

# Studie metod a technik zjišťování a ověřování pokrytí radiokomunikačními službami

Připraveno pro Ministerstvo  
průmyslu a obchodu

[31.10.2024]

**Registered office**

**Grant Thornton International Ltd**

Grant Thornton House  
22 Melton Street,  
Euston Square,  
London, NW1 2EP  
United Kingdom

T +44 (0)20 7391 9500

F +44 (0)20 7391 9501

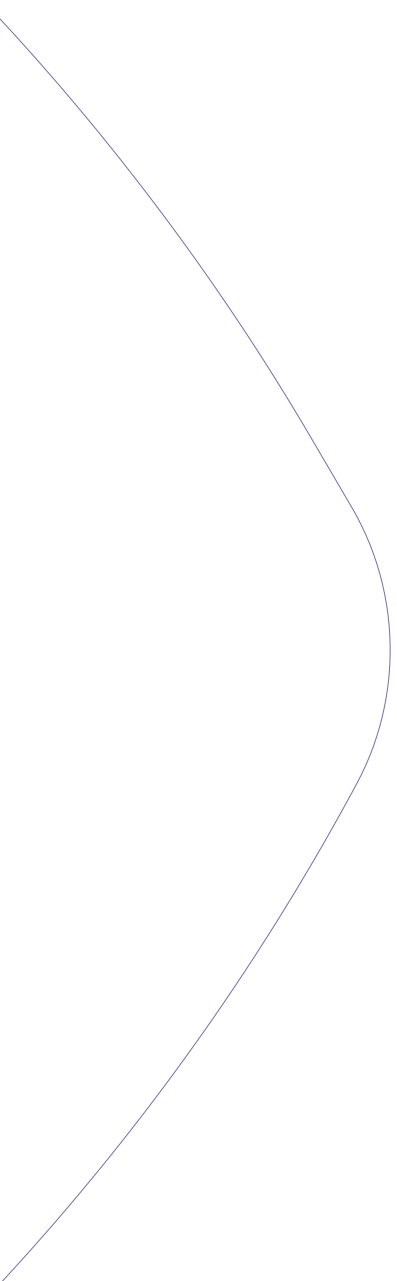
[linkd.in/grant Thornton](https://www.linkedin.com/company/grant-thornton)

[twitter.com/Grant Thornton](https://twitter.com/GrantThornton)

## Obsah

<b>Manažerské shrnutí</b> .....	<b>6</b>
<b>Management summary</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>10</b>
1.1 Význam ověřování pokrytí území radiokomunikačními službami .....	10
1.2 Cíle studie .....	10
1.3 Rozsah, zaměření a struktura studie .....	10
<b>2 Analýza řešené problematiky a obecná východiska</b> .....	<b>11</b>
2.1 Monitorování parametrů v radiokomunikačních sítích .....	11
2.1.1 Možnosti hodnocení parametrů komunikačních sítí a služeb .....	11
2.1.2 Hodnotící stupnice MOS pro QoE .....	13
2.1.3 Uspořádání sítě a oblasti hodnocení parametrů .....	13
2.1.4 Přenosové parametry dle vrstev komunikace .....	14
2.1.5 Parametry radiového rozhraní .....	15
2.1.6 Kvalitativní parametry na síťové a transportní vrstvě .....	15
2.1.7 Vztah radiových parametrů (RFI) a parametrů přenosu dat (QoS) .....	16
2.1.8 Metrologické souvislosti .....	17
2.2 Metodiky a kritéria pro testování a hodnocení pokrytí radiokomunikačními službami .....	18
2.2.1 Metodiky a dokumenty ČTÚ .....	18
2.2.2 Metoda čtverců .....	18
2.2.3 Limity pro radiové parametry .....	19
2.2.4 Limity pro parametry datové komunikace .....	19
<b>3 Spektrální monitorování pomocí družic</b> .....	<b>21</b>
3.1 Základní charakteristiky družic a jejich použití .....	21
3.1.1 Rozdělení družic .....	21
3.1.2 Kmitočtová pásma pro provoz družic .....	22
3.1.3 Investiční a provozní náklady družice .....	22
3.2 Monitorování kmitočtového spektra pomocí družic .....	23
3.2.1 Monitorování pozemského sektoru z družic .....	23
3.2.2 Projekt SMOG-P .....	23
3.2.3 Trendy v oblasti využití družic pro monitorování radiového spektra .....	24
3.3 Dílčí závěry .....	25
<b>4 Použití dronů pro měření</b> .....	<b>26</b>
4.1 Specifika měření komunikační sítě 5G NR .....	26
4.2 Legislativa a pravidla používání dronů na území České republiky .....	26
4.3 Technické požadavky kladené na drony / UAS .....	28
4.3.1 Technické požadavky vyplývající z měřicích úloh pokrytí sítí 4G a 5G .....	30
4.4 Stav monitorování drony v ČR .....	31

4.4.1	Přehled dostupné měřicí techniky.....	31
4.4.2	Stav využití dronů u operátorů v ČR.....	40
4.5	Dílčí závěry.....	40
<b>5</b>	<b>Využití vyspělých simulačních modelů a technik založených na strojovém učení .....</b>	<b>41</b>
5.1	Teoretická východiska .....	41
5.1.1	Metody strojového učení.....	41
5.1.2	Další pokročilé metody modelování pokrytí .....	42
5.2	Současný stav .....	42
5.2.1	Vybraná řešení dostupná na trhu .....	43
5.2.2	Nástroje používané operátory v ČR.....	48
5.2.3	Nástroje využívané v rámci činnosti ČTÚ .....	48
5.3	Identifikované problémy a příležitosti.....	51
5.3.1	Rozdíl mezi simulačními modely používaných operátory a ČTÚ .....	51
5.4	Dílčí závěry.....	51
<b>6</b>	<b>Použití vyspělejších technologií pro měření a monitorování pokrytí.....</b>	<b>52</b>
6.1	Úvod do problematiky, identifikace příležitostí a nedostatků současných řešení.....	52
6.2	Testování hlasových služeb.....	52
6.2.1	Základní rozdělení a hodnocení hlasových služeb .....	52
6.2.2	Metodiky k hodnocení kvality hovorového signálu .....	53
6.2.3	Algoritmy pro vyhodnocení kvality hovorového signálu .....	54
6.2.4	Další vývoj v oblasti testování kvality hovorových spojení .....	56
6.3	Testování obrazových multimediálních služeb .....	56
6.3.1	Hodnocení OTT multimediálních služeb .....	56
6.3.2	Dílčí závěry.....	59
6.4	Systémy pro měření a monitorování služeb rádiových sítí .....	59
6.4.1	Současné řešení pro testování hlasových služeb .....	59
6.4.2	Perspektivní způsoby testování hlasových služeb a jejich kombinace s dalšími službami .....	60
6.5	Dílčí shrnutí .....	64
<b>7</b>	<b>Současné a korelované ověřování radiových parametrů a parametrů kvality služby .....</b>	<b>66</b>
7.1	Úvod do problematiky .....	66
7.1.1	Parametry datové komunikace a jejich vztah k parametrům radiového rozhraní .....	66
7.1.2	Postup při zpracování a analýze dat .....	66
7.2	Výsledky analýzy a zpracování dat.....	67
7.2.1	Souvislost mezi RFI parametry získaných různým způsobem .....	67
7.2.2	Souvislost mezi RFI parametry a parametry přenosu dat .....	69
7.3	Dílčí závěry doporučení pro další postup.....	76
<b>8</b>	<b>Shrnutí, závěry a doporučení .....</b>	<b>77</b>
8.1	Souhrn.....	79
8.2	Doporučení vyplývající ze studie .....	80



# Manažerské shrnutí

Monitorování radiového spektra a pokrytí geografického území radiovými signály je klíčové pro zajištění efektivního a bezpečného využívání rádiových frekvencí. Radiové spektrum je omezený přírodní zdroj, který je třeba spravovat tak, aby se zabránilo rušení mezi různými službami a aplikacemi, které jsou v něm provozovány. Zvláště důležité je to v dnešní době, kdy je řada oblastí závislá na dálkovém přenosu informací prostřednictvím bezdrátových sítí. Typicky se jedná o oblast průmyslu, veřejné bezpečnosti, obrany a samozřejmě je zde i oblast uspokojování komunikačních požadavků privátních koncových uživatelů.

Monitorování pokrytí geografického území radiovým signálem je v dnešní době principiálně dobře zvládnuto. Existují metodiky i adekvátní nástroje. Problémem jsou však vzrůstající počty monitorovaných kmitočtových pásem, nároky na přesnost a na rychlost monitorování a vzrůstá i objem monitorovaných parametrů. Rostoucí požadavky vedou k hledání nových technik monitorování, které by navazovaly na stávající nebo by byly jejich doplňkem.

Na základě zadání a s ohledem na vývoj techniky pro tuto oblast, se studie zaměřuje na vybrané způsoby zjišťování a ověřování pokrytí, které zahrnují využití družic a dronů, využití softwarových nástrojů a zpracování velkých objemů dat. Studie se zabývá dále možnostmi stanovení vzájemné závislosti monitorovaných parametrů pro hodnocení poskytovaných služeb dle nových kritérií. Při zpracování studie byla hlavní pozornost věnována pokrývání mobilními službami, zejména službami 5G.

V České republice se monitorování provádí pomocí zejména měření úrovně signálu na různých místech pomocí přenosných měřících zařízení, měřením pomocí vozidel vybavených specializovanou měřicí technikou, vyhodnocením pomocí softwarových nástrojů a matematických modelů formou predikce úrovně pokrytí a také sledováním stavu a výkonnosti sítí v reálném čase.

V rámci nových technik hardwarového monitorování radiových signálů mobilních sítí je studie zaměřena na oblast využití družic a dronů. Družice se v dnešní době ukazují jako prakticky nevyužitelné pro monitorování radiového spektra. Důvody jsou především technické – minimalizace vyzářených výkonů mobilními základnovými stanicemi do kosmického segmentu, a ekonomické – vývoj a provoz řešení provozovaných v kosmickém segmentu komunikační sítě. Ale, v souvislosti s rostoucí orientací na využívání kosmu jsou kladeny požadavky i na rozvoj kosmických telekomunikací. To povede i na nutnost tvorby a zavádění odpovídajících technických metod pro monitorování radiového spektra. Drony se jeví jako reálně využitelný prostředek pro monitorování ve specifických případech, kdy monitorování standardními drive nebo walk testy není v mobilních bezdrátových sítích možné. Aktuálně jsou na trhu k dispozici vhodná měřidla a existují měřicí metodiky. V platné legislativě však chybí výjimky pro vybrané státní orgány a instituce. Konkrétním příkladem je ČTÚ odpovědný za kontrolu radiového spektra. Úřad nedisponuje výjimkou pro provádění měřících letů a musí například žádat o souhlas s provozem dronu majitele pozemku, který má na svém pozemku zdroj radiového rušení (např. neoprávněná vysílací stanice).

Ověřování pokrytí geografického území softwarovými nástroji je dnes reálně využívanou metodou pro plánování a provoz bezdrátových / mobilních sítí. Praxe ukazuje, že dochází k rozdílným výsledkům mezi simulacemi a naměřenými hodnotami v reálném terénu a provozu. S ohledem na odlišné metodiky výpočtů a odlišné vstupní parametry pro výpočty, existují rozdíly v závěrech mezi jednotlivými mobilními operátory a samozřejmě i vůči dohledovému úřadu ČTÚ. Bylo by ku prospěchu výchozí podmínky sjednotit vhodnou úpravou platné legislativy a ve spolupráci s ČÚZK vytvořit veřejně dostupný "referenční" model terénu. Strojové učení a prvky umělé inteligence jsou dnes používány v některých SW a simulačních nástrojích. Část studie, která se zaměřuje na použití vyspělejších technologií a softwarových nástrojů, byla na základě diskuse se zadavatelem zaměřena na testování hlasové komunikace, kde je aktuální potřeba inovace měřícího vybavení. Testování kvality přenosu hlasu je v dnešní době u různých dodavatelů založeno na stejných metodikách. Řešení pro monitorování parametrů komunikačních sítí se u renomovaných nadnárodních výrobců liší jen minimálně. Ani nástroje pro získávání, zpracování a vizualizaci dat se z pohledu své funkcionality významně neliší.

Studie se zabývá i možnostmi, jak dát do souvislosti stávající metodiky monitorování parametrů signálů radiových rozhraní mobilních sítí, s novými kritérii pro hodnocení poskytovaných služeb, která více reflektují pohled koncového uživatele a jeho spokojenost se službou. Jak ukázala analýza nad vybraným vzorkem dat, současně a korelovaně ověřování radiových parametrů a parametrů kvality služby je možné, ale pro vypovídající závěry vyžaduje zpracování velkého množství dat z různých lokalit. Měření za jízdy (drive testy) generují data s velkým dynamickým rozsahem a změnami podél trajektorie měření. V tom případě hraje velkou roli průměrování dat, které se dnes provádí na referenční síti čtverců. Ze závislosti datové propustnosti (dosažené přenosové rychlosti) na úrovni vysílaného referenčního signálu základnové stanice, je možné rámcově vyčíst mezní hodnoty zájmových parametrů, pro které významné procento koncových uživatelů dosáhne na požadovanou úroveň služby.

Měření pokrytí geografického území rádiovými signály, průběžné monitorování a vyhodnocování parametrů poskytovaných služeb, jsou nezbytné úlohy spojené se zajištěním provozu bezdrátových sítí elektronických komunikací a s efektivním využitím spektra. Ve svém důsledku i s ochranou spotřebitele.

Doporučujeme průběžně sledovat vývoj v oblasti metod a technik zjišťování a ověřování pokrytí radiokomunikačními službami, zejména mezinárodních standardů, měřicích metod, technik vyhodnocení a simulací. Speciálně pak se zaměřit na následující:

- V souvislosti s rostoucím významem fixního LTE a fixního 5G analyzovat potřeby měření a testování v této oblasti, a to i v kontextu sítí a podmínek VHCN.
- V souvislosti s rostoucím rozvojem privátních sítí 5G, zejména v průmyslu, analyzovat potřeby měření a testování v této oblasti, a to i v kontextu očekávaného využití pásma 26 GHz.
- Při využití dronů se snažit o rozšíření jejich využitelnosti, mj. zavedením výjimek v platné legislativě pro provádění měřicích letů.
- Iniciovat podrobnější analýzu simulačních a měřicích nástrojů a jejich výsledků u operátorů a ČTÚ s cílem sjednotit výchozí podmínky, metodiky a kritéria.
- Podrobněji a průběžně v čase analyzovat vztahy mezi rádiovými parametry a parametry kvality služby vedoucí k validaci, případně změně limitů pokrytí. Pro tyto účely optimalizovat metodiku měření parametrů přenosu dat.
- V souvislosti s rostoucí orientací na využívání kosmu se zabývat tématem správy rádiového spektra v kosmických telekomunikacích s ohledem na výstupy a studijní výsledky radiokomunikačních konferencí WRC-27 a WRC-31 a na rozvoj družicových technologií a podpory jejich aplikací ve vědě, výzkumu, průmyslu a službách.

# Management summary

Monitoring the radio spectrum and the coverage of a geographical area by radio signals is a key factor to ensure the efficient and safe use of radio frequencies. The radio spectrum is a limited natural resource that needs to be managed to avoid interference between the different services and applications that operate on it. This is particularly important nowadays, when many areas depend on the remote transmission of information via wireless networks. Typically, this includes industries, public safety, defence and of course meeting the communication requirements of private end users.

Monitoring the coverage of a geographical area by radio signals is well managed in principle at the present time. Proper methodologies and adequate tools exist. However, the problem is the increasing number of frequency bands that require monitoring, the demands on accuracy and speed of monitoring, and the higher volume of monitored parameters. The increasing requirements are evoking a search for new monitoring techniques to build on or complement existing ones.

Based on the terms of reference and considering the evolution of technology for this area, the study focuses on selected methods of coverage detection and verification, which include the use of satellites and drones, software tools and the processing of large data volumes. Furthermore, the study examines the possibilities of establishing the monitored parameters interdependencies for the evaluation of the services provided according to the new criteria. The focus of the study was on the mobile services coverage, particularly 5G services.

In the Czech Republic, monitoring is carried out mainly by measuring the signal level at various locations using portable measuring devices, vehicles equipped with specialised measuring equipment, then evaluating with software tools and mathematical models that predict the coverage level, and by observing the status and performance of the network in real time.

In the context of new techniques for hardware monitoring of radio signals in mobile networks, the study focuses on the satellites and drones. Currently, satellites are seen as practically unusable for monitoring the radio spectrum. The reasons are mainly technical – minimal power emission of mobile base stations to the space segment, and economic – development and operation of solutions placed in the space segment of the communication network. Of course, in the context of increasing interest of using space, the development of space telecommunications is a valid demand. It will lead to the necessity of finding and implementing appropriate technical methods for monitoring the radio spectrum. Drones appear to be more practical instrument for monitoring in specific cases, where standard drive or walk tests are not possible in mobile wireless networks. Currently, on the market suitable measuring tools are available and measurement methodologies exist. However, there are no exemptions for selected governmental authorities and institutions in the current legislation. A specific example is the CTO (Czech Telecommunication Office) responsible for controlling the radio spectrum. The office does not have an exemption for carrying out measurement flights and must, for example, request consent for the operation of a drone from a landowner who has a source of radio interference on his land (e.g. an unauthorised transmitting station).

Verification of geographic area coverage by software tools is now a viable method for planning and operating wireless/mobile networks. Practice shows that there are different results from simulations and measured values in real field and operation. Considering different calculation methodologies and different input parameters for the calculations, there are distinctions in conclusions between various mobile operators and of course the CTO. It would be beneficial to unify the initial conditions by appropriate modification of the current legislation and to create a publicly available “reference” terrain model in cooperation with the ČÚZK (State Administration of Land Surveying and Cadastre). In some software and simulation tools, machine learning and elements of artificial intelligence are being used. Based on discussions with the client, the part of the study that focuses on the use of more advanced technologies and software tools was focused on voice communication testing, where there is a current need to upgrade measurement equipment. Voice quality testing is nowadays based on the same methodologies across different vendors. The solutions for monitoring the parameters of communication networks vary only minimally between the reputable international vendors. Even the tools for data acquisition, processing and visualisation do not differ significantly in terms of their functionality.

The study additionally checks the possibilities of reconciling the existing methodologies for monitoring the parameters of mobile network radio interfaces with new criteria for evaluating the services provided, which more closely reflect the end user's perspective and satisfaction with the service. As the analysis of selected data sample has shown, simultaneous and correlated verification of radio parameters and quality of service parameters is possible but requires the processing of large data amounts from different locations to draw meaningful conclusions. Drive tests generate data with a large dynamic range and variations along the measurement trajectory. In this case, data averaging, which is nowadays performed on a reference grid of squares, plays a major role. From the dependence of the data throughput (achieved data rate) on the level of the transmitted reference signal from the base station, it is possible to determine the threshold parameters' values of interest for which a significant percentage of end-users will reach the desired level of service.

Coverage measurement of the geographical area by radio signals, continuous monitoring and parameters evaluation of the provided services are necessary tasks related with ensuring the operation of wireless electronic communications networks and efficient use of the spectrum. As a result, also with consumer protection.

It is recommended to continuously monitor the developments in methods and techniques for detecting and verifying coverage of radiocommunication services, in particular international standards, measurement methods, evaluation techniques and simulations. Specifically, the following should be addressed:

- In the context of the growing importance of fixed LTE and fixed 5G, analyse the measurement and testing needs in this area, including in the of VHCN networks and conditions.
- In the context of the increasing development of private 5G networks, especially in industries, analyse the measurement and testing needs in this area, including the expected use of the 26 GHz band.
- With drones' usage, seek to expand their usability by introducing exemptions in the current legislation for the performance of measurement flights.
- Initiate a more detailed analysis of simulation and measurement tools and their results from providers and the CTO to standardise baseline conditions, methodologies and criteria.
- To analyse fully and continuously the dependencies between radio and quality of service parameters leading to validation and possible change of coverage limits. For this purpose, optimise the methodology for measuring data transmission parameters.
- In the context of the increasing interest of space usage, to address the topic of radio spectrum management in space telecommunications, consider the outcomes and study results of the WRC-27 and WRC-31 radiocommunication conferences, the development of satellite technologies and support for their applications in science, research, industry and services.

# 1 Úvod

## 1.1 Význam ověřování pokrytí území radiokomunikačními službami

Zjišťování a ověřování pokrytí území radiokomunikačními službami v Čechách se provádí pomocí běžně používaných metod a technik (např. měření úrovně signálu na různých místech pomocí přenosných měřících zařízení, měření pomocí vozidel vybavených specializovanou měřicí technikou a měřících úroveň signálu během jízdy, vyhodnocení pomocí softwarových nástrojů a matematických modelů formou predikce úrovně pokrytí a také sledováním stavu a výkonnosti sítě v reálném čase při současném monitorování pokrytí signálu).

Jelikož uvedené způsoby zjišťování a ověřování pokrytí území radiokomunikačními službami častokrát obsahují nepřesnosti, je nezbytné ve studii identifikovat a popsat takovéto nejvýraznější nedostatky (zejména za jakých podmínek a na kterých místech dochází k těmto negativním jevům).

Následně vzniká potřeba nastínit, jakým způsobem řešit uvedené nedostatky a jakým způsobem lze vylepšit stávající způsoby a zjišťování a ověřování pokrytí území. Dále je potřebné navrhnout a doporučit k zavedení nové způsoby metod a technik s tím, že takovéto způsoby zjišťování a ověřování musí kvantitativně a kvalitativně vylepšit přesnost pokrytí, případně zefektivnit celý proces.

Ověřování pokrytí je důležitou činností v rámci správy kmitočtového spektra Českým telekomunikačním úřadem, při prověřování plnění rozvojových kritérií operátory nad přidělenými kmitočtovými pásmy, ale i z hlediska ochrany spotřebitele a zjišťování plnění smluv o poskytování služeb sítí elektronických komunikací.

## 1.2 Cíle studie

Na základě zadání a vývoje techniky v dané oblasti se studie zaměřuje na vybrané způsoby zjišťování a ověřování pokrytí založených na těchto perspektivních metodách:

- Spektrální monitorování pomocí družic (získání výsledků v reálném čase).
- Použitím dronů pro měření (provádění měření v obtížně přístupných nebo nebezpečných oblastech).
- Pomocí vyspělých simulačních modelů (sofistikovanější simulační modely umožňují přesnější predikce pro různé scénáře).
- Technik založených na strojovém učení (automatizace procesu zjišťování pokrytí na základě analýzy velkého množství dat).
- Použitím vyspělejších technologií (měření a monitorování pokrytí signálu s větší přesností a citlivostí).
- Současné a korelované ověřování radiových parametrů a parametrů kvality služby (QoS, případně QoE).

Při zpracování je hlavní pozornost věnována pokrývání mobilními službami, zejména službami 5G. Současně s rozбором a technickými aspekty jsou uvedeny přehledově následující informace, pokud jsou známy: země, ve kterých se daný způsob zjišťování zavedl, rámcové náklady na zavedení, další důležitá fakta a omezení (zvláštní HW a SW vybavení, náročnost realizace apod.).

## 1.3 Rozsah, zaměření a struktura studie

Studie se zaměřuje na radiokomunikační sítě a radiokomunikační služby, primárně pak na sítě mobilní LTE a 5G. Je rozdělena do stěžejních kapitol, kde první je analýzou současného stavu a soustředěním společných východisek pro jednotlivé cíle studie. Tyto jsou pak zpracovány v samostatných kapitolách s odkazy na společná východiska. Pro vzájemnou provázanost byly cíle c) a d) zpracovány ve společné kapitole. Pro jednotlivé cíle jsou nastíněny dílčí problémy a příležitosti. K nim jsou navrženy možnosti řešení a dílčí závěry. Celkové závěry a navrhované další kroky jsou pak sumarizovány v závěrečné kapitole.

# 2 Analýza řešené problematiky a obecná východiska

## 2.1 Monitorování parametrů v radiokomunikačních sítích

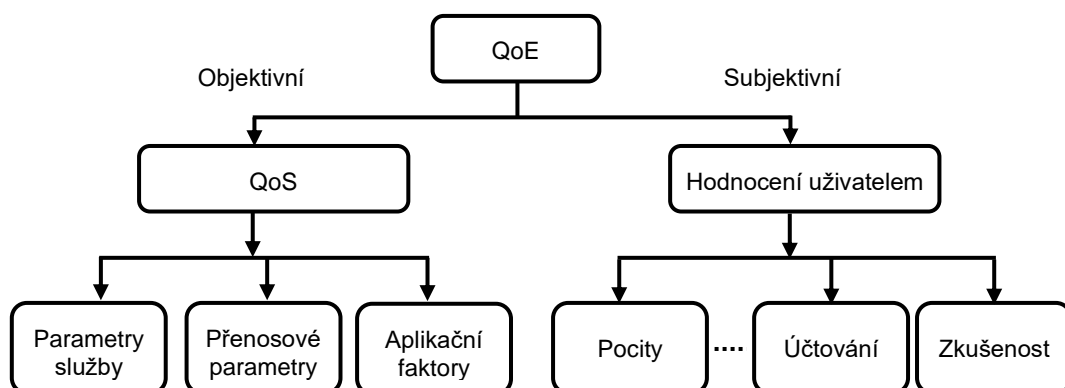
Radiokomunikační sítě představují specifickou oblast sítí elektronických komunikací. Využívají minimálně v jednom segmentu (obvykle v přístupové části sítě) radiový kanál a šíření signálu pomocí elektromagnetické vlny volným prostorem. S radiovým kanálem je spojené riziko výpadků a ztrátovosti komunikace, umocněné v řadě případů pohybem účastníků a s tím spojenou dynamikou parametrů. Pro zajištění požadované míry spolehlivosti komunikace je třeba zajistit pro pohybující se účastníky plošně dostatečnou úroveň radiového signálu v zájmovém území.

Pro moderní mobilní komunikační sítě jsou klíčové technologie LTE a 5G, které výrazně ovlivňují kvalitu poskytovaných služeb veřejnými sítěmi elektronických komunikací i celkovou spokojenost uživatelů. Technologie LTE/LTE-A přinesla značné navýšení v rychlosti přenosu dat, snížila zpoždění při přenosu a zlepšila pokrytí ve srovnání s předchozími generacemi. Umožnila též technologické sjednocení pro různé typy služeb, zejména datových a hlasových (VoLTE, Voice over LTE). Technologie 5G NR (5G New Radio) pak dosahuje ještě vyšších hodnot rychlosti, nižšího zpoždění a schopnosti připojit mnohem více zařízení současně. Tyto technologické pokroky v oblasti mobilních sítí zlepšují uživatelskou spokojenost a otevřely nové možnosti v dosud nerozvíjených oblastech, např. privátních (kampusových) bezdrátových sítích.

### 2.1.1 Možnosti hodnocení parametrů komunikačních sítí a služeb

Nedílnou součástí provozování komunikačních sítí je monitorování a ověřování jejich provozních parametrů a parametrů poskytovaných služeb, u radiových částí sítě pak pokrytí zájmové oblasti signálem. Ověřovat zájmové parametry je možné prostřednictvím různých metodik, tedy prostřednictvím definovaných principů a standardizovaných postupů. Metodiky mohou být zaměřeny na zjišťování objektivních ukazatelů, jako je propustnost, zpoždění při přenosu, kolísání zpoždění, ztrátovost. Tyto parametry jsou zásadní pro hodnocení úrovně poskytované služby, tj. kvality služby (QoS). Parametry QoS jsou podmnožinou v celkovém hodnocení služby koncovým uživatelem a jsou technickým pohledem na výkonnost sítě. Celkové hodnocení služby uživatelem – kvalita požitku (QoE) – zahrnuje mimo objektivních parametrů QoS i subjektivní hodnocení uživatele, které zahrnuje vnímání kvality služby na základě osobních zkušeností. Subjektivní část parametru QoE se často měří prostřednictvím dotazníků a zpětné vazby od uživatelů a poskytuje cenné informace o tom, jak uživatelé vnímají výkonnost sítě a služby. Vztah mezi QoE a QoS zachycuje následující obrázek.

Obrázek 1 – Principiální vztah mezi QoE a QoS.



Problematice parametrů QoS / QoE se v telekomunikacích věnuje celá řada doporučení Mezinárodní telekomunikační unie, počínaje doporučením ITU-T I.350 pro síť ISDN. Pro přenosové komunikační sítě a prostředky jsou hodnotící parametry QoS definovány doporučením ITU-T G.1000. Navazující doporučení ITU-T G.1010 definuje parametry QoS pro spojení v paketově orientovaných sítích, které poskytují přenosové prostředí pro kombinace různých typů služeb. Z pohledu QoS / QoE jsou v telekomunikacích důležitá doporučení:

Tabulka 1 – Titulek tabulky

#### Základní metodiky pro služby přes IP

G.1000	Communications Quality of Service: A framework and definitions
G.1010	End-user multimedia QoS categories
G.1011	Reference guide to quality of experience assessment methodologies
G.1020	Performance parameter definitions for quality of speech and other voiceband applications utilizing IP networks
G.1021	Buffer models for development of client performance metrics
G.1022	Buffer models for media streams on TCP transport
G.1028	End-to-end quality of service for voice over 4G mobile networks
G.1028.1	End-to-end quality of service for video telephony over 4G mobile networks
G.1029	Voice service diagnosis framework

#### Datové a další služby

G.1030	Estimating end-to-end performance in IP networks for data applications
G.1031	QoE factors in web-browsing
G.1032	Influence factors on gaming quality of experience
G.1033	Quality of service and quality of experience aspects of digital financial services
G.1034	Quality of experience metrics for mobile telephony communication during rail travel
G.1035	Influencing factors on quality of experience for virtual reality services
G.1040	End- Network contribution to transaction time
G.1050	Network model for evaluating multimedia transmission performance over Internet Protocol
G.1070	Opinion model for video-telephony applications
G.1071	Opinion model for network planning of video and audio streaming applications
G.1072	Opinion model predicting gaming quality of experience for cloud gaming services
G.1080	Quality of experience requirements for IPTV services
G.1091	Quality of Experience requirements for telepresence services

Z pohledu zainteresovaných subjektů můžeme problematiku hodnocení služeb rozdělit do základních oblastí:

- Oblast poskytovatele připojení – jedná se o subjekt zajišťující připojení koncového uživatele a transport dat služby. Zájmové parametry lze dělit dle jednotlivých komunikačních vrstev – hodnocení QoS.
  - Fyzická vrstva – úroveň přijímaného signálu, poměr signálu k šumu, bitová nebo bloková chybovost.
  - Vyšší komunikační vrstvy – propustnost (přenosová rychlost), ztrátovost paketů, zpoždění při přenosu a kolísání zpoždění apod.
- Oblast poskytovatele služby – subjekt poskytující vyžádanou službu (aplikační faktory – rozlišení videa, rychlost načtení webové služby apod).
- Oblast uživatele služby – oblast je hodnocena kvalitou požitku QoE.
  - VoIP telefonie – MOS parametr, E-model (R-faktor dle doporučení ITU-T G.107 a navazujících).
  - IPTV – MOS stupnice a další metriky (dle doporučení ITU-T G.108x).
  - Webové služby – subjektivní hodnocení (dle doporučení ITU-T G.1030).
  - apod.

## 2.1.2 Hodnotící stupnice MOS pro QoE

Stupnice MOS (Mean Opinion Score) původně vznikla pro hodnocení služby přenosu hovorových signálů. V dnešní době je používána pro veškeré dostupné služby, lze ji aplikovat například na přenos multimediálních toků nebo poskytování webových služeb apod. Její využití je důležité pro oblast subjektivního hodnocení komunikačních služeb. Hodnotící stupnice je bodová v intervalu 1 až 5.

*Tabulka 2 – Stupnice MOS pro hodnocení uživatelského dojmu ze služby.*

Hodnocení MOS		Kvalita vnímaná uživatelem
5	Excellent	Výborná
4	Good	Dobrá
3	Fair	Průměrná
2	Poor	Špatná
1	Bad	Nedostatečná

Mimo použití pro hodnocení hovorového signálu, jsou v doporučení ITU-T P.800.1 definovány stupnice MOS pro:

- Interaktivní komunikaci – doplňkový symbol C (Conversational).
- Video (V).
- Audio (A).
- Kombinaci audia a videa (AV).
- Hodnoty získané subjektivním hodnocením – doplňkový symbol S (Subjective).
- Hodnoty získané objektivním měřením – doplňkový symbol O (Objective).
- Odhadnutou kvalitu na základě výpočetního modelu – doplňkový symbol E (Estimated).

Pro hodnocení služeb existují mimo MOS i jiné metodiky. Mezi nimi a MOS jsou definovány převodní vztahy (viz dále E-model).

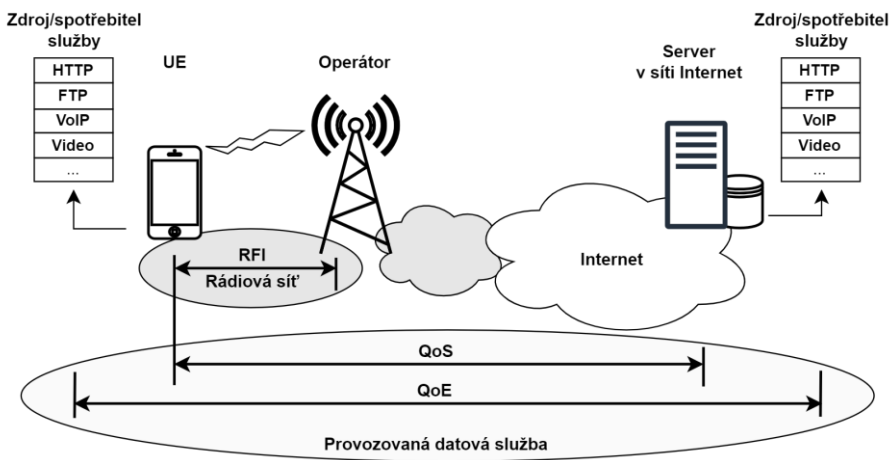
## 2.1.3 Uspořádání sítě a oblasti hodnocení parametrů

Celkově se přenosový řetězec při realizaci datových a jiných digitálních služeb rozpadá do kaskády dílčích segmentů (částí sítě) a do vrstev komunikace (komunikační model RM-OSI, případně TCP/IP), jak naznačuje následující schéma<sup>1</sup>. Mobilní sítě jsou specifické kombinací fixní části a radiového přístupu (RAN), kde se zjišťují specifické parametry radiového signálu (RFI).

