v tunelech, podzemních garážích a obdobných prostorech* [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3505-1. Dostupné také z: http://fbiweb.vsb.cz/safeteach/images/pdf/Materialy/Radiove_spojzeni_IZS_v_tunelech_podzemnich_garazich_a_obdobnych_prostorech.pdf
- [16] ČSN EN 55020 ed. 2 (334288) *N Rozhlasové a televizní přijímače a přidružená zařízení – Charakteristiky odolnosti – Meze a metody měření = Sound and television broadcast receivers and associated equipment – Immunity characteristics – Limits and methods of measurement*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [17] ČTÚ. *Statut Českého telekomunikačního úřadu* [online]. Praha: ČTÚ, 2005 [cit. 15. března 2012]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/1/download/Statut_CTU/statut_ctu.pdf
- [18] ČTÚ. *Dodatek č. 7/2010 ke Statutu českého telekomunikačního úřadu* [online]. Praha: ČTÚ, 2010 [cit. 15. března 2012]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/statut_ctu/statut_ctu_d7.pdf
- [19] ČTÚ. *Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/21/11.2013-6 pro kmitočtové pásmo 174–380 MHz* [online]. Praha: ČTÚ, 2013 [cit. 12. listopadu 2014]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/plan-vyuziti-radioveho-spektra/rok_2013/pv-p_21-11_2013-06.pdf
- [20] ČTÚ. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz* [online]. Praha: ČTÚ, 29. září 2010 [cit. 7. listopadu 2012]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/ooop/rok_2010/vo-r_12-09_2010-12.pdf
- [21] ČTÚ. *Zpráva o vývoji trhu elektronických komunikací se zaměřením na rok 2010* [online]. Praha: ČTÚ, září 2011 [cit. 4. května 2015]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/statisticke_udaje/rok_2011/zprava_vyvoj_trhu_ek_2010.pdf
- [22] ČTÚ. *Výroční zpráva českého telekomunikačního úřadu za rok 2014* [online]. Praha: ČTÚ, duben 2015 [cit. 30. srpna 2015]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/vyrocnizpravy/vyrocnizprava_ctu_2014.pdf
- [23] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD, V. *Moderní radiotechnika*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [24] DOBKIN, Daniel Mark. *RF Engineering for Wireless Networks: hardware, antennas, and propagation* [online]. Communications engineering series. Amsterdam: Elsevier/Newnes, ©2005 [cit. 29. května 2015]. Dostupné z: <http://site.ebrary.com/lib/natl/Doc?id=10167028>

- [25] FILKA, Miloslav a Milan Grenar. The most frequent shortcomings of WiFi operators. *Przegląd Elektrotechniczny*, roč. 2015, č. 6, s. 129–133. ISSN 0033-2097.
- [26] FETCHEL, Stefan A. Novel Approach to Modeling and Ecient Simulation of Frequency-Selective Fading Radio Channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Volume 11, No. 3, April 1993, pp. 422–431.
- [27] GLEISSNER, František, HANUS, Stanislav a Jan MIKULKA. Optimalization of Interference in Mobile Network. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*, ročník 4, č. 2, 2005, s. 180–185. ISSN 1109-2742.
- [28] GREAR, Milan. Nejčastější chyby provozovatelů WiFi. *Elektrorevue – Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2012, roč. 2012, č. 59, s. 1–6. ISSN 1213-1539.
- [29] HANUS, Stanislav a Jan MIKULKA. Coexistence of Bluetooth and WLAN Systems. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*, ročník 3, č. 4, 2004, s. 972–975. ISSN 1109-2742.
- [30] HANZO, Lajos L., MÜNSTER, Alfred M. a Byungcho J. CHOI. *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications*. Wiley-IEEE Press, 2003. ISBN 0470858796.
- [31] LEHNE, Per Hjalmar a Frode BOHAGEN. *OFDM(A) for Wireless Communication* [online]. Telenor R&I Research Report R 7/2008. ISSN 1500-2616.
- [32] HORÁK, Jaroslav. *Vytváříme domácí bezdrátovou síť*. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-2977-7.
- [33] HRÁČEK, Jiří. IEE 802.11n – *Zrychlete a rozšiřte svou bezdrátovou síť* [online]. INTELEK spol. s r. o., 3. února 2009 [cit. 14. dubna 2012]. Dostupné z: <http://www.intelek.cz/art_doc-5C56A0147621A13AC12575510053AE3E.html>
- [34] CHEN, Hsiao-Hwa a Mohsen GUIZANI. *Next Generation Wireless Systems and Networks*. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- [35] CHEN, Ling-Jyh, SUN, Tony a Yung-Chih CHEN. Improving Bluetooth EDR Data Throughput Using FEC and Interleaving. *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, Volume 4325/2006, Springer Berlin / Heidelberg, 2006, pp. 724–735. ISSN 0302-9743.
- [36] IEEE. *IEEE standard Association* [online]. www.ieee.org, 2009 [cit. 28. dubna 2012]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/about/index.html>

