



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DIAGNOSTIKA MOBILNÝCH SIETÍ
MOBILE NETWORK DIAGNOSTICS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Radko Krkoš

ŠKOLITEL
SUPERVISOR

doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.

BRNO 2018

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou diagnostiky mobilních sítí, různými metodami použitelnými k tomuto účelu a taky postupy pro technickou diagnostiku a navazující odstraňování problémů či optimalizaci mobilních sítí. Jsou popsány služby, které jsou mobilními sítěmi obvykle realizované, jejich požadavky na kvalitu služby a způsoby jejich analýzy.

KLÍČOVÁ SLOVA

dohledové centrum, drive testing, pasivní sondy rozhraní, služby mobilních sítí, agenti na mobilních terminálech, klíčové výkonnostní indikátory, metodika

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá problematikou diagnostiky mobilných sietí, rôznymi metódami použiteľnými k tomuto účelu a tiež postupmi pre technickú diagnostiku a nadväzujúce odstraňovanie problémov či optimalizáciu mobilných sietí. Sú popísané služby, ktoré sú mobilnými sieťami obvykle realizované, ich požiadavky na kvalitu služby a spôsoby ich analýzy.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

dohľadové centrum, drive testing, pasívne sondy rozhraní, služby mobilných sietí, agenti na mobilných termináloch, kľúčové výkonnostné indikátory, metodika

ABSTRACT

The thesis deals with the topic of mobile network diagnostics, different methods applicable for this purpose and methodology for technical diagnostics and consequent error mitigation or mobile network optimisation. Service commonly offered by mobile networks and their quality of service requirements and analysis methods are described.

KEYWORDS

operations and maintenance centre, drive testing, passive interface probes, mobile network services, mobile terminal agents, key performance indicator, methodology

Obsah

Úvod	1
1 Technológia mobilných sietí	2
1.1 Historický vývoj mobilných sietí	2
1.2 Architektúra mobilnej siete	4
1.3 Služby v mobilných sieťach	5
1.3.1 Okruhovo spínaná doména	5
1.3.2 Paketovo orientované OTT služby	6
1.3.3 Služby integrované do siete	7
1.3.4 Zabezpečenie kvality služby	7
2 Diagnostické metódy	9
2.1 Dohľadový subsystém	9
2.2 Drive testíng	10
2.3 Pasívne sondy rozhraní	11
2.4 Agenti na používateľských koncových zariadeniach	13
3 Zameranie a ciele dizertačnej práce	14
4 Prístrojové vybavenie a realizácia experimentálneho pracoviska	15
5 Diagnostika mobilných sietí	18
5.1 Štatistické nástroje	18
5.2 Korelácia výsledkov analýz riadiacej a používateľskej roviny	19
5.3 Relačná analýza	20
5.4 Cielenie diagnostických zásahov	21
5.5 Modelovanie prvkov mobilnej siete pre diagnostické účely	21
5.6 Kľúčové výkonnostné indikátory	22
6 Výskum a aplikácie diagnostiky mobilných sietí	23
6.1 Metodika diagnostiky mobilných sietí	23
6.1.1 Ciele	24
6.1.2 Výskumný plán a kľúčové aktivity	25
6.2 Automatizovaný analyzátor rozhraní mobilných sietí	26
6.2.1 Ciele a kľúčové aktivity	27
6.2.2 Popis realizácie automatizovaného analyzátoru rozhraní mobilných sietí	27
6.3 Využitie navrhutej metodiky pre diagnostiku komerčnej mobilnej siete	29

6.3.1	Analýza úspešnosti a výkonu paketovo orientovaných dátových služieb	29
6.3.2	Porovnanie KPI v rádiovkej prístupovej sieti odlišných dodávateľov technológie	29
6.3.3	Porovnanie jednotlivých variantov Circuit Switched Fallback	30
6.3.4	Akceptačné testovanie VoLTE rôznymi diagnostickými nástrojmi	30
7	Záver	32
	Použitá literatúra	33
	Vlastné publikácie	36

Úvod

Mobilné bunkové siete kompletne zmenili spôsob, akým používatelia využívajú dátové a telekomunikačné služby. Všadeprítomný vysokorychlostný prístup k sieti Internet, ktorý mobilné siete ponúkajú, umožňuje organizáciu času, aktivít a spôsob prístupu k informáciám, ktoré predtým neboli dostupné pomocou žiadnej inej technológie. Táto skutočnosť tiež spôsobuje, že mobilné siete sú ako prístupová sieť k Internetu používatelmi preferované pred inými alternatívami, čo v praxi vedie k nárastu pomeru objemu dát prenesených mobilnými sieťami v pomere ku všetkým realizovaným dátovým prenosom. Vzhľadom k tomu sú mobilné siete, ktoré sú dosť drahé na výstavbu a prevádzku, využívané blízko zahltenia, najmä v prípade rádiového rozhrania, typického úzkeho hrdla, ale často taktiež v iných častiach siete. Preto akákoľvek metóda vedúca k zvýšeniu efektivity prenosu mobilnými sieťami vedie k značným úsporám a tiež k lepšej službe pre používateľov.

Diagnostika komplexných systémov využíva postupy z modelovania systémov pre zostavenie referenčného modelu, často založeného na teoretických poznatkoch o fungovaní, ďalej merania pre zistenie statických parametrov a dynamického chovania reálnych systémov, simulácie pre overovanie vyššieho správania a dopadov navrhovaných úprav a tiež analýzy pre teoretické testovanie hypotéz. Z toho dôvodu má diagnostika vysoké požiadavky na teoretické znalosti fungovania analyzovaných systémov a tiež zodpovedajúci základný výskum, ďalej prístrojové vybavenie pre presné špecializované meranie a náročné výpočty a na matematický aparát pre vyhodnocovanie a návrh optimalizačných zásahov pri aktívnej diagnostike. Zároveň je z praktického hľadiska nutná pokročilá automatizácia celého procesu kvôli objemu spracovávaných dát a rozmerom stavovému priestoru systému a tiež dostupnosť diagnostiky ako nástoja pokrývajúceho systém ako celok ale umožňujúceho špecializáciu na konkrétne súčasti či generalizáciu na väčšie celky podľa rozsahu a podstaty primárneho problému.

Text práce začína literárnou rešeršou popisujúcou ako použitú literatúru, tak publikácie, na tvorbe ktorých sa autor podieľal. Nasleduje krátky teoretický úvod popisujúci architektúru mobilnej siete a charakterizujúci služby v mobilných sieťach realizované. Ďalej nasleduje kapitola o aktuálnom stave problematiky diagnostiky mobilných sietí.

V druhej časti si autor vytyčuje ciele a nasledujúce kapitoly popisujú ich naplnenie. Nakoniec je problematika zhrnutá a sú formulované nezodpovedané otázky a určené možné ciele pre ďalšiu teoretickú a praktickú prácu v oblasti diagnostiky mobilných sietí.

1 Technológia mobilných sietí

Pred analýzou mobilných sietí a pokusom o optimalizáciu prenosu je, ako v prípade v podstate akejkoľvek inej témy, vhodné sa pozrieť na historický vývoj. Len zamýšľanie nad tým ako sme sa dostali k súčasnému stavu ho totiž umožňuje naozaj pochopiť a odhadnúť potreby pre ďalší rozvoj.

1.1 Historický vývoj mobilných sietí

Najvýznamnejšou technickou prerekvizitou pre mobilnú telekomunikáciu je realizácia prenosu rádiovými vlnami. Po prvých demonštráciách Heinricha Hertza (1888), Nikoly Tesly (1893) a Alexandra Stepanoviča Popova (1895) sa ako prvá komerčne úspešná technológia komunikačného prenosu rádiovými vlnami ukázal bezdrôtový telegraf Guglielma Marchese Marconioho (1897). Systém ale využíval kódovanie Morseovou abecedou a nejednalo sa o prenos hlasu.

Systémy pre mobilnú telefóniu sa začali objavovať v 20-tych rokoch 20. storočia, napr. medzi silovými a policajnými zložkami USA (United States of America, Spojené štáty americké) a tiež pre použitie v námornej komunikácii. Neskôr malo kladný vplyv začatie využívania frekvenčnej modulácie, čo sa prejavilo najmä v rádiokomunikačných systémoch počas druhej svetovej vojny. Následne sa vojenská technológia začala využívať pre poskytovanie mobilnej telefónnej služby vo väčších amerických mestách, ale s veľmi limitovanou kapacitou.