---

<sup>1</sup> Dokument BoR (11) 53;BEREC ; A framework for Quality of Service in the scope of Net Neutrality; (<https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/reports/a-framework-for-quality-of-service-in-the-scope-of-net-neutrality>)

Obrázek 1 – Principiální schéma sítě a oblastí hodnocení komunikačních služeb.



Technologie LTE/5G NR mají, v rámci svých protokolových architektur a rovin řízení, implementovány principy zajišťující monitorování a dodržování požadovaných kvalitativních parametrů poskytovaných přenosových služeb. Koncový uživatel vyžaduje poskytování služby, tj. vyžaduje zajištění přenosových parametrů mezi oběma koncovými body datového spoje (konec-konec). Kvalitativní parametry jsou tak ovlivňovány i navazující síťovou infrastrukturou. Monitorování kvalitativní parametrů je proto nutné řešit v širším kontextu než jen například na radiovém rozhraní mobilní sítě. V tomto kontextu rozlišujeme hodnocení QoS do tří stupňů<sup>2</sup>:

- QoS-1 – teoretická (očekávaná, odhadovaná) výkonnost sítě – na základě modelů a výpočtů.
- QoS-2 – měřeno sondami a prvky bez účastnického zařízení.
- QoS-3 – měřeno včetně účastnické části sítě.

## 2.1.4 Přenosové parametry dle vrstev komunikace

Složitý problém, kterým je komunikace na dálku, je zjednodušen rozdělením na problémy dílčí. Jedním ze způsobů, mimo dělení na segmenty (dílní části sítě, jako je přístupová, páteřní atd.) je rozdělení komunikace na dílní vrstvy na základě tzv. vrstevných modelů komunikace (ISO-OSI, TCP/IP). V dnešní době je pro zajištění komunikačních potřeb koncových uživatelů obvykle využíván vrstevný model (resp. architektura) TCP/IP. V souladu s principy vrstevného modelu byla historickým vývojem stanovena řada metodik pro měření zájmových komunikačních parametrů na konkrétní komunikační vrstvě. V současné době je tedy možné konkrétní metodikou stanovovat parametry dané komunikační vrstvy sítě. Metodiky lze dělit i podle toho, zda jsou aplikovány za provozu (In-Service, komunikační síť přenáší i data běžných uživatelů) nebo bez provozu (Out-of-Service, komunikační síť přenáší výhradně testovací data). Základní dělení do vrstev a příklady metodik:

- Aplikační vrstva – je vrstvou nejbližší koncovému uživateli.
  - Pro určení parametrů na aplikační vrstvě se obvykle využívají měřiče rychlosti, tzv. speed-meter, bývají součástí určitých webových stránek poskytovatelů a aplikačních serverů. Využívá se také ke stanovení parametrů QoE.
- Transportní vrstva (L4) – využívají se komunikační protokoly TCP/UDP.
  - Metodika TCP True Speed RFC 6349.
- Síťová vrstva (L3) – využívá se protokol IP.
  - Režim In-Service – lze využít SW nástroje IP Ping, Trace Route.
  - Režim Out-of-Service – lze využít SW nástroje např. Iperf, Flowping, doporučení ITU-T Y.1540.

<sup>2</sup> Dokument BoR 20 (42); BEREC; Guidelines to assist NRAs on the consistent application of Geographical surveys of network deployments; (<https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/regulatory-best-practices/guidelines/berec-guidelines-to-assist-nras-on-the-consistent-application-of-geographical-surveys-of-network-deployments>)

- Spojová (linková) vrstva (L2) – odvíjí se od konkrétní používané technologie přenosu dat na nižší fyzické vrstvě. Pokud je využívána například technologie Ethernet lze využít:
  - Režim In-Service – monitorování v souladu s ITU-T Y.1731 (OAM – Operations, Administration and Maintenance, IEEE 802.1ag).
  - Režim Out-of-Service – metodika RFC 2544 doplněna o měření parametrů v časové doméně (např. kolísání zpoždění) a měření umožňující generování více současných toků.
  - Režim Out-of-Service – metodika SAM (Service Activation Methodology) dle ITU-T Y.1564.
- Fyzická vrstva (L1) – zajištění bitového přenosu dat na fyzické vrstvě se řeší v závislosti na typu přenosového prostředí. U fixních sítí se používají metodiky např.:
  - Režim In-Service – monitorování blokové chybovosti (např. ze zabezpečení CRC) dle ITU-T G.826.
  - Režim Out-of-Service – BERT (Bit Error Rate Test) pomocí PRBS (Pseudo-Random Bit Sequence) dle ITU-T G.821.
- Vrstva přenosového média (L0) – parametry signálu dle typu přenosového prostředí. U radiových sítí jde o parametry RFI.

Výše zmíněné standardizované měřicí metodiky pro obecné monitorování parametrů síťové a transportní vrstvy lze využívat i v moderních mobilních sítích s technologiemi LTE/5G/5GNR, protože se jedná o metodiky odstíněné od konkrétně použité přenosové technologie.

Metodiky měření parametrů fyzické (L1) a spojové vrstvy (L2), jsou poplatné konkrétní přenosové technologii použité pro realizaci mobilní sítě. Postupy pro stanovení parametrů jsou standardizovány v doporučeních 3GPP (resp. ETSI). Například stanovení parametrů na spojové vrstvě je uvedeno v:

- LTE – ETSI TS 136 314 (3GPP TS 36.314).
- 5G – ETSI TS 128 552 (3GPP TS 28.552).
- 5G NR – ETSI TS 138 314 (3GPP TS 38.314).

## 2.1.5 Parametry radiového rozhraní

V rámci ověřování funkcionality mobilních sítí lze monitorovat parametry fyzické vrstvy radiového rozhraní (RFI). Možnosti monitorování parametrů fyzické vrstvy se odvíjí od použité přenosové technologie (v souladu s příslušnými standardy). Typicky se monitorují parametry:

- RSSI – Received Signal Strength Indication (signal power) (dBm) (2G, 3G a LTE).
- RSCP – Received Signal Code Power (signal power) (dBm) (jen 3G).
- RSRP – Reference Signal Received Power (signal power) (dBm) (LTE).
- RSRQ – Reference Signal Received Quality (signal quality) (dB) (LTE).
- EC/IO – Downlink carrier-to-interference ratio (signal quality) (dB) (2G, 3G a LTE).
- SINR – Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (signal quality) (dB) (jen LTE).

V sítích LTE jsou parametry svázány s CRS (Cell Specific Reference Signal). Pro síť 5G NR se využívají signály SS (Synchronization Signal) a CSI (Channel State Information). Adekvátně je upraveno pojmenování LTE parametrů například na SS-RSRP/CSI-RSRP apod.

## 2.1.6 Kvalitativní parametry na síťové a transportní vrstvě

Vzhledem k architektuře TCP/IP se hodnocení datových přenosů z pohledu uživatele odehrává na síťové a transportní vrstvě komunikační sítě. Základním východiskem pro definování parametrů IP sítí (L3) je doporučení ITU-T Y.1540, které definuje tyto parametry:

- Zpoždění přenosu paketů IPTD (IP Packet Transfer Delay).
- Kolísání zpoždění IPDV (IP Packet Delay Variation).
- Četnost chybných paketů IPER (IP Packet Error Ratio).
- Četnost ztracených paketů IPLR (IP Packet Loss Ratio).

- Četnost nežádoucích paketů IPSR (Spurious IP Packet Rate).
- Četnost paketů mimo pořadí IPRR (Packet Reordered Ratio).
- Četnost duplikovaných paketů IPDR (Packet Duplicate Ratio).

Přenosová rychlost se počítá na třetí vrstvě včetně záhlaví IP paketu:

- Propustnost paketů IPPT (IP Packet Throughput) a příslušný poměr IPPR.
- Propustnost oktetů IPOT (Octet Based IP Packet Throughput) a příslušný poměr IPOR.

V doporučení Y.1540 je uvedena i obecná metodika, jak provést rozpad parametrů na jednotlivé části komunikačního řetězce, tedy např. mezi jednotlivé části páteřní sítě a síť přístupovou apod.

Měření a hodnocení parametrů datového přenosu na transportní vrstvě se řídí dokumentem RFC 6349 (Framework for TCP Throughput Testing), který definuje metodu označovanou též TCP True Speed. Využívá se vhodné vlastností komunikačního protokolu, který využívá principu potvrzování doručení datových segmentů vzdáleném konci spoje. Princip potvrzování zároveň zajišťuje regulaci datového toku podle aktuálního stavu přenosové sítě. Další výhodou měření protokolem TCP je, že tento komunikační protokol je využíván pro komunikaci převážnou většinou uživatelských aplikací a výsledky testů jsou tak blízké skutečnému vnímání služby uživatelem.

V dokumentu RFC 6349 jsou definované tyto metriky a parametry:

- TCP throughput – propustnosti/velikost datového toku, která je měřena v určitém bodu sítě při komunikaci pomocí TCP protokolu (v bitech za sekundu).
- RTT (Round-Trip Time) – rozdíl času od odeslání prvního bitu zprávy příjemci po doručení posledního bitu příslušného potvrzení TCP segmentu (TCP Acknowledgment).
- BB (Bottleneck Bandwidth) – nejnižší hodnota přenosové kapacity celé měřené trasy.
- BDP (Bandwidth Delay Product) – násobek kapacity datového spoje (v bitech za sekundu) a zpoždění mezi oběma konci spoje (v sekundách).
- Send and Receive Socket Buffers – velikost vysílací a přijímací vyrovnávací paměti.
- Minimum TCP RWND (Receive Window) – velikost okna pro potvrzování přijetí paketů.
- MTU (Maximum Transmission Unit) – maximální velikost paketu použitelná pro datový spoj (bez nutnosti segmentace).

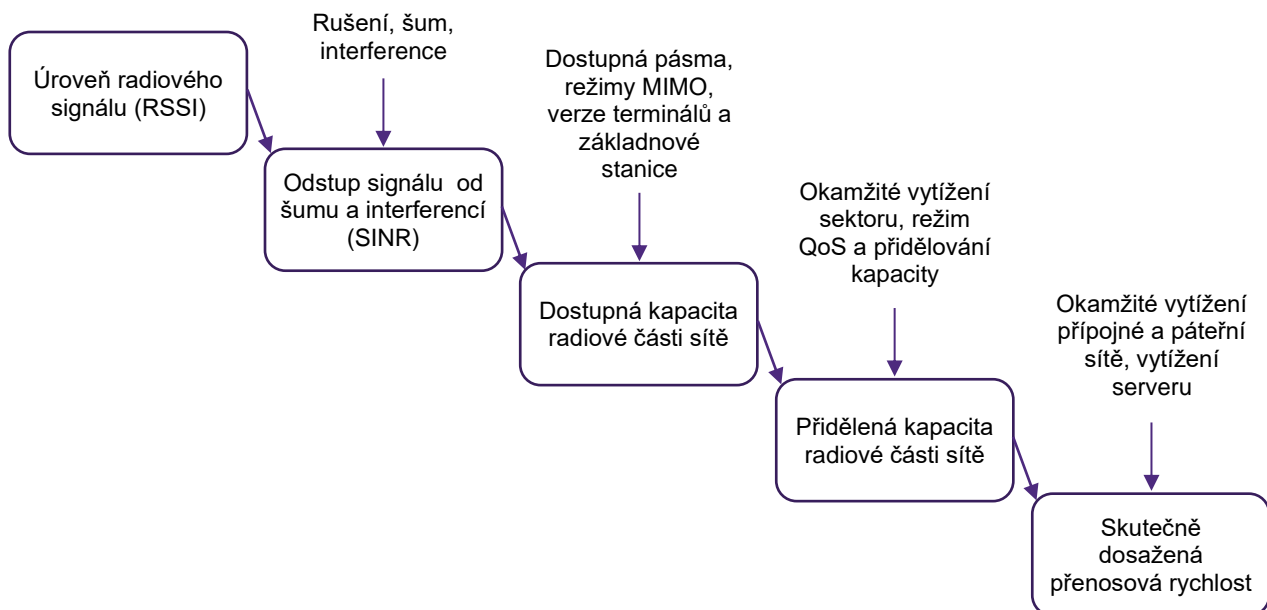
Přenosová rychlost na čtvrté vrstvě (L4) je nižší oproti nižším vrstvám (L3, L2, L1) v důsledku nutnosti přidávat dodatečné služební informace pro komunikační protokoly nižších vrstev (záhlaví paketů, rámců), dále je nižší v důsledku uplatnění regulačních mechanismů TCP (pozdvolný náběh přenosové rychlosti datového spoje) a je nižší i v důsledku chybovosti a nutnosti znovu vyslání nedoručených dat apod.

## 2.1.7 Vztah radiových parametrů (RFI) a parametrů přenosu dat (QoS)

Zjišťování parametrů pro pokrytí radiokomunikačními službami je možné na různých vrstvách komunikačního modelu, jak bylo uvedeno výše. Zjednodušeně řečeno, v radiokomunikačních sítích se zaměřujeme na parametry radiové fyzické vrstvy (RFI), parametry datového přenosu a poskytované služby (QoS), případně uživatelskou spokojenost s poskytovanou službou (QoE).

V radiových sítích, speciálně pak v síti mobilní působí řada faktorů, které ovlivňují parametry komunikace. A jedná se o velice dynamické děje, ať již z pohledu změn na radiovém rozhraní (pohyb terminálu, předávání komunikace mezi základnovými stanicemi), tak zatížení souběžným provozem (sdílení prostředků na radiovém rozhraní, sdílení dalších částí síťové infrastruktury). Následující schéma ukazuje postupné nabalování vlivů a faktorů od radiového rozhraní k síťové infrastruktuře.

Z naznačených vlivů plyne, že souvislosti mezi parametry radiového rozhraní existují, je však třeba brát potaz vedlejší vlivy, charakter víceuživatelského prostředí se sdílenými prostředky sítě a snažit se najít správné příčinné souvislosti.



Důležitou skutečností u sítí LTE-A a vyšších je souběžné využití více kmitočtových pásem (metoda „agregace nosných“ – CA). Výsledný datový tok je součtem dílčích datových toků ve více pásmech a nelze jednoduše rozlišit dílčí přenosové rychlosti. Každé kmitočtové pásmo přitom vykazuje obecně rozdílné parametry RFI. Terminály zobrazují intenzitu přijímaného signálu obvykle pro primární pásmo, ve kterém probíhá přihlášení se k síti a signalizace. Ve venkovských oblastech se jedná hlavně o pásmo 800, případně 700 MHz, ve městech i pásmo 1800 MHz.

## 2.1.8 Metrologické souvislosti

Při měření radiových sítí a hodnocení jejich kvalitativních parametrů je důležité nejen zvolit vhodnou metodiku, měřicí a diagnostickou techniku, ale je nutné do procesu posuzování nebo rozhodování zahrnout i možnou chybu obdržených dat (výsledků měření). Ať již je to chyba statistická nebo chyba měření je nutné ji vyčíslit a zahrnout do pravidel posuzování nebo rozhodování. V případě naměřených dat se jedná o vyčíslení tzv. **rozšířené nejistoty** měření  $U$ , která je přiřazena k získanému údaji měřidla  $X$  a s dostatečnou pravděpodobností (např. >95 %, při koeficientu rozšíření  $k = 2$ ) garantuje, že skutečná hodnota měřeného parametru leží v intervalu  $X \pm U$ .

Dalším důležitým aspektem je i metrologická návaznost měřidel a jimi kontrolovaných (měřených) parametrů. Metrologie a chyba měření se promítá do pravidla pro posouzení shody sítě nebo služby s předepsanou specifikací.

Metrologickou návaznost předepisuje např. norma *ISO 9001 Systémy managementu kvality – Požadavky*, která popisuje pravidla pro kontrolu kvality, metrologickou návaznost, opatření pro řízení rizik. Metrologickou návazností, bilancí chyb a nejistot měření, rozhodovacími pravidly při uvádění výroků o shodě s předepsanými specifikacemi se zabývá řada dokumentů přístupných na stránkách Českého institutu pro akreditaci.

Zajištění metrologické návaznosti měřidla se provádí jeho kalibrací – porovnání s metrologickým normálem. Při měření radiových parametrů jde prakticky o zjištění amplitudy přijímaného signálu, tedy o měření střídavého elektrického napětí o dané frekvenci a na referenční vstupní impedanci. Důležité v procesu měření je i zahrnutí vlivu přijímací antény a jejího přívodu.

Při měření parametrů přenosu dat jde o zjištění hodnoty veličiny času, a to přímo v případě měření zpoždění (rozdílu časů mezi okamžikem odeslání a přijetí datové jednotky). Při zjišťování hodnot přenosové rychlosti jde o čítání elementů informace – bitů za jednotku času – opět tedy je podmínkou kalibrace časové základny měřidla (dostatečně přesný oscilátor pro generování referenční frekvence).

Další podstatnou skutečností je, že měření v mobilních sítích se provádějí vesměs za pohybu, při kterém se parametry dynamicky mění a výsledky se pak vyhodnocují jak průměr za jednotku času, nebo jako průměr promítnutý do geografické jednotky v podobě čtverce (např. o rozměrech 100 x 100 m). I když se měření provádí ve stacionárním bodě, měřené hodnoty v čase kolísají (typicky změnami šíření, odrazy, ale i změnou zatížení sítě, vnitřními regulačními mechanismy sítě). Nelze tedy použít běžný způsob statistického vyhodnocení, kdy se předpokládá stabilní měřená veličina s předpokladem výkyvů způsobených nepřesnostmi měření.

## 2.2 Metodiky a kritéria pro testování a hodnocení pokrytí radiokomunikačními službami

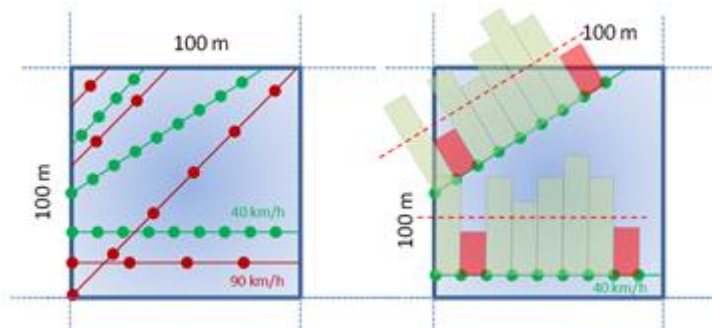
### 2.2.1 Metodiky a dokumenty ČTÚ

Vedle standardů pro komunikaci a obecné metody hodnocení kvality existují pro oblast řešenou ve studii metodické pokyny vydané ČTÚ. Pokrytí signálem je definováno v rámci podmínek aukcí v podobě tzv. „rozvojových kritérií“, které jsou součástí příslušných výběrových řízení pro využívání rádiových kmitočtů. Pro technologii LTE je to výběrové řízení z roku 2013 na kmitočtová pásma 800, 1800 a 2600 MHz<sup>3</sup> a výběrové řízení z roku 2016 na pásma 1800 a 2600 MHz<sup>4</sup>. Pro technologii 5G je to výběrové řízení z roku 2020 na kmitočtová pásma 700 MHz a 3400-3600 MHz<sup>5</sup>. Metodika měření mobilních sítí je předmětem dokumentu ČTÚ z roku 2013 „Postup při měření rychlosti přenosu dat v mobilních sítích dle standardu LTE“<sup>6</sup> a metodiky ČTÚ z roku 2021 „Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací“ ve verzi 2.3<sup>7</sup>. Základními procedurami je měření rádiových parametrů a parametrů přenosu dat za jízdy a v pevném bodě.

### 2.2.2 Metoda čtverců

Pro vyhodnocení pokrytí území se používá metoda čtverců, která spočívá v kvantizaci plochy území na elementy o délce strany typicky 100 x 100 m, nebo 50 x 50 m<sup>8</sup>. V tomto rastru poskytují své výstupy běžné simulátory pokrytí a ve stejném rastru jsou vyhodnocovány výsledky měření. Během měření za jízdy jsou ovšem data generována průběžně typicky s časovou periodou 1 sekunda. Záleží tedy na rychlosti pohybu, kolik bodů je naměřeno v konkrétním čtverci a z kolika hodnot bude tak stanovena průměrná hodnota pro čtverec. Dráha pohybu při měření může vést určitou dílčí částí čtverce, avšak výsledek je vztažen na celou plochu čtverce. S těmito aspekty je třeba počítat. Ke zpřesnění by vedlo dělení na více menších čtverců, což by ovšem znamenalo vyšší výpočetní náročnost pro simulace pokrytí a snahu snižovat rychlost při měřeních za jízdy (drive testy), což není žádoucí z hlediska efektivity měření, ale i případného zdržování silničního provozu.

Obrázek 2 – Principiální schéma hodnocení komunikačních služeb.



<sup>3</sup> Dokument ČTÚ-77 777/2013-613; Vyhlášení výběrového řízení na kmitočty v pásmech 800 MHz, 1800 MHz a 2600 MHz (2013); (<https://ctu.gov.cz/vyhlaseni-vyberoveho-rizeni-2013>)

<sup>4</sup> Dokument Čj.: ČTÚ-1/2016-613; Vyhlášení výběrového řízení za účelem udělení práv k využívání rádiových kmitočtů k zajištění veřejné komunikační sítě v pásmech 1800 MHz a 2600 MHz; (<https://ctu.gov.cz/aukce-2016-pasma-1800-2600-mhz>)

<sup>5</sup> Dokument ČTÚ-38 426/2020-613; Vyhlášení výběrového řízení za účelem udělení práv k využívání rádiových kmitočtů pro zajištění sítí elektronických komunikací v kmitočtových pásmech 700 MHz a 3400–3600 MHz; (<https://ctu.gov.cz/aukce-700/vyhlaseni>)

<sup>6</sup> Postup při měření rychlosti přenosu dat v mobilních sítích dle standardu LTE; (<https://ctu.gov.cz/sites/default/files/obsah/ctu-new/ochrana-spotrebitele/kontrola-a-mereni/mereni-rychlosti-prenosu-dat-lte-2013-08-15.pdf>)

<sup>7</sup> Dokument ČTÚ-10 330/2021-622; Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací, ver. 2.3; (<https://ctu.gov.cz/sites/default/files/obsah/ctu-new/ochrana-spotrebitele/kontrola-a-mereni/metodika-pro-mereni-a-vyhodnoceni-datovych-parametru-mobilnich-siti-ek-2-3.pdf>)

<sup>8</sup> Dokument BoR 20 (42); BEREC Guidelines to assist NRAs on the consistent application of Geographical surveys of network deployments (<https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/regulatory-best-practices/guidelines/berec-guidelines-to-assist-nras-on-the-consistent-application-of-geographical-surveys-of-network-deployments>)

Vztah mezi velikostí čtverců, trajektorií při měření, rychlostí pohybu měřicího vozu, počtu měřených bodů a dále principiální stanovení průměrné přenosové rychlosti při drive testu je patrná z obrázků pro periodu měření 1 sekunda.

## 2.2.3 Limity pro radiové parametry

Pro objektivní posouzení pokrytí území radiovým signálem se měří hodnoty parametrů RSRP a SINR referenčního signálu. Limitní hodnoty parametrů se mění v závislosti na kmitočtovém pásmu a vychází z platných norem ETSI a 3GPP. Konkrétní podmínky pro ověřování pokrytí geografického území a obyvatelstva, jsou uvedeny v dokumentech pro výběrová řízení pro využívání jednotlivých kmitočtových pásem.

Uceleně uvádí podmínky a postupy kontroly plnění požadovaných kritérií při provozování komunikačních technologií dokument Příloha č. 5 náležející k "Vyhlášení výběrového řízení za účelem udělení práv k využívání rádiových kmitočtů pro zajištění sítí elektronických komunikací v kmitočtových pásmech 700 MHz a 3400–3600 MHz". Dokument shrnuje způsob vyhodnocení pokrytí obyvatel, pokrytí území a liniových staveb. Z pohledu měření RFI parametrů jsou zde uvedeny informace k:

- Parametrům měřicí antény a jejímu umístění.
- Korekcím a přepočtům naměřených parametrů (výkonová bilance pracoviště, měření v příhraničních oblastech, korekce pro přepočec na úroveň signálu uvnitř budovy apod.).

Tabulka níže uvádí základní shrnutí zájmových parametrů pro jednotlivé typy lokalit a mobilní příjem, se zohledněním rezervy 4 dB v příjmu RSRP.

Tabulka 3 – Limitní hodnoty radiových parametrů

Kmitočtové pásmo	RSRP pro neobydlené území [dBm]	RSRP pro obydlené území [dBm]	RSRP pro silniční koridory [dBm]	RSRP pro železniční koridory [dBm]	SINR [dB]
700 MHz	-118	-109	-118	-114	-5
800 MHz	-118	-109	-118	-114	-5
900 MHz	-118	-109	-118	-114	-5
1800 MHz	-118	-107	-118	-113	-5
2100 MHz	-118	-106	-118	-113	-5
2600 MHz	-118	-105	-118	-112	-5
3400-3800 MHz	-118	-100	-118	-109	-5

## 2.2.4 Limity pro parametry datové komunikace

Rádiové rozhraní síťové infrastruktury poskytuje službu přenosu dat, tj. realizuje přenos bitů v bezdrátovém prostředí. Plnění stanovených kritérií na radiovém rozhraní je tak nutné (dostatečná úroveň signálu a SINR), ale ne plně postačující ke spokojenosti koncového uživatele se službou přenosu dat jako celkem.

Stejně jako jsou stanoveny parametry radiového rozhraní, jsou v jednotlivých Výběrových řízeních pro přiděl radiových kmitočtů stanoveny i parametry vyšších komunikačních vrstev.

Pro měření parametrů přenosu dat na vyšších komunikačních vrstvách v mobilních sítích, existuje měřicí metodika – dokument ČTU: Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací verze 2.3.

Pro síť založené na technologii LTE je dokumentem ČTU "Postup při měření rychlosti přenosu dat v mobilních sítích dle standardu LTE" stanovena minimální hodnota rychlosti přenosu dat v sestupném směru na jedno mobilní zařízení a jednu SIM kartu na hodnotu 5 Mbit/s.

Pro technologii 5G, provozovanou v kmitočtovém pásmu 700 MHz a 3400–36020 MHz, je v Příloze č. 5 výběrového řízení stanovena maximální doba zpoždění při přenosu mezi terminálem a peeringovým centrem na hodnotu RTT = 25 ms (zpoždění ve smyčce).

Na evropské úrovni je pak k dispozici dokument BEREC „Guidelines on Very High Capacity Networks“<sup>9</sup>, BoR (23) 164, 5 October 2023, který zahrnuje i bezdrátové sítě připojující terminály v pevném místě a definuje pro tyto případy parametry datové komunikace (kritérium 2 – základnová stanice připojena optickým vláknem, kritérium 4 – ostatní případy bezdrátové sítě, kdy základnová stanice není připojena optickým vláknem).

---

<sup>9</sup> [https://www.berec.europa.eu/system/files/2023-10/BoR\\_%2823%29\\_164\\_FNE\\_WG\\_Draft\\_BEREC\\_Guidelines\\_on\\_VHCNs.pdf](https://www.berec.europa.eu/system/files/2023-10/BoR_%2823%29_164_FNE_WG_Draft_BEREC_Guidelines_on_VHCNs.pdf)

# 3 Spektrální monitorování pomocí družic

Tato část studie je v souladu se jejím zadáním zaměřena na základní posouzení možností využití družicových technologií pro potřeby měření pokrytí pozemského segmentu mobilních rádiových komunikací.

Vzhledem k rozvoji kosmických telekomunikací je věnována i pozornost možnostem využití družicových technologií v celé šíři požadavků na úlohy monitorování rádiového spektra v oblasti družicových rádiových komunikacích.

Monitorování rádiového spektra je jedním z významných zdrojů informací a dat pro řízení jeho správy na globální úrovni v souladu s Radiokomunikačním řádem Mezinárodní telekomunikační unie (RR ITU<sup>10</sup>) a v jeho implementaci na regionálních a národních úrovních. Je tedy zdrojem informací, které jsou potřebné pro tvorbu plánů jeho efektivního využívání a kontrolu pro zajištění nediskriminačního přístupu rádiových zemských a kosmických služeb k přiděleným částem rádiového spektra, včetně pozic na oběžných drahách, nerušeného rádiového přenosu radiokomunikačních služeb a pro tvorbu příslušné národní legislativy.

Proto je v této části studie nad rámec zadání věnována pozornost trendům využití družic v blízké budoucnosti pro komplexní úlohu monitorování rádiového spektra v aktivitách ITU a Evropské kosmické agentury (ESA<sup>11</sup>) a popsán i příklad aplikace družice v maďarském projektu SMOG-P zaměřeného na monitorování rádiového znečištění kosmu generovaného rádiovými pozemskými prostředky v UHF pásmu.

## 3.1 Základní charakteristiky družic a jejich použití

### 3.1.1 Rozdělení družic

V závislosti na letové výšce se používá následující rozdělení oběžných drah na:

- Nízká oběžná dráha LEO (Low Earth Orbit): 160–2000 km, tu využívají malé družice (CubeSat, Orbcomm, meteorologické družice, senzorické monitorování Země,...). Životnost se v závislosti na jejich určení pohybuje do 3 roků.
- Střední oběžná dráha MEO (Medium Earth Orbit): 2000–35 786 km, telekomunikační (mobilní sítě Inmarsat, Iridium, Global Star), navigační (GPS, Galileo, Glonass, Beidou), senzorové monitorování. Životnost družic se pohybuje v rozmezí 5 a 6 roků.
- Vysoká orbitální dráha HEO (High Earth Orbit): apogeum je vždy větší jak 35 786 km, zřídka užívaná,
- Vysoká eliptická dráha HEO (Highly Elliptical Orbit): nejvzdálenější bod na dráze družice (apogge) je větší jak 35 786 km, ale perigeum je nižší, užívaná převážně ruskými telekomunikačními družicemi Molnia,
- Geostacionární dráha GEO (Geostationary orbit) – více jak 35 786 km, telekomunikační (TV a R vysílání, pevné družicové datové služby – Internet,...). Životnost je v rozmezí 11 až 15 roků.
- Měsíční dráha: více jak 384 401 km (sondy a mise k Měsíci a planetám). Životnost odpovídá časovým délkám těchto misí.

---

<sup>10</sup> zdroj: <https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/Pages/default.aspx>

<sup>11</sup> zdroj: <https://www.esa.int/>

### 3.1.2 Kmitočtová pásma pro provoz družic

Kmitočtová přidělení družicovým službám je v rozsahu od 2,5 MHz do 3000 GHz zahrnující i pozice na oběžných dráhách a technické rádiové parametry pro jednotlivé družicové služby (pevné, pohyblivé, mezidružicové, kosmického výzkumu,...) jsou obsaženy v RR ITU a v příslušných doporučeních ITU<sup>12</sup>. Koordinaci, notifikaci a administraci družicových služeb zajišťuje družicové oddělení Radiokomunikačního úřadu ITU (Space Dept. ITU-R<sup>13</sup>).

Pro základní představu – užívaná kmitočtová pásma pro družicovou komunikaci jsou: L (1–2 GHz) pro mobilní komunikaci, S (2–4 GHz) pro meteorologii a námořní dopravu, C (4–8 GHz) pro televizní vysílání, X (8–12 GHz) pro vojenské použití, Ku (12–18 GHz) pro přímé televizní vysílání (direct to homer), Ka (26–40 GHz) pro vysokorychlostní internet a V (40–75 GHz) pro ultravysokokapacitní komunikaci.

V rámci ITU je problematika monitorování rádiového spektra směrem k využití družic řešena ve studijních skupinách SG-1 Spectrum management ve Working Party 1C (WP 1C) – Spectrum monitoring<sup>14</sup>, SG-7 Science services<sup>15</sup> a SG-4 Satellite services<sup>16</sup>.

Provoz družic tvoří pozemní segment (pozemní družicová stanice) a družicový segment (jednotlivé družice nebo jejich sítě). Podle druhu družicové služby jsou využívány dva až tři rádiové kanály, které jsou určeny pro řízení provozu systémů vlastní družice a pro přenosy dat ze zařízení a systémů tvořící užitečný provoz (payload). Ten v případě rádiové komunikace představují vysílací a přijímací zařízení vědeckých experimentů, měřená data z různých senzorů, transpondéry pro rozhlasové a televizní programy, transpondéry radioamatérských služeb atd.

Provoz družice nebo jejich sítí vyžaduje kromě vlastní technické stránky i administrativní procesy, jako je koordinace a notifikace v ITU, registrace u Úřadu pro kosmické záležitosti OSN (UN OOSA – Office for Outer Space Affairs<sup>17</sup>) a také existenci a naplňování požadavků z příslušné mezinárodní a národní legislativy vzhledem k tomu že družicové služby jsou komoditou na telekomunikačním trhu.

### 3.1.3 Investiční a provozní náklady družice

Použití družice k nějakému definovanému účelu daného projektu (mise) vyžaduje kromě jiného i posouzení ekonomických hledisek (investičních, provozních a potencionálních vícenáskladů) vlastní družice v celém řetězci jejího životního cyklu (uvedené částky jsou hrubé odhady pro LEO družice).

Je třeba počítat s náklady na:

- a) návrh technického řešení – desítky tis. EUR,
- b) vývoj a realizace družice (vlastní nebo nákup stavebnice) – jednotky až desítky tis. EUR,
- c) předstartovní testy (vlastní zajištění, využití sdílení v rámci koupě stavebnice nebo jiných projektů) – jednotky tis. EUR,
- d) vynesení a umístění družice na orbitální dráhu (pronájem, sdílení, využití specializované firmy) – stovky tis. EUR,
- e) pozemní segment (budování nebo pronájem) – jednotky až desítky tis. EUR,
- f) zánik a úklid po ukončení její životnosti – jednotky tis. EUR,
- g) plnění administrativních a legislativních povinností (ITU-R, UN OOSA) – jednotky tis. EUR,
- h) predikci neočekávaných nákladů (např. právní služby a dopady při škodní události vlivem kolize s jinými družicemi nebo způsobené vlastní družicí na pozemských objektech, případně lidech, důsledky plynoucí z nepodařeného startu nebo umístění družice na orbitální dráze) atd., což se může pohybovat v řádů stovek tis. EUR.

K výše uvedeným celkovým nákladům nutno dále připočítat náklady na vývoj, výrobu a provoz vlastního obsahu daného projektu. Náklady na vlastní GEO družici se budou pohybovat v násobcích uvedených částek.