- [37] IEEE 802.11. *IEEE standard Association IEEE 802.11* [online]. www.ieee.org, 2012 [cit. 28. dubna 2012]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>
- [38] IEEE 802.11a. *IEEE standard Association IEEE 802.11a* [online]. www.ieee.org, 1999 [cit. 14. října 2014]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11a-1999.pdf>
- [39] IEEE 802.11b. *IEEE standard Association IEEE 802.11b* [online]. www.ieee.org, 1999 [cit. 28. dubna 2012]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11b-1999.pdf>
- [40] IEEE 802.11g. *IEEE standard Association IEEE 802.11g* [online]. www.ieee.org, 2003 [cit. 21. května 2011]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11g-2003.pdf>
- [41] IEEE 802.11n. *IEEE standard Association IEEE 802.11n* [online]. www.ieee.org, 2009 [cit. 28. dubna 2012]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009.pdf>
- [42] IEEE 802.11ac. *IEEE standard Association IEEE 802.11ac* [online]. www.ieee.org, 2013 [cit. 28. června 2015]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2013.pdf>
- [43] IEEE 802.16. *IEEE standard Association IEEE 802.16* [online]. www.ieee.org, 2012 [cit. 3. května 2014]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2012.pdf>
- [44] IEEE 802.16e. *IEEE standard Association IEEE 802.16e* [online]. www.ieee.org, 2005 [cit. 13. března 2014]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16e-2005.pdf>
- [45] I4WIFI A.S. *Jak na instalaci WLAN* [online]. www.i4wifi a.s., © 2012 [cit. 29. května 2013]. Dostupné z: <http://www.i4wifi.cz/LAN/> <http://www.i4wifi.cz/>
- [46] JANEČEK, Jan a Martin BÍLÝ. *Lokální síť*. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04014-0.
- [47] JOHANSSON, Per, KAPOOR, Rohit a Manthos KAZANTZIDIS. Personal Area Networks: Bluetooth or IEEE 802.11. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2002 – April, Netherlands, Volume 9, No. 2, pp. 89–103.
- [48] KLEMENT, Milan. *Bezdrátové sítě ve vzdělávání: elektronická studijní opora pro kurz distančního vzdělávání* [CD-ROM]. Olomouc: Univerzita Palackého, 2011. ISBN 978-80-244-2797-3.
- [49] KÖHRE, Thomas. *Stavíme si bezdrátovou síť Wi-fi*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0391-9.