Prvá generácia mobilných sietí, od 70-tych rokov 20. storočia, využívala analógový prenos a najväčšie zlepšenie bolo zavedenie bunkového systému. To umožňovalo pokrytie ľubovoľne veľkého územia s využitím obmedzeného frekvenčného pásma a z toho vyplývajúcu možnosť kapacitného škálovania siete. Patria sem systémy ako AMPS (Advanced Mobile phone system, mobilná sieť prvej generácie) v USA a Japonsku, severoeurópsky NMT (Nordic Mobile Telephone) či britský TACS (Total Access Communication System, variant AMPS). Veľmi aktívne bolo Nemecko s jeho tromi subgeneráciami analógových systémov A-Netz (1958), B-Netz (1972) a C-Netz (1985).

Najväčšie zlepšenie druhej generácie bolo zavedenie digitálneho prenosu a časového či kódového multiplexovania a s ním spojený výrazný nárast prenosovej kapacity mobilných sietí. Ďalším zlepšením je zavedenie voliteľného šifrovania signalizácie a hovorových dát, z používateľského a obchodného hľadiska zase zavedenie veľkej škály doplnkových služieb a najmä služba prenosu krátkych správ v GSM (Global System for Mobile communications, mobilná sieť druhej generácie). Sieť GSM tiež umožňovala okruhovo spínaný prenos dát, tzv. CSD (Circuit Switched Data, prenos, spravidla paketovo orientovaných, dát ponad okruhovo spínaný spoj v rádiovnej prístupovej sieti v mobilných sieťach), ktorý sa v dobe zavedenia vyrovnal možnostiam CSD prenosov v pevných telefónnych sieťach, no neskôr začal rýchlo zaostávať. Okrem GSM v Európe boli vyvinuté a nasadzované ďalšie technológie pre siete druhej generácie, využívané najmä v USA, napr. vylepšené verzie systému AMPS - IS-54B (digitálny prenos hlasu, analógová signalizácia) a neskôr plne digitálny systém IS-136, či tiež IS-95 CDMA (technológia Qualcomm).

Ďalej štandardizačný proces prešiel pod organizáciu 3GPP (3rd Generation Partnership Project, organizácia zastrešujúca štandardizáciu mobilných bunkových komunikačných systémov od tretej generácie ďalej) a tak začala práca na tretej generácii mobilných sietí. Nové myšlienky ale mali vplyv aj na druhú generáciu, kde niektoré technológie a postupy boli spätne portované pre využitie v sieťach druhej

generácie, najmä pre zlepšenie návratnosti vybudovanej infraštruktúry a urýchlenie dostupnosti týchto technológií pre používateľov – zákazníkov. Najdôležitejšou takouto technológiou je podpora paketového prenosu dát GPRS (General Packet Radio Service, prenos paketovo orientovaných dát rádiovým rozhraním mobilnej siete GSM), ktorá rozširuje GSM sieť o paketové jadro a upravuje rádiovú prístupovú sieť pre umožnenie takýchto prenosov. Upravená sieť sa označuje za sieť 2,5G. Neskôr bola tiež podobne implementovaná technológia EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution, zlepšenie technológie GPRS, zvyšujúce prenosové rýchlosti využitím výkonnejších modulačných a kódových schém), ktorá zaviedla nové kódové schémy a tým priniesla zvýšenie priepustnosti prenosu paketových dát po rádiovom rozhraní. Umožnenie prenosu paketovo spínaných dát výrazne zlepšilo dostupnosť a praktickú využiteľnosť mobilných dátových služieb, nakoľko kvôli lepšiemu zdieľaniu zdrojov viedlo k zníženiu cien, keď zákazník platí len za prenesené dáta bez ohľadu na dobu pripojenia. To umožňuje používateľom byť stále dostupnými aj v rámci dátových služieb a teda napr. priebežnú mobilnú prácu s e-mailom.

Nevýhodou GSM bolo to, že sa jednalo o európsky štandard a napriek veľkému rozšíreniu existovali a boli nasadzované konkurenčné nekompatibilné riešenia a tak stále nebolo možné využívať skutočný globálny roaming. Toto sa snaží riešiť tretia generácia mobilných sietí, kde v podstatnej väčšine krajín sveta bola nasadená technológia UMTS (Universal Mobile Telecommunications System, mobilná sieť tretej generácie). Okrem tohto štandardu sa prakticky používa len konkurenčný CDMA2000 (evolúcia IS-95 CDMA) a aj to len obmedzene v USA a Južnej Kórei, kde v oboch krajinách sú dostupné aj siete založené na technológii UMTS. Tretia generácia mobilných sietí sa okrem zlepšenia možností paketového prenosu dát zvýšením prenosových rýchlostí a znížením latencie, špeciálne v nadväzujúcich technológiách rodiny HSPA (High Speed Packet Access, systém pre zvýšenie prenosovej rýchlosti paketových dát v sieti UMTS), začala viac na paketovo prepínanú doménu spoliehať. Plánovalo sa všeobecné nasadenie videotelefónnej služby využívajúcej paketovo prepínaný prenos dát a riadenej subsystémom IMS. Táto služba sa ale nikdy nedokázala komerčne presadiť, kvôli nedostatočnému vybudovaniu sietí tretej generácie v dobe nasadzovania, nekompetitívnemu naceneniu a predovšetkým kvôli nízkej praktickej pridanej hodnote pre používateľov v porovnaní s klasickou telefónnou službou.

Štvrtá generácia mobilných sietí kompletne vypúšťa okruhovo spínanú doménu. To znamená, že telefónne hovory musia byť riešené buď dočasným prepnutím do paralelne vybudovanej siete 2G (mobilná sieť druhej generácie) či 3G (mobilná sieť tretej generácie), technológia sa označuje CSFB (Circuit Switched Fall-Back, technológia využitia k sieti štvrtej generácie paralelne prevádzkovanvej siete druhej či tretej generácie pre prenos okruhovo spínaných telefónnych hovorov počas doby ich realizácie) [21], keď sieť štvrtej generácie slúži len pre dátové prenosy, alebo neskôr s využitím technológie VoLTE (Voice over LTE, technológia pre paketovo orientovanú telefónnu službu v mobilných sieťach 3,9G a 4G), ktorá je aplikáciou VoIP (Voice over Internet Protocol, prenos hlasových hovorov cez paketovo orientované dátové siete) do mobilných sietí. Využívanie len paketovo prepínaného prenosu umožňuje zjednodušenie architektúry mobilnej siete a tiež lepšie zdieľanie prostriedkov a teda zvýšenie praktickej kapacity mobilnej siete, najmä z hľadiska počtu paralelne obsluhovaných koncových zariadení. To je veľmi dôležité kvôli veľkému nárastu počtu koncových zariadení, najmä kvôli IoT (Internet of Things, komunikačný systém pre fyzické zariadenia) a M2M (Machine to Machine, komunikácia dvoch fyzických zariadení), keď mobilnú sieť využívajú okrem ľudí aj stroje a zariadenia, a to vo veľkom rozsahu, ale väčšinou s malými objemami dátových prenosov.

Tým sa dostávame k súčasnosti, keď sú väčšinou paralelne prevádzkované jedným operátorom prepojené siete druhej, tretej a štvrtej generácie súčasne. To umožňuje znížiť náklady na budovanie infraštruktúry, najmä využitím kombinovaných základňových staníc, ale tiež pokrývaním novou technológiou prednostne lukratívnych územných častí, keď v ostatných dočasne postačuje aj len technológia staršej generácie. Z pohľadu diagnostiky ale takéto riešenie v podstate exponenciálne zvyšuje náročnosť a tiež sťažuje testovanie konfiguračných zásahov mierených na zlepšenie parametrov siete pred finálnym nasadením.

1.2 Architektúra mobilnej siete

Kompletná architektúra mobilnej siete, najmä v prípade posledných generácií či multigeneračných inštalácií, je značne zložitá, pozostávajúca z množstva prvkov vzájomne prepojených niekoľkými desiatkami rozhraní. Konceptne sa ale môžeme pozrieť na aktuálne používané mobilné siete druhej, tretej a štvrtej generácie, a nájsť spoločné rysy. Vždy je prítomná základňová stanica (angl. base station), realizujúca rádiový spoj s účastníckym koncovým zariadením. Následne je tu riadiaci prvok základňových staníc (angl. base station controller), ktorý je od 4G (mobilná sieť štvrtej generácie) integrovaný so základňovou stanicou, naopak v predchádzajúcich generáciách mohol riadiť aj viac ako jednu základňovú stanicu. Tieto dva funkčné prvky tvoria rádiovú prístupovú sieť. Problematika diagnostických a optimalizačných zásahov do produkčnej rádiovkej prístupovej siete bola riešená v [44] s prihliadnutím na minimalizáciu vplyvu týchto zásahov na ďalšie funkcie.