<sup>12</sup> zdroj: <https://www.itu.int/rec/r-rec/e>

<sup>13</sup> zdroj: <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/Pages/default.aspx>

<sup>14</sup> zdroj: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg1/rwp1c/Pages/default.aspx>

<sup>15</sup> zdroj: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg7/Pages/default.aspx>

<sup>16</sup> zdroj: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg4/Pages/default.aspx>

<sup>17</sup> zdroj: <https://www.unoosa.org/>

Pro vypracování finančního plánu se v případě LEO družic využívá finančních modelů jako např. Aerospace DS<sup>18</sup>.

I za předpokladu, že se jako perspektivní pro monitorování rádiového provozu ukazují LEO malé družice, tak jsou v současné době náklady na takové projekty značné a pohybují v řádu jednotek až stovek mil. EUR. Avšak, jasně indikovaný dynamický rozvoj trhu pro využívání technologií malých družic povede ke snížení těchto nákladů a tak i k možnosti výzkumu pro zavádění aplikací v oblasti monitorování rádiového spektra v jeho správě u telekomunikačních regulátorů. Další cestou pro snížení finančních nákladů na takové projekty je využití formy společných konsorcií telekomunikačních regulátorů, jak bude dále popsáno.

## 3.2 Monitorování kmitočtového spektra pomocí družic

### 3.2.1 Monitorování pozemského sektoru z družic

Studijní práce na daném tématu byly v prvním kroku zaměřeny na posouzení reálnosti možností měření pokrytí signálem pozemského (terestrického) segmentu z družic na geostacionárních a negeostacionárních drahách v souladu se zněním Radiokomunikačního řádu Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) a navazujícími národními legislativními dokumenty – Plán přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka) – vyhláška č. 105/2010 Sb.<sup>19</sup> k zákonu č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích) a v opatření všeobecné povahy vydané Českým telekomunikačním úřadem v Plánu využití rádiového spektra<sup>20</sup>.

Z provedených studijních prací vyplývá závěr, že využití družic pro měření pokrytí signálem z vysílacích zařízení terestrických služeb nejen v reálném čase je prakticky nevyužitelné z pohledu na požadavek měření pokrytí pozemského segmentu.

Hlavními důvody jsou:

- Monitorování rádiových signálů směrem do kosmického prostoru je možné spektrálně měřit v případě LEO družic ve výškách minimálně nad 300 km nad zemským povrchem a tedy případná geometrická projekce pokrytí na zemský povrch postrádá smysl i s ohledem na využívání této pozemské pohyblivé (mobilní) služby. Tato měření představují jistou formu sledování vyzařování rádiového smogu radiokomunikačních služeb z pozemských vysílačů do kosmického prostoru (viz experiment SMOG-P popisovaný dále).
- Vyzařovací diagramy anténních systémů základnových stanic pohyblivé a pevné služby (například u mobilních sítí se používá většinou panelová konstrukce<sup>21</sup>) jsou orientované v horizontální rovině na maximální využití vysílaného výkonu na zemském povrchu a v jeho blízkosti. Ve vertikální rovině se u těchto antén jedná o vyzařovací úhly do 15°. V případě šíření signálu směrem do kosmu je po průchodu zemskou atmosférou možné prakticky kromě vlastního spektra šířeného signálu (případně i obsahu) identifikovat s jistou pravděpodobností geografickou polohu zdroje signálu.

### 3.2.2 Projekt SMOG-P

Jako ukázka využití družic v oblasti monitorování rádiového spektra může posloužit projekt SMOG-P<sup>22</sup> řešený v roce 2020 maďarskou univerzitou Budapest University of Technology and Economics<sup>23</sup> za podpory National Media and Infocommunications Authority<sup>24</sup>.

<sup>18</sup> zdroj: <https://pdfs.semanticscholar.org/2654/787f913203f58ac40e01243b6b88715e20c5.pdf>

<sup>19</sup> zdroj: <https://ctu.gov.cz/sites/default/files/obsah/stranky/539/soubory/nkt2021p.pdf>

<sup>20</sup> zdroj: <https://ctu.gov.cz/plan-vyuziti-radioveho-spektra>

<sup>21</sup> zdroj: [https://svjfilipova.cz/files/brozura\\_-\\_zakladove\\_stanice2.pdf](https://svjfilipova.cz/files/brozura_-_zakladove_stanice2.pdf)

<sup>22</sup> zdroj: [https://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/smogp\\_spectrum\\_measurement.pdf](https://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/smogp_spectrum_measurement.pdf)

<sup>23</sup> zdroj: <https://www.bme.hu/en>

<sup>24</sup> zdroj: <https://english.nmhh.hu/>

Cílem tohoto projektu bylo potvrdit a zmapovat elektronického znečištění rádiovým smogem obklopující Zemi v kmitočtovém pásmu 460–860 MHz generovaného terestrickými TV vysílači a mobilními sítěmi ve výšce 350 km s pomocí malé družice SMOG-1<sup>25</sup>.

Malá družice SMOG-1 o velikosti 5 x 5 x 5 cm (rozměr Rubikovy kostky) a hmotností 175 g nesla spektrální analyzátor umožňující skenovací režim v daném rozsahu se šířkou pásma 800 kHz. Vzhledem k tomu, že šířka pásma digitálního TV vysílání je 8 MHz byly výsledné hodnoty zvětšeny o +10 dB. Její anténa pokrývala footprint o poloměru 4000 km. Pro komunikaci s družicí bylo využito 70 cm UHF radioamatérské pásmo.

Pro ověření funkčnosti družice, schopnosti měření spektra a letového software bylo využito meteorologického balónu na meteorologické stanici v maďarské Gilici.

Půlroční životnost družice byla odrazem její velikosti omezující zejména možnosti realizace dostatečné energetické soběstačnosti. Poměrně nízká výška letové dráhy měla rovněž za následek i větší působení gravitačních sil a vedla k postupnému sestupu do horních vrstev atmosféry a zániku shořením.

Výsledkem půlročního měření byla 3D interaktivní mapa<sup>26</sup> rádiového smogu a mapa odhadu rádiového smogu ve výšce 320 km až 420 km. Rozsah naměřených hodnot se pohyboval v rozmezí -100 dBm až -60 dBm.

Výsledky experimentu byly poskytnuty ESA a ITU pro využití zejména v rámci studií kompatibility v oblasti družicových služeb. Zajímavým výsledkem je zjištění, že úroveň signálů z mobilních systémů (810–950 MHz) jsou téměř totožné s těmi, které vysílají velké televizní vysílače pracující v kmitočtovém pásmu 500 MHz až 600 MHz.

### 3.2.3 Trendy v oblasti využití družic pro monitorování rádiového spektra

V současné době, v souvislosti s řadou záměrů ve využívání kosmu, je indikovaným trendem výraznější nástup a rozvoj oboru kosmických telekomunikací. Dynamický nárůst počtu družic na všech oběžných dráhách (viz např. síť Starlink, One Web na LEO dráhách) a záměry družicových operátorů a výrobců se projevují i vzrůstajícím tlakem na přiděly dalších kmitočtových pásem pro pevné a pohyblivé družicové služby a jejich nerušený provoz v souladu s RR ITU a jeho technickými a regulačními opatřeními. Což lze mimo jiné dovodit i z plánovaných bodů agendy a studijních prací vztahující se k družicovým službám na nadcházející Světové radiokomunikační konferenci ITU v roce 2027 (WRC-27<sup>27</sup>). Je tedy zřejmé, že v tomto kontextu se tyto trendy budou odrážet i v oblasti využívání družic pro tyto studijní a regulační potřeby ve správě rádiového spektra, zahrnující i získávání validních dat s pomocí družic.

Jako perspektivní v oblasti monitorování rádiového spektra se ukazují především technologie malých družic na LEO dráhách, které bude možné využít zejména v segmentu Země – Družice (upload) a pro identifikaci rušivých a nelegálních zdrojů rádiových signálů pronikajících do kosmu a případně i v monitorování mezidružicových komunikací.

Trend ve využívání družic pro úlohy monitorování rádiové spektra se odráží i v plánech aktivit Evropské kosmické agentury (ESA) v programu ARTES FPE 1B.129 – Spectrum monitoring mission feasibility assesment<sup>28</sup> a v aktivitách „Ensuring access to radio spectrum“ a „Supporting standardisation activities“. Rovněž v programových výzvách ESA je zpracování nového plánu aktivit v programu ARTES 4.0. Česká republika jako člen ESA má přístup do těch to aktivit 25 zemí EU a Kanady. Je tím tak vytvářena i možnost hlubšího zapojení české státní správy, akademické a průmyslové sféry pro návrhy a realizaci projektů orientovaných pro potřeby správy rádiového spektra v kosmických telekomunikacích. To především prostřednictvím členství v příslušných konsorciích takovýchto projektů.

Záměry v oblasti využívání družic a podpory v českých projektech a v účasti na programech ESA jsou pro období 2020–2025 obsaženy ve vládním dokumentu „Národní kosmický plán“<sup>29</sup> a bude obsažena i ve jeho novele na další období.

---

<sup>25</sup> zdroj: [https://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/levi\\_com/PID3627859.pdf](https://gnd.bme.hu/smog/files/publikaciok/levi_com/PID3627859.pdf)

<sup>26</sup> zdroj: <https://gnd.bme.hu/mb/site/>

<sup>27</sup> zdroj: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rcpm/Pages/wrc-27-studies.aspx>

<sup>28</sup> zdroj: <https://connectivity.esa.int/funding/spectrum-monitoring-mission-feasibility-assessment-artes-fpe-1b129>

<sup>29</sup> zdroj: <https://www.czechspaceportal.cz/narodni-strategie/narodni-kosmicky-plan/>

### 3.3 Dílčí závěry

Popsané studijní práce se věnovaly posouzení možnosti využívání družic pro monitorování rádiového spektra, tedy potřeby měření pokrytí signály, primárně mobilních sítí v reálném čase v terestrickém segmentu. Použití družic se v této činnosti ukazuje jako prakticky nevyužitelné. V případě, že vyzařovací diagramy pozemských vysílačů umožní šíření signálu směrem do kosmu, je po průchodu zemskou atmosférou možné prakticky kromě vlastního spektra šířeného signálu (případně i obsahu) identifikovat s jistou pravděpodobností geografickou polohu zdroje signálu. Tímto způsobem lze sledovat i vyzařování rádiového smogu radiokomunikačních služeb z pozemských vysílačů do kosmického prostoru.

V souvislosti s rostoucí orientací na využívání kosmu jsou kladeny požadavky i na rozvoj kosmických telekomunikací. To povede i na nutnost tvorby a zavádění odpovídajících technických metod pro monitorování rádiového spektra.

Současně s tím je nutné se zaměřit na přípravu a tvorbu odpovídajících národních legislativních a regulačních opatření jak ve využívání, tak ve správě rádiového spektra. Proto v této části studie je zahrnuto přehledové shrnutí základních aspektů a trendů v družicových technologiích, se zřetelem na možnosti jejich aplikací v oblasti monitorování rádiového spektra.

Daná problematika si bezpochyby vyžádá samostatnou studii, která se bude komplexně zabývat tématem správy rádiového spektra v kosmických telekomunikacích s ohledem na výstupy a studijní výsledky radiokomunikačních konferencí WRC-27 a WRC-31 a na rozvoj družicových technologií a podpory jejich aplikací ve vědě, výzkumu, průmyslu a službách.

# 4 Použití dronů pro měření

Použití dronů pro měření mobilních sítí nepředstavuje novum, protože se ve skutečnosti jedná o alternativu k dlouhodobě používaným „drive testům“. Tyto testy byly doposud prováděny na pozemních komunikacích pomocí vozidel, popř. v rámci železničních koridorů speciálními měřicími vozy, nebo například v minulosti, se používaly pro měření i klasické helikoptéry.

Drony však umožňují provádět měření efektivněji, ekonomičtěji, rychleji a s mnohem větší hustotou náměrů než běžný drive test, který je odkázán pouze na stávající pozemní silniční či železniční dopravní cesty. Mimo to je samozřejmě možné provádět veškerá měření i v obtížně dostupném terénu a v nebezpečných oblastech.

Nevýhodou, která zpomaluje nasazení této progresivní technologie, je však legislativní stránka. I tato část bude popsána v dalších kapitolách.

## 4.1 Specifika měření komunikační sítě 5G NR

Zejména 5G New Radio je výzvou pro testování infrastrukturních zařízení kvůli rostoucí složitosti MIMO a beam formingu, větším šířkám pásma a novým pásmům až do oblastí mmWave. Stále rostoucí diverzifikace a složitost infrastrukturních zařízení mobilních sítí se často kombinuje s požadavky, jako je nákladová efektivita a rychlé uvedení na trh. Tyto požadavky je třeba zohlednit v inovativních a flexibilních řešeních pro testování a měření.

Testování sítí 5G představuje jedinečné výzvy, které vyžadují strategická řešení. Mezi hlavní výzvy spojené s testováním sítí 5G patří:

- Pokrytí sítí 5G – počáteční zavádění této pokročilé technologie se soustředí do uzavřených oblastí. Regulační orgány nyní berou v úvahu jak výkon přijímaného referenčního signálu (RSRP), tak očekávanou datovou propustnost.
- Dosažení optimálního výkonu sítě 5G – vysoká míra flexibility 5G vyžaduje důkladné ladění výkonu během zavádění sítě, aby bylo dosaženo zamýšleného výkonu. Je nezbytné ověřit oblast předávání mobilní služby mezi lokalitami, buňkami a svazky, aby byla zajištěna maximální kapacita sítě.
- Rušení – používání duplexního režimu s časovým dělením (TDD) v sítích 5G přináší obavy z rušení. Aby se zabránilo rušení mezi základnovými stanicemi a mezi sítěmi různých operátorů, je nutná přesná synchronizace sítě.

5G New Radio je technologie rádiového přístupu pro standard mobilní komunikace příští generace. Od LTE se liší v následujících ohledech:

- Celosvětově jsou vyhrazena frekvenční pásma FR1 a FR2, přednostně budou využívána pásma 3,3 až 4,2 GHz a 26 až 44 GHz.
- Podpora beamformingu pro synchronizační signály / vysílací a datové kanály v kombinaci s 5G NR s MIMO pro datové kanály.
- Široká flexibilita fyzických rádiových parametrů, jako je šířka pásma kanálu, rozestup subnosných a délka symbolu.

Tyto charakteristiky mají vliv na šíření a kvalitu signálu, což zvyšuje potřebu přesného měření sítí 5G NR.

## 4.2 Legislativa a pravidla používání dronů na území České republiky

Provozování dronů / UAS na území Evropské unie je regulováno úřadem EASA (European Union Aviation Safety Agency). Česká republika jako členský stát EU se aktivně podílí na fungování EASA a také následně přebírá a uplatňuje pravidla pro používání dronů na našem území.

Z hlediska právního spadá do působnosti několika úřadů a ministerstev:

- Ministerstvo dopravy – jedná se o nadřízenou instituci Úřadu pro civilní letectví (UCL).
- Úřad pro civilní letectví UCL/CAA – tento úřad je zodpovědný za bezpečnost v letectví a je hlavní autoritou, která schvaluje letové plány.
- Český telekomunikační úřad – tento úřad je zodpovědný za správu a řízení kompletního kmitočtového spektra ČR.

Bezpilotní prostředky (drony) se v Evropské unii staly stále populárnějším nástrojem pro různé aplikace, od komerčních činností až po hobby létání. Pro provozování dronů v EU platí harmonizovaná pravidla, která byla zavedena v rámci evropského nařízení o bezpilotních prostředcích. Tato pravidla jsou nyní aplikována ve všech členských státech EU. Pravidla pro provozování dronů, jsou rozdělena do základních kategorií:

### Kategorie OPEN

Kategorie OPEN je určena pro provozování dronů s nízkým rizikem, což zahrnuje většinu hobby létání a některé komerční aplikace. Pro provozování v této kategorii platí následující pravidla:

- Hmotnost dronu:** Drony musí mít hmotnost do 25 kg (s výjimkou některých specifických podmínek).
- Výška letu:** Maximální výška letu je 120 metrů nad zemí.
- Viditelnost:** Pilot musí mít dron vždy v přímé viditelnosti (VLOS – Visual Line of Sight).
- Zákaz létání nad lidmi:** Létání nad shromážděními lidí je zakázáno, což znamená, že pilot by měl zachovat určitou vzdálenost od lidí a budov.
- Povinné školení:** Pro piloty dronů pod hmotností 250 gramů (až 2 kg pro některé modely) je nutné dokončit online kurz a získat kvalifikaci pilota.

Kategorie Open obsahuje dále podkategorie, dělené podle hmotnosti dronu a kvalifikace pilota.

Tam kde není možné aplikovat pravidla a omezení kategorie OPEN, a i tak je nutné provádět letecké práce, je možné využití kategorie SPECIFIC.

### Kategorie SPECIFIC

Kategorie SPECIFIC je určena pro operace s drony, které představují vyšší riziko a vyžadují dodatečné povolení a přístup k specifickému provoznímu plánu (SORA, Specific Operations Risk Assessment). Mezi úskalí této kategorie patří:

- Komplexní schvalovací proces:** Každý plánovaný let musí být úředně schválen, což může zahrnovat vypracování podrobné analýzy rizik a provozní dokumentace.
- Finanční a časové náklady:** Proces získávání povolení může být nákladný a časově náročný, což může odradit menší podnikatele od využití bezpilotních prostředků.
- Zkušenosti a znalosti:** Pilot musí mít dostatečné zkušenosti a znalosti o provozu dronů, což může zahrnovat složitější školení a certifikace.
- Omezení míst:** Některá místa (např. v blízkosti letišť, vojenské zóny, atp.) mohou mít dodatečná omezení, což komplikuje plánování letů.

### Do této kategorie pak spadá i létání v hustě osídleném prostoru (HOP)

Provozování dronů v hustě osídlených oblastech přináší další komplikace:

- Regulační omezení:** V těchto oblastech se vztahují přísnější pravidla na ochranu soukromí a bezpečnosti. Létání dronem, dokonce i v kategorii OPEN, je omezeno.
- Riziko pro lidi a majetek:** Hlavním problémem je vysoké riziko pro obyvatele a majetek. Je nutné dodržovat přísné nároky na minimalizaci rizik.
- Letecký provoz:** Hustý letecký provoz nad městy může vyžadovat další schválení nebo koordinaci s úřady, aby se předešlo kolizím s jinými letadly, či helikoptéry.
- Technická vybavenost:** Drony mohou vyžadovat pokročilé technologie, jako jsou systémy pro vyhýbání se překážkám nebo padákové systémy aby se zajistilo bezpečné létání v takových oblastech.

Celkově je provoz bezpilotních prostředků v Evropské unii komplexním tématem, které vyžaduje znalost regulací a odpovědný přístup k bezpečnému létání.

Z hlediska povolování letových plánů, respektive vlastních letových činností je velmi důležitá lokalita, kde se má dané měření provádět. Území ČR je rozděleno do geografických zón, mezi které se řadí například: výše zmiňované hustě osídlené prostory, chráněné krajinné oblasti, národní parky, Letištní plochy a heliporty, vojenské oblasti, věznice, elektrizační soustava, nebo také silniční a železniční síť. V případě, že je požadavek na provádění letů v zóně, která koliduje s geografickou zónou, je nutné dodržovat pravidla pro každou zónu a provoz bezpilotního letadla korigovat právě s omezením každé zóny. K takové koordinaci slouží právě kategorie provozu SPECIFIC (popsána výše) a Úřad pro Civilní letectví, který provádí dohled.

Dále se provoz dronů dotýká správců a majitelů pozemků a nemovitostí. Jejich souhlas je nutný k provádění letů. Z této logiky pak vychází, že nejvýhodnější použití dronů je v lokalitách těžko dostupných pro lidského technika, neboť v těchto lokalitách se obvykle ani žádné jiné zóny nenacházejí.

Je nutné podotknout, že legislativní situace spjatá s provozem bezpilotních systémů se za řadu let zlepšila. Limity, které byly dříve nepřekonatelné, jsou nyní dostupné. Je platný celoevropský systém s jasnými pravidly, což je bezesporu dobrá věc. Dále je potřeba si uvědomit, že pokud jsou nějaká omezení, tak jsou pouze z důvodu zachování bezpečnosti. A při kvalitním splnění všech bezpečnostních požadavků, je možné provozovat bezpilotní systémy i v jinak dříve nedostupných oblastech.

### **Ministerstvo dopravy**

Ministerstvo dopravy je zřizovatelem Úřadu pro civilní letectví a jako takový je nadřízenou institucí tohoto úřadu. Kontrolu a dohled nad provozem veškeré letecké techniky i dronů provádí prostřednictvím tohoto úřadu.

### **Úřad pro civilní letectví**

Úřad upozorňuje, že drony, které využívají jiné kmitočty než ty přidělené pro chráněné letecké použití, spadají pod směrnici 2014/53/EU pro rádiová zařízení. Při jejich provozování je možné využívat kmitočty pouze na základě všeobecného oprávnění nebo individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů, které vydává Český telekomunikační úřad (ČTÚ).

S koncem roku 2023 pozbývá účinnost Článek 22 Prováděcího nařízení Komise (EU) 2019/947 a dále zůstane v účinnosti, pro UAS uvedená na trh před 1. lednem 2024, pouze Článek 20. To znamená, že letadla, která nejsou vybavena „C“ štítkem a byla na trh uvedena do konce roku 2023, budou dále provozována v rámci podkategorií provozu A0 v případě letadel lehčích než 250 g a v podkategorii A1–A3 v případě letadel těžších než 250 g.

Dále dne 1.1.2024 vstupuje v účinnost ustanovení bodu UAS.SPEC.050 odst. 1 písm. l) bodu ii) přílohy Prováděcího nařízení. To znamená, že provozovatel je při provozu v rámci kategorie SPECIFIC povinen vybavit bezpilotní letadlo aktivním a aktualizovaným systémem dálkové identifikace. Přehled aktuálně dostupných systémů dálkové identifikace je na stránkách agentury EASA. V kategorii SPECIFIC je nyní také nutné vybavit bezpilotní letadlo tak aby splňoval požadavky podle 2.5.3 AMC1 k Článku 11 na „zlepšený kontejnment“.

### **Český telekomunikační úřad**

ČTÚ je ve dvojí pozici ve vztahu k provozu dronů a to:

- Správce kmitočtového spektra mimo jiné využívaného pro dálkové řízení dronů:
  - Kmitočty přidělené pro letecké modeláře, bezdrátově řízené hračky a drony.
  - Kmitočty přidělené pro chráněné letecké použití.
- Správce kmitočtového spektra může být provozovatel dronů, popř. objednatel služby, jejímž výsledkem jsou naměřená data prokazující kvalitu sítě. Zjištěná data, mohou poukazovat jak na kvalitu sítě, tak i na míru rušení sítě.
- ČTÚ jako státní instituce odpovědná za kontrolu kmitočtového spektra, by měla mít jisté výjimky pro provádění měřících letů. Je například nevhodné žádat o souhlas s provozem dronu majitele pozemku, který má na svém pozemku neoprávněnou vysílací stanici (nebo stanici vysílající mimo přidělená pásma). Praxe ukazuje, že takovéto kontroly jsou pak bezpředmětné.

## **4.3 Technické požadavky kladené na drony / UAS**

Obecně lze technické požadavky kladené na drony shrnout, jako požadavky na maximální dobu letu, maximální odolnost vůči povětrnostním vlivům, maximální nosnost a minimální cena.

- Doba letu a maximální dolet. Doba letu a maximální dolet mají přímý vliv na objem měřených dat, případně na oblast, kterou je možné měřením pokrýt. Tento parametr má pak také vliv na ekonomiku jednotlivých měřících úloh, případně celých projektů.
- Rozsah rychlostí letu.
- Užitečné zatížení dronu a wind load profil zátěže.
- Odolnost vůči povětrnostním vlivům. Vzhledem k tomu, že cílem je využití moderní robotické techniky, tak je žádoucí, aby co nejvíce odolávala vlivům počasí. Je již běžné, že bezpilotní letadla mají krytí IP XX. V některých případech je možné

použít bezpilotní letadla i v takových případech, kdy není možné použití vrtulníku, nebo lidské síly (mlhy, namrzlé vysílače atp.).

- Výpočetní výkon řídicí(ch) jednotek dronu.
- Výpočetní výkon zpracovatelských jednotek (obvykle miniPC), je dnes dostupný. Za poslední 1–2 roky, pak došlo ke zmenšení výpočetních stanic. Jedná se o běžný trend v sféře IT. Toto zmenšení, respektive odlehčení, potom dává váhovou rezervu, kterou je možné využít pro další systémy zvyšující bezpečnost letu.
- Oblast použití. V rámci telekomunikační infrastruktury je možné bez větších problémů měřit objekty, které se nacházejí v nepřístupných oblastech s nízkou hustotou osídlení, například příhraniční vysílače. Nebo je možné provádět měření v osídlených oblastech s větší hustotou osídlení. Tyto oblasti však představují vyšší nároky na bezpečnost. Tyto nároky jsou nyní již stanoveny ÚCL. Splnění vyšších nároků na bezpečnost, například prostřednictvím padákových systémů, nebo upoutaných řešení je možné a v praxi aplikovatelné. Vyšší nároky však mají vliv na ostatní parametry dronu, jako celková váha vs. užitečné zatížení dronu, doba letu, odolnost vůči větru apod. Proto je potřeba posuzovat provozní oblasti jednotlivě a zároveň komplexně.

Současná praxe ukazuje, že pro letecké úlohy spojené s měřením frekvenčního spektra jsou nutné drony, které mají nosnost užitečné zátěže minimálně 2,5 kg. Doba letu je nyní běžně dostupná kolem 30 min, a to jak pro velké, tak malé drony. Ukazuje se, že tato doba je aktuálně dostatečná pro provedení měření. Pro časově náročnější aplikace pak není problém měnit baterie a lety opakovat dle potřeby.

Pro měření tzv. liniových staveb jak pak vhodnější využívání letadlových systémů, respektive systému VTOL (Vertical Take Off and Landing).

*Obrázek 3 – Příklad dronu vybaveného systémem pro měření frekvenčního spektra.*



Obrázek 4 – Příklad dronu připraveného pro systém měření frekvenčního spektra.



### 4.3.1 Technické požadavky vyplývající z měřících úloh pokrytí sítí 4G a 5G

V dalším textu se omezíme pouze na oblast kmitočtů pásma FR1, což je 40 MHz až 6 GHz. Pásmo FR1 je středem zájmu s ohledem na masivní rozvoj sítí 5G a s nimi spojených terestriálních služeb a připravovaných non-terestriálních služeb – FR1 a FR2.

V 3GPP<sup>30</sup> jsou/budou pro komunikaci NTN UE<sup>31</sup> s družicí definována pásma 5G NR v tabulce:

Tabulka 4 – Pásma 5G NR pro komunikaci s družicemi.

REL	WI	NR band	Uplink (UL) operating band Satellite Access Node receiver / UE transmit $F_{UL,low} - F_{UL,high}$	Downlink (DL) operating band Satellite Access Node transmit / UE receive $F_{DL,low} - F_{DL,high}$	Remarks
REL-17	NR_NTN_solutions	N256	1980-2010 MHz	2170-2200 MHz	FR1, FDD, S-band
REL-17	NR_NTN_solutions	N255	1626,5-1660,5 MHz	1525-1559 MHz	FR1, FDD, L-band
REL-18	NR_NTN_LSband	N254	1610-1626,5 MHz	2483,5-2500 MHz	FR1, FDD, LS-band
REL-18	NR_NTN_enh	N512*, N511*, N510*	27,5-30,0 GHz 28,35-30,0 GHz 27,5-28,35 GHz	17,3-20,2 GHz 17,3-20,2 GHz 17,3-20,2 GHz	FR2, FDD, Ka-band

Zdroj: 3GPP

Vzhledem k množství měřících úloh je nezbytně nutné integrovat do bezpilotních letadel různé typy měřících přístrojů – od scannerů přes spektrální analyzátoři, analyzátoři datových toků až po měřící přijímače pro prověřovaná kmitočtová pásma. Dále je k dispozici i celé portfolio měřících antén. Ty jsou děleny, jak podle frekvenčních pásem, tak podle provozu a také podle směru záření. Antény jsou nezbytnou součástí měřícího vybavení.

Je možné bezpilotní letadla pronajímat. Stejně tak i jednotlivou měřící techniku. Tato možnost vychází z provozních a ekonomických hodnot jednotlivých řešení. Dnes jsou k dispozici již hotové produkty – Bepilotní letadlo + měřící zařízení + Software – které deklarují vzájemnou kompatibilitu (viz dále popis Deviser a NOKIA Drone Networks). Vzhledem k tomu, že i v dnešní době se stále jedná o nové metody a technologie, je obvyklé že se kombinace: bezpilotní letadlo + měřící přístroj

<sup>30</sup> 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) – Dohoda o spolupráci v oblasti mobilních komunikací.

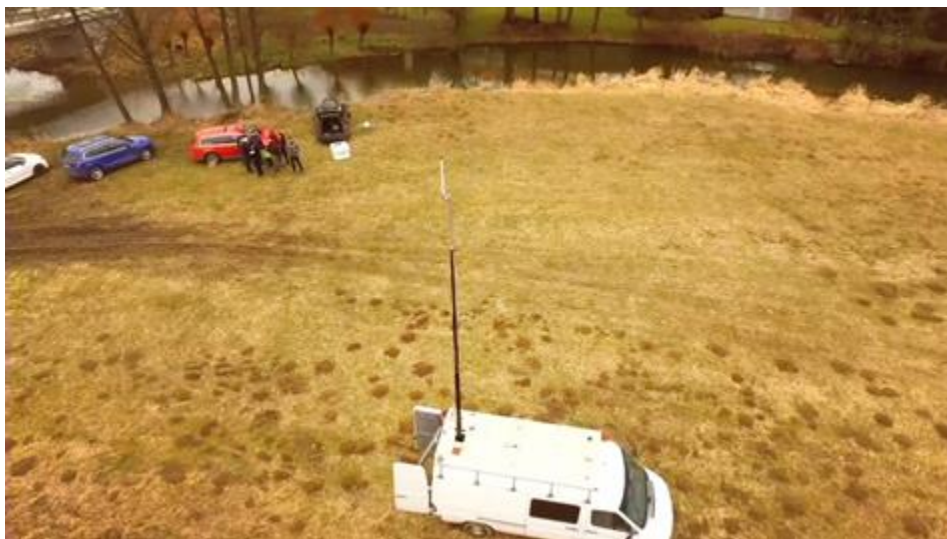
<sup>31</sup> NTN (Non-Terrestrial Networks) – Neterestrická síť (Jiná než pozemní síť, například síť s kosmickým segmentem); UE (User Equipment) – Uživatelský terminál/Koncové zařízení uživatele.

skládá. Nebo dokonce kompletuje na zakázku. V těchto případech je pak nutné věnovat speciální pozornost vzájemné kompatibilitě, neboť může docházet k vzájemnému rušení. Samotné měření pak může být ovlivněno a naměřená data irelevantní.

Hlavním požadavkem vzájemné kompatibility je, aby nedocházelo k průnikům rušení ze systémů dronu do měřících přístrojů a k interferencím s měřenými kmitočty, popřípadě k ovlivňování měřených parametrů jako např. datových služeb. V poslední době se k těmto požadavkům přidává také potřeba možnosti kontroly GPS / GNSS<sup>32</sup> dat v souvislosti s rušením těchto služeb. Kontrola GPS / GNSS dat je důležitá i proto, že v rámci těchto služeb je poskytována časová značka, která je důležitá pro synchronizaci sítě.

## 4.4 Stav monitorování drony v ČR

ČTÚ má vlastní bezpilotní i měřící techniku. Pro správu leteckého parku, administraci letových úloh i pilotování využívá subdodavatelskou firmu. Pro vyhodnocování měření, přípravu měřících úloh používá vlastní experty.



### 4.4.1 Přehled dostupné měřící techniky

Dále je popsán přehled dostupné měřící techniky, která je vhodná pro mapování a kontrolu bezdrátových a mobilních sítí. A to nejenom ve spojení s drony, ale i s jinými způsoby mapování.

#### Aaronia

**SPECTRAN® V6 ECO**<sup>33</sup> je spektrální analyzátor pracující v reálném čase (RTSA), a monitorovací přijímač navržený tak, aby zachytil i velmi krátké signály. Jeho rychlost skenování a rychlost / doba záznamu jsou 6 GHz za 2 ms (3 THz/s), což něj činí jeden z nejrychlejších USB spektrálních analyzátorů.

---

<sup>32</sup> GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Globální navigační satelitní systém, je dálkoměrný systém využívající specifické signály vysílané z družic pro určení polohy terminálu. GPS je jednou z verzí GNSS, jedná se o navigační systém NAVSTAR GPS (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System) USA, další GNSS systémy jsou Beidou, GLONASS, systém Galileo.

<sup>33</sup> zdroj: <https://aaronia.com/>

**Spectran V6** je skupina spektrálních analyzátorů určená pro kmitočtové rozsahy od 9 kHz až do 6 GHz popř. 7,25 GHz.



**SPECTRAN® V6 5G** je spektrální analyzátor v reálném čase (RTSA) speciálně navržený pro monitorování sítí 5G, včetně detekcí interferencí nebo degradace výkonu. Pozitivem je optimální poměr cena/výkon a množství dostupných doplňkových funkcí. Analyzátor skenuje 6 GHz za méně než 10 ms (500 GHz/s), a tedy se řadí k nejrychlejším USB spektrálním analyzátorům. K dispozici jsou tři různé verze, které pokrývají kompletní rozsah pásem 5G.

Díky modulární konstrukci softwaru RTSA-Suite PRO a jeho bohaté variabilitě, lze analyzátor uzpůsobit konkrétním potřebám, bez problémů provádět dodatečné změny a samozřejmě i bezproblémový budoucí upgrade.

**SPECTRAN® V6 5G 200XA-50** pokrývá kmitočtové rozsahy od 9 kHz až do 7,25 GHz (FR1) a 24GHz až 53 GHz (FR2).



## Anritsu

### Spectrum Master™ MS2760A<sup>34</sup>

Přenosné provedení umožňuje m.j. měření přímo u testovaného zařízení:

- Frekvenční rozsah: 9kHz až do 170 GHz.
- Měření: channel power, adjacent channel power, occupied bandwidth.
- Zobrazení spektra a spektrogramu.
- -127 dBm DANL do 110 GHz.
- Zobrazení až 6 průběhů, 3 detektory průběhů a 12 markerů.
- Dynamický rozsah: >103 dB, typicky na 70 GHz.
- RBW: 1 Hz až 3 MHz.
- Fázový šum: -110 dBc/Hz @ 1 GHz, typicky.