- [50] LÁTAL, Jan et al. Simulace a plánování vnitřního pokrytí budov dle standardu IEEE 802.11 v prostředí softwarové aplikace I-Prop – 1. část. *Elektrorevue*, roč. 2011, svazek 13, č. 4, s.1–13. ISSN: 1213-1539.
- [51] LÁTAL, Jan et al. Simulace a plánování vnitřního pokrytí budov dle standardu IEEE 802.11 v prostředí softwarové aplikace I-Prop – 2. část. *Elektrorevue*, roč. 2011, svazek 13, č. 5, s.1–10. ISSN: 1213-1539.
- [52] LEE, Byeong Gi a Sunghyun CHOI. *Broadband Wireless Access and Local Networks: Mobile WiMAX and WiFi*. Norwood (MA): Artech House, Inc., 2008. ISBN 978-1-59693-293-7.
- [53] LOUDA, Pavel. WiFi Calling dovolí telefonovat pře s Wi-Fi kdekoliv [online]. *COMPUPTERWORLD. Deník pro IT profesionály*. 5. února 2015 [cit. 13. dubna 2015]. Dostupné z: <http://computerworld.cz/aktuality/wifi-calling-dovoli-telefonovat-pres-wi-fi-kdekoliv-51763>
- [54] McCARTHY, Linda ed. a Denise WELDON-SIVIY. *Bud' pánem svého prostoru: jak chránit sebe a své věci, když jste online*. Praha: CZ.NIC, 2013. ISBN 978-80-904248-6-9.
- [55] MEANWELL. PSC-60 – Meanwell. *Meanwell.com* [online]. 2011 [cit. 29. května 2012]. Dostupné z: <http://www.meanwell.com/search/psc-60/default.htm>
- [56] MEANWELL. AD-155 datasheet Meanwell. *Meanwell.com* [online]. 2011 [cit. 29. května 2012]. Dostupné z: <http://www.meanwell.com/search/ad-155/default.htm>
- [57] MICHALEK, Libor a Roman ŠEBESTA. *Rádiové sítě II pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [DVD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3559-4.
- [58] MIKULKA, Jan a Stanislav HANUS. CCK and Barker Coding implementation in IEEE 802.11b standard. *Proceedings of the 17th International Conference RADIO-ELEKTRONIKA 2007*, ročník 1, 2007, s. 177–180. ISBN 1-4244-0821-0.
- [59] MIKULKA, Jan a Stanislav HANUS. Complementary Code Keying Implementation in the Wireless Networking. *Proceedings of the 14th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, IWSSIP 2007 and 6th EURASIP Conference Focused on Speech and Image Processing, Multimedia Communications and Services EC-SIPMCS 2007*, Volume 1, 2007, pp. 329–333. ISBN 978-961-248-029-5.
- [60] MIKULKA, Jan a Stanislav HANUS. IEEE 802.11g Baseband Physical Layer Simulation. *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on APPLIED ELECTROMAGNETICS, WIRELESS and OPTICAL COMMUNICATIONS (ELECTROSCIENCE '07)*, Volume 1, 2007, pp. 361–364.

- [61] MOLISH, Andreas F. *Wireless Communications*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd. (Wiley-IEEE Press) 2011. ISBN 47084888X.
- [62] MORROW, Robert. *Wireless Network Coexistence*. HPB-Seattle (Seattle, WA): McGraw-Hill Professional, 2004. ISBN 0071399151.
- [63] MVČR. *Sbírka zákonů č. 105/2010. Vyhláška o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka)* [online]. Sbírka zákonů, Česká republika, částka 38, ročník 2010, 19. dubna 2010 [cit. 11. listopadu 2013]. Dostupné z: www.mvcr.cz/soubor/sb038-10-pdf.aspx
- [64] ODVÁRKA, Petr. *Síťové a vyšší vrstvy referenčního modelu ISO OSI* [online]. www.svetsiti.cz, ©2000–2014 [cit. 8. prosince 2014]. Dostupné z: <http://www.svetsiti.cz/view.asp?rubrika=Tutorialy&temaID=1&clanekID=18>
- [65] OHRTMAN, FRANK. *WiMAX Handbook*. New York: McGraw-Hill Companies, 2005. ISBN 0-07-145401-2.
- [66] PECHAČ, Pavel. *Šíření vln v zástavbě – modely pro plánování mobilních radiových systémů*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-186-1.
- [67] PETERKA, Jiří. Vyznáte se ve standardech [online]? *Earchiv článků a přednášek Jiřího Peterky*, www.earchiv.cz, 2002 [cit. 4. dubna 2012]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/b02/b0900014.php3>
- [68] PETERKA, Jiří. WLAN, Wi-Fi, hotspots a community network [online]. *Earchiv článků a přednášek Jiřího Peterky*, www.earchiv.cz, 2002 [cit. 4. dubna 2012]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/b02/b0900011.php3>
- [69] PETERKA, Jiří. Jak probíhají bezdrátové přenosy v sítích WLAN? [online]. *Earchiv článků a přednášek Jiřího Peterky*, www.earchiv.cz, 2002 [cit. 4. dubna 2012]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/b02/b0900016.php3>
- [70] PETERKA, Jiří. Síťový model TCP / IP [online]. *Earchiv článků a přednášek Jiřího Peterky*, www.earchiv.cz, 1992 [cit. 7. května 2011]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a92/a231c110.php3>
- [71] PETERKA, Jiří. Referenční model ISO/OSI [online]. *Earchiv článků a přednášek Jiřího Peterky*, www.earchiv.cz, 1999 [cit. 23. dubna 2012]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/anovinky/ai1552.php3>
- [72] PETROVIČ, Michal a Martin ŠIMEK. *Bezdrátové sítě*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0225-0.
- [73] PUŽMANOVÁ, Rita. *Širokopásmový Internet: přístupové a domácí sítě*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0139-8.
- [74] PUŽMANOVÁ, Rita. *Bezpečnost bezdrátové komunikace: jak zabezpečit Wi-Fi, Bluetooth, GPRS či 3G*. Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0791-4.