Rádiová prístupová sieť sa následne napája na okruhovo spínané jadro a/alebo paketovo spínané jadro. Pôvodne sa používalo len okruhové spínanie a uvedená architektúra vyplýva z toho, že podpora paketových prenosov bola do mobilnej siete integrovaná doplnením takmer nezávislého paketovo spínaného jadra a zdieľaním rádiovkej prístupovej siete s časovým oddelením pre oba typy prenosu. Okruhovo spínaná a paketovo spínaná doména sa z pohľadu prevádzkovaných služieb od seba líšia najmä poskytovanými parametrami kvality služieb a možnosťou zdieľania infraštruktúry. Zatiaľ čo prenosy pomocou okruhového spínania ponúkajú službu s nízkou latenciou a jej kolísaním za cenu vyhradenia prostriedkov pre konkrétneho používateľa počas celej doby realizácie služby, prepínanie paketov umožňuje efektívnejšie zdieľanie prostriedkov medzi jednotlivými používateľmi a službami, čo umožňuje znížiť prevádzkové náklady, následne cenu telekomunikačnej služby a tiež lepšie škáluje s počtom používateľov a umožňuje uspokojiť požiadavky na vyššiu špičkovú či okamžitú požadovanú prenosovú rýchlosť v prípade nízkeho vyťaženia ostatnými používateľmi. Podrobne je architektúra mobilných sietí popísaná napr. v [4], so zameraním na mobilné siete 3G.

Z hľadiska diagnostiky veľmi dôležitou časťou mobilnej siete je transportné jadro (angl. transport core) alebo tiež nosná sieť (angl. backhaul). Úlohou tohto subsystému je prenos komunikácie medzi jednotlivými prvkami mobilnej siete zahŕňajúcej ako signalizáciu, tak, čo do dátového objemu významnejšie, tunelované používateľské dáta. Funkčnosť transportného jadra sa priamo prejavuje na spoľahlivosti a výkone mobilnej siete, keď v prípade problémov v tejto oblasti dochádza k výraznej degradácii všetkých kvalitatívnych parametrov. Historicky boli pre realizáciu nosnej siete používané najmä dva varianty líšiace sa podobne ako okruhovo a paketovo spínané jadro a vychádzajúce z filozofie týchto dvoch systémov. Pre potreby realizácie okruhovo komutovaných služieb a teda historicky starší je prenosový systém založený na časovom delení do slotov využívajúci technológiu E1/T1 (systém časovo

deleného multiplexovaného prenosu dát využívajúci časové sloty), ponúkajúci nízku latenciu s prakticky nulovým kolísaním a konštantnú prenosovú rýchlosť. Tento systém umožňuje aj prenos paketovo prepínaných služieb, ale za cenu zníženia efektivity a zvýšenia zložitosti kvôli nutnosti využitia prenosu vo viacerých časových slotoch. Pre realizáciu paketovo komutovaných služieb je vhodnejšie použitie tohto typu prenosu, zväčša založenom na rodine technológií Ethernet. Prenos okruhovo spínaných dát je v tomto prípade možný tiež, pre zabezpečenie kvality služby sa využíva naddimenzovanie prenosového systému. Treťou možnosťou je využitie systému založeného na prepínaní buniek, napr. ATM (Asynchronous Transfer Mode, technológia telekomunikácie založenej na prepínaní buniek), ktorá teoreticky umožňuje lepšiu podporu kombinovaného prenosu okruhovo a paketovo komutovaných služieb, v praxi je ale efektívnejšie, najmä z ekonomického hľadiska, využitie rozumne naddimenzovaného paketovo spínaného transportného jadra. Problematiku optimalizácie prepínania dátových jednotiek v transportnom jadre na tretej vrstve pomocou protokolu OSPF s rozdelením záťaže medzi alternatívne cesty a so zachovaním parametrov kvality služby boli riešené v na seba nadväzujúcich publikáciách [RK1], [RK2] a [RK3]. Monitorovaniu funkcií transportného jadra sa venovala tiež [42] a podrobnejšie so zameraním na ucelenú metodiku [45].

1.3 Služby v mobilných sieťach

Mobilné siete pochopiteľne neexistujú samoučelne, ale preto, aby používateľom poskytovali telekomunikačné služby. Operátor mobilnej siete za poskytované telekomunikačných služieb získava finančné prostriedky a vzhľadom na konkurenčné prostredie je potrebné, aby zabezpečoval dostatočnú kvalitu služby a parametre siete pre zachovanie spokojnosti zákazníkov. V priebehu času vzniklo množstvo rôznych telekomunikačných služieb poskytovaných nad mobilnými sieťami, majúcich často veľmi rôzne požiadavky na kvalitu služby.

1.3.1 Okruhovo spínaná doména

Historicky najstaršia transportná a prepínaná časť mobilných sietí, okruhovo spínaná doména, ktorá je základom mobilných sietí druhej a v podstate aj tretej generácie, podporuje väčšinu klasických telekomunikačných služieb, v prvom rade službu hovorovú. Pre prenos hovorových dát je tento typ komutácie optimálny, nakoľko umožňuje výborné zabezpečenie kvalitatívnych požiadaviek služby ako nízke oneskorenie a kolísanie oneskorenia. Vzhľadom na používané kódovanie pre prenos dát je následne dimenzovaná kapacita prepojovaných jednotiek a prepojovacích uzlov a hovorová služba tak má v okruhovo spínanej doméne podpornú infraštruktúru s dostatočnými a veľmi stabilnými parametrami.

Oproti klasickým pevným telekomunikačným sieťam musí ústredňa mobilnej siete navyše riešiť problematiku mobility používateľa a je teda viac logicky prepojená s prístupovou sieťou, kde hovor od konkrétneho koncového zariadenia môže prísť z v podstate ľubovoľnej časti prístupovej siete a takisto môže byť počas doby trvania prepájaný podľa pohybu používateľa a jeho koncovkej stanice.

Nad okruhovo spínanou doménou je možné okrem telefónneho hovoru realizovať aj dátové prenosy pomocou technológie CSD, podobnej vytáčanému dátovému spojeniu z pevných telefónnych sietí, ponúkajúcej dátové služby s nízkou latenciou a konštantným dátovým tokom.

Okrem hovorovej služby a ďalších základných služieb podporuje okruhovo spínaná doména aj širokú škálu služieb doplnkových, najmä ohľadom rôznych variantov indikácie čísla volajúceho účastníka, multiplexovania hovorov (konferenčný hovor, pridržanie hovoru) či presmerovania prichádzajúceho hovoru za rôznych okolností.

1.3.2 Paketovo orientované OTT služby

Najvýznamnejšou paketovo orientovanou OTT (Over The Top, transportovaná služba) službou je prístup k sieti Internet, aj keď v mobilných sieťach je pomerne časté sprostredkovanie pripojenia účastníckeho koncového zariadenia do iných, privátnych, dátových sietí, označované ako VPN (Virtual Private Network, tunelované pripojenie používateľského koncového zariadenia k lokálnej dátovej sieti) služba. Bez ohľadu na typ cieľovej dátovej siete je spravidla realizovaný prenos používateľských dát pomocou protokolu IP, i keď použitie iného prenosového protokolu je taktiež možné.

Protokol IP následne umožňuje transport všetkých bežných služieb protokolovej sady TCP/IP (protokolová sada používaná v sieti Internet) ako v iných dátových sieťach. Veľmi častou službou je prenos webového obsahu pomocou protokolu HTTP (HyperText Transfer Protocol, protocol pre prenos hypertextových dokumentov a ďalších dát), ďalej e-mail a tiež rôzne služby prenosu súborov. Z pohľadu diagnostiky sa analýza používateľskej roviny mobilných sietí teda nelíši od analýzy prenosov v akejkoľvek inej dátovej sieti. Analýze služby prenosu hypertextových dokumentov pomocou protokolov HTTP a HTTP 2.0 a vplyvu tejto služby na sieťovú infraštruktúru a tým iné služby bola venovaná práca [38].

Realizácia rôznych typov paketovo orientovaných služieb s metódami merania a analýzy je rozoberaná v [RK6] a vo väčšom rozsahu v [RK10]. Špeciálne problematika autentizácie, autorizácie a účtovania paketovo orientovaných prenosov v mobilných sieťach je rozobratá v [43].

Dôležitou skupinou, ktorej význam v čase narastá, sú multimediamiálne prenosy. Realizácia multimediamiálnych prenosov a zabezpečenie kvality služby v tomto prípade sú preberané v rámci [34]. Multimediamiálne prenosy po paketovo orientovaných sieťach je možné rozdeliť do dvoch kategórií, na prenosy v reálnom čase a na streamované multimediamiálne prenosy. Tieto skupiny sa líšia najmä požiadavkami kvality služby, ale obe kladú na sieť relatívne veľké nároky, typicky do značnej miery protichodné, pretože pre prenosy v reálnom čase je potrebná nízka latencia a teda doba odozvy systému, zatiaľ čo pre streamované multimediamiálne služby je to vysoká priepustnosť. Pri praktickej realizácii sa tieto dve požiadavky ukazujú ako protichodné, čo komplikuje návrh jednotlivých zariadení a tiež infraštruktúry ako celku.