<sup>34</sup> zdroj: <https://www.anritsu.com/>

- Vstup externí referenční frekvence 10 MHz.
- Externí TTL spouštěcí vstup.

### Spectrum Master™ MS2762A

Tento typ SA se liší od MS2760 těmito parametry:

- Frekvenční rozsah: 6 GHz up to 170 GHz.
- -142 dBm DANL, od 6 do 40 GHz.
- Dynamický rozsah: > 108 dB na 70 GHz.



### Deviser

**Ground to Air Integrated Testing System** je měřicím dronem určeným především pro analýzu a vyhledávání interferencí. Celé řešení je založeno na integraci měřicího přístroje E8900A High-Performance 5G NR Spectrum Analyzer do komerčního dronu přímo výrobcem.



### E8900A High-Performance 5G NR Spectrum Analyzer

- Frekvenční rozsah 9 kHz až 9 GHz.
- Vysoce výkonný ruční spektrální analyzátor pro výstavbu a údržbu systémů 5G NR.
- Vysokorychlostní spektrální analýza, měření 30 GHz/s @ 7,8 kHz RBW.
- Real time analýza pro šířku pásma až 110 MHz a pro 100% zachycení signálu je doba kratší než 5 ms.
- Testování a demodulování signálů 5G NR (FR1), 4G FDD/TDD LTE.
- IQ data acquisition.
- Spektrogram, Spectrum Persistence Analysis, Gated Sweep a mapování pokrytí.
- Analýza rušení a určování polohy pomocí algoritmu Angle-of-Arrival.
- 10,1" dotykový displej pro snadnou navigaci.



### E8600N 5G NR Handheld Spectrum Analyzer

- Frekvenční rozsah 9 kHz až 6 GHz.
- Real time analýza pro šířku pásma 20 a 100MHz pro zachycení skrytých signálů.
- Analýza 5G NR (FR1), 4G FDD/TDD LTE, UMTS.
- Spektrogram, Spectrum Persistence Analysis, Gated Sweep.
- Analýza rušení a určování polohy pomocí algoritmu Angle-of-Arrival.



### E816 Series 5G NR Scanning Receiver

Demodulace 4G/5G: E816 dokáže demodulovat až 32 frekvenčních bodů současně s dekódováním Beam ID, Beam Indexem, RS-RSRP, RS-RSRQ a RS-SINR parametry příslušné základnové stanice.

Funkce analýzy spektra: E816 podporuje měření až 8 frekvenčních pásem se spektrální stopou, spektrogramem a měřením výkonu pro prověření spektra a analýzu interferencí.



Tabulka 5 – Parametry analyzátorů E816.

REL	E816-A	E816-B	E816-D
Frekvenční rozsah	350 MHz až 6000 MHz		
Demodulace	TDD-LTE, FDD-LTE, 5G NR		
Demodulace – citlivost	LTE -136 dBm @ 15 kHz SCS	5G NR / -132 dBm @ 30 kHz SCS	
Přesnost měření	+/- 1,5 dB		
Rozměry	262 x 160 x 80 mm	166 x 97 x 42 mm	292 x 210 x 82 mm
Hmotnost	< 2 kg		

Zdroj: [www.deviserinstruments.com](http://www.deviserinstruments.com)

### Enhancell Ltd.<sup>35</sup>

Produktová řada Echo je řešení pro měření a analýzu komunikační sítě. Všechny dále uvedené nástroje je možné integrovat do cloudu.

- Echo One je řešení pro testování mobilních sítí v podobě SW aplikace v mobilním telefonu. Mimo měření zájmových parametrů sítě (vrstvy L1–L3) umožňuje provádět i uživatelské testy typu end-to-end.
- Echo Lite je ruční nástroj pro měření mobilních sítí, který nevyžaduje provedení tzv. rootování operačního systému mobilního telefonu. Echo Lite podporuje operační systémy Android a Harmony OS (od společnosti HiSilicon), v běžně dostupných komerčních telefonech. Nástroj Echo Lite, obdobně jako Echo One, zaznamenává klíčové síťové ukazatele a parametry výkonnosti komunikační sítě. Ve srovnání s nástrojem Echo One má však Echo Lite omezenější funkcionalitu.
- Echo FT je řešení pro prohlížení zájmových výkonnostních parametrů sítě v reálném čase.
- Echo Trek I a II je batoh pro drive a walk testy. Echo Trek I obsahuje sloty pro 6 telefonů, tablet, skener, 4 baterie a napájecí zdroj. Echo Trek II obsahuje sloty pro 10 telefonů, 2 USB huby, miniaturní řídicí počítač, baterii a nabíječku.
- Echo Verify je řešení pro verifikaci parametrů základnových stanic (včetně procesu handover mezi sousedními sektory). Echo Verify podporuje všechny dostupné technologie 2G/3G/4G/5G (NSA/SA). Řešení umožňuje i testování směrování hlasových hovorů (Voice Call Test Routing), včetně tísňových volání na telefonní číslo 112 (resp. 911).
- Echo Studio je nástroj pro analýzu dat, vizualizaci výsledků a vytváření protokolů z měření. Jednotlivá měřicí zařízení řady Echo lze pomocí aplikace Studio vzdáleně plně ovládat pro potřeby testů. Získané výsledky lze synchronizovat a sdílet prostřednictvím služby Echo Cloud.

### Keysight Technologies, Inc.

**Nemo Walker Air<sup>36</sup>** je systém pro benchmarking v interiéru.

Nemo Walker Air je řešením pro provádění měření a srovnávacích testů v interiéru na více technologiích současně. Jedná se o lehký systém umístěný v back packu, který se snadno přenáší a nastavuje. Celý systém může být v provozu na vlastní baterie až 10 hodin.

Základní vlastnosti:

- Synchronizace vnitřních srovnávacích měření a skriptů událostí až se sedmi testovacími terminály (UE).
- Řídicí jednotka provádí měření, řídí a koordinuje podřízené jednotky, které jsou připojené pomocí rozhraní Bluetooth.
- Podporuje technologie: 5G NR, 5G NR NSA/SA, 5G Carrier Aggregation, LTE/LTE-A, starší technologie od 2G po 4G, WiFi a WiFi6.



<sup>35</sup> zdroj: <https://enhancell.com/enhancell/>

<sup>36</sup> zdroj: <https://www.keysight.com/>

- Testy kvality zvuku a kvality streamování videa (POLQA, PEVQ-S).
- Umožňuje provádět měření pomocí skeneru 5G NR pomocí PCTEL Gflex™ / HBflex™ / IBflex™ a autonomních skenerů mobilních sítí R&S@TSMa6 (viz popis scannerů dále).

### NOKIA Drone Networks

Dalším silným hráčem na trhu se stává společnost Nokia<sup>37</sup>, která je výrobcem kompletní infrastruktury pro sítě mobilních operátorů. Od roku 2022 úzce spolupracuje s firmou Rohde & Schwarz na „drone-based network measurement solution“. Řešení je založeno na produktu QualiPoc, který je zaintegrovan přímo do dronu NOKIA.



### PCTEL





**SeeGull IBflex® Scanning Receiver<sup>38</sup>**. Scannery umožňují v současné době paralelní skenování 4G/5G FR1 a 5G FR2, doposavad uměly skenery pracovat pouze v jednom z pásmech sub 6GHz nebo mmWave.

Parametry a režimy a diagnostiky pásma FR2:

- Možnost měření FR2 ve dvou anténních režimech pro vyšší rychlost vyhrazené FR2 měření.
- Režim jedné antény pro souběžné měření v pásmu sub 6GHz a mmWave.
- V konfiguraci 2 Port high speed FR2 – 10 meas/sec, DSS N/A.
- V konfiguraci Simultaneous FR2 & 4G/5G FR1 – 5 meas/sec, DSS YES.

Feature	2 Port high speed FR2	Simultaneous FR2 & 4G/FR1
FR2 speed	10 meas/ sec	5 meas/sec
DSS	N/A	Yes

			
Gflex®	HBflex™	IBflex®	MXflex®

<sup>37</sup> zdroj: <https://www.nokia.com/>

<sup>38</sup> zdroj: <https://www.pctel.com/>

## Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Společnost Rohde & Schwarz<sup>39</sup> nabízí řešení pro testování infrastruktury mobilních sítí, která reagují na různé potřeby a umožňují využít potenciálu sítí 5G. Portfolio řešení pokrývá všechny fáze životního cyklu produktu, od výzkumu a vývoje RF a digitálních návrhů, validace návrhu a integrace až po testování shody základnových stanic definované 3GPP a testování výroby.

### Řešení pro testování sítí 5G

Složitost sítí 5G vyžaduje testování ve všech fázích životního cyklu sítě. Měření sítí 5G NR umožňují operátorům rychleji zavádět a provozovat síť a zajišťovat jejich špičkovou kvalitu. Společnost Rohde & Schwarz nabízí komplexní portfolio pro testování mobilních sítí 5G s řešeními pro pasivní i aktivní testy:

**Rodina síťových skenerů R&S@TSMx6** a řešení R&S@5G Site Testing Solution (STS) podporují pasivní metodu testování. Při této metodě je možné získat přehled o všech "always-on" DL signálech v oblasti pomocí automatické detekce kanálů (ACD), která zahrnuje dekodování informací o vysílacím kanálu a RF parametrech, jako je síla a kvalita signálu. Analyzovat lze také všechny signály základnových stanic (buňky a svazky). Pro pasivní testy pomocí síťových skenerů nejsou potřeba karty SIM.



Přehled základních funkcí:

- Přehled signálů – rychlá identifikace všech signálů na air interface s automatickou detekcí kanálů (ACD) a vysokorychlostním měřením 5G NR.
- Informace o signálech – analyzuje signály základnových stanic 5G (buňky a beams/svazky) s vysokou citlivostí a zjišťuje přítomnost dominantního signálu v každém místě, aby bylo možné zabránit interferencím mezi buňkami.
- Redukce nežádoucích interferencí – možnost ověřit synchronizaci sítě 5G TDD během drive testu 5G.

**Software QualiPoc Android** podporuje aktivní testy. To vyžaduje připojení k síti. Výkon sítě lze měřit z hlediska QoE nebo QoS, která zahrnuje datovou propustnost a latenci.

- QoE měření kvality sítě vnímané uživatelem – měření výkonu sítě z hlediska kvality aplikací QoS / QoE.
- test interaktivity – použití standardních testovacích metod (ITU-T G.1051) pro měření zpoždění při přenosu s různými vzorci provozu.



**Free Rider** – back pack určený pro walk test. Tento batoh může být vybaven jak scannery TSMx6, tak i MT QualiPoc android. V takovém případě umožňuje měřit QoS i QoE.



<sup>39</sup> zdroj: <https://www.rohde-schwarz.com/>

**FSH + optiony K15, K16,...** Spektrální analyzátor s rozšířeními pro monitorování spektra.

Společnost Rohde & Schwarz nabízí také software pro analýzu dat a monitorování kvality:

- Smart Bench Marker – software primárně určený pro drive test ve spojení s aplikací QualiPoc a počítačem pro sběr dat. Protějškem je SmartAnalytics software.
- SmartAnalytics – softwarová sada pro analýzu dat.
- SmartMonitor – software pro monitorování kvality a vyhodnocování drive testů.



Analytický software – **SmartAnalytics:**

- poskytuje QoE náhled na výkonnost mobilní sítě,
- poskytuje přesné vyhodnocení kvality vlastní sítě operátora tj. QoE z pohledu koncového uživatele a jeho konkurenčního postavení na trhu,
- analyzuje data RAN pro zlepšení QoE koncových uživatelů,
- upozorňuje na problémy s výkonností sítě a analyzuje jejich příčiny,
- průřezová analýza od makroúrovně až po buňky sítě.

**SmartMonitor** je webová aplikace, která v reálném čase poskytuje přehled o aktuální situaci v síti na základě dat ze sond QualiPoc Android.

- podporuje QualiPoc Android sondy, které lze nainstalovat do smartphonů značek Samsung, LG, HTC a Sony,
- data odesílaná ze sond QualiPoc Android jsou vizualizována na ovládacích panelech aplikace SmartMonitor a poskytují okamžitý přehled o kvalitě služeb a výkonnosti sítě z pohledu koncového uživatele,
- nákladově efektivní sledování stavu kvality služeb v reálném čase z pohledu koncového uživatele,
- pomáhá snižovat provozní náklady v terénu.

**Tektronix, INC.**

Společnost Tektronix<sup>40</sup> vytvořila řešení pro monitorování RF spektra založené na spektrálních analyzátoch řady RSA a Intel® NUC Mini PC.

**RSA306B USB Real Time Spectrum Analyzer**

- Frekvenční rozsah 9 kHz až 6,2 GHz pokrývá široký rozsah analýzy potřeb.
- Rozsah měření úrovně +20 dBm až -160 dBm.
- Třída odolnosti podle normy Mil-Std 28800 2 – prostředí, nárazy a vibrace, specifikace pro použití v náročných podmínkách.
- Rychlé měření – 2 za sekundu v celém rozsahu 6,2 GHz Šířka pásma snímání 40 MHz umožňuje širokopásmovou vektorovou analýzu moderních standardů.
- Minimální doba trvání signálu pouhých 15 µsec pro 100% pravděpodobnost zachycení.



**RSA500A Series USB Portable Spectrum Analyzer**

- Frekvenční rozsah 9 kHz až 3,0/7,5/13,6/18,0 GHz
- Šířka akvizitního pásma 40 MHz umožňuje analýzu v reálném čase pro zachycení přechodových dějů a vektorovou analýzu



<sup>40</sup> zdroj: <https://www.tek.com/>

- Vysokorychlostní snímání v celém rozsahu (70 GHz/s)
- Standardní přijímač GPS/GLONASS/Beidou pro mapování
- Volitelný tracking generátor pro měření zisku/ztrát, antén a kabelů
- Software DataVu-PC umožňuje záznam z více jednotek
- Třída odolnosti podle normy Mil-Std 28800 2 – prostředí, nárazy a vibrace, specifikace pro použití v náročných podmínkách
- Interní baterie pro delší provoz v terénu
- Software SignalVu-PC nabízí zpracování signálu v reálném čase pomocí DPX®
- Spectrum/Spectrogram, který minimalizuje čas strávený vyhledáváním přechodových jevů a rušení.

## Signal Hound

Americký výrobce měřicí techniky<sup>41</sup>, který má ve své nabídce ultra kompaktní spektrální analyzátoři.

**BB60C** je 6 GHz vysokorychlostní real time spektrální analyzátoři BB60D, v reálném čase přenáší 140 MB/s digitalizovaných RF dat do počítače prostřednictvím rozhraní USB 3.0, poskytuje okamžitou šířku pásma 27 MHz a přeladění s rychlostí až 24 GHz/s. Přidejte k počítači nebo notebooku vysokorychlostní pevný disk (trvalá rychlost zápisu 250 MB/s) a BB60D zdvojnásobí jako RF rekordér streamování až 80 milionů IF vzorků za sekundu nebo 40 milionů I/Q vzorků na disk.

- RF kmitočtový rozsah od 9 kHz do 6 GHz.
- Up to 24 GHz/sec sweep speed.
- Široký dynamický rozsah od -158 dBm do +10 dBm.
- RBW od 10 Hz do 10 MHz.
- Napájení výhradně přes USB.
- Software je součástí dodávky přístroje.
- Pro vývoj vlastních aplikací je k dispozici SignalHound API (Application Programming Interface).
- Digitized IF Data na 80 milionů vzorků za sekundu.
- 27 MHz okamžitá šířka pásma.
- Kompatibilní s operačními systémy Windows 7/8/10 64-bit.
- Komunikace přes USB 3.0 rychlostí 140 MB/sec.



**BB60D** obsahuje stejné funkce jako oblíbený model BB60C, ale nabízí o 10 dB větší dynamický rozsah a preselector filtry od 130 MHz do 6 GHz.

- 6 GHz vysokorychlostní real time spektrální analyzátoři BB60D v reálném čase přenáší 140 MB/s digitalizovaných RF dat do počítače prostřednictvím rozhraní USB 3.0, poskytuje okamžitou šířku pásma 27 MHz a přeladění s rychlostí až 24 GHz/s. Přidejte k počítači nebo notebooku vysokorychlostní pevný disk (trvalá rychlost zápisu 250 MB/s) a BB60D zdvojnásobí jako RF rekordér streamování až 80 milionů IF vzorků za sekundu nebo 40 milionů I/Q vzorků na disk.
- Analýzu spektra lze s BB60D provádět pomocí našeho vlastního rozhraní pro programování aplikací (API), které dokáže provést za sekundu až 1,2 milionu FFT spekter nebo 320 milionů FFT bodů, a odesílat realtime spectrum data do grafické aplikace Spike nebo do vaší vlastní softwarové aplikace.



<sup>41</sup> zdroj: <https://signalhound.com/>

**SP145** je spektrální analyzátor a monitorovací přijímač v reálném čase na frekvenci 14,5 GHz s rychlostí snímání až 200 GHz/s, šířkou pásma 40 MHz, zobrazeným průměrným šumem -160 dBm a interním GPS pro lepší měření v terénu.

**Spike** je software pro spektrální analyzátorů Signal Hound, který je kompatibilní s celou řadou spektrálních analyzátorů a sledovacích generátorů Signal Hound. Spike poskytuje plné ovládání zařízení, konfigurovatelné zobrazení spektrogramu a uživatelské rozhraní a řadu analytických režimů. Spike je dokonalou aplikací pro výkonnou a cenově dostupnou RF analýzu.



**EXFO Inc.**<sup>42</sup>

### EXFO 5GPRO spektrální analyzátor

- Měření pásma FR1 (sub 6 GHz) 450MHz – 6GHz.
- Měření pásma FR2 (mmWave ) 24,25 GHz – 40GHz.
- Analýza spektra v reálném čase (RTSA), šířka pásma až 100 MHz.
- Analýza demodulace a tvoření svazku pro 5G NR (New Radio).
- Modulární měřicí přístroj.
- Kompletní a kompaktní řešení pro validaci 4G a 5G sítí.
- Navržen a zkonstruován pro potřeby techniků a praktická měření.



### EXFO FTB 5GPRO testovací řešení pro 5G mobilní síť

- Plně automatizovaný software iORF pro detekci RF interferencí a PIM.
- Měření pásma FR1 (sub 6 GHz) 450MHz – 6GHz.
- Měření pásma FR2 (mmWave ) 24,25 GHz – 40GHz.
- Analýza spektra v reálném čase (RTSA), šířka pásma až 100 MHz.
- Podpora SyncE, 1588-PTP a Wander/TE pro validace synchronizace a časování.
- GNSS/GPS modul.
- Modulární měřicí přístroj.
- Testování s využitím BER a QoS (např. zpoždění).
- Kompaktní řešení pro validaci 4G a 5G sítí.



### Výrobci UE / MT

Nedílnou součástí testovacího řetězce jsou výrobci UE / MT (User Equipment / Mobile Terminal), neboť na jejich HW je nezbytně nutný pro testy především QoE, Walk testy atp.

Problematika týkající se vztahu UE a testovacích aplikací však přesahuje rámec této studie a proto uvádíme pouze několik vybraných aspektů:

- Vlastní aplikace a úprava FW UE / MT je zvládnutá na velice dobré úrovni.
- Relativně malý počet UE / MT, které lze připojit do monitorovacích aplikací – většinou se jedná o počty nižších desítek kusů.

<sup>42</sup> zdroj: <https://www.exfo.com/>

- Pro některé testy je zapotřebí kombinovat více různých typů a výrobců UE s ohledem na použitý procesor.
- Možnost / nemožnost kalibrace parametrů UE / MT – „kalibrace“ popř. ověření parametrů UE / MT např. v závislosti na teplotě je náročná na měřicí techniku, protože vyžaduje test bed, anténní coupler a stíněnou komoru.
- Závislost parametrů UE / MT na vnějších vlivech – např. výkon jádra.

## 4.4.2 Stav využití dronů u operátorů v ČR

Pro účely této studie byly provedeny rozhovory s mobilními operátory v ČR (CETIN a.s./O2 Czech Republic a.s., T-Mobile Czech Republic a.s., Vodafone Czech Republic a.s.). Na základě nich lze konstatovat následující.

Drony pro měření parametrů sítí mobilních operátorů jsou v České republice omezeně využívány. Pouze jeden z operátorů má vlastní dron, včetně vhodné měřicí techniky a k němu vlastní vyškolený personál. Zbylí dva operátoři využívají služeb dodavatelských firem. Současný stav zrcadlí na straně jedné investiční náročnost při pořízení dronu, vhodné měřicí techniky a kvalifikovaného personálu, a na straně druhé administrativní překážky související s provozem dronu.

Výrazným zlepšením situace by mohla být úprava omezení daná Úřadem pro civilní letectví pro používání dronů. Drony používané mobilními operátory by mohly spadat do stejné kategorie, jako drony provozované PČR, HZS, kde je uplatňována výjimka letů nad budovami a jejich okolím. Obdobně by pomohlo upravit i platné předpisy pro provozování dronů v městských aglomeracích. Ohrožení leteckého provozu drony v těchto oblastech jsou minimální, jelikož maximální smysluplná výška letu přesahuje výšku zástavby jen o jednotky metrů.

Drony jsou nejvíce využívány k predikcím tzv. bílých míst, pro porovnání dat a pokrytí s konkurencí nebo k ověření splnění rozvojových kritérií. Doplnkově je operátoři také využívají v malé míře jako alternativu k tzv. walk testům, především k řešení specifických účelů, jako jsou např. reklamace zákazníků.

## 4.5 Dílčí závěry

Drony pro měření parametrů sítí mobilních operátorů jsou v České republice omezeně využívány. Pouze jeden z operátorů má vlastní dron včetně vhodné měřicí techniky a k němu vlastní vyškolený personál. Zbylí dva operátoři využívají služeb dodavatelských firem. Současný stav zrcadlí na straně jedné investiční náročnost pořízení dronu, vhodné měřicí techniky a kvalifikovaného personálu, a na druhé straně administrativní překážky související s provozem dronu.

V platné legislativě chybí výjimky pro vybrané státní orgány a instituce (nevztahuje se na PČR a HZS). U ČTÚ by existence výjimek pro provádění měřících letů, napomohla k efektivní kontrole kmitočtového spektra. Je například nevhodné žádat o souhlas s provozem dronu majitele pozemku, který má na svém pozemku zdroj RF rušení, neoprávněnou vysílací stanici nebo stanici vysílající mimo přidělená pásma. Praxe ukazuje, že takovéto kontroly jsou pak bezpředmětné.

Dron vybavený měřicí technikou je vhodný a velmi efektivní doplněk k drive testům nebo walk testům mobilních bezdrátových sítí. K dispozici jsou různá měřidla a různé měřicí metody pro různé parametry. Přehled sledovaných parametrů a měřidel je podrobně uveden v kapitole 5. Další postup v této oblasti by měl mít za cíl získat další soubor nebo mnohem větší soubory naměřených dat a rozšířit množinu získaných dat. Důležité je porovnat zkušenosti s jejich získáváním, vyhodnotit také praktické provedení a náročnost testů, porovnat data a doporučit vhodnou metodu. Jsme teprve na začátku využití dronů pro účely mapování sítí mobilních operátorů.

Obecně lze provozní požadavky na dron shrnout jako požadavky na maximální dobu letu, maximální odolnost vůči povětrnostním vlivům, maximální nosnost a minimální cenu.

Požadavky na měřicí přístroje vycházejí z měřících úloh a z nosnosti použitého dronu. Při volbě konkrétního přístroje a UE je nutné věnovat pozornost nejen jeho funkcím, ale také provedení a konstrukci, protože obvykle dostupné přístroje a UE nejsou primárně určeny pro nasazení v dronech. Většina výrobců má ve svém portfoliu i potřebné příslušenství k měřícím přístrojům, jako jsou různé typy antén, RF měřicí kabely atp. Výjimkou jsou kompletní systémy např. od firem Nokia Drone Networks a Deviser, kdy je dron dodáván se zintegrováním měřícím systémem.

Ve využívání dronů pro měření parametrů radiového pokrytí však platí, že drony jsou stále populárnějším nástrojem pro různé aplikace a komerční činnost. Pro provozování dronů v EU platí harmonizovaná pravidla, která jsou nyní aplikována ve všech členských státech EU.

# 5 Využití vyspělých simulačních modelů a technik založených na strojovém učení

## 5.1 Teoretická východiska

### 5.1.1 Metody strojového učení

Strojové učení je nedílnou součástí umělé inteligence (AI). Speciální podkategorií strojového učení je hluboké učení (DL), které využívá neuronové sítě s mnoha vrstvami ke zpracování velkého množství dat (big dat), která jsou rozmanitá, přichází ve velkých objemech a s velkou rychlostí. Pro řešení problémů představovaných v této studii je relevantní tzv. úzká umělá inteligence (ANI), která dokáže rozpoznávat vzory, učit se z dat, rozhodovat atd. Strojové učení využívá algoritmy, které se autonomně učí na souborech dat a jsou schopné předvídat výsledky a klasifikovat informace na základě autonomního učení. Modely strojového učení také zpřesňují svoji predikci na základě získaných zkušeností.

V oblasti modelování pokrytí radiovým signálem má strojové učení potenciál vylepšit přesnost a efektivitu. Přináší nové možnosti pro simulaci pokrytí radiovým signálem a může také vést k výrazně lepším výsledkům při vlastní komunikaci a přenosu dat radiovými kanály. Zde jsou uvedeny některé oblasti, kde se strojové učení uplatňuje:

- **Analýza dat** – Strojové učení může analyzovat velké množství dat o zdrojích signálu, použitých frekvencích, terénní konfiguraci, překážkách a dalších faktorech. Na základě těchto analýz lze vytvořit sofistikovanější modely pokrytí. Lze využít existujících zdrojů dat ověřených např. měřeními a na základě podobnosti odhadovat pokrytí v jiné oblasti, jiných frekvenčních pásmech či jinak konfigurovaných zdrojů signálu.
- **Predikce interferencí** – Strojové učení může lépe odhadovat místa, kde dochází k interferencím mezi signály, a to signály jedné sítě a operátora, ale i mezi sítěmi různých operátorů, nebo i signály rozdílných typů služeb. To umožňuje lepší radiové plánování, minimalizaci rušení a dá se promítnout i do predikce pokrytí (interference mohou omezit reálný provoz služeb v potřebné kvalitě).
- **Adaptivní řízení výkonu a přidělování radiových prostředků** – Algoritmy strojového učení mohou dynamicky upravovat výkon vysílačů, přidělovat části spektra, časové intervaly, směrovat paprsky apod. na základě aktuálních podmínek. To pomáhá optimalizovat pokrytí, využití radiových zdrojů, zvyšovat kvalitu služby a snižovat spotřebu energie.
- **Optimalizace umístění vysílačů** – Algoritmy strojového učení mohou analyzovat data o signálu, terénu a umístění antén. Na základě těchto informací mohou navrhnout optimální umístění vysílačů pro maximální pokrytí, nebo minimalizovat náklady pro požadované pokrytí.

Příklady algoritmů strojového učení, které se používají pro modelování pokrytí radiovým signálem:

- **Regresivní modely:**
  - **Lineární regrese:** Modeluje vztah mezi vstupními a výstupními proměnnými. Může být použit pro predikci úrovně signálu na základě různých faktorů.
  - **Polynomiální regrese:** Rozšiřuje lineární regresi na polynomiální funkce.
  - **Support Vector Regression (SVR):** Používá se k modelování nelineárních vztahů.
- **Klasifikační modely:**
  - **K-Nearest Neighbors (K-NN):** Klasifikuje místa na základě podobnosti s okolními body.

- Random Forest: Soubor stromů rozhodování, které se používají k predikci úrovně signálu.
- Neuronové sítě:
  - Feedforward síť: Můžou modelovat komplexní vztahy mezi vstupy a výstupy.
  - Rekurentní neuronové sítě (RNN): Umožňují modelovat časovou závislost signálu.
- Genetické algoritmy:
  - Optimalizují parametry modelu na základě evolučních principů.
- Particle Swarm Optimization (PSO):
  - Optimalizuje parametry modelu na základě chování hejna částic.

V praxi je důležité vybrat algoritmus na základě specifických požadavků a dostupných dat. Každý z těchto algoritmů má své vlastní výhody a omezení. V konkrétních komerčně dostupných aplikacích se využívají různé algoritmy pro modelování a jejich kombinace.

## 5.1.2 Další pokročilé metody modelování pokrytí

Velice slibnou pro modelování pokrytí se jeví metoda „ray-tracing“. Jde o model, který vyniká extrémní rychlostí s dostatečnou přesností, kterou lze zlepšit využitím ML/AI. Využívá se zkušeností se zpracováním 3D grafiky a přesných 3D modelů terénu. Zatím metoda není ověřena pro sítě 5G/6G, ale dá se očekávat její přínos, včetně možnosti uplatnění ve venkovním prostředí (zejména hustě zastavěné oblasti). Modelování Wi-Fi a RFID viz článek<sup>43</sup>. Stručný popis metody:

- Přesnost: metoda dosahuje přesnosti srovnatelné s jinými pokročilými 3D metodami, jako je MR-FDPF, s průměrnou odchylkou mezi 5 a 8 dB. To je akceptovatelné pro většinu scénářů predikce šíření signálu ve vnitřních prostorech, a zajišťuje spolehlivé výsledky i ve složitějších prostředích.
- Rychlost: Metoda nabízí výrazně vyšší rychlost simulace než jiné 3D modely, jako jsou metody SRT nebo SBR, které mohou trvat hodiny. Naše metoda zvládne simulaci v řádu desítek sekund až minut v závislosti na zvoleném rozlišení heatmapy (např. 2 až 5 cm/pixel), což je velká výhoda v časově citlivých aplikacích.
- Optimalizace pro komplexní prostředí: Využití pokročilých technik ray tracingu a globálního osvětlení z oblasti počítačové grafiky umožňuje modelování komplexních prostředí s vysokou mírou přesnosti. Tato metoda zahrnuje vliv různých materiálů a překážek, jako jsou zdi, okna nebo interiérové prvky, což umožňuje realističtější simulace v náročných podmínkách.
- Vhodnost pro indoor aplikace: Metoda je obzvláště vhodná pro simulaci bezdrátových technologií, jako jsou Wi-Fi nebo 5G v prostředích s komplikovanou architekturou, typicky vnitřních prostorách. Její flexibilita a přizpůsobivost ji činí ideální pro projekty zahrnující kancelářské prostory, domácnosti či průmyslové objekty.
- Úskalí a omezení: Přestože je tato metoda rychlejší než jiné 3D simulace, zůstává výpočetně náročnější než jednodušší 2D modely (např. empirický model COST 231). Nicméně, její hlavní výhodou je možnost jemného ladění poměru mezi rychlostí a detailností simulace, což umožňuje optimalizovat proces podle konkrétních požadavků na přesnost a časovou náročnost. Další zpřesnění lze čekat v oblasti zpracování obrazu, tj. heatmap pomocí ML/AI.

## 5.2 Současný stav

Mobilní sítě páté generace představují významný pokrok v telekomunikacích díky své schopnosti poskytovat výrazně vyšší rychlosti, nižší zpoždění a vyšší kapacitu sítě. Tyto inovace otevírají dveře širokému spektru aplikací, jako je autonomní doprava, inteligentní městské systémy, průmyslová automatizace nebo masivní připojení IoT zařízení. S tímto rozvojem přichází i potřeba sofistikovanějších simulačních modelů. S jejich přispěním je možné plně využít potenciál těchto sítí a zajistit jejich spolehlivý provoz. Tyto modely umožňují operátorům a vyvojářům přesně předvídat chování sítě v různých podmínkách,

<sup>43</sup> zdroj: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10557547>

testovat nové technologie a optimalizovat výkonnost sítí 5G ještě před jejich nasazením do reálného provozu. Díky nim lze lépe porozumět vlivům proměnných faktorů, jako jsou topologie sítě, pohyblivost uživatelů, různé typy rušení, dynamické přidělování zdrojů a také interakce mezi novými technologiemi, což vede k efektivnějšímu plánování a zvyšování kvality služeb pro koncové uživatele.

## 5.2.1 Vybraná řešení dostupná na trhu

V současnosti je na trhu velké množství aplikací profesionálních firem specializujících se na tuto oblast. Mimo to jsou zde i produkty pocházející např. z vědecké a univerzitní oblasti. Tyto produkty jsou většinou typu „freeware“ včetně všech problémů a výhod, a proto se jim nebudeme dále věnovat.

### Actix International Ltd. / Amdocs Ltd.

Od roku 2013 je Actix součástí společnosti Amdocs. Actix Analyzer je multi-vendor desktopové řešení pro následné zpracování dat z drive testů a walk testů. Actix Analyzer obsahuje nástroje pro analýzu bezdrátové sítě a výkonu zařízení, akceptaci, benchmarking a optimalizaci.

**Amdocs Drive Test Analysis, Suite by Actix<sup>44</sup>** je pokročilý softwarový nástroj určený pro analýzu a optimalizaci výkonu mobilních sítí včetně sítí 5G NR.

Aplikace umožňuje definovat KPIs (Key Performance Indicators) pro QoS / QoE služeb a zájmových událostí. Umožňuje provádět analýzy pracovních postupů pro zefektivnění testování technologií a služeb. Lze sdílet výsledky a závěry definovaných postupů a procesů se širším týmem. Disponuje nástroji pro vizualizaci výsledků s využitím šablon sestav a filtrů.

### Atoll3.5 – Forsk S.A.S.

Atoll disponuje modulární architekturou, která umožňuje přizpůsobení konfiguracím, technologiím a funkčním požadavkům mobilních operátorů.