- [75] PUŽMANOVÁ, Rita. *Moderní komunikační sítě od A do Z: technologie pro datovou, hlasovou i multimediální komunikaci*. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 80-251-1278-0.
- [76] PUŽMANOVÁ, Rita. *TCP/IP v kostce*. České Budějovice: Kopp, 2009. ISBN 978-80-7232-388-3.
- [77] RADAR4CTU. *Vizualizace nefiltrovaných radarových dat (RLAN) sítě CZRAD*. 2015 [cit. 4. května 2015]. Dostupné z: <http://radar4ctu.bourky.cz/>
- [78] RAIDA, Zbyněk et al. *Advanced radio communication systems and their components: lectures*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4173-6.
- [79] RICHTR, Tomáš. IEE 802.11 [online]. *Technologie pro mobilní komunikaci*. tomas.richtr.cz [cit. 5. dubna 2014]. Dostupné z: <http://tomas.richtr.cz/mobil/ieee802.htm>
- [80] RICHARDSON, Michael a Patrick RYAN. WiMAX: Opportunity or Hype? [online] *Proceedings of the Fourth Annual ITERA Conference*, ITERA 2006.
- [81] ROHDE&SCHWARZ. *Wireless Communications Standards* [online]. 2009 [cit. 24. dubna 2011]. Dostupný z: <http://www2.rohdeschwarz.com/en/technologies/?view=downloads&downloadtype=69>
- [82] ROHDE&SCHWARZ. Rohde&Schwarz [online]. *Rohde&Schwarz* [cit. 3. dubna 2012]. Dostupné z: <http://www.rohde-schwarz.com>
- [83] RUKOVANSKÝ, Imrich, KRATOCHVÍL, Oldřich a Jaroslav KAVKA. *Computer networks*. Kunovice: Evropský polytechnický institut, 2009. ISBN 978-80-7314-175-2.
- [84] ŘEHÁK, Jan. *Co to je Wi-Fi – úvod do technologie* [online]. www.hw.cz, 21. 6. 2003 [cit. 10. září 2011]. Dostupné z: http://hw.cz/ethernet/wifi/wifi_co_to_je.html
- [85] SITE.EBRARY. *Wireless communications systems and networks* [online]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers. Information technology – transmission, processing, and storage, ©2004 [cit. 20. dubna 2015]. Dostupné z: <http://site.ebrary.com/lib/natl/Doc?id=10115206>
- [86] STALLINGS, William. *Networking Standards – a Guide to OSI, LAN, and Man Standards*. Inc. Boston, MA, US, Addison-Wesley: Longman Publishing Co., 1993. ISBN 0-201-56357-6.
- [87] SIWIAK, Kazimierz. *Ultra-Wide Band Radio: A New PAN and Positioning Technology*. IEE Vehicular Technology, February 2002, pp. 4–9.