Ďalším typom paketovo orientovaných služieb sú služby realizované pomocou multicastových prenosov, špeciálne služby zamerané na distribúciu dátového obsahu sú popisované v [35], ďalšou kategóriou takýchto služieb sú prenosy masového streamovania multimediamiálneho obsahu, napr. televízneho vysielania, podrobne rozoberané v [17].

Dôležitou, s predpokladaným rastom významu do budúcnosti, dátovou OTT službou je zabezpečenie komunikácie typu IoT či M2M, kde komunikujúce strany priamo nezahŕňajú ľudského účastníka. Systémy priemyselnej automatizácie využívajúce mobilné siete ako prístupové komunikačné siete sú bežnou praxou. Dokument [RK12] popisuje realizáciu senzorického systému, ktorý počítal s možnosťou využiť pre prenos dát konektivitu mobilnej siete ako záložnú možnosť v prípade výpadku hlavnej transportnej technológie.

1.3.3 Služby integrované do siete

Už od svojho počiatku boli mobilné bunkové siete vystavované problému, že pre zabezpečenie špeciálnych požiadaviek a funkcií potrebovali integrovať ďalšie služby. Zrejme najznámejšou službou, ktorá bola integrovaná do mobilných sietí, je služba posielania krátkych správ SMS. Riadiace prvky mobilnej siete, signalizácia na jednotlivých rozhraniach a zodpovedajúce procedúry sú vytvorené či rozšírené tak, aby sieť podporovala natívne túto novú, integrovanú službu. Služby integrované do siete sú napr. k paketovo orientovaným OTT službám kontrastné tým, že k ich realizácii sa využíva signalizácia v riadiacej rovine mobilných sietí a sú zabezpečované prvkami mobilnej infraštruktúry namiesto aplikačných serverov v sieti Internet.

Príkladom modernej služby integrovanej do mobilnej siete je sieťou riadená priama komunikácia medzi používateľskými koncovými stanicami na základe geografickej blízkosti. Overenie princípov tejto služby ešte v priebehu štandardizácie bolo realizované na experimentálnej mobilnej sieti a výsledky boli prezentované v [RK11].

Ďalšou službou či skôr sadou služieb vyžadujúcou špecializované procedúry riadiacej roviny a podporu v zariadeniach sieťovej infraštruktúry je zabezpečenie požiadaviek na kvalitu služby pre podporu komunikačných potrieb kritickej infraštruktúry štátu a priemyslu. V minulosti boli pre takéto účely budované vyhradené siete, napr. na základe technológie TETRA, čo je ale finančne pomerne náročné. Pre prenos napr. správ nižších stupňov utajenia je použitie bežných sietí, ak umožňujú zabezpečiť požiadavky na kvalitu týchto kritických služieb, akceptovateľné a vítané. Využitiu bežných mobilných sietí pre zabezpečenie komunikácie systémov kritickej infraštruktúry sa venuje [48].

1.3.4 Zabezpečenie kvality služby

Podpora zabezpečenia kvality služby (QoS) v mobilných sieťach je potrebná z dôvodu limitovanej priepustnosti rádiového rozhrania mobilnej siete, najmä v dobe zvýšenej záťaže, a nutnosti realizovať súčasný prenos mnohých typov služieb, využívaných viacerými používateľmi. V prípade realizácie okruhovo spínanej hovorovej služby je zabezpečenie kvality služby implicitné pomocou dopredného vyhradenia prostriedkov naprieč celou komunikačnou infraštruktúrou. Zložitejšia je situácia v prípade využívania paketovo prepínaných dátových služieb, ktoré sú v prípade mobilných sietí generácie 3,9G a vyššej využívané aj pre hovorovú službu, tzv. VoLTE.

Pre logické vyčlenenie paketovej dátovej komunikácie jedného koncového zariadenia sa využíva v mobilných sieťach koncept paketového dátového kontextu, čo je asociácia sieťovej adresy koncového terminálu a prístupového bodu k vonkajšej paketovej sieti APN (Access Point Name, názov prístupového bodu). V prípade, že jedno koncové zariadenie je pripojené k viacerým paketovo orientovaným sieťam, existuje pre neho teda niekoľko paketových dátových kontextov. V druhej a tretej generácii mobilných sietí sa paketový dátový kontext nazýva PDP (Packet Data Protocol, protokol pre prenos paketovo orientovaných dát v systémoch založených na GPRS) kontextom, v systémoch SAE (System Architecture Evolution, evolúcia architektúry jadra siete v mobilných sieťach 3,9G a 4G) zase PDN (Packet Data Network, identifikátor paketového dátového spoja v mobilných sieťach 3,9G a 4G) spojom.

Následne pre logické rozlíšenie kategórií realizovaných služieb v rámci jedného paketového dátového kontextu je používaný koncept tzv. nosičov (angl. bearer). Nosič je virtuálne spojenie

definované množinou parametrov podľa ktorých infraštruktúra mobilnej siete s tokmi prenášanými týmto nosičom zaobchádza. Vždy je vytvorený jeden implicitný nosič (angl. default bearer), ktorý poskytuje transport typu best-effort, bez garantovania prenosovej rýchlosti. Ak je určitý tok či toky nutné prioritizovať s určitými parametrami, je preň vytvorený vyhradený nosič (angl. dedicated bearer). Nosiče v rámci jedného paketového dátového kontextu zdieľajú jednu adresu sieťovej vrstvy (IP adresu), priradenú pri vytváraní implicitného nosiča. Vyhradené nosiče môžu byť s garantovanou (tzv. GBR – Guaranteed Bit Rate, systém zabezpečenia kvality služby s vyhradením pásma pre konkrétnu službu či skupinu služieb) alebo negarantovanou prenosovou rýchlosťou (tzv. Non-GBR). Ďalšími parametrami sú prioritizácia používaná pri spracovaní v plánovači paketov (angl. packet scheduler), horná hranica oneskorenia paketov a paketová chybovosť, definujúca maximálnu hodnotu pomeru počtu neprijatých paketov k odoslaným. Ďalším, veľmi dôležitým, parametrom nosiča je ARP (Allocation and Retention Priority, prioritizácia pridelovania a uchovania), ktorý definuje na úrovni riadiacej roviny prioritu vytvorenia nosiča na úkor iných či jeho zrušenia v prípade vyčerpania kapacity. Jedná sa len o binárnu funkciu existencie konkrétneho nosiča v konkurencii ostatných nosičov, ktorá nemá, na rozdiel od predchádzajúcich parametrov, vplyv na prenos jednotlivých paketov.

V rámci jedného nosiča je možné prenášať niekoľko služieb, definovaných pomocou SDF (Service Data Flow, vzor dátovej služby), kde každá služba môže pozostávať z jedného alebo viacerých používateľských tokov. Agregácia jednotlivých používateľských tokov (v používateľskej rovine definovaných napr. pomocou tzv. 5-tuple, t.j. kombinácie zdrojovej a cieľovej IP adresy, protokolu a zdrojového a cieľového portu transportnej vrstvy) do SDF je vykonávaná na základe TFT (Traffic Flow Template, vzor premávkového toku).

Podrobnejšie informácie ohľadom implementácie kvality služby v mobilných sieťach je možné nájsť v [47], vrátane popisu prvkov siete zabezpečujúcich tieto funkcie, rozhraní medzi týmito prvkami a procedúr pre realizáciu podpory kvality služby v mobilných sieťach.

Zabezpečenie kvality služby v transportovanej používateľskej rovine je ďalšia záležitosť. Túto problematiku je ale tiež potrebné riešiť, pretože podpora kvality služby musí byť realizovaná E2E (End to End, po celej dĺžke trasy), pretože degradáciu na čiastkovom úseku nie je možné korigovať inde. Je preto vhodné medzi používateľským koncovým zariadením a druhou komunikujúcou stranou niekde v Internete realizovať zabezpečenie kvality služby pomocou metód známych z dátových sietí. Značkovanie sieťovej premávky na koncovom zariadení s OS Windows pre zabezpečenie podpory kvality služby podľa metodiky DiffServ rieši [RK4]. Ďalej problematikou nasadenia a koexistencie triple-play služieb v dátových sieťach založených na IP protokole sa zaoberá [40].