Moduly Atollu:

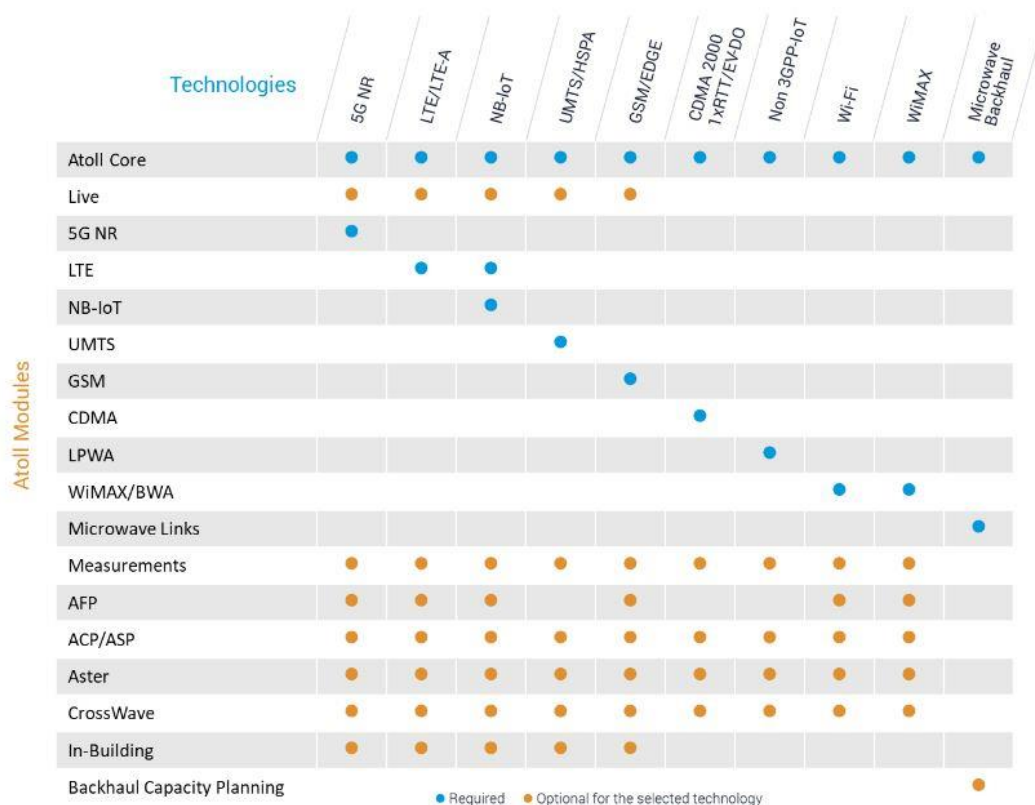
- **Atoll Core** – modul podporující uživatelské rozhraní, funkce GIS, modelování šíření, služby správy dat a rozhraní.
- **Atoll Live a Atoll Automatic Cell Planning** – modul pro kombinaci jednak provozních dat mobilní sítě, jako jsou plněné KPI, parametry UE/buněk/MDT, dále dat získaných z crowdsourcingu a pro kombinaci především s daty, které jsou výsledkem predikce budoucího stavu. Modul díky tomu dále rozšiřuje přesnost nástroje Atoll. Pomocí modulu Live může Atoll Automatic Cell Planning využívat provozní data sítě pro procesy výběru, optimalizace a konfigurace lokalit.
- **Atoll In-Building** – modul pro návrh vnitřních bezdrátových sítí.
- **Atoll Microwave** – je komplexní software (soubor modulů) pro plánování páteřních a přenosových sítí. Je založen na platformě Atoll Core a lze jej integrovat s konfiguracemi pro plánování rádiových sítí Atoll. Atoll Microwave zahrnuje pokročilé modelování LOS a zahrnuje funkce nLOS/NLOS pro backhaul malých buněk.
- **Aster a Aster mmWave Propagation Model** – jsou moduly pro pokročilé modelování šíření signálu, včetně vícenásobného šíření a výpočtů pro kmitočtová pásma pod/nad pásmem 6 GHz.
- **Crosswave Propagation Model** – je univerzální model šíření vyvinutý společností Orange Labs. Podporuje modelování pro všechny bezdrátové technologie a všechny typy prostředí, od venkovských oblastí až po hustě osídlené městské oblasti.

Dále uvedená tabulka<sup>45</sup> ukazuje moduly vhodné pro jednotlivé technologie. Pro plánování projektů s více technologiemi lze v jedné konfiguraci Atoll kombinovat i několik modulů.

---

<sup>44</sup> zdroj: [www.actix.com](http://www.actix.com), [www.amdocs.com](http://www.amdocs.com)

<sup>45</sup> zdroj: <https://www.forsk.com/>



### Infovista Technologies, Inc. – TEMS<sup>46</sup>

**TEMS** – je produkt společnosti Infovista Technologies, Inc. pro testování mobilních sítí operátory a výrobci infrastruktury. Produkt kombinuje orchestraci, analytické nástroje a systém více režimového testování sítě. K dispozici je:

- **TEMS Investigation** – slouží k provádění drive testů pro ověření, optimalizaci a řešení problémů se napříč všemi mobilními technologiemi.
- **TEMS Pocket** – slouží k provádění walk testů ve vnitřních prostorech a testování v těžko přístupných místech pomocí dronů.
- **TEMS Paragon** – slouží k zefektivnění provozu mobilní sítě a provádění srovnávacích kampaní.
- **TEMS Director** – slouží pro ovládání, správu / řízení měřících sond TEMS a analýzu dat v reálném čase.
- **TEMS Sense** – slouží k proaktivnímu monitorování bezdrátových síťových služeb end-to-end s aktivním testováním.
- **TEMS Discovery** – slouží ke zpracování dat z testování sítě, tvorbu analýz a statistik využitelných pro optimalizaci.

Produkt TEMS umožňuje zefektivnit činnosti všech oblastí, které se týkají provozování mobilní sítě, tj. plánování, výstavbu sítě, provoz, správu a řízení.

### iBwave Solutions Inc.<sup>47</sup>

- **iBwave Design** je softwarový nástroj pro návrh bezdrátových sítí v interiérech i exteriérech, včetně složitých bezdrátových sítí, Wi-Fi sítí, DAS (Distributed Antenna Systems), malých buněk a sítí 5G. Funkcionalita nástroje dovoluje, mimo modelování šíření signálu a predikce pokrytí, i analýzu rušení a dovoluje integrovat i data z reálných měření v terénu, pro

<sup>46</sup> zdroj: <https://www.infovista.com/>

<sup>47</sup> zdroj: <https://www.ibwave.com/>

zprecizování simulací. Umožňuje provádět optimalizaci umístění antén, nastavení výkonu a určovat další klíčové parametry pro zajištění optimální činnosti sítě.

- **iBwave Unity Integration** je nástroj pro správu, synchronizaci a sdílení datových sad, vytvořených komponent a modelů i celých projektů, napříč týmem.
- **iBwave Mobile Integration** je nástroj integrovaný do iBwave Design, který umožňuje zefektivnit proces návrhu bezdrátové sítě, od fáze prohlídky místa až po finální dodání návrhu. Předběžný návrh v zájmové oblasti lze vytvořit na základě reálně získaných dat a následnou finalizaci provést se zohledněním dalších informací, z okolních oblastí nebo vyšších úrovní již existující sítě, pomocí aplikace iBwave Design.
- **iBwave Viewer** je bezplatná zjednodušená verze, prohlížeč iBwave Design, pro prohlížení hotových návrhů, návrhů s predikcí ve 3D a spouštění vlastních výstupních sestav.

Produkt má flexibilní způsob licencování jednotlivých komponent, nabízí přístup k pokročilým funkcím, které urychlují a zvyšují kvalitu výsledného návrhu, využití snižuje náklady spojené s výstavbou a provozem sítě. A to i pro lokální sítě v náročných prostředích, jako jsou velké budovy, stadiony či podzemní prostory.

#### **HCM-Agreement – Harmonized Calculation Method<sup>48</sup>**

HCM Agreement je oficiální označení dohody mezi správními orgány států Rakouska, Belgie, České republiky, Německa, Francie, Maďarska, Nizozemska, Chorvatska, Itálie, Lichtenštejnska, Litvy, Lucemburska, Polska, Rumunska, Slovenskou republikou, Slovinska a Švýcarska, o koordinaci kmitočtů v pásmu mezi 29,7 MHz a 43,5 GHz pro pevnou službu a pozemní pohyblivou službu. Z této dohody vychází HCM model výpočtu přeshraničního rušení, který má značný vliv na využitelné spektrum v příhraničních oblastech. Příklad: Spectrum allocation v lokalitě kde se stýkají hranice 2, 3, 4 zemí: 2 countries = 50%, 3 countries = 33.3%, 4 countries = 25%.

#### **Huawei Technologies Co., Ltd.<sup>49</sup>**

- **Huawei – Omstar** je integrovaná softwarová platforma pro správu a optimalizaci mobilních sítí. Nástroj kombinuje několik klíčových modulů, které podporují činnost operátorů při zajišťování kvalitního provozu a efektivní správy sítí, včetně diagnostiky, testování a analýzy výkonu.
- **Huawei Genex Probe & Assistant** jsou nástroje, které slouží k testování a optimalizaci mobilních sítí. Huawei Genex Probe je výkonný nástroj pro měření parametrů a výkonu mobilních sítí (síla signálu, datová propustnost, latence, handover performance apod.) Genex Probe se obvykle používá ve spojení se softwarem Huawei Genex Assistant, který uživatelům umožňuje analyzovat data z testů a vytvářet hodnotící zprávy.
- **Probe** je software pro testování rádiového rozhraní. Prostřednictvím Probe lze vyhodnocovat výkonnost sítě, provádět optimalizaci sítě a odstraňovat závady. Shromážděná testovací data z rádiového rozhraní lze ukládat do standardizovaných výstupů pro využití dalších SW komponentách nebo pro post processing.
- **Huawei FMA** - Fault Management Assistant je modul pro kolektování a správu poruch v síti, pro rychlou identifikaci a diagnostiku problémů, automatické monitorování a vytváření reportů o závadách v síti.
- **Vnet** je nástroj určený pro vizualizaci a simulaci virtuálních síťových prostředí. Pomocí Vnetu lze vizualizovat topologii sítě, simulovat změny a analyzovat dopady nových technologií, jako je zavádění 5G, nebo nový typů síťových architektur. Vnet umožňuje lepší plánování kapacity a efektivní správu síťových zdrojů, což vede ke zlepšení celkového výkonu sítě.

Společně tyto nástroje poskytují komplexní platformu pro optimalizaci a správu mobilních sítí, která operátorům umožňuje efektivněji plánovat, monitorovat a zlepšovat kvalitu poskytovaných služeb.

---

<sup>48</sup> zdroj: <https://www.hcm-agreement.eu/>

<sup>49</sup> zdroj: <https://carrier.huawei.com/>

## Keysight Technologies, Inc.<sup>50</sup>

**Nemo Analyze Drive Test Post Processing Solution** - Nemo Analyze je desktopové řešení pro analýzu dat z produktů Nemo. Nemo Analyze slouží k provádění postprocesingové analýzy, řešení problémů a tvorbě statistických výkazů založených na datech získaných z nástrojů Nemo.

- rychlý a efektivní post-processing a analýza dat z drive testů, drone testů.
- poskytuje kompletní automatizovaný řetězec zpracování dat s dalšími nástroji Nemo od sběru surových dat z měření až po automaticky generované výsledky ve formátu pracovního sešitu.
- vizualizace dat s plně uživatelsky přizpůsobitelnými, časově synchronizovanými vícestránkovými sešity a komplexní sadou náhledů a zobrazení dat, včetně map, sítí, spojnicových grafů, sloupcových grafů, koláčových grafů, plošných sítí, barevných sítí a tabulek.
- 3D vizualizace 5G NR testovacích dat a sektorů.
- uživatelsky plně přizpůsobitelné nastavení KPIs a reportů.
- vizualizace dat ve webových mapách, Google Maps a OpenStreetMap.
- různorodé možnosti tvorby reportů od okamžitých reportů až po reporty kompatibilní s MS Excel.
- komplexní reporty založené na CDR off-the-shelf dostupné pro hlas a data s podporou technologií od GSM po VoLTE, LTE 8CC a 5G NR.
- nejlepší up-to-date podpora dat z měřicích nástrojů Nemo.

## RadioLab – CRC Data spol. s r.o.<sup>51</sup>

CRC Data je ryze česká společnost dodávající software, technologie a služby v oblasti výpočetní techniky, sítí a internetu a poskytující vlastní softwarová řešení v řadě oblastí (radiokomunikace, informační systémy, technologické systémy, jazyková podpora a další).

Společnost se zaměřuje na vývoj, dodávky a správu softwarových řešení, mezi kterými dominují radiokomunikační výpočetní systémy. Jejich systémy používají např. ČTÚ, Telefonica O2 Czech Republic, a.s., T-Mobile Czech Republic a.s., ÚCL, a další.

Jedná se o soubor aplikací a nástrojů pro výpočetní podporu úloh analýzy šíření rádiových signálů, vyhodnocení důležitých kritérií radiokomunikačních služeb a návrh a optimalizaci sítí rádiových prostředků. Řešení požadavků od základních úloh typu detailní analýza terénního profilu včetně zobrazení dráhy paprsku na mapách nebo výpočet a zobrazení rádiové viditelnosti až po úlohy velké dimenze jako např. vyhodnocení kritérií kvality pokrytí pro sítě digitální televize nebo celulárních sítí.

### RadioLab 4

Výpočetní systém pro analýzu a vizualizaci šíření rádiových signálů nad zemským povrchem zahrnující analýzu terénního profilu, výpočet útlumů šíření signálu, výpočet rádiové viditelnosti a radarové dohlednosti a výpočty plošného rozložení intenzity elmag. pole.

- Modely šíření – RadioLab 4 obsahuje řadu modelů šíření jak podle doporučení ITU tak modely vzniklé v TESTCOM nebo CRC Data. Vedle těchto modelů obsažených v základní instalaci jsou k dispozici modely šíření ITU P.1812, ITU P.526 a brzy též ITU P.2001.
- RadioLab Aplikace – Nabízí širokou škálu funkcí od komplexních výpočetních úloh, přes správu různých typů datových objektů, až po prezentační nástroje.

---

<sup>50</sup> zdroj: <https://www.keysight.com/>

<sup>51</sup> zdroj: <https://www.crcdata.cz/>

## Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG<sup>52</sup>

### SmartAnalytics – analytický software:

- poskytuje QoE náhled na výkonnost mobilní sítě.
- poskytuje přesné vyhodnocení kvality vlastní sítě operátora, tj. QoE z pohledu koncového uživatele a jeho konkurenčního postavení na trhu.
- analyzuje data RAN pro zlepšení QoE koncových uživatelů.
- upozorňuje na problémy s výkoností sítě a analyzuje jejich příčiny.
- průřezová analýza od makroúrovně až po jednotlivé buňky sítě.

**SmartMonitor** je webová aplikace, která v reálném čase poskytuje přehled o aktuální situaci v síti na základě dat ze sond QualiPoc Android.

- podporuje QualiPoc Android sondy, které lze nainstalovat do smartphonů značek Samsung, LG, HTC a Sony
- data odesílaná ze sond QualiPoc Android jsou vizualizována na ovládacích panelech aplikace SmartMonitor a poskytují okamžitý přehled o kvalitě služeb a výkonnosti sítě z pohledu koncového uživatele
- nákladově efektivní sledování stavu kvality služeb v reálném čase z pohledu koncového uživatele
- pomáhá snižovat provozní náklady v terénu

**NESTOR** je analytický software pro mobilní sítě. Aplikace řídí síť skenerů mobilních sítí a analyzuje, vyhodnocuje a vizualizuje naměřené výsledky. NESTOR umožňuje provádět analýzy v reálném čase během sběru dat a zápisů naměřených dat s následnou hloubkovou analýzou. Jeho aplikačně orientované uživatelské rozhraní umožňuje intuitivní ovládání i pro složité úlohy orgánů veřejné správy. Tyto informace umožňují orgánům získat přehled o dostupných sítích a o jejich pokrytí. Systémy mohou určovat polohu buněk, detekovat nesprávně nakonfigurované základnové stanice a dokonce pomáhat v průběhu forenzního vyšetřování.

**ROMES** je univerzální softwarová platforma pro optimalizaci sítí. V kombinaci s dalšími testovacími a měřicími přístroji, jako jsou RF komunikační skenery a testovací mobilní telefony, poskytuje řešení pro všechny základní úlohy spojené s měřením pokrytí, vyhledáváním interferencí, měřením výkonu a analýzy kvality v mobilních sítích. Kromě měření a zobrazení testovacích parametrů jsou data okamžitě zpracována a statistické údaje se vypočítávají v reálném čase. Je určen pro sítě od 2G až po nejnovější 5G technologie. Další předností softwaru je jeho schopnost vizualizovat výsledky měření pomocí map a grafů, což umožňuje snadnou identifikaci problémových oblastí, jako jsou zóny s rušením, slabým signálem nebo přetížením. ROMES podporuje také analýzu kvality datových služeb, včetně hlasových a datových přenosů.

## SIRADEL<sup>53</sup>

Volcano ML, je nová verze modelu šíření Volcano založeného na technice strojového učení.

Model Volcano ML disponuje dostatečným výkonem a schopností pracovat ve všech předemných frekvenčních pásmech. Umožňuje výrazně snížit počet modelů šíření potřebných k pokrytí měst a zajišťuje velmi vysokou míru jistoty ohledně přesnosti výsledků modelování.

Společnost SIRADEL řadu let shromažďuje výsledky měření v mnoha zemích a prostředích, ve všech frekvenčních pásmech a využívá tyto výsledky k ladění modelů šíření tak, aby splňovaly cíle telekomunikačních operátorů v oblasti přesnosti pokrytí. Model Volcano ML poskytuje rozsáhlý zdroj znalostí o tom, jak se rádiové signály šíří v různých reálných podmínkách.

---

<sup>52</sup> zdroj: <https://www.rohde-schwarz.com/>

<sup>53</sup> zdroj: [siradel.com](http://siradel.com), [infovista.com](http://infovista.com)

## 5.2.2 Nástroje používané operátory v ČR

Pro účely této studie byly provedeny rozhovory s mobilními operátory v ČR (CETIN a.s./O2 Czech Republic a.s., T-Mobile Czech Republic a.s., Vodafone Czech Republic a.s.). Na základě nich lze konstatovat následující:

- Všichni operátoři používají modely a aplikace pro plánování, výstavbu, simulaci a analýzu, především od firmy Forsk – Atoll, Aster a Siradel – Vulcano.
- Odchytky mezi výsledky získaných ze simulací v porovnání s reálně změřenými hodnotami existují a jsou vysvětlovány především omezeným rozlišením a přesností modelu terénu a samozřejmě nestálostí fyzikálních parametrů prostředí.
- Operátoři vidí hlavní příčinu rozdílů v používaných modelech terénu a dále např. ve zjednodušených modelech HCM, které nezrcadlí dnešní výpočetní možnosti.
- Platná legislativa vyžaduje striktní dodržování povolených a licenčních kritérií a nezohledňuje např. fyzikální podmínky a klimatické podmínky působící v průběhu měření a ověřování kritérií.

Z pohledu jak operátorů, tak i ČTÚ by mohla být vhodným řešením úprava platné legislativy a vytvoření veřejně dostupného "referenčního" modelu terénu vypracovaného ve spolupráci s ČÚZK.

## 5.2.3 Nástroje využívané v rámci činnosti ČTÚ

Český telekomunikační úřad používá v současné době pro modelování pokrytí systém RadioLab. Tento systém používají i operátoři Telefónica O2 Czech Republic, a.s., T-Mobile Czech Republic a.s., ÚCL a další subjekty.

Český telekomunikační úřad provádí veškerá svoje měření ve venkovních prostorách. Získaná data ze simulací a z měření sítí v terénu jsou vizualizována na VPortálu na adrese <https://Vportal.ctu.cz>. VPortál slouží k validaci, ukládání, vizualizaci a sdílení dat. Je zpracován a rozvíjen v souladu s pravidly pro design webů veřejné zprávy Ministerstva vnitra ČR.

ČTÚ v současné době využívá tyto nástroje pro měření a ověřování parametrů sítí:

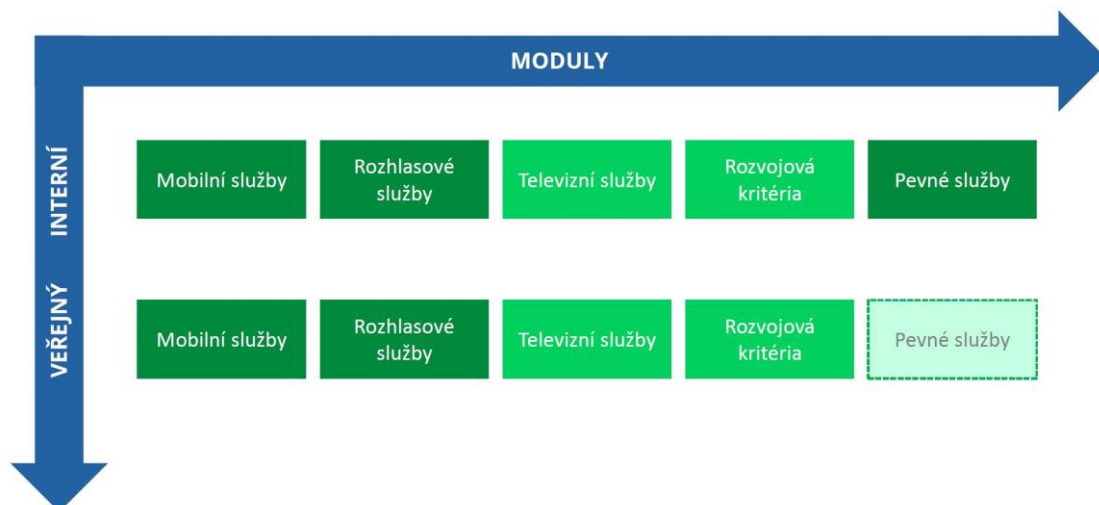


(zdroj: ČTÚ, ing. K. Holek)

VPortál obsahuje především tyto informace:

- Výsledky výpočtů pokrytí.
- Data získaná z měření.
- Vyhodnocení dat nad mapou.
- Přehled o plnění rozvojových kritérií.
- Stížnosti veřejnosti a další.

VPortál je rozdělen na část interní a veřejnou. Obě tyto části se dále dělí na moduly.



(zdroj: ČTÚ , ing. K. Holec)

Data mohou být zobrazována nad mapovými podklady nebo mohou být exportována v datovém formátu. Podkladová mapa umožňuje zobrazení vrstev jako jsou například základní a letecká vrstva, vrstva obsahující adresní místa, vrstva umožňující zobrazení výškových profilů atp.

Pro mobilní služby si lze zvolit tyto parametry:

- Zobrazení.
- BTS (Base Transceiver Station).
- Měření.
- Vyhodnocení.
- Operátor.
- Technologie, Pásmo.
- Oblast.
- Hodnota.
- Kritérium.
- Souřadnicový systém.
- Formát dat.

Po nastavení parametrů výběru a zobrazení FME server zasílá odkaz ke stažení výsledku na vyplněný e-mail.

Existují rozdíly mezi interní a veřejnou verzí stahování dat z VPortálu.

(zdroj: ČTÚ , ing. K. Holek)

VPortál je budován jako otevřený systém s výhledem dalších rozšíření do budoucna. V současné době je plánováno v krátkodobém období rozšíření a doplnění vybraných modulů a v dlouhodobém období je počítáno s vývojem dalších nových modulů:

<b>Krátkodobé</b>	Modul Pevné služby	Dokončení modulu Rozvojová kritéria	Rozšíření funkcí výškového profilu	Rozhlasové služby
	Importy měření - automatizace	Propojení se srovnávacím nástrojem	Varianty útlumu ve vagónech	Vyzařovací diagram dle měření

<b>Dlouhodobé</b>	Sumarizace na AM pro širokou veřejnost	Stížnosti na pevné služby	INSPIRE	Pokrytí POI
	Modul RLAN	Simulace pokrytí pro jednotlivé BTS/vysílače	Využití DTM	Vyhodnocení dle měření

(zdroj: ČTÚ , ing. K. Holek)

## 5.3 Identifikované problémy a příležitosti

### 5.3.1 Rozdíl mezi simulačními modely používaných operátory a ČTÚ

ČTÚ a operátoři používají velice podobné a mnohdy i stejné simulační modely.

Z pohledu ČTÚ vznikají rozdíly v simulacích, a především vůči naměřeným hodnotám simulačních modelů.

Vzniklé rozdíly jsou způsobeny:

- Jinou nastavenou počáteční přesností.
- Morfologií terénu.
- Kategorizací budov v zástavbě.
- Stanovení ukazatelů populace v daných oblastech.

Mimo to je zapotřebí brát v úvahu skutečnost, že měření pokrytí obyvatelstva signálem mobilních operátorů je prováděno ve venkovních prostorech.

Hodnocení Indoor pokrytí / pokrytí signálem ve vnitřních prostorech je problematické, protože je závislé na mnoha faktorech. Mnohé z těchto faktorů nejsou schopni mobilní operátoři výrazně ovlivnit:

- Použité konstrukční materiály budov.
- Geometrické uspořádání budov.
- Platné zákony a normy – jedná se především o hygienické normy týkající se přípustných úrovní expozice elmg. záření pro různé typy pobytových prostor.
- Technické normy a povolovací podmínky stanovené národním regulátorem – ČTÚ.

## 5.4 Dílčí závěry

Simulační modely hrají klíčovou roli při vývoji a optimalizaci mobilních sítí 5G a jsou nepostradatelným nástrojem. V dnešní době je již modelování mobilních sítí zvládnuto na vysoké úrovni. Na trhu jsou firmy zabývající se touto problematikou dlouhodobě. Tyto pokročilé aplikace umožňují nejen plánovat výstavbu sítí, předpokládané pokrytí signálem, ale zároveň s jejich pomocí lze vyhodnocovat stav již funkční mobilní sítě a provádět pokročilé analýzy a požadované predikce. V poslední době dochází k využívání umělé inteligence ke zpracování dat z testování sítě, tvorbu analýz a statistik využitelných pro optimalizaci.

Výběr simulačního nástroje závisí na konkrétních požadavcích a typu simulací, které jsou potřebné pro daný projekt.

Praxe ukazuje, že dochází k rozdílným výsledkům mezi simulacemi a naměřenými hodnotami v reálném terénu a provozu. Rozdíly jsou jak u jednotlivých mobilních síťových operátorů, tak mezi operátory a samozřejmě vůči ČTÚ. Tyto rozdíly vyplývají ze skutečnosti, že každý ze subjektů používá jiné počáteční podmínky popisující dané teritorium a jiné simulační aplikace.

Z pohledu jak operátorů, tak i ČTÚ by mohla být vhodným řešením úprava platné legislativy a vytvoření veřejně dostupného "referenčního" modelu terénu vypracovaného ve spolupráci s ČÚZK (Český úřad zeměměřický a katastrální).

S ohledem na dynamiku vývoje mobilních technologií se jeví, že v některých ohledech normalizační a legislativní procesy zaostávají a je třeba jim věnovat zvýšenou pozornost.

# 6 Použití vyspělejších technologií pro měření a monitorování pokrytí

## 6.1 Úvod do problematiky, identifikace příležitostí a nedostatků současných řešení

Na základě prvotní analýzy bylo konstatováno, že měřicí technika dnes využívaná k měření pokrytí radiokomunikačními službami na fyzické vrstvě je dostatečně vyspělá a přesná. Jedná se zejména o analyzátoře spektra. Současné měřicí přístroje používané ČTÚ zvládají pásmo do 90 GHz. Vyšší pásma zatím nejsou aktuální pro praktické využití a je třeba s nimi počítat až v dlouhodobějším výhledu (po roce 2030 a dále).

Složitější je situace s ověřováním služeb na vyšších vrstvách komunikace. Zde se nejedná v pravém slova smyslu o měření, ale ověřování dostupnosti komunikace a výkonnosti přenosu dat. Měřicí aplikace, obdobně jako nabízené služby se poměrně rychle mění a není úplně jednoduché vybrat dlouhodobě stabilní a perspektivní řešení. Po diskusi s pracovníky ČTÚ bylo zadání v tomto bodě upřesněno na průzkum oblasti měřících aplikací do mobilních terminálů (mobilů), s důrazem na inovaci nástrojů pro měření hovorových služeb. Měření v této oblasti se využívá převážně pro řešení stížností uživatelů na nízkou kvalitu poskytované služby. V případě klíčové hovorové služby jde o její dostupnost, problémy s rušením hovoru, výpadky/špatným předáváním hovorů (handover). Vybavení ČTÚ v této oblasti zastarává a nejsou k dispozici moderní terminály (mobily) a moderní měřicí aplikace. Jednoznačným trendem je postupný přesun hovorových služeb z okruhově orientované technologie GSM na paketovou komunikaci VoLTE a VoNR (Voice over LTE, Voice over New Radio).

Výhodou testů za pomoci mobilních terminálů je skutečnost, že nejvíce odpovídají uživatelským zkušenostem včetně využití daného HW a operačního systému OS (což může být někdy nevýhodou, např. nedostatečná výpočetní kapacita procesoru).

Obecným problémem tohoto segmentu testování je skutečnost, že trh mobilních terminálů se velice rychle vyvíjí, je velice široký a nelze úplně reagovat na rychlost vývoje trhu a není ekonomicky ani kapacitně možné dynamicky obměňovat portfolio měřících terminálů. Je možné se zaměřit jen na typické a nejrozšířenější zástupce na trhu a obměnu provádět ne s periodou 1 rok, ale např. 3 roky.

V souladu s tímto problémem nejsou ani výrobci testovacích aplikací do mobilních terminálů schopni dynamicky reagovat na změny a jsou to někdy oni, kteří brzdí nasazení nového terminálu, protože ještě pro něj nemají dokončenou či řádně otestovanou SW podporu.

## 6.2 Testování hlasových služeb

Přenos hovorového signálu je stále jednou z klíčových služeb poskytovaných mobilními sítěmi LTE / 5G. Specifika paketově orientovaných sítí si vyžádala vývoj a implementaci technologií označovaných termíny VoLTE a VoNR. Hovorový signál je moderními sítěmi přenášen s vyšší kvalitou a nižším zpožděním ve srovnání s tradičními mobilními sítěmi. Budoucí vývoj v oblasti přenosu hovorového signálu v mobilních sítích pravděpodobně zahrne další zlepšení kvality hovoru, snížení latence a integraci s novými technologiemi, jako je umělá inteligence či rozšířená realita. S rostoucím počtem zařízení připojených k sítím 5G / 6G se však dá očekávat, že objem dat přenášených pro hlasové hovory zůstane relativně stabilní, zatímco objem dat pro ostatní služby bude nadále růst.

### 6.2.1 Základní rozdělení a hodnocení hlasových služeb

Existují dva hlavní typy hlasových služeb, které jsou dostupné v mobilních sítích:

- Hlasové služby VoLTE / VoNR definované a smluvně zajištěné na úrovni operátora, které mají přísnou podporu QoS a nepatří do veřejného internetu.
- Hlasové služby OTT jsou poskytovány obecně nad sítí internet a nadále budou poskytovány prostřednictvím mobilních sítí na principu nejlepší snahy (Best-effort) souběžně s obecným provozem na bázi síťové neutrality (např. služby Viber, WhatsApp, Skype a další).

Stejně jako u ostatních nabízených služeb je nutné i u hlasové služby monitorovat a měřit její kvalitativní parametry tak, aby koncový uživatel byl se službou spokojen. Základní metodika pro testování hovorových spojení v sítích LTE je uvedena v ITU-T G.1028. Mobilní síť 5G pak na tuto metodiku navazují.

Základní výkonnostní parametry KPI pro přenos hovorového signálu v sítích LTE jsou definovány v G.1028.

Klíčovými parametry jsou:

- CBR (Call Blocking Rate) – četnost nenavázaných hovorů (%).
- CDR (Call Drop Rate) – četnost přerušených hovorů ze všech úspěšně navázaných hovorů (%).
- Výskyt hluchých hovorů (nesymetricky) – ověření tohoto stavu je možný měřením MOS.
- MOS (Mean Opinion Score) Kvalita hovoru v parametru – LQO (Listening Quality Objective) – poslechová kvalita měřená objektivně s tím, že oproti stávajícím systémům je žádoucí rozšíření na konverzační kvalitu (MOS-CQO, MOS-Conversation Quality Objective).
- Call setup time (pro analýzu je vhodný rozpad do dílčích fází, zahájení, začátek vyzvánění, skutečné zvonění, vyzvednutí, průchodnost kanálu), určité události lze detekovat z 5G modemu, některé z audio-kanálu.

## 6.2.2 Metodiky k hodnocení kvality hovorového signálu

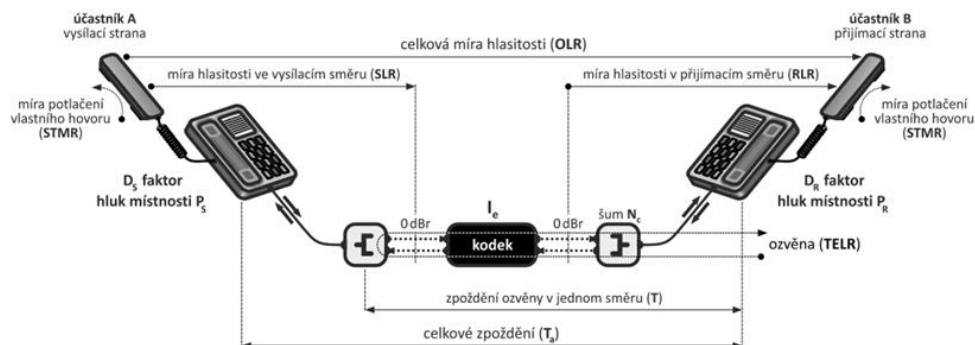
Pro vyhodnocování parametrů přenosu hovorového signálu existuje z historických důvodů řada metodiky, které postupně vznikaly dle přicházejících požadavků.

**Subjektivní hodnocení.** Principem je statistické vyhodnocení kvality vzorku řeči dostatečně velkou, náhodně vybranou, skupinou osob na základě vyplněného dotazníku. Dotazník je uveden v doporučení ITU-T P.82. Ekonomické náklady této metodiky jsou zvyšovány nutností zajistit definované podmínky testu v souladu ITU-T P.800. Výsledkem této metodiky je však skutečné průměrné hodnocení, která se označuje jako MOS-LQS (Mean Opinion Score – Listening Quality Subjective).

**Objektivní hodnocení.** Principem je statistické vyhodnocení kvality vzorku řeči prostřednictvím digitálního zpracování signálu a matematických modelů, které modelují lidský sluchový aparát. Tato metodika není tak časově a finančně náročná. Její nevýhodou je závislost na přesnosti matematického modelu. Výsledkem této metodiky je hodnota MOS-LQO.