- [88] SLOMAN, Morris. *Network and Distributed Systems Management*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. 1994. ISBN 0-201-62745-0.
- [89] ŠEBESTA, Roman a Marek DVORSKÝ. *Rádiové sítě I pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [DVD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3612-6.
- [90] ŠPÍNA, Michal. *Ruseni meteorologických radiolokatoru CZRAD* [online]. 30. 3. 2015 [cit. 4. května 2015]. Dostupné z: <https://plus.google.com/wm/www.gif.ly-sucks-off-sam-breed/+Michal%C5%A0p%C3%ADna/posts/2jCNzg2ccCY>
- [91] TANENBAUM, Andrew S. *Sieci komputerowe*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1988.
- [92] VAVREČKOVÁ, Šárka. *Počítačové sítě a decentralizované systémy* [online]. Opava: Slezská univerzita v Opavě, 4. června 2015 [30. srpna 2015]. Dostupné z: http://vavreckova.zam.slu.cz/obsahy/site/site_dec.pdf
- [93] VOZŇÁK, Miroslav. *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics: proceedings of the 11th international conference : KTTO 2011 : June 22–24, 2011, Szczyrk, Poland*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2399-7.
- [94] WALKE, Bernhard H., MANGOLD, Stefan a Lars BERLEMANN. *IEE 802 Wireless Systems: Protocols, Multi-hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence*. West Sussex, England, UK: John Wiley & Sons Ltd. (Wiley-IEEE Press), 2006. ISBN 978-0-470-01439-4.
- [95] WEI, Hung-Yu. *WiFi, WiMAX and LTE multi-hop mesh networks basic communication protocols and application areas* [online]. Wiley Series on Information and Communications Technology, Hoboken, N.J.: Wiley, ©2013 [cit. 8. září 2014]. Dostupné z [www](http://www.wiley.com): <http://site.ebrary.com/lib/natl/Doc?id=10674796>
- [96] WEI, Hung-Yu, RYKOWSKI, Jarogniew a Sudhir DIXIT. *WiFi, WiMAX and LTE Multi-hop Mesh Networks: Basic Communication Protocols and Application Areas* (Information and Communication Technology Series) [online]. Hoboken, N. J.: Wiley, 2013. Wiley Series on Information and Communications Technology [cit. 10. ledna 2015]. Dostupné z: <http://site.ebrary.com/lib/natl/Doc?id=10674796>
- [97] Wi-Fi. *Wi-Fi Alliance: Discover and Learn* [online]. wi-fi.org, ©2010 [cit. 29. května 2012]. Dostupné z: http://www.wi-fi.org/discover_and_learn.php
- [98] WINKLER, Peter. *Velký počítačový lexikon: co je co ve světě počítačů*. Brno: Computer Press, 2009. ISBN 978-80-251-2331-7.
- [99] ZANDL, Patrick. *Bezdrátové sítě WiFi: praktický průvodce*. Brno: Computer Press, 2003. ISBN 80-7226-632-2.
- [100] ZEŽULKA, František a Ondřej HYNČICA. Průmyslový Ethernet I: Historický úvod. *Automa*, 2007, roč. 13, č. 1, s. 41–43. ISSN: 1210-9592.

- [101] ZEZULKA, František a Ondřej HYNČICA. Průmyslový Ethernet II: Referenční model ISO/ OSI. *Automa*, 2007, roč. 13, č. 3, s. 86–90. ISSN: 1210-9592.
- [102] ZEZULKA, František a Ondřej HYNČICA. Průmyslový Ethernet VIII: Ethernet, Powerlink, Profinet. *Automa*, 2008, roč. 14, č. 5, s. 62–66. ISSN: 1210-9592.
- [103] ZVÁNOVEC, Stanislav. *Diversity techniques in free space optical networks = Diverzitní techniky v bezdrátových optických sítích*. Praha: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 978-80-01-05427-7.

VYBRANÁ ODBORNÁ PUBLIKAČNÍ A PŘEDNÁŠKOVÁ ČINNOST AUTORA V PRŮBĚHU DOKTORSKÉHO STUDIA

Vybraná odborná publikační činnost autora v průběhu doktorského studia

2015

FILKA, Miloslav a Milan GREAR. The most frequent shortcomings of WiFi operators. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, roč. 2015, č. 6, s. 129–133. ISSN 0033-2097.