2 Diagnostické metódy

Termín diagnostika vychádza z lekárskeho vied a znamená identifikáciu podstaty zdravotných problémov, ich klasifikáciu a vyhodnotenie. V technickej diagnostike ide analogicky o identifikáciu, klasifikáciu a vyhodnotenie symptómov indikujúcich odchýlku od normálneho stavu technického systému, kde výsledkom je diagnóza, na základe ktorej sa následne pokračuje opravou či optimalizáciou systému. Termín symptóm označuje indikátor, získaný pozorovaním či meraním nenormálneho stavu systému s určitou mierou istoty (pravdepodobnosti). Následne syndróm je množinou symptómov spoločne charakterizujúcich konkrétny nenormálny stav systému. Pri popise nenormálneho stavu hovoríme o poruchách (angl. fault) a zlyhaniach (angl. failure). Zatiaľ čo porucha je stavom systému keď aspoň jeden z jeho komponentov či súčastí vykazuje degradované či nenormálne chovanie, zlyhanie je udalosť keď systém prestáva plniť aspoň jednu zo svojich funkcií. Po zlyhaní nasleduje v rámci technickej diagnostiky systematická analýza postihnutého systému, či jeho častí, vedúca k identifikácii prejavu zlyhania, jeho mechanizmu a príčiny (angl. root cause). Technickú diagnostiku teda môžeme definovať ako analýzu symptómov a syndrémov pre určenie podstaty porúch a zlyhaní technických systémov. [1]

Tradičný prístup k diagnostike, ale aj k výkonnostnému testovaniu mobilných sietí, podľa dokumentov 3GPP, je za pomoci výpočtu a porovnávania tzv. kľúčových výkonnostných indikátorov (KPI – Key Performance Indicator), kde k ich získaniu môžu slúžiť, s rôznym stupňom výpovednej hodnoty, napr. dohľadový subsystém, drive testing, agenti na používateľských koncových zariadeniach či pasívne sondovanie rozhraní.

V prípade nutnosti ohodnotenia či optimalizácie siete sa ustanovia hladiny, ktoré musia hodnoty získaných indikátorov presiahnuť, aby sieť bola považovaná za dostatočne výkonnú. Tieto hladiny a aj skupiny indikátorov sú ale stanovované takmer až ľubovoľne, podľa preferencií konkrétneho operátora, dodávateľa technológie či firmy vykonávajúcej diagnostické a optimalizačné služby na konkrétnej sieti. To bohužiaľ vedie k získaniu a následnej práci s množinou čísel, ktorá je ťažko porovnateľná s prístupom a výsledkami inej autority.

2.1 Dohľadový subsystém

Dohľadový subsystém ako integrálna súčasť ľubovoľnej komerčnej mobilnej siete je prvou voľbou pre diagnostiku siete, indikáciu a riešenie problémov. Jeho kvality a možnosti v tejto oblasti ale veľmi závisia na tom, čo implementoval jeho dodávateľ. Možnosť rozšíriteľnosti a doplnenia pôvodne nepodporovaných výkonnostných ukazovateľov je totiž väčšinou veľmi obmedzená.

Veľkou výhodou dohľadového subsystému oproti iným variantom je spravidla výrazne väčšia škála podporovaných výkonnostných indikátorov k podmienkam na rádiovom rozhraní. Údaje sú dostupné z pohľadu základňovej stanice, čo v podstate neumožňuje žiadna iná metóda. V prípade niektorých dodávateľov je tiež možné pracovať so štatistikami získanými z výsledkov meraní zasielaných mobilnými koncovými stanicami siete pri rôznych príležitostiach. Takáto funkcia ale rozhodne nie je pravidlom u všetkých dodávateľov. Funkčne dohľadový subsystém komunikuje so všetkými súčasťami mobilnej siete ktoré dohľadá. Na získavanie údajov a štatistík o fungovaní týchto zariadení využíva ich vstavané meracie a reportovacie služby. Tieto dáta sú sprístupnené pomocou tzv. počítadiel (angl. counter).

Z hodnôt počítačiel sa následne za použitia väčšinou len základných matematických operácií generujú ďalšie štatistiky ako rôzne súhrnné hodnoty či percentuálne vyjadrenia úspešností jednotlivých procedúr.

Z toho vyplývajú dve veľké nevýhody. Za prvé je nutné veľmi úzke prepojenie dohľadového subsystému a dohľadovaného zariadenia, často nad rámec dostupných štandardov a teda sa jedná väčšinou o proprietárne riešenie, z čoho vyplýva potreba vytvorenia oboch častí jednou autoritou alebo veľké vynaložené úsilie v prípade dohľadového subsystému tretej strany. Existuje síce možnosť používať štandardné nástroje ako napríklad sprístupniť počítačľá pomocou protokolu SNMP, ale aj keď sa výrobca vydá touto cestou, stále nemusí sprístupniť popis svojej vetvy MIB (Message Information Base, stromová štruktúra definujúca systém informačných štruktúr o sieťovom zariadení pre použitie s protokolom SNMP) databázy, čo vec komplikuje skoro rovnako ako použitie vlastného komunikačného protokolu, tiež častý prípad. Druhým problémom je, že množina počítačiel nie je definovaná štandardom a závisí na implementácii výrobcu zariadenia. To znamená, že dostupné počítačľá sa líšia medzi zariadeniami rôznych výrobcov a tiež že počítačľá nie sú používateľsky definovateľné a teda rozšírenie v prípade potreby je veľmi zložitú, vyžaduje spoluprácu s výrobcou zariadenia, tým pádom trvá dlho a je nákladné, vyžaduje tiež zmeny minimálne v programovom vybavení zariadenia a teda následnú aktualizáciu, čo väčšinou znamená prerušenie služby. Bez ohľadu na ďalšie nevýhody je doba potrebná k sprístupneniu nových počítačiel a nutnosť aktualizácie programového vybavenia pre praktické použitie v diagnostickom procese diskvalifikačným faktorom. Takmer vždy, okrem dlhodobého monitorovania rozprestretého aspoň počas niekoľkých rokov a tým pádom zahŕňajúceho aj plánované aktualizácie, je teda nutné vychádzať len z údajov aktuálne zbieraných konkrétnym zariadením.

Na druhú stranu má táto situácia aj výhody. Prvou je väčšinou zanedbateľný až žiadny vplyv monitorovania na výkon a funkcie monitorovaného zariadenia. Získavanie hodnôt totiž rieši samotné zariadenie a toto je integrované do normálnej funkcionality zariadenia. Ďalšia veľká výhoda je, že je možné jednoducho získať aj parametre popisujúce interné chovanie zariadenia ako napr. reakcie na realizáciu procedúry vychádzajúce z vnútorného stavu zariadenia. Tieto údaje nie je rozumným spôsobom možné získať žiadnou inou dnes známou metódou.

2.2 Drive testing

Metóda „drive testing“ je veľmi rozšíreným prístupom k výkonnostnému testovaniu mobilných sietí. Podstata tohto prístupu spočíva v realizácii aktívnych výkonnostných meraní v pohybe a rôznych geografických lokalitách pokrytých analyzovanou mobilnou sieťou. Merací systém je realizovaný programovateľným, špeciálne upraveným, terminálom mobilnej siete, ktorý v slučke realizuje rôzne procedúry ako pripájanie k mobilnej sieti a odpájanie, či realizuje telekomunikačné služby, napr. telefónny hovor, či definovanú dátovú službu.

V rámci testovania metódou „drive testing“ je možné sa zamerať na procedúry riadiacej roviny, ale tiež na služby v používateľskej rovine. Plán merania sa zostavuje dopredu a podľa skompilovaného zoznamu meraných služieb, procedúr a parametrov sa vybaví testovacie vozidlo meracími koncovými terminálmi v kombinácii s počítačom s programovým vybavením pre realizáciu meraní a záznam výsledkov. Veľmi dôležitou súčasťou je kontinuálny záznam polohy spolu s nameranými dátami. Pre túto metódu je projektom 3GPP vypracovaný zoznam kľúčových výkonnostných indikátorov aj s postupom merania, ako pre procedúry riadiacej roviny, tak pre realizáciu rôznych typov služieb nad paketovým

dátovým spojením. Meranie je možné vykonávať pre rôzne rýchlosti pohybu koncových staníc, vrátane merania bez pohybu, keď sa dopravný prostriedok využíva len k presunom medzi meracími bodmi. Realizácia meraní s dynamickou rýchlosťou pohybu umožňuje, za cenu zvýšenia časovej a finančnej náročnosti, sledovať a analyzovať vyladenie operačných parametrov mobility účastníkov a vykonávať následnú optimalizáciu architektúry bunkového systému.

Častým prístupom k testovaniu metódou „drive testing“ je vykonávanie meraní na zákazku treťou stranou, väčšinou s porovnaním s mobilnými sieťami ostatných operátorov, keď sa počet koncových zariadení zduplikuje podľa počtu alternatívnych mobilných sietí. Takto získané dáta umožňujú pre danú geografickú lokalitu porovnať performačné parametre mobilnej siete a kvalitatívne parametre realizovaných služieb, medzi jednotlivými operátormi. Toto je možné považovať za najväčšiu výhodu tohto prístupu.