**Metoda odhadu.** Tato metoda nepracuje se vzorky řeči, ale využívá tzv. E-model. E-model je nástroj, který popisuje kompletní řetězec pro přenos hovorového signálu a jeho parametry. E-model byl vyvinut expertní skupinou při ETSI a je popsán v doporučení ITU-T G.107 (G.107.1 Wideband E-model; G.107.2 Fullband E-model). Každému dílčímu faktoru, který ovlivňuje kvalitu hovoru, definuje model koeficient s určitým intervalem hodnot. Význam koeficientů je naznačen na následujícím obrázku, který ukazuje referenční spojení dvou účastníků, včetně akustických rozhraní (zde uvedeno pro fixní telefonii, platí však obecně i pro mobilní a kombinovanou telefonii včetně VoIP).

Obrázek 5 – Schéma přenosového řetězce pro úzkopásmový E-model.

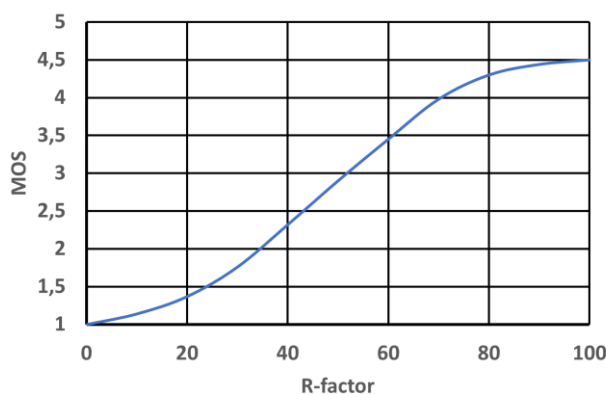


Výsledný R-faktor (Rating) je definován jako prostý součet jednotlivých koeficientů a nabývá hodnot v rozsahu od 0 do 100 (akceptovatelná hodnota je však jen v intervalu od 50 do 100). Zohledňuje vliv šumu, hlasitosti, kvantizačního zkreslení, způsobu kódování, ozvěny a zpoždění. R-faktor se stanovuje pro celý přenosový řetězec mezi akustickými rozhraními telefonní sítě, to znamená, že zohledňuje nejen vlastní telefonní kanál, ale i koncové zařízení. Platí, že čím vyšší hodnota R-faktoru, tím vyšší kvalita telefonní služby. Výslednou hodnotu R-faktoru lze transformovat na stupnici MOS. Výsledkem pak je pouze Odhadovaná hodnota kvality (MOS-LQE, MOS – Listening Quality Estimated).

Tabulka 6 – Přřazení hodnot R kvalitativní kategorii.

Rozsah faktoru R	Jakost přenosu řeči
$90 \leq R < 100$	Nejlepší
$80 \leq R < 90$	Vysoká
$70 \leq R < 80$	Střední
$60 \leq R < 70$	Nizká
$50 \leq R < 60$	Špatná

Obrázek 6 – Přepočítání parametru R-faktor na stupnici MOS.



### 6.2.3 Algoritmy pro vyhodnocení kvality hovorového signálu

Pro měření kvality hovorového signálu se využívají měření neintruzivní a intruzivní.

**Neintruzivní měření** – výpočetní algoritmy nemají pro hodnocení k dispozici referenční vzorek řeči. Z tohoto důvodu lze obtížně odhalit některé specifické typy zkreslení vzorku při přenosu. Základní metodikou je INMD (Inservice Non-intrusive Measurement Device, ITU-T P.561), která je vytvořena pro měření za provozu (In-Service) v sítích s přepojováním okruhů i paketů. Metodika INMD vyjmenovává potřebné hodnotící parametry a principy jejich měření. Způsob, jak zkombinovat naměřené parametry do jediného výsledného kvalitativního parametru CCI (Call Clarity Index, © Copyright British Telecommunications plc.) předepisuje doporučení ITU-T G.562.

Standard ITU-T P.563 (3SQM, Single Sided Speech Quality Measure) popisuje metodiku pro neintruzivní objektivní měření kvality přenosu hovorového signálu. Přijatý vzorek je nejprve adekvátně upraven, je aplikován model přijímacího telefonního přístroje, jsou identifikovány časové intervaly s přítomností hlasu apod. Následně zkoumání předzpracovaného řečového vzorku lze rozdělit do tří nezávislých částí:

- Analýza vokálního traktu a nepřirozenosti hlasu:
  - Rozpoznání pohlaví (mužské hlasy a ženské hlasy).
  - Syntetický hlas.
- Analýza šumu:
  - Úroveň šumu pozadí.
  - Šum v segmentech.
- Přerušení, ztlumení a časové oříznutí (výpadky při přenosu).

Výsledek každé části je ohodnocen (přiřazena hlavní třída zkreslení) a z dílčích výsledků je vypočítána hodnota parametru MOS-LQO, jakožto celkové hodnocení. Nedostatkem této metody je omezená přesnost, a to zejména pro ne zcela běžné jazyky, jako je čeština.

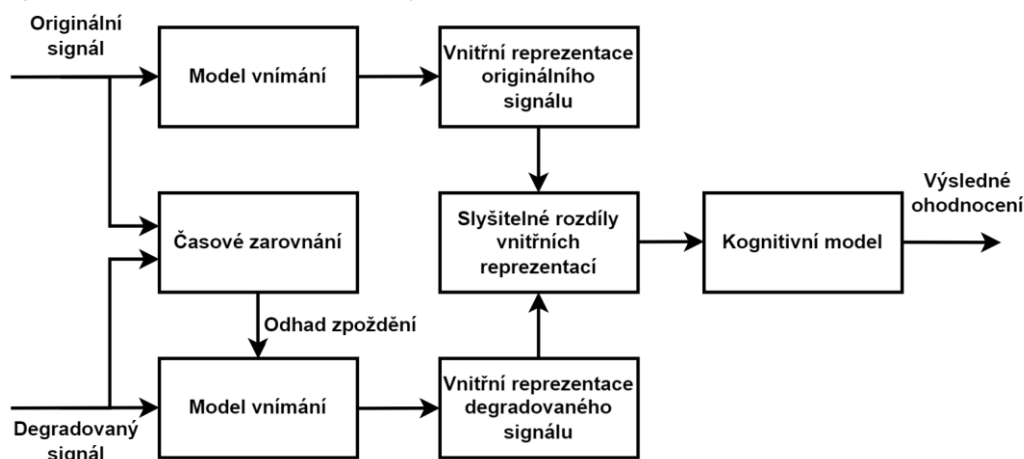
**Intruzivní měření** – výpočetní algoritmy pracují na základě porovnání referenčního a degradovaného (přeneseného) vzorku řeči.

Z historických důvodů existuje řada objektivních metodik pro hodnocení řečových vzorků, které využívají intruzivní měření. Metodiky byly navrhovány nejen pro oblast telekomunikací (úzkopásmové kodeky a signály), ale především pro oblast televizního a rozhlasového vysílání (širokopásmové kodeky a signály). Jednotlivé metodiky jsou si podobné svým principem, který spočívá v porovnávání originálního vzorku a degradovaného. Podstatně se vzájemně liší v implementaci modelu lidského vnímání (kognitivní model) a ve způsobu vzájemné amplitudové a časové korelace (zarovnání) řečových vzorků. Výsledné vyjádření kvality se skládá z jediného čísla, které představuje akustické zkreslení testovaného signálu.

PSQM (Perceptual Speech Quality Measure, ITU-T P.861) je základní metodikou pro hodnocení kvality přenosu hovorového signálu, optimalizovaná pro telefonní úzkopásmové řečové signály. Metodika PSQM nejprve signály (řečové vzorky originální a degradované) mapuje do psychoakustické reprezentace (sluchová konverze) tak, aby odpovídaly vnitřním reprezentacím řečových signálů (reprezentovaných uvnitř lidské hlavy). O kvalitě kódované řeči se rozhoduje na základě rozlišení vnitřních reprezentací kognitivním modelem.

Metodika PESQ (Perceptual Estimation of Speech Quality) je normalizována jako ITU-T P.862. Jedná se v podstatě o PSQM s kompenzací zpoždění a s vylepšenou detekcí ticha v hovoru, což je obzvláště důležité u VoIP. Výsledkem je parametr MOS-LQO. Nedostatkem PESQ je, že není použitelná pro aplikace v reálném čase. Je časově i výpočetně náročná, vzorky pro hodnocení přenosu vkládá do reálné sítě a zatěžuje ji tak umělým provozem.

Obrázek 7 – Principiální blokové schéma hodnotící metodiky PESQ.



Metodika POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Analysis, ITU-T P.863) vychází z metodiky PESQ a řeší její nevýhody, typicky časové vyrovnání jednotlivých vzorků a práci s novými kodeky. POLQA na rozdíl od PESQ podporuje širokopásmové kodeky pro řečové signály (do 24 kHz). Při vyhodnocování POLQA zkoumá původní řečový vzorek a jeho chyby (dozvuk, šum apod.), ty zohledňuje v celkovém hodnocení.

ViSQOL<sup>54</sup> (Virtual Speech Quality Objective Listener) je objektivní metodika pro hodnocení vnímané kvality zvuku a řeči. Porovnává referenční vzorek se vzorkem degradovaným průchodem komunikační sítě. Výstupem je predikce kvality řeči vyjádřená parametrem MOS-LQO. První fází je předzpracování porovnávaných vzorků, kdy jsou výkonově srovnány a převzorkovány na požadovanou vzorkovací frekvenci (48 kHz pro audio režim, 16 kHz pro řečový režim), jsou vytvořeny spektrogramy. Druhá fáze je zarovnání, ve které jsou vytvořené spektrogramy nejprve segmentovány a vypočítává se

<sup>54</sup> Hines, A.; Skoglund, J.; Kokaram, A.; a spol. ViSQOL: The Virtual Speech Quality Objective Listener. Acoustic Echo Noise Control (IWAENC), IEEE Intl. Workshop on, 01 2012: str. 1–4.

podobnost mezi jednotlivými segmenty referenčního vzorku a testovacího vzorku. Ve třetí fázi je na základě míry podobnosti vypočítáno skóre MOS-LQO a míra časového zkreslení. Ve srovnání s jinými standardními metrikami, jako jsou PESQ a POLQA, ViSQOL často dosahuje srovnatelných nebo lepších výsledků, zejména při řešení problémů, jako je časové zkreslení nebo zpoždění přehrávání. ViSQOL je neustále aktualizován a rozšiřován, aby podporoval nové technologie a metody zpracování zvuku, jako jsou hluboké neuronové sítě a generativní modely.

## 6.2.4 Další vývoj v oblasti testování kvality hovorových spojení

Testovat přenos hovorového signálu prostřednictvím uvedených intruzivních metodik, vhodných i pro automatizovaná měření, znamená porovnávat originální a přenesený vzorek a pomocí psychoakustického modelu lidského vnímání a odhadovat výsledek subjektivních testů. U dnes používaných metodik je ve výsledku dosahována vysoká míra shody se subjektivními testy. Ve své podstatě tyto metody posuzují tzv. poslechovou kvalitu (Listening Quality). Tato kvalita však nezahrnuje vliv zpoždění signálu při přenosu, ozvěny mluvčího i posluchače, artefakty souběžné řeči, přepínání generátoru komfortního šumu apod., tedy faktorů ovlivňujících konverzaci dvou koncových uživatelů.

Vliv těchto parametrů v konverzaci je tak významný, že pro hodnocení celkové kvality konverzace (CQ, Conversation Quality), nutné využít komplexnějších metodik, kde poslechová kvalita je pouze jedním z několika parametrů. Jako další parametry se právě uvažují technické parametry jako je zpoždění při přenosu, velikost ozvěny atd. Mezi komplexnější metodiky patří E-model nebo Management Conversational Quality Predictor (ETSI TR 103 121).

Hodnotící E-model (dle ITU-T G. 107) byl navržen pro potřeby plánování komunikačních sítí, včetně tandemového spojení sítí různých poskytovatelů a při využívání různých koncových terminálů. Poskytované výsledky E-modelem jsou pesimističtější ve srovnání s poslechovými testy. Na základě těchto zkušeností byl vyvinut a standardizován pokročilý model MCQP (Management Conversational Quality Predictor) pro objektivní vyhodnocení kvality přenosu hovorového signálu, který zohledňuje více parametrů pro hodnocení než E-model. Z tohoto důvodu je v budoucnu pravděpodobná implementace tohoto modelu do měřících nástrojů.

## 6.3 Testování obrazových multimedialních služeb

V souvislosti s historickým vývojem existuje obecně řada mezinárodních doporučení pro měření a hodnocení parametrů v oblasti distribuce video signálu. Příchodem moderních komunikačních sítí se relativně jednoduchá situace násobně zkomplikovala. Původně byla distribuce datového toku pouze jednosměrná (od zdroje informace ke spotřebiteli) a šíření signálu bylo možné pouze terestricky nebo v síti kabelové televize. Dnes jsou využívány odlišné přenosové technologie, změnil se i formát přenášených informací a změnil se způsob využívání služby koncovým uživatelem, protože koncový uživatel se dnes může podílet na vytváření obsahu. Z těchto důvodů se k obvyklým objektivním kvalitativním parametrům datového toku (chybovost, doba šíření atd.) přidávají kritéria respektující další časové závislosti (kolísání zpoždění, rychlost odezvy na straně zdroje informací atd.). Výsledné hodnocení pak významným způsobem ovlivňují i subjektivní kritéria hodnotící přenášený obsah.

### 6.3.1 Hodnocení OTT multimedialních služeb

Služby OTT (Over-The-Top) mohou být považovány za substitut klasických telekomunikačních služeb. Jejich rozšíření nastalo s rozvojem vysokorychlostních přípojek do sítě Internet. Pro koncového uživatele mají služby OTT obdobný přínos, jako klasické telekomunikační služby (přenos textových zpráv, přenos multimedialních signálů atd.). Pozitiva OTT služeb ale spočívají v dynamice jejich vývoje, kdy nepodléhají obvyklým standardizačním procesům. Z tohoto důvodu mohou rychle reagovat na nově přicházející požadavky uživatelů a uspokojovat je.

Z pohledu úřadu BEREC BOR (16) 35<sup>55</sup> se služby OTT dělí na:

- OTT-0 – služba OTT, která má charakter služby ECS (Electronic Communications Service)<sup>56</sup>,
- OTT-1 – služba OTT, která není službou ECS, ale potenciálně konkuruje ECS,
- OTT-2 – ostatní služby OTT.

Z definice služby ECS plynou tři základní kritéria pro její rozpoznání. Služba ECS:

- je obvykle poskytována za úplaty,
- spočívá zcela nebo převážně v přenosu signálů,
- nezahrnuje služby poskytující obsah nebo vykonávající redakční kontrolu nad obsahem.

Služby ECS a OTT mají pro koncového uživatele obdobný přínos. OTT služby však mají obvykle šifrovaný datový tok, server poskytující službu OTT není přístupný pro síťového operátora, služby OTT nepodléhající standardizaci mohou měnit své parametry.

Z výše uvedeného plyne, že diagnostikovat nestandardizovanou službu, která v závislosti na různých požadavcích mění své parametry nebo charakter, je velice obtížné. Při hodnocení parametrů multimediálních služeb OTT se vychází z ověřených metodik ECS služeb, respektují se také doporučení zájmových sdružení jako je DASH Industry Forum<sup>57</sup> nebo Streaming Video Technology Alliance<sup>58</sup>.

Metodiky měření kvalitativních parametrů u video datových toků jsou principiálně stejné, jako je tomu u metodik pro měření hlasových služeb. Parametry toku či služby ověřovat v režimu In-Service/Out-of-Service, objektivně/subjektivně, intruzivně/neintruzivně a v závislosti na dostupnosti zdrojové nepoškozené informace lze hovořit o měření s plnou nebo částečnou referencí, případně o měření bez reference.

Datové toky multimediálních služeb obecně využívají protokolové struktury UDP/TCP nad IP, a proto by je bylo možné hodnotit prostřednictvím standardních metrik hodnotících QoS na vrstvách L3 / L4. Vzhledem k obsahu přenášené informace a jeho vnímání koncovým uživatelem, je hodnocení na L3/L4 nedostatečné a hodnocení je nutné provádět až na aplikační vrstvě síťového modelu (L7). Pro vlastní hodnocení obrazové informace lze využít metody Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Video Quality Metric (VQM) či Structural Similarity (SSIM)<sup>59</sup>.

U služeb klasické videotelefonie nebo klasické IPTV lze výše uvedené principy využívat. Multimediální služby OTT využívají pro datové přenosy obvykle komunikační protokol TCP, který je v určitých mezích sám schopen zajistit bezchybný datový přenos. Navíc za cenu nárůstu zpoždění při přenosu, lze využít i pokročilé algoritmy pro detekci a korekci chyb v přenášeném datovém toku. Výše uvedené metody hodnocení obrazové informace u multimediálních služeb OTT tak ztrácejí vypovídající schopnost, neboť koncový uživatel může konzumovat zcela jiný obsah, než jaký byl přenesen komunikační sítí.

Z důvodu nepříjemné náročnosti subjektivního hodnocení QoE (dostatečný počet hodnotitelů, proškolení, dotazníky) je snaha subjektivní hodnocení QoE služby nahradit objektivním hodnocením. Tj. využít matematický model, který bude schopen, podle vybraných klíčových kvalitativních parametrů (KQI, Key Quality Indicator) hodnocení QoS, předpovědět výsledné percepční hodnocení koncového uživatele – QoE. Takovéto analytické modely předpovídající hodnocení QoE se proto nazývají prediktivní modely QoE.

---

<sup>55</sup> zdroj: <https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/reports/berec-report-on-ott-services>

<sup>56</sup> Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/21/ES: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/cs/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0021>

<sup>57</sup> zdroj: [dashif.org](http://dashif.org)

<sup>58</sup> zdroj: [www.svta.org](http://www.svta.org)

<sup>59</sup> DE ANGELIS, Francesco. A lightweight QoE evaluation model for OTT media services. Online. EBU Technology & Innovation. 2019, s. 15. ISSN 1609-1469. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications/a-lightweight-qoe-evaluation-model-for-ott-media-services>. [cit. 2024-09-16].

Hodnotit parametry multimediálních toků můžeme pro účel<sup>60</sup>:

- monitorování, kdy v reálném čase objektivně hodnotíme kvalitu datového toku zájmové aplikace (např. podle ITU-T P.1202).
- plánování, kdy před zprovozněním zájmové multimediální služby ověříme plnění požadovaných parametrů, tj. ověří se parametry přenášeného datového toku a parametry datové sítě (ITU-T G.1071).
- přesného laboratorního testování, kdy je cílem vyhodnotit parametry služby v neprovozních podmínkách komunikační sítě, například s přítomností nepoškozené referenční informace, nebo při ověřování parametrů síťového prvku (ITU-T J.341).

Objektivní hodnocení prostřednictvím prediktivních modelů QoE lze rozdělit na:

- Model multimediální vrstvy pracuje s reálnými multimediálními signály (audio/video). Reflektuje vliv parametrů použitého kodeku a přenosového kanálu. S ohledem na možnost dostupnosti referenčního vzorku pro potřeby hodnocení, je tento model dále dělen na kategorie:
  - Plná reference (Full Reference) – pro stanovení hodnotících parametrů je k dispozici kompletní referenční vzorek, který je porovnáván s degradovaným (přeneseným komunikační sítí). Modely FR se obvykle používají pro přesné hodnocení u laboratorních testů (v souladu s ITU-T J.247).
  - Redukovaná reference (Reduced-Reference) – z referenční informace jsou pro hodnocení k dispozici pouze určité charakteristiky (např. informace o vektorech pohybu, hranách texturách, ...). Pro potřeby hodnocení na přijímací straně, je možné tyto charakteristiky přenášet v samotném zkoumaném toku, jako například metadata (ITU-T J.246).
  - Bez reference (No Reference) – hodnotící modely nemají k dispozici referenční vzorek, pomocí algoritmů hledají v přijatém obsahu nežádoucí stavy, jakými v případě videí může být tzv. kostičkování obrazu, zamrznutí části obrazu, rozmazání apod. Tyto metody se obecně používají pro posuzování kvality videí v reálném čase u multimediálních aplikací (ITU-T P.1201).
- Model paketové vrstvy využívá pro predikci hodnocení QoE pouze informace ze záhlaví datových paketů bez zohlednění vlastního přenášeného obsahu (užitečného zatížení). Takovéto modely jsou určeny především pro monitorování multimediálních toků prostřednictvím síťových sond. (ITU-T P.1201).
- Model vrstvy bitového je kombinací modelu paketové a multimediální vrstvy, protože pro hodnocení jsou respektovány nejen informace v bitovém toku, ale také informace ze záhlaví paketu. (ITU-T P.1202, ITU-T P.1203).

Pro subjektivní hodnocení lze využít doporučení ITU-T P.910 s algoritmy Absolute Category Rating (ACR), Absolute Category Rating with Hidden Reference (ACR-HR), Degradation Category Rating (DCR), and Pair Comparison (PC).

Kombinací objektivních metod hodnocení a subjektivních jsou metody hybridní. Hybridní metody obvykle využívají na začátku procesu hodnocení metodu hodnocení subjektivního. Snahou je od hodnotitelů získat náhled na kvalitu referenčních vzorků (videosekvencí). Referenční vzorky jsou následně adekvátně znehodnoceny v závislosti na QoS faktorech přenosového prostředí a jsou aplikovány hodnotící prediktivní modely QoE pro ohodnocení se zohledněním úvodního subjektivního testu.

PEVQ-S metodika byla vyvinuta firmou OPTICOM GmbH. (autor POLQA). Metodika je určena pro hodnocení QoE video přenosů včetně OTT služeb, v pevných i mobilních sítích. Metodika je vychází z PEVQ® (Perceptual Evaluation of Video Quality) dle standardu ITU-T J.247. Při hodnocení je porovnáván se referenční vzorek se vzorkem degradovaným, výstup hodnocení je transformován do supnice MOS.

Rohde & Schwarz SwissQual AG používá metodiku založenou na ITU-T J.343.1, což je hybridní bezreferenční metodika hodnotící QoE v IPTV/CaTV sítích, která kombinuje model bitové vrstvy a model multimediální vrstvy. Vzhledem k tomu, že není využíván pro hodnocení referenční vzorek, je možné hodnotit i multimediální streamy s například tzv. přímými TV přenosy. A to včetně šifrovaných datových toků. Implementace metodiky firmou Rohde & Schwarz SwissQual AG umožňuje testování i OTT multimediálních toků.

---

<sup>60</sup> PAL, Debajyoti a TRIYASON, Tuul. A Survey of Standardized Approaches towards the Quality of Experience Evaluation for Video Services: An ITU Perspective. Online. International Journal of Digital Multimedia Broadcasting. 2018, roč. 2018, s. 1-25. ISSN 1687-7578. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2018/1391724>. [cit. 2024-09-16].

## 6.3.2 Dílčí závěry

Neexistuje univerzální metodika pro testování OTT hlasových nebo video aplikací a jimi přenášených informací. Existují metodiky pro hodnocení kvality přenosu pouze obrazové nebo audio/video informace ve standardizovaných přenosových technologiích např. CaTV, IPTV a videohovorů s využitím protokolů RTP/RSTP/SIP apod. U určování QoE pro zájmové služby, je snahou nahrazovat přesnější, ale nákladné a zdlouhavé, subjektivní hodnocení, hodnocením objektivním. Metodiky objektivního hodnocení se zaměřují na nalezení matematických modelů, které budou věrně kopírovat percepční chování koncového uživatele vůči parametrům nedegradované služby a podmínkám přenosu.

Hodnocení OTT služeb se děje obvykle v souladu s proprietární metodikou té které společnosti, která takovéto služby nabízí. Služby poskytované společnostmi jsou komplexní, včetně monitorování parametrů a poskytování výsledků v reálném čase, s doporučením navazujících procesů.

## 6.4 Systémy pro měření a monitorování služeb rádiových sítí

Ověřování parametrů přenosu hovorového signálu, případně parametrů multimediálních přenosů v moderních mobilních sítích využívá dva principy.

První princip využívá měření základních kvalitativních parametrů QoS mobilní sítě, jako je zpoždění při přenosu, kolísání zpoždění, chybovost přenosu apod. Na změřené parametry je aplikován výpočetní model E-model (ITU-T G. 107) s hodnocením pomocí parametru MOS. Z tohoto postupu plyne hlavní nevýhoda, kdy není možné zohlednit komplexní charakter hovorové komunikace a dynamické chování mobilní sítě. Výsledné hodnocení QoE je odhadem, na základě naměřených parametrů datové mobilní sítě.

Druhý princip využívá specializované koncové terminály nebo běžně dostupné mobilní terminály (mobilní telefony) se speciálním SW vybavením emulující reálnou hlasovou komunikaci. Specializovaný koncový terminál odesílá známé datové vzorky představující hovorový signál k protějšimu testovacímu terminálu. Ten je umístěn v prostředí, které svým charakterem vylučuje negativní ovlivnění testu. Toto intruzivní testování je maximálně věrohodné. Nevýhodou při použití běžných mobilních telefonů, je možnost ovlivnění testu parametry mobilního telefonu a nutnost úprav speciálního programového vybavení.

Obecně se systém pro testování mobilními terminály skládá z těchto komponent:

- Mobilní terminál (sada typických zástupců různých generací a výrobců, vybavená různými SIM kartami pro testování různých operátorů a různých typů služeb).
- Aplikace běžící v mobilním terminálu.
- Řídící jednotka koordinující lokálně spouštění testů sady terminálů (typicky přes USB rozhraní).
- Server, proti kterému probíhají testy (dedikovaný zdroj dat, případně vybrané internetové servery).
- Centrální aplikace v cloudu pro sběr dat, koordinaci testů, vyhodnocení, vizualizaci, statistiky.

Testy má smysl provádět v rámci jedné sítě (mezi terminály v síti jednoho operátora), pro tandemová spojení mezi sítěmi různých operátorů (vzájemně kombinované mobilní či fixní terminály) a také proti referenčnímu bodu (testovacímu serveru) ve fixní síti VoIP.

### 6.4.1 Současné řešení pro testování hlasových služeb

V současné době Český telekomunikační úřad nemá dílčí metodiku pro vyhodnocování kvalitativních parametrů hlasových služeb v mobilních sítích. Kvalitativní kritéria hlasových služeb nejsou součástí výběrových řízení pro přiděl rádiových kmitočtů. Pro měření a vyhodnocování není k dispozici v rámci ČTÚ vhodné hardwarové vybavení v dostatečném počtu a na úrovni odpovídající moderním potřebám.

Aktuální stav vychází z historických souvislostí při zavádění mobilních sítí standardu GSM, kdy účelem sítě bylo primárně přenášet hovorové signály. Pro zajištění kvalitativních parametrů hovorových služeb postačovalo měřit parametry radiového rozhraní. Pokud byly tyto parametry v příslušných mezích, byla hovorová služba dostupná na požadované úrovni.

Pro parametry hlasové služby je aktuálně v platnosti síťový plán přenosových parametrů veřejných komunikačních sítí (opatření obecné povahy č. SP/2/01.2022-1 resp. č. SP/2/05.2011-7<sup>61</sup>), který specifikuje kvalitu hlasové komunikace, včetně sítí mobilních.

Provozovatelé mobilních komunikačních sítí v ČR využívají pro testování hlasové komunikace služeb subdodavatelských firmy. Analýzy se zaměřují převážně na dodržení stanovených KPI, tedy zejména schopnost navázat a udržet hovor.

## 6.4.2 Perspektivní způsoby testování hlasových služeb a jejich kombinace s dalšími službami

Současný a budoucí přenos hovorového signálu prostřednictvím sítí mobilních operátorů stojí na principu VoLTE nebo VoNR.

K hodnocení kvality je celosvětově využívána metodika POLQA, a to jak v pevných, tak mobilních i IP sítích. Od roku 2018 je k dispozici třetí verze POLQA v3. Algoritmus POLQA je výsledkem vývoje společností OPTICOM, SwissQual a TNO. Je chráněn autorskými právy a patenty. V souladu s příslušnou licencí od uvedených společností, je k dispozici jako software pro různé platformy. Aktuálně je licence využívána více než 100 subjekty (výrobci a operátoři) na celém světě.

Produkty využívající POLQA jsou v nabídkách předních výrobců, typicky:

### **Enhancell Ltd.**

Společnost Enhancell Ltd. je finskou společností, která vyvinula rodinu nástrojů pro komplexní analýzu bezdrátových sítí se zastřešujícím označením Enhancell Echo. Jednotlivé komponenty umožňují získání zájmových dat, jejich zpracování a vizualizaci dosažených výsledků. Rodina nástrojů Enhancell Echo umožňuje mj. vyhodnocování parametrů hovorového spojení.

Rodina nástrojů Enhancell Echo zahrnuje produkty:

- Echo One a Echo Lite – jsou samostatné SW nástroje pro měření parametrů mobilních sítí, které lze instalovat do mobilních telefonů s OS Android a Harmony OS. Podporovány jsou čipsety firem Qualcomm a HiSilicon a nově i Exynos. Produkt Echo Lite má omezenou funkcionalitu v získávání parametrů radiového rozhraní (zobrazení informací o buňce, pásmu apod.), pro svoje spuštění nevyžaduje root OS Android.
- Echo Scanbox/ Scanbox Pro/ScanMaster je rodina samostatných měřících sond pro monitorování parametrů mobilních sítí LTE/5G NR.
- Echo Plus – je SW nástroj pro tablety, který umožňuje konfiguraci a správu měřících sond v reálném čase. Umožňuje paralelní spouštění indoor/outdoor testů, logování činnosti a naměřených výsledků jednotlivých sond. Dále umožňuje vizualizaci výsledků a synchronizaci s cloudem. Sondou může být SW nástroj Echo One/Lite, zařízení EADS TETRA nebo síťové scannery třetích stran (podporovány jsou např. přístroje PCTel IB/HB flex®).
- Echo Studio – je SW nástroj pro osobní počítače/notebooky s OS Window/Linus/Apple. Disponuje obdobnou funkcionalitou jako produkt Echo Plus. Správou a řízením měřících sond, indoor/outdoor testováním, kolektováním a vizualizací výsledků, synchronizací s cloudem. Navíc lze pomocí nástroje Echo Studio dekodovat a analyzovat zachycenou signalizaci, provádět post-processing a vizualizaci výsledků, které jsou uloženy na cloudu a byly získány jinými nástroji rodiny Echo, vytvářet reporty.
- Echo Analyzer – je SW nástroj optimalizovaný na post-processing velkých objemů dat s následnou vizualizací.

---

<sup>61</sup> zdroj: <https://ctu.gov.cz/opatreni-obecne-povahy-c-sp2052011-7-kterym-se-vidava-sitovy-plan-prenosovych-parametru-verejnych>

- Echo Cloud – je online služba pro všechny nástroje Echo, která nad nimi umožňuje vzdálený dohled a správu, automatickou synchronizaci konfigurací a výsledků, vytváření a distribuci testů, automatizaci činností, správu mapových podkladů, licencování.

Pro zvýšení uživatelské přívětivosti nabízí společnost produkt Echo Connect dongle, který po připojení k mobilnímu telefonu (certifikovanému) s OS Android funguje jako Echo One, ale bez nutnosti provést root OS. K dispozici koncovým zákazníkům jsou předpřipravená řešení pro walk/drive testy.

Funkcionalita řešení z pohledu hodnocení přenosu hovorového signálu:

- Outdoor testy a indoor (řešení iBWave).
- Podpora LTE/LTE-A / 5G NSA / 5G SA / 5G NR.
- Podpora pro běžně dostupné mobilní přístroje s kompatibilním čipsetem (Qualcomm/HiSilicon/Exynos), podpora EADS TETRA, scannery třetích stran.
- Flexibilní licenční politika (přenos licencí, plovoucí, krátkodobé licence, ...)
- Funkcionalita vzdálené správy, skriptování, parametrizace testů, synchronizace parametrů, vizualizace formou grafů a vynesení do map, zpracování velkých objemů dat.
- Podpora testů pro hodnocení kvality přenosu hlasu mezi mobilními koncovými zařízeními nebo mezi mobilním koncovým zařízením a fixní sítí.
- Podpora pro hodnocení metodikou ViSQOL.
- Hodnocení metodikou POLQA v3 s výpočtem parametru MOS v reálném čase pro úzkopásmové i širokopásmové kodeky.

Obrázek 8 – Příklad nastavení testu POLQA.

VOICE CALL	
Name:	<input type="text" value="Test"/>
Mode:	<input type="button" value="Call"/>
Number:	<input type="text" value="722922553"/> <input type="button" value="⊞"/>
Duration (seconds):	<input type="text" value="15"/>
MOS Algorithm:	<input type="button" value="POLQA NB (Narrow Band)"/>
Reference sample:	<input type="text" value="Czech_SWB_f2s1_m1s4_6s.wav"/>

## Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Společnost Rohde & Schwarz (součástí je společnost SwissQual, jeden z tvůrců standardizovaných metod testování kvality řeči) nabízí komplexní řešení pro monitoring a analýzu bezdrátových sítí – Rohde & Schwarz Mobile Network Testing (MNT). Produkty v portfoliu MNT zahrnují specializované HW přístroje a SW produkty pro sběr dat, nástroje pro plánování a obsluhu měření, programové vybavení pro analýzu získaných výsledků. MNT disponuje i měřením parametrů kvality hovorových spojení mobilních sítí. Pro měření zájmových parametrů v přenosu hovorového signálu, lze využít měřicí systém složený ze tří softwarových komponent.

- R&S@QualiPoc je programové vybavení pro realizaci měřicí sondy pro mobilní sítě. Nejznámější je QualiPoc Android, který představuje měřicí sondu v běžném mobilním telefonu (samostatná měřicí sonda QualiPoc Android Probe). Software QualiPoc ve spojení s příslušným HW disponuje funkcionalitou měření parametrů od nejnižších komunikačních vrstev (RF) až po hodnocení QoS / QoE v OTT aplikacích (streamování audia a videa, komunikace aplikací WhatsApp, ...). Jsou podporovány významné čipsety firem Qualcomm, Samsung Exynos a HiSilicon. Pro instalaci je certifikována řada modelů různých výrobců (Samsung, Xiaomi, OnePlus, Sony, ...).
- SmartAnalytics je analytický software, který poskytuje přehledy o kvalitě zkušeností (QoE) uživatelů mobilních sítí. SW nástroj umožňuje ukládání, zpracování i vizualizaci naměřených dat do mapových podkladů (indoor/outdoor). Disponuje potřebným post-processingem pro optimální využití dostupných údajů. Na základě získaných údajů je schopen i doporučit následné kroky pro optimalizaci testované sítě. Pro analýzy využívá data shromážděná komponentami SmartMonitor a SmartBenchmarker.
- SmartMonitor je serverová dohledová aplikace s webovým rozhraním pro monitorování kvality služeb mobilních sítí v reálném čase. Řídí vzdálené měřicí sondy (typicky R&S@QualiPoc), kompletuje výsledky, provádí jejich analýzu a vizualizaci.