KŘEPELKA, Václav a Milan GREAR. Využití rádiových sítí pro řízení krizových situací. *Telekomunikace*, 2015, roč. 2015, č. 4, s. 13–20. ISSN 0040-2591.

2012

GREAR, Milan. Interference caused by the operation of radar. *New Information and Multimedia Technologies – NIMT 2011. 1*. Brno: VUT FEKT, 2012, s. 55–58. ISBN 978-80-214-4126-2.

GREAR, Milan, KŘEPELKA, Václav a Miloslav FILKA. Introduction into Converging Telecom Clouds II. *New Information and Multimedia Technologies – NIMT 2011. 1*. Brno: VUT FEKT, 2012, s. 59–62. ISBN 978-80-214-4126-2.

GREAR, Milan. Nejčastější chyby provozovatelů WiFi. *Elektrorevue – Internetový časopis* [online], roč. 2012, č. 59, s. 1–6. ISSN 1213-1539 [cit. 30. srpna 2013].
Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz>

2011

GREAR, Milan, KŘEPELKA, Václav a Miloslav FILKA. Introduction into Converging Telecom Clouds. *New Information and Multimedia Technologies – NIMT 2011. 1*. Brno: VUT FEKT, 2011, s. 98–101. ISBN 978-80-214-4126-2.

2010

GREAR, Milan, FILKA, Miloslav a Václav KŘEPELKA. Convergence – Synergy of Fixed & Mobile Services. *New Information and Multimedia Technologies – NIMT 2010. 1*. Brno: VUT FEKT SEI, 2010, s. 1–4. ISBN 978-80-214-4126-2.

Vybraná odborná přednášková činnost v průběhu doktorského studia

GRENDAR, M. *Metodika postupu měření při odstraňování rušení DVB-T provozem základnových stanic LTE*. Luhačovice: ČTÚ, 10.–11. června 2014.

GRENDAR, M. *Metodika monitorování IO letadlových stanic sportovních letců*. Luhačovice: ČTÚ, 29.–30. května 2013.

GRENDAR, M. *Metodika monitorování WiFi sítí v kmitočtovém pásmu 2,4GHz a 5GHz*. Brno: ČTÚ, 12. prosince 2012.

GRENDAR, M. *Rušení analogového vysílání televizního příjmu postupným spouštěním DVB-T*. Luhačovice: ČTÚ, 19.–20. května 2011.

GRENDAR, M. *Měření pokrytí obcí signálem DVB-T*. Brno: ČTÚ, 25.–26. května 2011.

GRENDAR, M. *Využití kmitočtového spektra bezdrátovým místním informačním systémem*. Brno: ČTÚ, 13.–14. června 2010.

GRENDAR, M. *Rušení televizního příjmu základnovými stanicemi CDMA*. Bedřichov: ČTÚ, 20.–21. května 2010.

CURRICULUM VITAE

Základní údaje

Jméno a příjmení: Milan Grenar, ing.
Datum narození: 30. srpna 1960
Národnost: česká
Stav: ženatý
Kontakt: e-mail: milan.grenar@seznam.cz
telefon: +420 602 777 507

Vzdělání

1975 – 1978 SOÚ spojů v Brně – mechanik telekomunikačních zařízení
1981 – 1986 Vysoké učení technické v Brně, elektrotechnická fakulta, studijní obor 26-26-8 Telekomunikační technika – Ing.

Přehled zaměstnání a odborné praxe

2007 – dosud Český telekomunikační úřad, odbor pro jihomoravskou oblast – vedoucí oddělení kontroly
zabezpečování výkonu státní správy v oboru elektronických komunikací a poštovních služeb; dohled nad dodržováním právních předpisů z oblasti elektronických komunikací a poštovních služeb; řízení, organizování a zabezpečování realizace výkonu kontroly v elektronických komunikací a poštovních službách.