Najväčšou nevýhodou tejto metódy je vysoká cena vyplývajúca z potreby vybavenia a prevádzky testovacieho vozidla s obsluhou, časovej náročnosti celého úkonu a nutnosti spracovávať dáta po skončení fázy merania s pomerne zložitou koreláciou. Ďalšou nevýhodou tejto metódy je praktické obmedzenie na konkrétne typy koncových zariadení, či už z pohľadu praktickej realizácie meraní väčšinou len na jednom type zariadenia, tak z pohľadu dostupnosti modelov testovacích koncových zariadení keď nie od každého je možné zaobstaráť verziu upravenú pre realizáciu meraní metódou „drive testing“. Pomerne veľkou nevýhodou je aj praktická nereprodukovateľnosť výsledkov meraní, keď nezanedbateľný vplyv na aktuálne výsledky má charakteristika rádiového kanálu, ktorá sa spravidla v čase výrazne a pomerne rýchlo mení. Praktický dopad tohto problému je možné zmierniť zvýšeným počtom opakovaní celého merania, čo ale zase zvyšuje finančnú a časovú náročnosť.

Vo svojej podstate metóda „drive testing“ pristupuje k analyzovanej mobilnej sieti ako k čiernej skrinke keď je systém vybudovaný definovaným vstupom a následne analyzovaná jeho odozva. Z toho dôvodu je využitie metódy pre hľadanie podstaty problému malé, je možné získať len nepriame indície o poruchách bez hlbších poznatkov o dôvodoch.

2.3 Pasívne sondy rozhraní

Využívanie pasívnych sond pre diagnostiku a predovšetkým monitorovanie mobilných sietí má historický obraz v telekomunikačnej technike, kde bolo použitie analyzátorov signalizácie na rôznych vrstvách rozšíreným prístupom, starším ako koncept plného dohľadového subsystému. Na druhú stranu je použitie pasívnych sond v dnešnej dobe výrazne inšpirované diagnostikou paketovo prepínaných dátových sietí, kde sa využívajú paketové zachytávače a analyzátory, ako najvýznamnejšieho predstaviteľa je nutné spomenúť program Wireshark. Základom je teda zachytávanie správ a dátových jednotiek, ich disekcia a zobrazenie v podobe zrozumiteľnej odbornej obsluhu. Doplňujúcimi funkciami je následná analýza, korelácia a štatistické spracovanie, umožňujúce kvantifikovať rôzne stavy, procedúry a chyby.

Podobne pracujú komerčne dostupné pasívne sondy rozhraní mobilnej siete. Rozlišujú sa podľa podporovaných generácií mobilných sietí, kde niektoré sú zamerané len na konkrétnu generáciu, iné podporujú aj viacero generácií. V druhom prípade sú často zamerané na ekvivalentné rozhrania v architektúre mobilných sietí, napr. na rádiové rozhranie, či na rozhranie medzi účastníckym registrom

a prvkom správy mobility. Zoznam podporovaných rozhraní u konkrétneho typu pasívnej sondy spravidla časom rastie z dôvodov konkurencie.

Ďalším dôležitým rozdeľujúcim kritériom je zameranie na používateľskú či riadiacu rovinu mobilných sietí. Historicky starším typom sú analyzátory zamerané čisto na signalizáciu. Tieto umožňujú pracovať s jednotlivými procedúrami riadiacej roviny, vyhodnocovať ich úspešnosť, či hľadať dôvody zlyhania. Ako také sú veľmi užitočným nástrojom pri inštalácii a oživovaní technológie mobilných sietí. Využívajú sa ale aj neskôr, pri optimalizácii, pretože znížená úspešnosť realizácie procedúr riadiacej roviny na v podstate ľubovoľnom rozhraní či v prvku mobilnej siete má výrazne negatívny vplyv na performančné parametre mobilnej siete ako celku. Taktiež z globálneho hľadiska sa problémy riadiacej roviny diagnostikujú relatívne ľahko, pretože táto časť je dostatočne dobre popísaná v špecifikácii. Ďalej, vzhľadom na to, že najvýznamnejšou úlohou mobilných sietí, s predpokladom ešte väčšieho rastu do budúcnosti, je funkcia prístupovej siete k Internetu, je dôležitá analýza používateľskej roviny a teda zameranie pasívnych sond rozhraní na túto rovinu. Komunikácia v používateľskej rovine je z princípu podobná bežným dátovým sieťam založeným na protokole IP a teda sa tu využíva prenos signalizácie a používateľských dát jedným kanálom. Realizácia bežných služieb používateľmi teda netrpí len problémami riadiacej roviny, ale rovnako aj neúspechom signalizácie na z logického hľadiska vyššej vrstve, prenášanej v používateľskej rovine. Ďalší pohľad je zameranie na prenášané používateľské dáta, kde podľa typu služby je možné kontrolovať parametre ovplyvňujúce kvalitu služby ako sú priepustnosť, latencia, kolísanie latencie v jednom smere, stratovosť a pod. Problémy s týmito parametrami sa neprejavujú neúspešnosťou služby, ale môžu narušiť kontinuitu služby či spôsobiť realizáciu služby s parametrami pre používateľa, či zo samotnej podstaty služby neakceptovateľnými. Posledným variantom, naberajúcim na dôležitosti, je typ pasívnych sond podporujúcich analýzu ako riadiacej, tak používateľskej roviny, s rôznou, časom stúpajúcou, schopnosťou korelácie medzi nimi. Problematike korelácie medzi riadiacou a používateľskou rovinou sa hlbšie venuje kapitola 5.2.

Častým navrhovaným využitím pasívnych sond rozhraní mobilnej siete je v kontexte dlhodobého dohľadu nad sieťou s vyhodnocovaním prevádzkových štatistík tak, ako to umožňuje aj dohľadový subsystém. Toto použitie je často pretláčané marketingovými oddeleniami výrobcov pasívnych sond, ale z praktického hľadiska má len malý význam, nakoľko dohľadový subsystém už tieto funkcie zastáva a spravidla je súčasťou každej inštalácie. Naproti tomu využitie pri cielej diagnostike mobilných sietí, kde sondy vynikajú nad relatívnou statickosťou dohľadového subsystému, je väčšou príležitosťou. S tým súvisí ďalšie kritérium rozdelenia pasívnych sond a to podľa spôsobu spracovania dát na sondy pracujúce v reálnom čase a sondy s odloženým spracovaním. Spôsob funkcie v reálnom čase je vhodný na dlhodobé monitorovanie, ale takmer nepoužiteľný pre diagnostické využitie. V prípade diagnostiky sa s výhodou uplatní záznam komunikačných dát s možnosťou neskôr, väčšinou iteratívne, analyzovať túto v čase zakonzervovanú vzorku. To umožňuje aj ľahšie porovnanie s dátami získanými z iných zdrojov a hľadanie príčin rozdielov. Nevýhodou, často prakticky neprekonateľnou z ekonomických dôvodov, je, najmä v prípade záznamu komunikácie v používateľskej rovine, potreba úložiska extrémnej kapacity a zápisovej rýchlosti, keďže priepustnosť rozhraní používateľskej roviny či podliehajúceho transportného jadra môže dosahovať rádovo stovky Gb/s.

Veľkou výhodou použitia pasívnych sond rozhraní je možnosť dočasného monitorovania, v dnešnej dobe vzhľadom na schopnosti infraštruktúry transportného jadra ohľadom odbočenia a duplikovania

sieťovej premávky, bez výpadku služby. Určitými nevýhodami je pomerne vysoká cena a množstvo byrokratických a administratívnych problémov súvisiacich s pripojením externých zariadení k existujúcej produkčnej infraštruktúre. Problematikou využitia pasívnych sond rozhraní mobilnej siete pre diagnostiku sa zaoberá [RK13]. Návrh meracieho a analytického systému využívajúceho princípy pasívnych sond a cieľeného na elimináciu ich aktuálnych nevýhod je prezentovaný v [RK17].