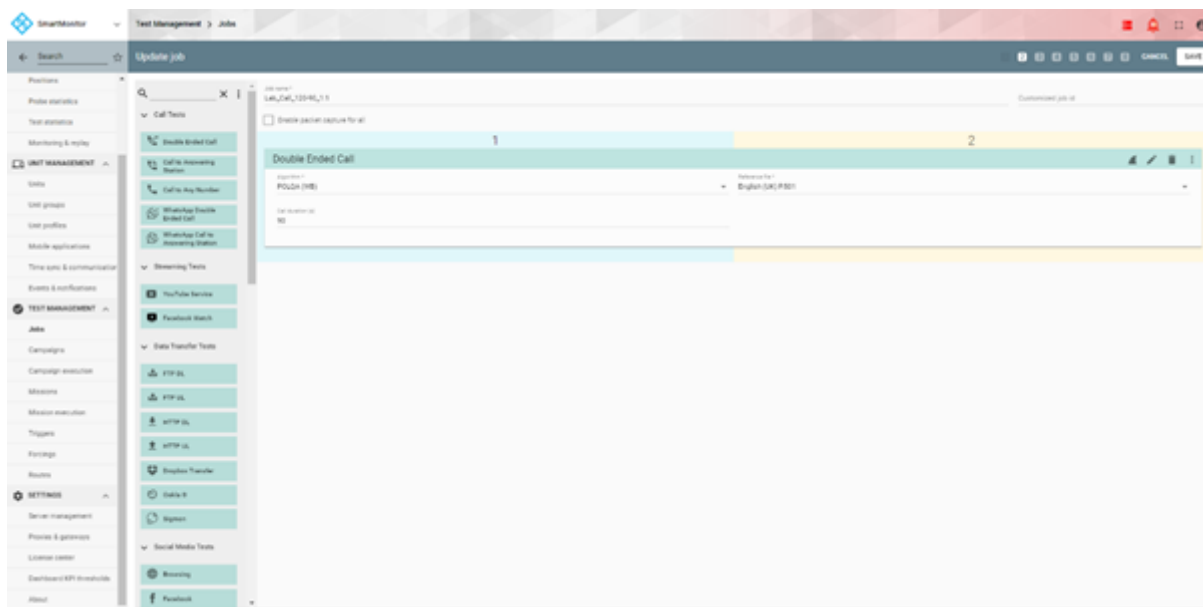
- Komponenta SmartBenchmarker je určena pro činnosti související s měřením. Umožňuje snadnou konfiguraci, realizaci a monitorování testovacích kampaní (scénářů). SmartBenchmarker podporuje různé hardwarové moduly (R&S@TSME6, R&S@TSMExxDC, R&S@Benchmarker 3, ...) a může být použit jak pro drive testy (střešní box VBR), tak pro walk testy (R&S@Freerider 4). Testy mohou být prováděny i přímo na mobilních telefonech pomocí nativního softwaru Qualipoc Android. SmartBenchmarker může být vzdáleně monitorován a konfigurován pomocí SmartMonitoru.

Pro hodnocení kvality přenosu hovorového signálu lze využít metodiky PESQ, POLQA a SQuad08 s výstupy formou MOS parametru, a to mezi dvěma mobilními telefony nebo mobilním telefonem a terminálem v pevné síti. Hodnotit přenos multimediálních datových toků lze také algoritmem ITU-T J.343.1, který je navržen pro objektivní neintrusivní testování i šifrovaných toků (YouTube, ...).

Funkcionalita řešení z pohledu hodnocení přenosu hovorového signálu:

- Outdoor testy a indoor (řešení iBWave).
- Podpora relevantních technologií pro mobilní sítě až do LTE-A / 5G / 5G NR.
- Podpora pro běžně dostupné mobilní přístroje s kompatibilním čipsetem firem (Qualcomm / HiSilicon / Exynos),
- Variabilní (plovoucí) licencování
- Disponuje analyzátory pro L3 komunikační protokoly s funkcionalitou dekódování zpráv (SIP, TCP/IP, ...).
- Funkcionalita vzdálené správy, skriptování, parametrizace testů, synchronizace parametrů, vizualizace formou grafů a vynesení do map, zpracování velkých objemů dat.
- Podpora testů pro hodnocení kvality přenosu hlasu mezi mobilními koncovými zařízeními nebo mezi mobilním koncovým zařízením a fixní sítí.
- Podpora pro hodnocení multimediálních přenosů metodikou ITU-T J.343.1.
- Hodnocení metodikou PESQ, POLQA a SQuad08, s výpočtem parametru MOS v reálném čase pro úzkopásmové i širokopásmové kodeky.

Obrázek 9 – Obrazovka s nastavením úkolu „Double Ended Call“.



## Keysight Technologies, Inc.

Společnost Keysight nabízí pro oblast monitorování a analýzy bezdrátových sítí komplexní řešení Nemo Wireless Network Solution (NWNS). Řešení disponuje relevantními HW prvky pro měření parametrů, adekvátním programovým vybavením pro uložení a zpracování dat, včetně SW nástrojů pro analýzu a vizualizaci dosažených výsledků. Vybrané komponenty řešení jsou:

- Nemo Handy – je softwarová aplikace, kterou lze instalovat do mobilního telefonu s operačním systémem Android. Aplikace ve spojení s HW umožňuje provádět outdoor a indoor, manuální i automatizované měření parametrů rádiového rozhraní (včetně LTE-A / 5G NSA / 5G SA / 5G NR), včetně hodnocení QoS / QoE. Jsou podporovány standardní telefony renomovaných výrobců (Samsung, Xiaomi, Sony) s čipovými sadami (Samsung Exynos, Qualcomm a MediaTek).

Monitorovat kvalitu přenosu hlasu v reálném čase lze metodikami POLQA v2 a v3, ViSQOL s hodnocením ve stupnici MOS. Umožňuje testování multimediálních datových toků aplikací OTT (YouTube, Facebook, WhatsApp, ...) metodikou PEVQ-S od společnosti OPTICOM GmbH. Pro měření RFI parametrů lze využít scannery třetích stran PCTEL Gflex ®/IBflex ®/HBflex ® a R&S® TSMA6. Nepodporované mobilní telefony lze dovybavit externím diagnostickým modulem (Nemo Diagnostic Module, přes USB) a obejít tak problémy s rootováním apod. Komponenta Nemo Handy se na jednotlivé produkty liší se funkcionalitou (Handy Basic, Handy Pro, Handy Field Test, ...).

- Nemo Industry Probe/ Nemo Active Probe – jsou HW komponenty řešení NWNS, které umožňují běh diagnostických aplikací v průmyslových prostředích nebo obecně v prostředích, které vyžadují vysoký počet automatizovaných měření či měření kontinuální pro monitorování stavu komunikační sítě.
- Nemo Walker Air – je zastřešující nástroj, který využívá komponentu Nemo Handy, pro walk testy vně i uvnitř budov.
- Nemo Outdoor 5G – je sw nástroj diagnostikující parametry komunikační sítě, parametry RFI i parametry vyšších vrstev včetně QoS / QoE, v drive testech.
- Nemo Cloud – je online služba propojující komponenty Nemo. Systém umožňuje vzdálený přístup v reálném čase k jednotlivým komponentám, umožňuje jejich ovládání, automatizované spouštění měřících úloh, automatizované zpracování naměřených výsledků a jejich sdílení, zpětné přehrávání a ukládání do centralizované úložiště.
- Nemo Global License Server – je nástroj pro centralizovanou správu licencí, včetně jejich dynamického přidělování podle potřeby.
- Nemo Analyze, Nemo WindCatcher – jsou další softwarové komponenty umožňující ve spolupráci s Nemo Cloud post-processing naměřených dat a jejich vizualizaci.

Funkcionalita řešení z pohledu hodnocení přenosu hovorového signálu:

- Outdoor a indoor testy (řešení iBWave/Google Maps).
- Podpora LTE / LTE-A / 5G NSA / 5G SA / 5G NR.
- Podpora pro běžně dostupné mobilní přístroje s kompatibilním čipsetem (Qualcomm/MediaTek/Exynos), scannery třetích stran PCTEL, R&S®, externí diagnostický modul NDM.
- Řešení nabízí vzdálenou správu, automatizaci měření a zpracování výsledků, ukládání a sdílení výsledků, vizualizace formou grafů a vynesení do map, zpracování velkých objemů dat.
- Funkcionalita vzdálené správy, skriptování, parametrizace testů, synchronizace parametrů, vizualizace formou grafů a vynesení do map, zpracování velkých objemů dat.
- Flexibilní licenční politika (přenos licencí, plovoucí, krátkodobé licence, ...)
- Hodnocení multimediálních toků OTT aplikací metodikou PEVQ-S.
- Podpora pro hodnocení metodikou ViSQOL.
- Hodnocení metodikou POLQA v2, v3 s hodnocením stupnicí MOS v reálném čase.

Obrázek 10 – Rozhraní produktu Nemo Outdoor<sup>62</sup>.



## 6.5 Dílčí shrnutí

Testovací řešení a aplikace jsou koncipovány pro ověřování různých služeb. A to buď postupně, nebo některé z nich současně. Vedle hovorových služeb se jedná o datové služby, kde se ověřuje dostupnost streamování videa a audia, přenos souborů a webové služby. V rámci ovládání testů se naplánují testy do posloupností dle daného cíle a poté se provedou, a to typicky ve stacionárním bodě, za chůze nebo jízdy.

Společným znakem jednotlivých řešeních je:

- Intuitivní a snadné nastavení rozsáhlého portfolia testů, včetně zpracování výsledků a jejich vizualizace formou protokolů.
- Kombinace testů do vlastního scénáře.
- Možnost měření ve stacionárním místě i možnost walk/drive testů.
- Paralelní využití více měřících terminálů.
- Nabídka certifikovaných měřících terminálů i možnost instalace měřícího SW do zřízení zákazníka/externí měřící moduly.
- Možnost zpracování velkého objemu dat a podrobnější analýzy formou cloudové služby. Nástroje pro vizualizace (typicky mapové podklady).

Testování kvality přenosu hlasu je u různých dodavatelů založeno na stejných metodikách (POLQA). Shodné je i poskytování výsledků prostřednictvím stupnice MOS. Výrobce může nabízet i dodatečné hodnotící metodiky, např. ViSQOL.

R&S a Keysight Technologies nabízejí širší spektrum využití než systém Enhancell, díky vyšší variabilitě v nastavení a počtu parametrů v konfiguraci testu.

<sup>62</sup> Zdroj obrázku: 5G NR field measurements with Nemo Outdoor and Qualcomm X50 modem, Keysight Technologies, Inc., <https://www.youtube.com/watch?v=LTPrKLVrJY4>.

Sofistikovanost a komplexnost řešení pro monitorování parametrů komunikačních sítí se u renomovaných nadnárodních výrobců liší jen minimálně. Nástroje, které výrobci nabízejí pro získávání dat (scannery vlastní nebo scannery třetích stran), nástroje pro zpracování a pro vizualizaci dat, se z pohledu své funkcionality významně neliší.

# 7 Současné a korelované ověřování radiových parametrů a parametrů kvality služby

## 7.1 Úvod do problematiky

### 7.1.1 Parametry datové komunikace a jejich vztah k parametrům radiového rozhraní

Obecně lze konstatovat, že aktuálně používané metodiky na vyhodnocování parametrů mobilních sítí se zaměřují nezávisle buď na RFI parametry (určení pokrytí signálem), nebo na datové parametry přenosu (dosahovanou přenosovou rychlost). Základním požadavkem je ověření, zda komunikační síť daného operátora splňuje rozvojová kritéria vyplývající z akcí kmitočtů, či dalších dokumentů a pravidel.

Specifickou oblastí měření, je ověřování kvalitativních parametrů z pohledu koncového uživatele (QoS / QoE), typicky ověření uživatelské zkušenosti v případě reklamací a v rámci ochrany spotřebitele. Bližší rozbor byl uveden v kapitole 2.1. Metodiky měření parametrů komunikačních sítí slouží k ověřování nejen jejich správné funkcionality, ale i hodnocení komunikační sítě pro řadu dalších účelů. V dnešní době například pro splnění dotačních kritérií při budování sítí nebo jejich částí apod.

Identifikace souvislostí mezi parametry fyzické vrstvy a parametrů na vyšších komunikačních vrstvách, by napomohla ke zpřesnění hodnotících procesů a usnadnila interpretaci výsledků. Je zřejmé, že ve fixních komunikačních sítích, ve kterých se parametry přenosového prostředí nemění nebo se mění velmi pomalu, lze takovou souvislost mezi parametry jednotlivých vrstev nalézt a analytickými vztahy snadněji popsat.

Moderní mobilní sítě jsou ale díky kladeným nárokům (mobilita) a charakteru využívaného přenosového prostředí (časová změna parametrů, interference, apod), významně složitější (různá kmitočtová pásma, řízení, ...). Určení vzájemných vztahů mezi RFI parametry a vyššími vrstvami se tak předpokládá spíše v rovině odhadů nebo doporučených intervalů zájmových parametrů, jak nastiňuje kapitola 2.1.7.

### 7.1.2 Postup při zpracování a analýze dat

Cílem této části studie je odpovědět na otázku, zda existují souvislosti mezi různým způsobem měřenými parametry (různými druhy analyzátorů) a na různých bodech (vrstvách) komunikačního řetězce a zda těchto souvislostí nelze využít pro zjednodušení procesů, zpřesnění hodnocení, dovozování souvislostí apod.

Následující text obsahuje základní postup zpracování dat a dále ukázky zpracování vzorků dat a jejich interpretaci.

Stanovení vzájemného vztahu (souvislostí) parametrů RFI a parametrů na vyšších komunikačních vrstvách vychází z dat získaných měřeními podle aktuálně platné metodiky ČTU pro kontrolu kritérií ve Výběrových řízení pro využívání kmitočtových pásem v mobilních sítích.

Typy lokalit vybraných pro analýzu:

- Měření za pohybu:
  - Kontinuální měření pokrytí obyvatelstva,
  - Liniová stavba – dálnice,
  - Liniová stavba – železniční koridor.
- Stacionární měření – zájmová lokalita (adresní místo).

Operátoři mobilních sítí: Provider\_A/B/C.

Technologie mobilních sítí:

- LTE (4G),
- 5G.

Pro porovnání jsou využity výsledky měření pracovníky ČTU z přehledového spektrálního analyzátoru TSMA a testeru parametrů datové komunikace F-Tester (parametry přenosu na vyšších komunikačních vrstvách zároveň se záznamem parametrů RFI poskytnutých radiomodemem). Při zpracování dat byly aplikovány zejména následující kroky:

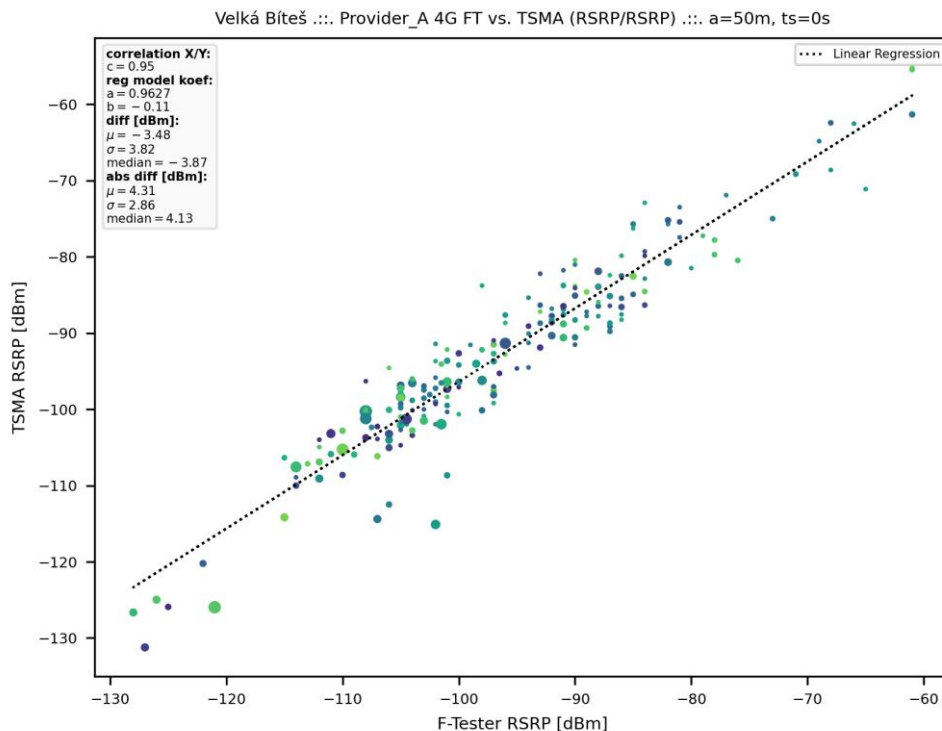
- Filtrace dat pro dané zájmové oblasti dle:
  - Technologie mobilní sítě,
  - Frekvenčního pásma atd.
  - Buňky mobilní sítě (PCI),
  - Polohy (GPS),
  - Stavů datového spojení měřicího zařízení k mobilní síti (vyloučení situací se ztrátou spojení se sítí).
- Časové zarovnání – zjištění posunu mezi parametry získanými z různých zařízení.
- Úrovňové zarovnání – zjištění diference – rozdílu měřících cest různých přístrojů a zohlednění anténní a signálové konfigurace (1 anténa vs. 4x4MIMO).
- Statistické zpracování dat.
- Porovnání trendů.

## 7.2 Výsledky analýzy a zpracování dat

### 7.2.1 Souvislost mezi RFI parametry získaných různým způsobem

Prvním krokem bylo ověření shodnosti naměřených výsledků oběma uvažovanými analyzátory. Níže uvedený graf porovnává naměřené výsledky parametru RSRP z analyzátoru TSMA a platformy F-Tester. Náměry jsou vztaženy ke stejné geografické poloze, kdy výsledky náměrů jsou zpracovány ve čtvercovém rastru se stranou 50 m. Lokalita náměru je město Velká Bíteš, technologii 4G.

Obrázek 11 – Srovnání změřeného parametru RSRP z analyzátoru TSMA a F-Tester pro lokalitu Velká Bíteš.

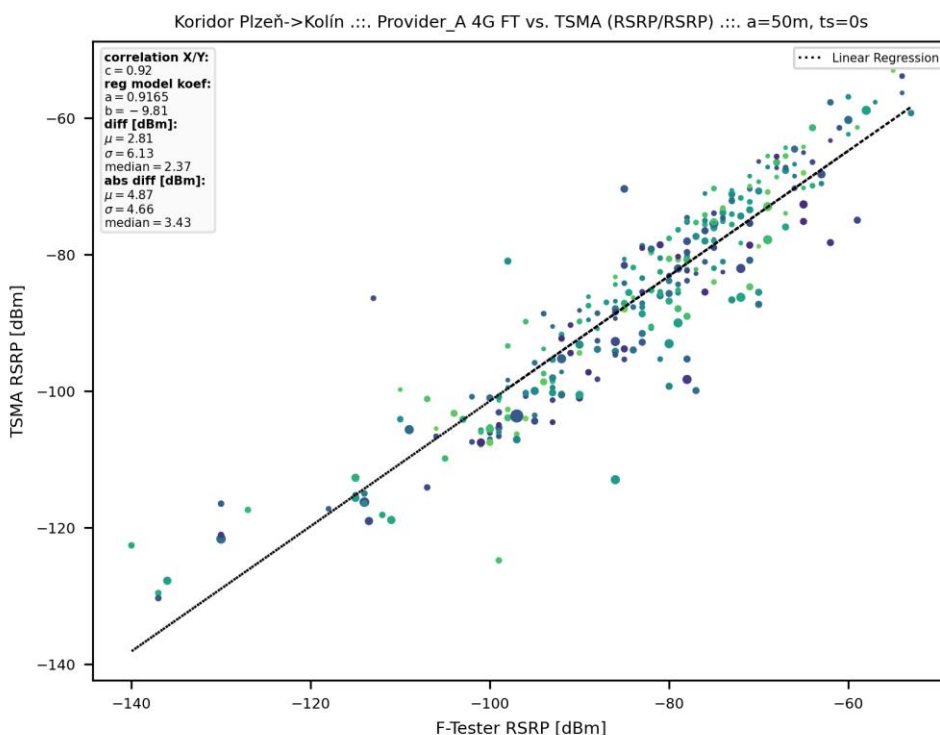


Počet provedených měření parametru RSRP v každém čtverci je reflektován velikostí bodu. Parametr ts udává případnou časovou korekci mezi jednotlivými náměry obou analyzátorů. Vzájemnou vazbu mezi výsledky analyzátorů TSMA a F-Tester vyjadřuje Pearsonův korelační koeficient  $c$ . Čím více je vztah mezi zájmovými výsledky přímo úměrný (roste jeden, stejně roste i druhý), blíží se koeficient hodnotě 1. Pro nekorelované výsledky je hodnota koeficientu 0. Pokud jsou porovnávány výsledky nepřímo úměrné, blíží se koeficient hodnotě -1.

Při zpracování naměřených údajů je také proveden výpočet lineární regrese Scikit-learn modelem pro ověření statistických závislostí. Výpočtem jsou určeny parametry křivky a statistické parametry pro naměřené hodnoty TSMA a FT vzhledem k této křivce – medián, střední hodnota a směrodatná odchylka.

Se stejnými parametry filtrace, jako u lokality Velká Bíteš, je na následujícím grafu zobrazen výsledek porovnání liniové stavby koridor Plzeň-Kolín.

Obrázek 12 – Srovnání změřeného parametru RSRPI z analyzátoru TSMA a F-Tester pro železniční koridor Plzeň-Kolín.



Dílejší část analýzy se zabývala vztahem mezi parametry RSSI (je používán v terminálech pro indikaci úrovně v celém pásmu) a RSRP (indikuje referenční signál a je použit v podmínkách ČTÚ pro definici pokrytí signálem). Hodnota rozdílu reflektuje situaci, jak moc se mění přenosové podmínky na rádiovém rozhraní a jak dynamicky pracuje systém automatického řízení vysílací úrovně v rámci modulace OFDM a časových slotů přidělovaných základnovou stanicí terminálům.

Teoretické předpoklady vycházejí z poměru celkové šířky využitého pásma (odpovídá RSSI) a šířky jednoho subkanálu OFDM modulace (odpovídá referenčnímu subkanálu, v němž se měří úroveň RSRP). Poměr vyjádřený v dB odpovídá rozdílu obou parametrů dle vztahu:

$$RSRP = RSSI - 10 \cdot \log(S) = RSSI - 10 \cdot \log(12 \cdot N) = RSSI - 10 \cdot \log(B \cdot 12 / 0,2) \quad [\text{dBm}; \text{dBm}, -; \text{dBm}, \text{MHz}]$$

kde S je počet subkanálů využívaných modulací OFDM a N je počet PRB (Physical Resource Blocks). Jeden PRB přitom odpovídá šířce pásma 200 kHz a odpovídá 12 subkanálům OFDM. B je šířka pásma použitá pro dané pásmo (datový přenos). Teoreticky tedy rozdíly mezi RSSI a RSRP vycházejí pro pásmo 10 MHz 28 dB a pro pásmo 20 MHz 31 dB (pro stabilní neměnní se podmínky přenosu).

## 7.2.2 Souvislost mezi RFI parametry a parametry přenosu dat

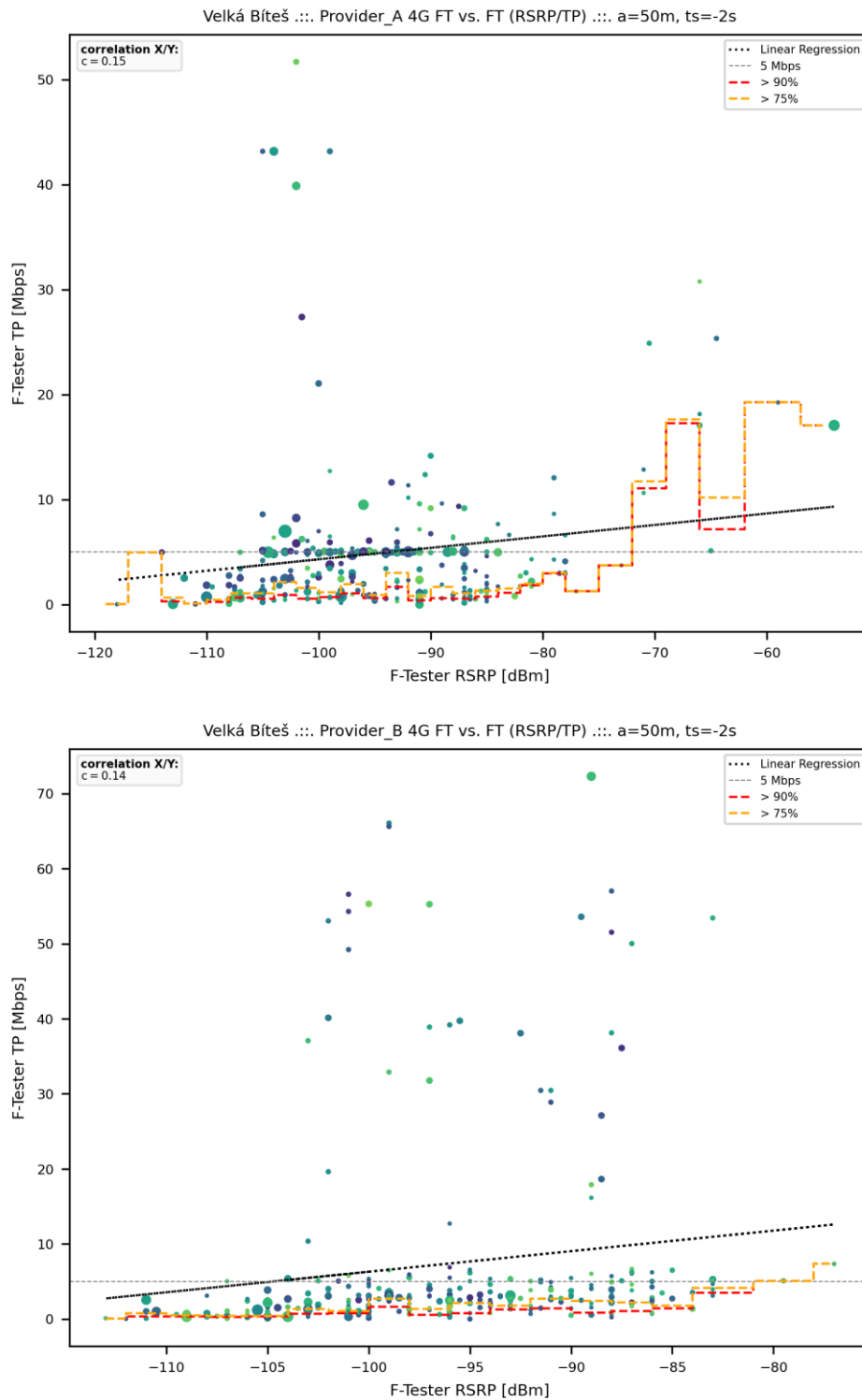
Následující grafy zobrazují zpracování naměřených výsledků dosažené datové propustnosti na L4 v závislosti na RSRP pro platformu F-Tester. V rámci demonstrace možnosti korelace závislosti RFI parametrů a parametrů vyšších komunikačních vrstev, byly zpracovány typizované lokality zahrnující osídlenou oblast – město Velká Bíteš, liniové stavby – železniční koridor Plzeň – Kolín a dálnici D4. Ve všech měřeních se jedná o technologii 4G a sestupný směr.

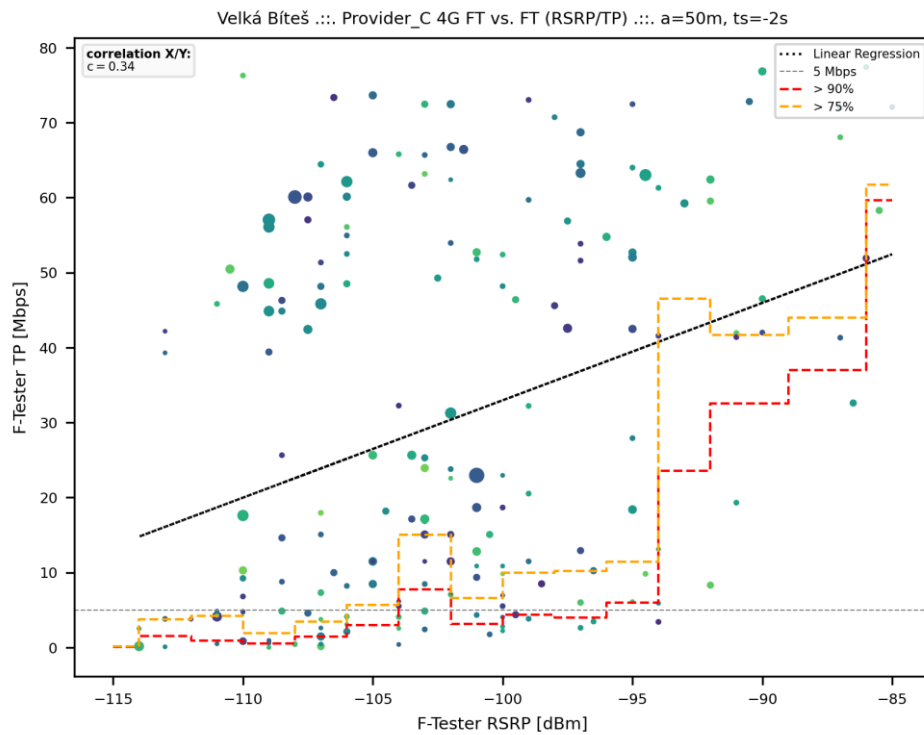
Grafy poukazují na komplikovanost v závislosti parametrů datové komunikace pro mobilní síť. Mimo parametrů rádiového rozhraní, je datový přenos ovlivněn i parametry a nastavením základnové stanice, nastavením jádra mobilní sítě a parametry propojení do sítě Internet. V městské aglomeraci Velká Bíteš jsou dosažené hodnoty přenosové rychlosti ukázkového měření (parametr TP) relativně nízké. Bez dalších měření je však nemožné určit příčinu tohoto stavu. Je například možné, že se jedná o výsledek nastavené politiky na základnových stanicích a důsledek okamžitého zatížení sítě, protože výsledky měření u poskytovatelů Provider\_A a Provider\_B jsou obdobného charakteru. Výsledky u poskytovatele Provider\_C jsou ovšem odlišné.

V grafech je zobrazena limitní hodnota přenosové rychlosti 5 Mbit/s. Pro liniové stavby typu dálnice D4 jsou limitní hodnoty přenosové rychlosti navýšeny na 10 Mbit/s. Dále je v grafech vyobrazen 25. percentil (oranžová křivka), který vyjadřuje

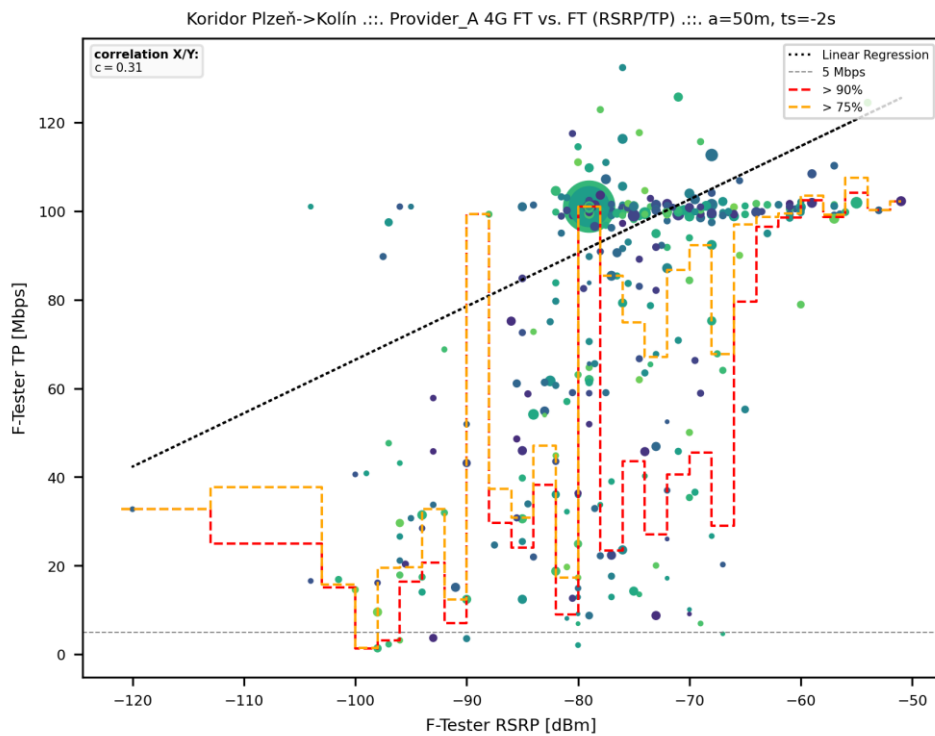
skutečnost, že nad křivkou se nachází 75 % měření. Při plnění podmínek Výběrového řízení na rádiové kmitočty, by tak oranžová křivka by měla být nad přímkou limitní přenosové rychlosti. Červená křivka demonstruje přísnější podmínky, kdyby minimální přenosná rychlost měla být splněna ve více jak 90 % měřeních.