2000 – 2007 FY Kapsch Telecom, s. r. o., pobočka Brno – projektant datových a hlasových řešení na bázi produktů Nortell, Ericsson a Cisco a od roku 2005 vedoucí pobočky
návrhy technického řešení datové i hlasové oblasti, vypracování projektové dokumentace, kalkulace ceny, realizace projektu; konverze různých hlasových a datových systémů do

produktového portfolia fy Kapsch.

- 1996 – 1999
FY Alcatel Czech, s. r. o., pobočka Brno – projektant datových a hlasových řešení
návrhy technického řešení datové i hlasové oblasti, vypracování projektové dokumentace, kalkulace ceny, realizace projektu; konverze různých hlasových a datových systémů do produktového portfolia fy Alcatel, návrhy datových sítí s využitím aktivních prvků Bay Netware (Nortel), Cisco a 3COM, problematika sítí LAN a WAN (implementace hlasu do datových okruhů).
- 1994 – 1996
FY AT&T, Business Communication Systems, s. r. o. – technický manager, pobočka Brno: instalace a zajištění servisní činnosti u telefonních ústředěn od nejnižšího po nejvyšší typ
instalační dohled, proškolení a předání zařízení zákazníkovi; návrhy možných technických řešení, odborná konzultace.
- 1992 – 1994
Komerční banka, a. s. – specialista PC/LAN technického týmu podpory centrály Praha, dislokované pracoviště KB Brno–venkov
přechod poboček KB Brno–venkov a Brno–město z offline na online; práce s modemy typu Case a Javelin; komplexní řešení datové a telekomunikační problematiky v rámci KB.
- 1991 – 1992
Jihomoravské ředitelství spojů Brno – vedoucí odborně technický pracovník diagnostického střediska a vedoucí digitální přenosové skupiny technologie Marconi
v rámci diagnostického střediska servis v rámci celého Jihomoravského kraje; zajištění přenosu digitálního signálu IV. a V. řádu mezi digitálními ústřednami a ústřednou digitální a analogovou pro oblast Brno.

1989 – 1991	Jihomoravské ředitelství spojů Brno – odborný referent technického úseku komunikační zařízení druhého a vyššího řádu.
1986 – 1989	Okresní správa spojů Blansko – vedoucí uzlové zkušebny přenosu signálu mezi uzlovými a tranzitními ústřednami.
1978 – 1981	Okresní správa spojů Blansko, telefonní ústředna Boskovice mechanik telekomunikačních spojovacích zařízení.

Kurzy, osvědčení

- absolvování řady školení s certifikacemi v technické i obchodní oblasti a marketingu, managementu a soft skills

Certifikáty

1991	Kvalifikační zkoušky vyššího stupně v oboru Vyšší technika a ekonomika spojů;
1992	Školení k problematice rozhraní optického vlákna a digitální ústředny v Itálii u firmy Marconi, certifikát opravňující k práci na rozhraních 2/34 Mb/s a 34/140 Mb/s Single Board Muldex a 34/ 140 Mb/s O. F.; Line Terminal Equipment, ML33 a Supervisory Control System, MV31;
1993	Školení u FY Dell, certifikát opravňující provádět servis PC této firmy; Školení o údržbě laserových tiskáren Hewlett Packard a rychlotiskáren; Školení FY Microsoft, zakončené zkouškou pro Windows, Excel, Word a kurz Novell.

- 1994 – 1995 Dvě školení zakončená zkouškami ve školicím středisku FY AT&T pro střední Evropu v Budapešti, certifikáty opravňující provádět instalaci a údržbu telefonních ústreden Partner, Merlin Legend, programovat a udržovat telefonní ústřednu Definity;
Kurz Project Management.
- 1996 – 2000 Školení FY Learning International:
Professional Selling Skills;
Developing Performance:Coaching;
PSS Specific Applications.
- 2000 – 2004 Certifikát FY Ericsson na BP50 – 250, BusinessPhone 6.0 Presales (EEPT-02003);
Školení na IP telefonii Nortel, Cisco;
Prověření NBÚ pro funkci odpovědného zástupce k vydání koncese poskytování technických služeb k ochraně majetku a osob v plném rozsahu.