2.4 Agenti na používateľských koncových zariadeniach

Veľmi zaujímavou možnosťou, použiteľnou či už pre cieľnú diagnostiku alebo dlhodobejšie monitorovanie používateľmi vnímaných parametrov, je využitie programového vybavenia nainštalovaného na koncových zariadeniach. Takíto agenti môžu byť pasívne monitorovať rádiové podmienky a parametre prenosu, alebo dokonca realizovať aktívne merania. Zozbierané dáta sa následne väčšinou centrálné analyzujú pre získanie štatistických indikátorov a podľa hĺbky a objemu zbieraných údajov je možné dokonca diagnostikovať konkrétne neštandardné situácie, ktoré zažívajú konkrétne koncové zariadenia. Výhodou je možnosť presnej lokalizácie meracieho bodu v čase a priestore s využitím satelitných pozičných systémov ako GPS (Global Positioning System, satelitný systém pre určovanie polohy na zemeguli), Galileo (satelitný systém pre určovanie polohy na zemeguli), GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System, satelitný systém pre určovanie polohy na zemeguli) či v blízkej budúcnosti Beidou (odhadovaná globálna funkčnosť na rok 2020). Väčšina koncových zariadení mobilných sietí má prijímač pre aspoň jeden z týchto systémov.

Úroveň monitorovania rádiového prostredia sa môže vyrovnávať a dokonca predstihnúť možnosti dohľadového subsystému, zozbierané údaje sú ale lokálne pre konkrétne zariadenie a pri nízkom početnom nasadení väčšinou neponúkajú dostatočne detailné informácie pre vytvorenie máp pokrytia či ďalších všeobecných parametrov a indikátorov. Túto skutočnosť je možné zmierniť okrem zvýšenia počtu meracích staníc aj vyššou pohybovou aktivitou koncového zariadenia či agregáciou výsledkov z dlhšieho časového úseku.

Možnosť realizovať aktívne meranie dáva tejto metóde predpoklady vyrovnávať sa drive testom. Agent môže byť na pokyn obsluhy, alebo plne autonómne vykonávať v podstate všetky testy, ktorými disponujú dostupné DTT (Drive Test Tool, nástroj na meranie parametrov mobilných sietí metódou drive testing). Ďalšou výhodou je možnosť nasadenia na rozličné modely koncových zariadení a z toho vyplývajúce posúdenie správania sa konkrétneho typu zariadenia v danej sieti s prípadným následným diagnostickým a optimalizačným zásahom.

Táto metóda je v súčasnosti veľmi zriedkavo využívaná. Do budúcnosti je možné predpokladať výrazné rozšírenie kvôli relatívne malému množstvu, navyše pomerne jednoducho odstrániteľných, nevýhod a veľkej výhody v jednoduchosti a v porovnaní s ostatnými metódami takmer zanedbateľnej cene. Pokiaľ by operátor mohol nasadiť túto technológiu na významné množstvo používateľských koncových zariadení svojich zákazníkov, získal by lacný a celkom presný spôsob získavania informácií o zákazníkmi vnímaných parametroch siete, navyše výsostne z lokalít, v ktorých sa používatelia reálne pohybujú.

3 Zameranie a ciele dizertačnej práce

Pri teoretickej práci autora boli identifikované potreby a možnosti k zlepšeniu, ktoré je možné sumarizovať do nasledujúcich oblastí. Autor práce si ich zobral za ciele pre túto prácu.

1. Vybudovanie experimentálneho pracoviska pre výskum problematiky diagnostiky mobilných sietí, kde bude zabezpečené technické a materiálne zázemie pre odbornú technickú diagnostiku. Centrálnym prvkom takéhoto pracoviska musí byť moderná mobilná sieť komerčných parametrov, doplnená špecializovanými meracími prístrojmi a koncovými zariadeniami.
2. Využitie pasívnych sond rozhraní pre diagnostické zásahy do infraštruktúry mobilných sietí, kde sa využijú špeciálne vlastnosti a výhody pasívnych sond rozhraní pre realizáciu presných meraní a následné vytvorenie náhľadu na stav mobilnej siete ako celku a jej jednotlivých súčastí, nezávislý na dodávateľovi technológie mobilnej siete či špecifikách používateľských koncových zariadení.
3. Vytvorenie metodiky diagnostiky mobilných sietí popisujúcej realizáciu meraní a ich vyhodnotenie, zabezpečujúcej porovnateľnosť výsledkov získaných jednotlivými diagnostickými metódami a prístupmi, so zameraním na porovnateľnosť využitia pasívnych sond rozhraní mobilnej siete najmä s metódami drive-testing a monitorovania pomocou dohľadového subsystému. Tieto metódy sú dnes z pohľadu nasadenia majoritnými a pre reálne nasadenie pasívnych sond rozhraní ako diagnostického nástroja je nutné zabezpečiť historickú kontinuitu meraní a výsledkov.

4 Prístrojové vybavenie a realizácia experimentálneho pracoviska

V dobe započatia postgraduálneho štúdia autorom Ústav telekomunikácií Fakulty elektrotechniky a komunikačných technológií Vysokého učení technického v Brne a konkrétne Laboratórium konvergovaných sietí a integrovaných služieb nebol na aplikovaný výskum a experimentálny vývoj ale ani základný výskum v oblasti diagnostiky mobilných sietí pripravený ani technickým vybavením, ani personálne. Realizácia experimentálneho pracoviska umožňujúceho seriózný výskum v oblasti teda mala vysokú prioritu a bolo jej venovanej veľké množstvo úsilia.

Existujúce prístrojové vybavenie Laboratória konvergovaných sietí a integrovaných služieb s ohľadom na problematiku mobilných sietí pozostávalo v prvom rade z experimentálnej rádiovkej siete druhej generácie¹ spoločnosti Motorola napojený na emulátor subsystému mobilnej telefónnej ústredne MSS (Mobile Switching Subsystem, subsystém mobilnej siete zabezpečujúci prepájanie okruhovo orientovaných služieb). Tento rádiový subsystém² (BSS, Base Station Subsystem, subsystém základňových staníc mobilnej siete) umožňoval komunikáciu s koncovými stanicami, vybavenými špeciálne pripravenými kartami SIM (Subscribers Identification Module, modul identifikácie účastníka), cez rádiové rozhranie a realizáciu odchádzajúceho (angl. mobile originated) telefónneho hovoru a SMS (Short Message System, systém krátkych správ) správy. Systém ako taký mal produkčné parametre, ale absencia okruhovo spínaného a/alebo paketovo spínaného jadra obmedzovala jeho využitie. Túto rádiovú prístupovú sieť bolo možné plne konfigurovať a zaujímavá bola najmä možnosť sledovania signalizácie na rozhraní medzi prvkami, k čomu boli dostupné analyzátory Tektronix K1205 a GN Nettest MPA 7300. Ďalej bol dostupný aj prvok pre riadenie základňových staníc z pohľadu prenosu paketovo prepínaných dát PCU (Packet Control Unit, jednotka riadenia prvkov rádiovkej prístupovej siete pre potreby prenosu paketovo komutovaných dát), bez zvyšku zariadení paketovo spínanej domény ale nemal žiadne využitie. Výskumné využitie tohto systému je dnes minimálne, dobre ale stále slúži v laboratórnej výuke predmetu „Komunikační prostředky mobilních sítí“, ďalej len MKPM.

Ďalej bola prístupná implementácia mobilnej siete druhej generácie založená na rádiovkej prístupovej sieti pozostávajúcej z niekoľkých základňových staníc ip.access nanoBTS a zvyšok mobilnej siete bol implementovaný pomocou komerčného programového vybavenia nainštalovaného na komoditný osobný počítač. Nevýhodou tohto systému bola nutnosť platenia vysokých ročných licenčných poplatkov, ktoré nebolo možné z prevádzkového fondu laboratória financovať. Autor práce preto vytvoril náhradnú inštaláciu mobilnej siete podobnej architektúry využívajúcu existujúce základňové stanice, ale s nahradením komerčného, licencovaného, programového vybavenia open-source implementáciou vyvinutou v rámci projektu OpenBSC. Použité programové vybavenie bolo tiež nutné pre potreby využitia v rámci Laboratória konvergovaných sietí a integrovaných služieb upraviť, čo ale jeho licencia³ umožňovala. Realizovaný systém bol následne využívaný k výskumu analýzy signalizácie na rozhraniach

1 Systém GSM pracujúci v pásmach 900 MHz a 1800 MHz

2 Pozostávajúci zo základňovej stanice BTS (Base Transceiver Station, základňová stanica) a kontroléru základňových staníc BSC (Base Station Controller)

3 Projekt používa licenciu AGPLv3 či neskoršiu, ktorá sa radí do rodiny copyleft licencií, kde autor programového kódu neobmedzuje ďalšie použitie (okrem potreby dodávať zákazníkovi aj kompletný zdrojový kód) [18]

mobilnej siete GSM a tiež k výskumu modelovania prvkov mobilnej siete. Dnes, po aktualizácii, sa systém stále využíva v laboratórnej výuke predmetu MKPM, kde patrí k podpornej infraštruktúre väčšiny laboratórnych úloh.