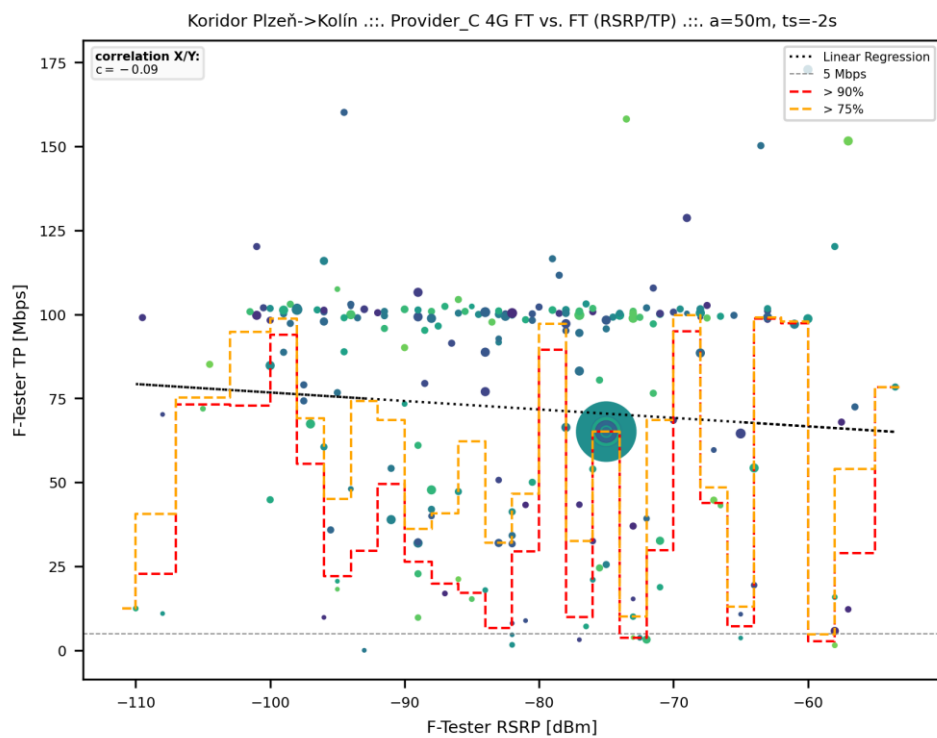
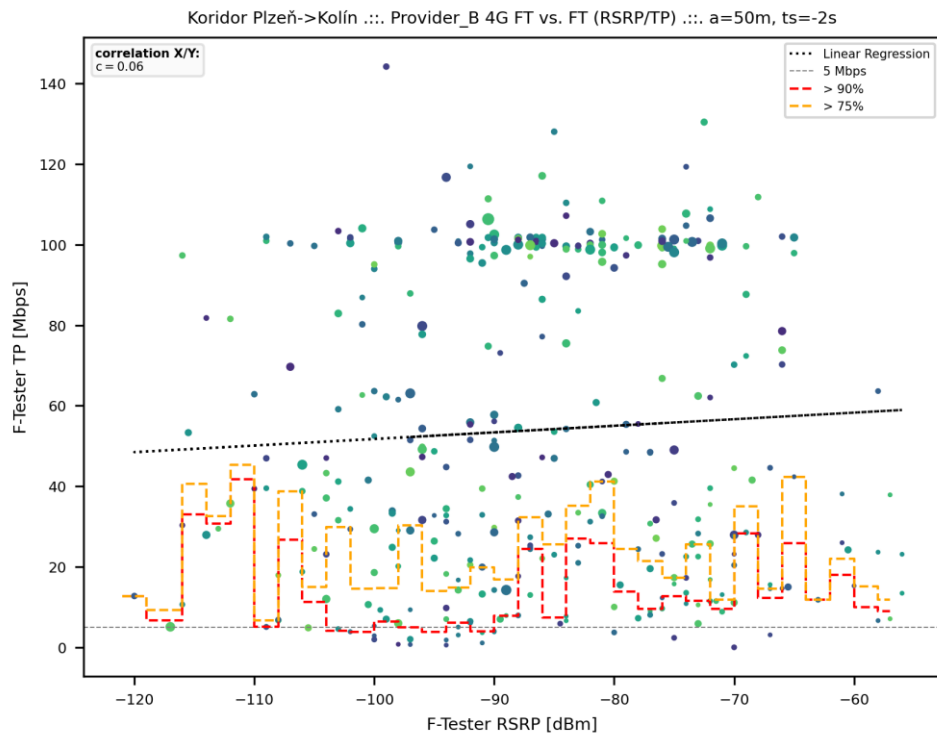
Obrázek 13 – Závislost propustnosti datového spoje na parametru RSRP pro lokalitu Velká Bíteš.



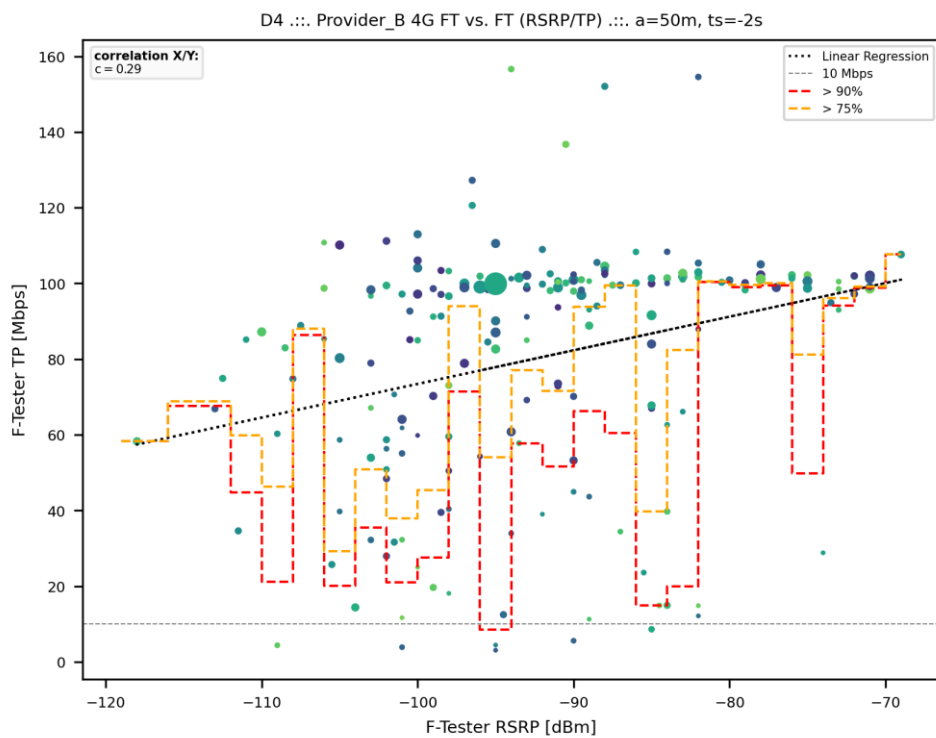
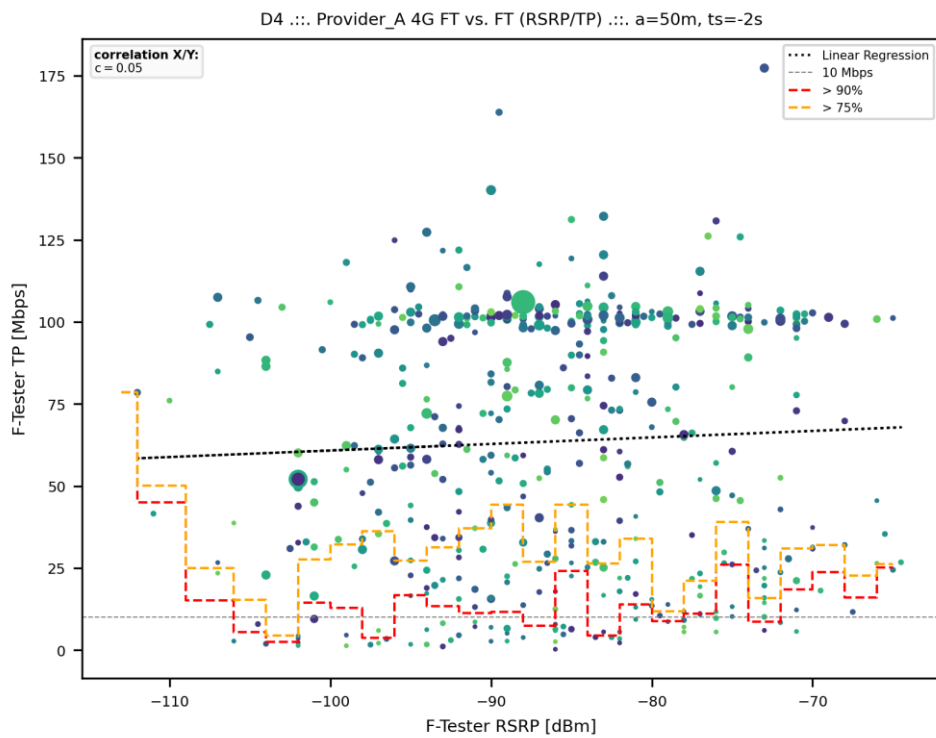


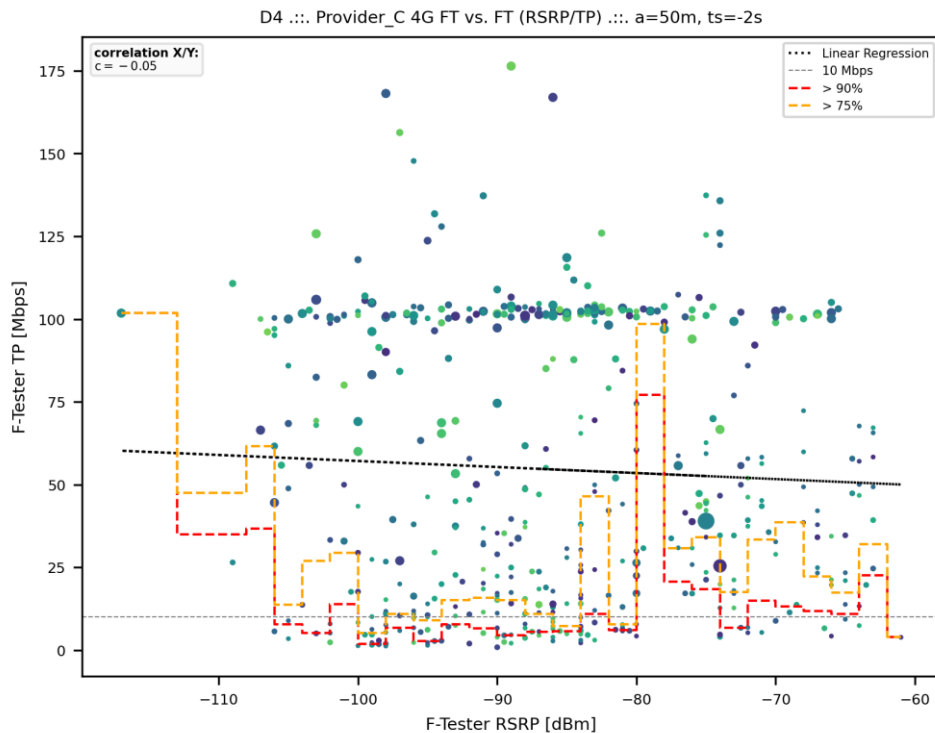
Obrázek 14 – Závislost propustnosti datového spoje na parametru RSRP pro železniční koridor Plzeň – Kolín.





Obrázek 15 – Závislost propustnosti datového spoje na parametru RSRP pro dálnici D4.





Z uvedených grafů, je možné rámcově vyčíst hodnotu parametru RSRP, pro kterou 75 % koncových uživatelů dosáhlo na hodnotu 5 Mbit/s resp. 10 Mbit/s datového přenosu. V tabulce níže jsou odečtené hodnoty uvedeny, společně s přepočtem na referenční podmínky (odpovídá výsledkům měření analyzátoru TSMA), včetně limitní hodnoty parametru RSRP, která je uvedena v podmínkách výběrových řízení u jednotlivých typů lokalit.

Tabulka 7 – Porovnání změřených hodnot RSRP s dosažením hodnoty TP = 5 Mbit/s (resp. 10 Mbit/s pro dálnici D4) a hodnot RSRP dle rozvojových kritérií pro zajištění pokrytí.

Lokalita	Operátor	Naměřená FT RSRP [dBm] pro TP = 5 Mbit/s	Hodnota RSRP [dBm] dle kritérií	Přepočtené RSRP pro TSMA	Poznámka
Velká Bíteš	A	-73	-100 až -109	-69,5	
	B	-75	-100 až -109	-73,5	
	C	-106	-100 až -109	-103,6	
Koridor Plzeň – Kolín	A	-98	-109 až -114	-100,8	
	B	-114	-109 až -114	-117,4	
	C	-110	-109 až -114		Nelze provést korekci dle dat měření.
Dálnice D4	A	-102	-118	-102,6	
	B	-118	-118	-120,8	
	C	-98	-118	-99,01	

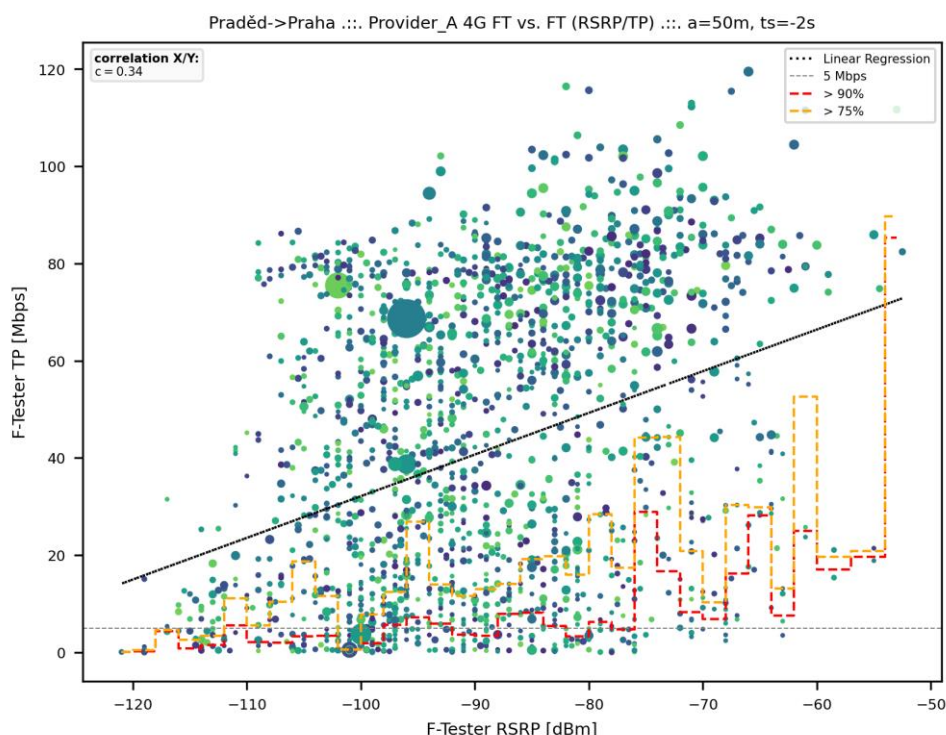
Měření a grafy ukazují, že:

- U ověřování přenosové rychlosti na železničním koridoru a dálnici je patrný limit v maximální hodnotě přenosové rychlosti testovacího datového toku (tok UDP 100 Mbit/s).
- S klesající hodnotou RSRP by mělo docházet k poklesu hodnoty přenosové rychlosti datového spoje. Z grafů plyne, že přenosová technologie je v širokém rozsahu hodnot schopna poskytovat adekvátní prostředky pro dosažení požadované přenosové rychlosti blízké přibližně 100 Mbit/s. Tato rychlost odpovídá nastavené hodnotě pro testovací datový tok analyzátoru (konstantní tok UDP). Při limitní hodnotě RSRP dojde k rychlému rozpadu datového spojení.

- S rostoucí hodnotou RSRP by mělo docházet ke spolehlivějšímu datovému přenosu – dosažení přenosové rychlosti testovacího datového toku. Graf takovýto předpoklad nepotvrzuje. Nejpravděpodobnější se jeví vysvětlení, že významnější měrou se projevuje sdílení kapacity sítě většimu množství uživatelů a jejich vzájemné ovlivňování.
- Významné překračování hodnoty přenosové rychlosti testovacího toku pak ukazuje na využití bufferování datových toků v síťových prvcích (ukládání do vyrovnávací paměti a její uvolňování při uvolnění prostředků sítě).

### 7.2.2.1 Souvislost mezi RFI parametry a propustností TCP

Nastavení charakteru datového testovacího toku hraje při testování vyšších komunikačních vrstev zásadní roli. Při použití datových toků řízených protokolem TCP v jiné zpracovávané lokalitě lze z naměřených výsledků získat následující závislost propustnosti na RSRP.



Po analýze byla data zarovnána ke standardní čtvercové síti se stranou 50 m, agregována a byl aplikován časový posuv z důvodu odlišných časových okamžiků získávání hodnot (RSRP vs. TP).

Získané náměry ukazují, že testovací datový tok dokázal detekovat skutečnou propustnost mobilní sítě. S rostoucím parametrem RSRP postupně narůstá i hodnota propustnosti k limitní hodnotě mobilní sítě – cca 80 Mbit/s. I s rostoucím RSRP není tato hodnota propustnosti výrazně přesahována, což může být způsobeno například politikou základnové stanice nebo přetížením datového spoje mezi základnovou stanicí a jádrem sítě. Z náměru je patrné, že i při vysokých hodnotách RSRP je často dosahována velmi nízká hodnota propustnosti (jednotky nebo nízké desítky Mbit/s). To může znamenat velké zatížení radiové přístupové sítě uživateli, případně indikovat situace na rozhraní buněk, kde dochází k interferencím signálu.

Z grafu lze odečíst, že pro hodnoty přibližně od RSRP = -100 dBm je splněn předpoklad trvalého dosažení hodnoty přenosové rychlosti 5 Mbit/s pro 75 % měření.

Důležité je mít na paměti, že přenosová rychlost je složena z dílčích datových toků v dostupných (a sítí přidělených) kmitočtových pásmech. Zaznamenávané hodnoty parametrů RFI se týkají jednoho konkrétního pásma, typicky primárního pásma, ve kterém se navazuje spojení se sítí a vyměňují se signalizační zprávy. Obecně mohou být parametry v různých pásmech různé, a to může způsobit značné odchylky od předpokládaných trendů (data mohou téci více přes jiné pásmo, než pro které máme RFI data a které má lepší hodnoty). Pro nepřilíši vzdálená pásma se dá předpokládat obdobný trend (pokles úrovně při vzdalování od základnové stanice). Pro komplexnější analýzu by bylo nutné zaznamenat RFI parametry pro všechna aktivní pásma a provádět průměrování, případně zahrnout i váhování vzhledem k šířce daného pásma v rámci agregace nosných.

Na již analyzovaných a zarovnaných datech, lze provést zkušební korekci spočívající v nezapočítání dat s vysokou hodnotou zpoždění při přenosu (parametr RTT). Po neuvažování takových dat, tj. dat představujících data typicky přenášená sítí s

malou hodnotou BDP, dojde k rozpadu jakékoliv korelace mezi zájmovými parametry v náměru. V náměru se neobjevila nějaká nová/jiná závislost. Pro podrobnější analýzu by byla nutná další měření. Nyní lze jen například spekulovat, že datová síť má stále příliš velké "bufferování dat" a proto při zátěži dojde k nárůstu RTT bez nějakého většího omezení ze strany sítě.

Pro hledání korelace mezi parametry RFI a parametry vyšších komunikačních vrstev, bude jedním ze stěžních faktorů správné nastavení testovacího datového toku. Testovací datový tok nesmí přetěžovat datovou kapacitu dostupnou na zájmové základnové stanici. Měření by se měla definovaným způsobem opakovat pro eliminaci anomálií vzniklých vlastnostmi přenosové prostředí či mimořádným chováním koncových uživatelů.

Měření kombinující TCP toky a souběžně UDP tok na pozadí by mohlo vyřešit problém při zahlcování sítě a s tím související problém zaplnění a následného vyprazdňování vyrovnávacích pamětí (bufferů) na rozhraních buněk a jádra sítě.

## 7.3 Dílčí závěry doporučení pro další postup

Jak ukázala analýza na vzorku dat, měření za jízdy (drive testy) generují data s velkým dynamickým rozsahem a změnami podél trajektorie měření. V tom případě hraje velkou roli průměrování dat, které se dnes provádí na referenční síť čtverců.

Z grafů závislosti propustnosti na úrovni referenčního signálu je možné rámcově vyčíst hodnotu parametru RSRP, pro kterou 75% koncových uživatelů dosáhlo na hodnotu 5 Mbit/s datového přenosu. V provedené analýze odečtené hodnot přepočtených na referenční podmínky (odpovídá výsledkům měření analyzátoru TSMA) je provedeno porovnání s aktuálně platnými limitními hodnotami parametru RSRP, která je uvedena v podmínkách výběrových řízení u jednotlivých typů lokalit. Nebyl identifikován důvod k případné změně těchto limitů. Pro zásadnější závěry by bylo nutné provést zpracování a analýzu výrazně většího souboru dat přes velké množství lokalit.

Pro přesnější stanovení limitů lze doporučit nepoužívat zátěžové testy vysokou rychlostí UDP (typicky 100 Mbit/s sestupný směr) pro mobilní měření (problém bufferování dat na přechodu mezi buňkami a v okrajových částech sítě), ale pouze pro stacionární měření v dobře pokrytých oblastech. Naopak doporučujeme měření právě limitní rychlostí (UDP tok 5 Mbit/s sestupný směr, v okrajových oblastech sítě případně i menší), kdy na výsledcích lze snadno indikovat RFI parametry při nichž nebyla rychlost splněna. K zjištění dostupné kapacity sítě lze přitom využít souběžné toky TCP, které v důsledku svého vlastního regulačního mechanismu nevedou k přetěžování sítě.

Důležité je mít na paměti, že přenosová rychlost je složena z dílčích datových toků v dostupných (a sítí přidělených) kmitočtových pásmech. Zaznamenávané hodnoty parametrů RFI se týkají jednoho konkrétního pásma, typicky primárního pásma, ve kterém se navazuje spojení se sítí a vyměňují se signalizační zprávy. Obecně mohou být parametry v různých pásmech různé, a to může způsobit značné odchylky od předpokládaných trendů (data mohou téci více přes jiné pásmo, než pro které máme RFI data a které má lepší hodnoty). Pro nepříliš vzdálená pásma se dá předpokládat obdobný trend (pokles úrovně při vzdalování od základnové stanice). Pro komplexnější analýzu by bylo nutné zaznamenat RFI parametry pro všechna aktivní pásma a provádět průměrování, případně zahrnout i váhování vzhledem k šířce daného pásma v rámci agregace nosných.

# 8 Shrnutí, závěry a doporučení

Ověřování pokrytí je důležitou činností v rámci správy kmitočtového spektra Českým telekomunikačním úřadem, při prověřování plnění rozvojových kritérií operátory nad přidělenými kmitočtovými pásmy, ale i z hlediska ochrany spotřebitele a zjišťování plnění smluv o poskytování služeb sítí elektronických komunikací.

Zjišťování a ověřování pokrytí území radiokomunikačními službami se v České republice provádí pomocí běžně používaných metod a technik, zejména měřením úrovně signálu na různých místech pomocí přenosných měřících zařízení, měřením pomocí vozidel vybavených specializovanou měřicí technikou, vyhodnocením pomocí softwarových nástrojů a matematických modelů formou predikce úrovně pokrytí a také sledováním stavu a výkonnosti sítí v reálném čase.

Na základě zadání a vývoje techniky v dané oblasti se studie zaměřuje na vybrané způsoby zjišťování a ověřování pokrytí s dílčími závěry tak, jak byly analyzovány podrobně v samostatných kapitolách a jsou stručně shrnuty v tomto přehledu. Při zpracování byla hlavní pozornost věnována pokrývání mobilními službami, zejména službami 5G.

**Družice pro monitorování rádiového spektra**, primárně mobilních sítí v terestrickém segmentu v reálném čase, se ukazují jako prakticky nevyužitelné. Pouze v případě, že vyzařovací diagramy pozemských vysílačů umožní šíření signálu směrem do kosmu, je po průchodu zemskou atmosférou možné prakticky kromě vlastního spektra šířeného signálu identifikovat s jistou pravděpodobností geografickou polohu zdroje signálu. Tímto způsobem lze sledovat i vyzařování rádiového smogu radiokomunikačních služeb z pozemských vysílačů do kosmického prostoru.

V souvislosti s rostoucí orientací na využívání kosmu jsou kladeny požadavky i na rozvoj kosmických telekomunikací. To povede i na nutnost tvorby a zavádění odpovídajících technických metod pro monitorování rádiového spektra. Daná problematika si bezpochyby vyžádá samostatnou studii, která se bude komplexně zabývat tématem správy rádiového spektra v kosmických telekomunikacích s ohledem na výstupy a studijní výsledky radiokomunikačních konferencí WRC-27 a WRC-31 a na rozvoj družicových technologií a podpory jejich aplikací ve vědě, výzkumu, průmyslu a službách.

**Využití dronů** – jde o vhodný a velmi efektivní doplněk k drive testům nebo walk testům v mobilních bezdrátových sítích. K dispozici jsou různá měřidla a různé měřicí metody pro různé parametry. Obecně lze provozní požadavky na dron shrnout jako požadavky na maximální dobu letu, maximální odolnost vůči povětrnostním vlivům, maximální nosnost a minimální cenu. Požadavky na měřicí přístroje vycházejí z měřících úloh a z nosnosti použitého dronu. Kromě toho se musíme zaměřit i na provedení a konstrukci, protože běžné přístroje nejsou primárně určeny pro nasazení v dronech. Většina výrobců má ve svém portfoliu vhodné přístroje i potřebné příslušenství jako jsou různé typy antén, RF měřicí kabely atp. Výjimkou jsou kompletní systémy např. od firem Nokia Drone Networks a Deviser, kdy je dron dodáván s integrovaným měřicím systémem.

V platné legislativě chybí výjimky pro vybrané státní orgány a instituce. Konkrétním příkladem je ČTÚ odpovědný za kontrolu kmitočtového spektra. Měl by mít výjimky pro provádění měřících letů. Je například nevhodné žádat o souhlas s provozem dronu majitele pozemku, který má na svém pozemku zdroj RF rušení, neoprávněnou vysílací stanici nebo stanici vysílající mimo přidělená pásma. Praxe ukazuje, že takové kontroly jsou pak bezpředmětné.

Praxe ukazuje, že dochází k rozdílným výsledkům mezi simulacemi a naměřenými hodnotami v reálném terénu a provozu. Rozdíly jsou jak u jednotlivých operátorů, mezi operátory a samozřejmě i vůči ČTÚ. Tyto rozdíly vyplývají ze skutečnosti, že každý ze subjektů používá jiné počáteční podmínky popisující dané teritorium a jiné simulační aplikace. Bylo by ku prospěchu výchozí podmínky sjednotit, případně podrobně analyzovat, za jakých podmínek dochází k rozdílným.

Část studie, která se zaměřuje na **použití vyspělejších technologií**, byla na základě diskuse se zadavatelem zaměřena na testování hlasové komunikace, kde je aktuální potřeba inovace měřícího vybavení. Testování kvality přenosu hlasu je u různých dodavatelů založeno na stejných metodikách (zejména POLQA). Shodné je i poskytování výsledků prostřednictvím stupnice MOS. Řešení pro monitorování parametrů komunikačních sítí se u renomovaných nadnárodních výrobců liší jen minimálně. Ani nástroje pro získávání, zpracování a vizualizaci dat se z pohledu své funkcionality významně neliší.

Testovací řešení a aplikace, jsou obvykle koncipovány pro ověřování různých druhů služeb. A to buď postupně, nebo některé z nich současně. Vedle hovorových služeb se jedná o datové služby, kde se ověřuje kvalita streamování videa a audia, přenos souborů a dostupnost webové služby.

Pro testování OTT hlasových nebo video aplikací není k dispozici specifická metodika. Existují metodiky pro hodnocení kvality přenosu obrazové nebo audio/video informace ve standardizovaných přenosových technologiích, např. CaTV, IPTV a videohovorů s využitím protokolů RTP / RSTP / SIP. Hodnocení OTT služeb se děje obvykle v souladu s proprietární metodikou té které společnosti, která takovéto služby nabízí.

Jak ukázala analýza nad vybraným vzorkem dat, **současné a korelované ověřování radiových parametrů a parametrů kvality služby** je možné, ale pro vypovídající závěry vyžaduje zpracování velkého množství dat z různých lokalit. Měření za jízdy (drive testy) generují data s velkým dynamickým rozsahem a změnami podél trajektorie měření. V tom případě hraje velkou roli průměrování dat, které se dnes provádí na referenční síť čtverců.

Ze závislosti propustnosti na úrovni referenčního signálu je možné rámcově vyčíst hodnoty parametru RSRP, pro které významné procento koncových uživatelů dosáhlo na požadovanou rychlost datového přenosu. Ty je možné porovnat s aktuálně platnými limitními hodnotami parametru RSRP, které je uvedeny v podmínkách výběrových řízení. Nebyl identifikován důvod k případné změně těchto limitů. Pro tyto případy by bylo žádoucí generovat UDP tok právě požadovanou minimální rychlostí, aby nedocházelo k přehlcování sítě, případně zbytek kapacity vyplňovat tokem s protokolem TCP.

## 8.1 Souhrn

Tabulka 8 – Souhrnná charakteristika analyzovaných řešení

	Přínosy	Zvláštní podmínky	Realizovatelnost	Omezení	Země, ve kterých se zavedlo	Rámcové náklady	Další důležitá fakta
Spektrální monitorování pomocí družic (získání výsledků v reálném čase)	Nelze použít pro pozemský segment, ale aktuální je pro kosmický sektor.	Dáno extrémními podmínkami vesmírné mise.	Realizovatelné ve spolupráci s jinými zeměmi a ESA.	Z družic lze jen omezeně lokalizovat významné pozemské vysílače (nebo zdroje rušení).	Spíše experimenty a monitorování kosmického smogu.	Velmi vysoké náklady, které lze snížit sdílením s jinými subjekty a projekty. Náklady na malé družice jsou řádově menší.	Nejeví se jako aktuální potřeba pro podmínky malého území ČR, spíše pro globální území Evropy.
Použití dronů pro měření (provádění měření v obtížně přístupných nebo nebezpečných oblastech)	Dnes již dobře zvládnutá technologie. Bezpečné, rychlé a relativně levné řešení.	Provádění měření vyžaduje ve většině případů zvláštní povolení v souladu s platnou legislativou.	Testování již u ČTÚ probíhá, je žádoucí rozšíření pro další úlohy.	Geografické zóny, Hustě osídlené prostory, Klimatické vlivy.	EU	Zahrnuje náklady na dron, měřicí techniku a letecký personál. Náklady lze snížit realizací subdodavatelsky.	Pouze jeden mobilní operátor používá vlastní vybavení a personál, ostatní řeší subdodavatelsky.
Využití vyspělých simulačních modelů a technik založených na strojovém učení	Zvýšení přesnosti modelování a interpretace dat.	Nutné sjednocení vstupů simulačních modelů. Nutné rozsáhlé soubory dat pro trénování modelů.	Redukce nepřesností současných modelů podmíněno legislativní podporou a zavedením referenčního modelu terénu za asistence ČÚZK.	Dynamické změny parametrů přenosového prostředí.	EU	Licenční poplatky za SW, náklady na výpočetní výkon.	
Použití vyspělejších technologií (měření kvality přenosu hlasu)	Hlasové služby jsou stále podstatné v sítích elektronických komunikací a sledovat jejich kvalitu je žádoucí.	Specifické algoritmy pro objektivní vyhodnocení kvality na souborech hlasových vzorků.	Běžná funkcionalita testovacích systémů renomovaných výrobců uzpůsobená i pro walk a drive testy.	Většina řešení využívá standardních mobilních terminálů, výsledky mohou být jimi ovlivněny, není reálná rychlá obměna novu za nové modely.	Používá se prakticky ve všech vyspělých zemích a u většiny operátorů pro průběžné sledování kvality.	Vyšší stovky tisíc až jednotky mil. Kč podle vybavení a konfigurace.	U hlasových služeb bude žádoucí doplnit vedle hodnocení kvality hovoru také vyhodnocování kvality konverze.
Současné a korelované ověřování radiových parametrů a parametrů kvality služby (QoS, případně QoE)	Úroveň signálu vždy nemusí být zárukou služby s danými parametry, komplexní sledování a vyhodnocení může zpřesnit limity pro pokrytí.	Je nutno průběžně sledovat a vyhodnocovat velké množství dat, podmínky v mobilní síti, zvláště za pohybu se velmi dynamicky mění.	Realizovatelnost je dobrá, protože jde o zpracování existujících a průběžně získávaných dat s doplněním dalších pohledů a vyhodnocení.	Omezení jsou dána počtem měřících vozů a jejich posádek, dále rychlostí průjezdu, kdy nemusí být dostatek dat pro vyhodnocení v územním čtverci.	Obvykle se používá samostatné měření radiových parametrů a parametrů QoS.	Náklady na vývoj doplňkových SW modulů na zpracování velkého množství dat. Úpravy metodik pro měření rychlosti přenosu dat.	Při testech propustnosti je vhodné kombinovat toky UDP a TCP tak, aby nedocházelo k zahlcení sítě.

## 8.2 Doporučení vyplývající ze studie

Měření pokrytí geografického území radiovými signály, průběžné monitorování a vyhodnocování parametrů poskytovaných služeb, jsou nezbytné úlohy spojené se zajištěním provozu bezdrátových sítí elektronických komunikací a s efektivním využitím spektra. Ve svém důsledku i s ochranou spotřebitele.

Doporučujeme průběžně sledovat vývoj v oblasti metod a technik zjišťování a ověřování pokrytí radiokomunikačními službami, zejména mezinárodních standardů, měřících metod, technik vyhodnocení a simulací. Speciálně pak se zaměřit na následující:

- V souvislosti s rostoucím významem fixního LTE a fixního 5G analyzovat potřeby měření a testování v této oblasti, a to i v kontextu sítí a podmínek VHČN.
- V souvislosti s rostoucím rozvojem privátních sítí 5G, zejména v průmyslu, analyzovat potřeby měření a testování v této oblasti, a to i v kontextu očekávaného využití pásma 26 GHz.
- Při využití dronů se snažit o rozšíření jejich využitelnosti, mj. zavedením výjimek v platné legislativě pro provádění měřících letů.
- Iniciovat podrobnější analýzu simulačních a měřících nástrojů a jejich výsledků u operátorů a ČTÚ s cílem sjednotit výchozí podmínky, metodiky a kritéria.
- Podrobněji a průběžně v čase analyzovat vztahy mezi radiovými parametry a parametry kvality služby vedoucí k validaci, případně změně limitů pokrytí. Pro tyto účely optimalizovat metodiku měření parametrů přenosu dat.
- V souvislosti s rostoucí orientací na využívání kosmu se zabývat tématem správy rádiového spektra v kosmických telekomunikacích s ohledem na výstupy a studijní výsledky radiokomunikačních konferencí WRC-27 a WRC-31 a na rozvoj družicových technologií a podpory jejich aplikací ve vědě, výzkumu, průmyslu a službách.