Ďalším dostupným zariadením je systém pre testovanie mobilných sietí metódou „drive testing“ od firmy Morotola nazývaný MDTT. Systém pozostáva z riadiaceho programového vybavenia a zo sady špeciálne upravených testovacích koncových zariadení (mobilné telefóny výrobcu Morotola so špeciálnym firmware) a je určený pre testovanie sietí GSM. Bohužiaľ programové vybavenie je zastaralé a malo problém pri behu na moderných⁴ systémoch, preto autor pripravil merací systém zakonzervovaný špeciálne pre použitie tohto nástroja, s vhodnými verziami podporných knižníc a ďalších komponentov. Využitie vo výskume diagnostiky mobilných sietí bolo pri overovaní možností metódy „drive testing“, dnes sa systém stále využíva v laboratórnej výuke predmetu MKPM.

V Laboratóriu konvergovaných sietí a integrovaných služieb bola dostupná tiež inštalácia transkódovacieho zariadenia MGW (Media GateWay, jednotka adaptácie prenášaných dát medzi systémami s rôznym kódovaním dát) od firmy Motorola. Táto inštalácia ale pozostávala len z hardwareového vybavenia a úplne chýbalo obslužné programové vybavenie, čo systém činilo nepoužiteľným k pôvodnému účelu. V rámci výskumných aktivít sa plánovalo nasadenie programovej verzie subsystému multimedialných služieb založených na protokole IP, tzv. IMS [16], keďže MGW bolo realizované ako sada počítačov a ďalších podporných subsystémov v prevedení ATCA (Advanced Telecommunications Computing Architecture, pokročilá architektúra telekomunikačných počítačov). Vzhľadom na vek systému, rýchle zastarávanie techniky a dostupnosť komoditných osobných počítačov výrazne vyššieho výkonu bolo ale od tohto plánu upustené v prospech riešenia využívajúceho klientskú virtualizáciu.

Kvôli realizácii výskumného centra SIX (Sensor, Information and Communication Systems, projekt vybudovania výskumných laboratórií na FEKT VUT v Brne) bol tiež v dobe nástupu autora krátko pred dodaním moderný systém pre testovanie mobilných sietí metódou „drive testing“, Rohde&Schwarz ROMES4 spolu so spektrálnym analyzátorom Rohde&Schwarz TSMW. Tento je stavaný na meranie rôznych rádiových a mobilných sietí, napr. GSM, UMTS, CDMA (Code Division Multiple Access, systém zdieľania komunikačného kanálu pomocou techniky kódového delenia), LTE (Long Term Evolution of the UMTS, vylepšený rádiový systém pre 3,9G), LTE-Advanced (rádiový subsystém mobilných sietí 4G), ale tiež WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access, komunikačný štandard pre rádiové siete) či TETRA (TErrestrial TRunked RAdio, systém pre realizáciu mobilných sietí pre núdzové služby) a podporuje realizáciu širokej škály služieb a použitie množstva typov meracích používateľských koncových zariadení. Systém bol použitý pre výskumné aktivity pri realizácii zmluvného výskumu.

Ďalším systémom krátko pred dodaním, objednaným v rámci centra SIX bol záťažový tester pracujúci na druhej až siedmej vrstve ISO/OSI (International Standardization Organization Open Systems Interconnection, štandard prepojenia otvorených systémov organizácie ISO) pozostávajúci z fyzického zariadenia Ixia Optixia XM2 s inštalovanými doplnujúcimi meracími kartami a programového vybavenia IxLoad, IxExplorer a Test Conductor. Tento tester bol pri výskume diagnostiky mobilných sietí opakovane použitý, najmä k určeniu referenčných výkonových hladín jednotlivých prvkov či subsystémov mobilnej siete.

⁴ V danej dobe Windows XP SP3

V rámci realizácie centra SIX sa tiež plánovalo zaobstaranie emulátoru rádiového kanálu, ktoré bolo ale zrušené a nahradené súpravou analyzátorov rozhraní mobilnej siete od spoločnosti EXFO (predtým NetHawk). Súprava pozostáva z analyzátora riadiacej roviny mobilných sietí pre vizuálne spracovanie EXFO Travelhawk založeného na softwareovom riešení M5 a z pasívnej sondy rozhraní mobilnej siete a vysokokapacitného spracovacieho systému pre analýzu používateľskej a riadiacej roviny, EXFO PowerHawk. Tieto analyzátory boli intenzívne využívané pri riešení projektov zmluvného výskumu. Neskôr boli kvôli komerčnej nedostupnosti vhodných systémov oba tieto analyzátory svojpomocne upravené vylepšením HW (HardWare, pevné súčasti počítačových a komunikačných systémov) a optimalizáciou nastavení programového vybavenia tak, aby zvládali spracovanie objemov dát bežných pre realizované projekty zmluvného výskumu.

Kvôli zrušeniu viacerých výberových konaní v rámci projektu SIX sa sprístupnili finančné prostriedky, ktoré na pokyn doc. Ing. Víta Novotného, Ph.D. boli použité k zaobstaraniu experimentálnej mobilnej siete štvrtej generácie. Toto zariadenie je v podstate najdôležitejším fyzickým prvkom v laboratóriu pre podporu výskumu diagnostiky mobilných sietí. Autor práce sa od počiatku staral o technické aspekty realizácie experimentálnej mobilnej siete. Bolo potrebné pripraviť podrobnú špecifikáciu systému, [RK7], v dobe, keď bola len čerstvo dokončená štandardizácia, jednotlivé prvky sa testovali v laboratóriách výrobcov zariadení infraštruktúry mobilných sietí, občas v spolupráci s komerčnými operátormi a ucelená inštalácia nikde na svete neexistovala. Dnes sú pochopiteľne komerčne bežne prevádzkované mobilné siete s porovnateľnými parametrami, ale v akademickom prostredí sa stále podľa dostupných informácií jedná o unikátny systém. Okrem technickej špecifikácie bolo potrebné vybrať operačné frekvenčné pásmo aby nedochádzalo k vzájomnému rušeniu s inými, verejne prevádzkovanými, systémami a tiež tak, aby bola prevádzka tohto experimentálneho systému ekonomicky únosná, čiže mimo komerčne operátormi mobilných sietí využívané pásmo v geografickej oblasti, ale zase s možnosťou použiť komoditné koncové zariadenia. Podrobnejšie informácie o experimentálnej mobilnej sieti, jej architektúre, inštalácii a využití je možné nájsť v [RK8]. Dokument obsahuje aj ďalšie informácie o pracovisku diagnostiky mobilných sietí. Súčasťou vybudovania mobilnej siete bolo aj školenie k jej prvkom a funkciám podporené výukovými materiálmi [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15].

5 Diagnostika mobilných sietí

5.1 Štatistické nástroje

Aplikácia štatistických metód umožňuje vyčíslenie sekundárnych výkonnostných indikátorov, zameraných na odhad podstaty porúch a nežiaducich či negatívne sa prejavujúcich dejov v analyzovanom systéme. Klasický diagnostický prístup ale štatistické metódy v podstate nevyužíva. Pri vyčíslovaní výkonnostných indikátorov, viac v kapitole 5.6, sa v priemyselnej praxi využíva len priemer ako vyjadrenie strednej hodnoty. To je samozrejme veľmi dôležité, nakoľko to umožňuje korekciu vplyvu náhodných javov, ale pri využití ďalších štatistických nástrojov, napr. vyčíslovania momentov vyšších rádov, je možné získať užitočné informácie, ktoré inak zostávajú skryté. Tieto nové informácie majú často výrazný dopad na pokračovanie diagnostického procesu, okrem indikácie stavu ukazujú aj na jeho možné príčiny, čím zrýchľujú diagnostické práce a skracujú čas výpadku systému v prípade poruchy, [RK13]. Teoretický základ k nižšie uvedeným štatistickým veličinám je možná nájsť napr. v [3], praktický prístup bol prezentovaný napr. v [19].

Pre príklad zoberme hodnotu doby odpovede vzdialeného systému v používateľskej rovine mobilnej siete. Máme množinu realizácií meraní tohto parametru ktorú berieme ako štatistický súbor. Klasický prístup je výpočet aritmetického priemeru \hat{x} podľa vzorca:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (5.1)$$

kde n je veľkosť štatistického súboru a x_j je iterátor nad štatistickým súborom. Takto získaná stredná hodnota ako bolo spomínané obmedzuje vplyv náhody. Vypočítaný aritmetický priemer sa teda berie ako reprezentatívna hodnota strednej doby odpovede vzdialeného systému, na základe ktorej sa usudzuje o stave systému. Pokiaľ hodnota prekročí nejakú určenú hranicu, stav sa vyhlási za nevyhovujúci a nasledovala ďalšia diagnostika tohto stavu z iných zdrojov. Takto získaný parameter teda spĺňa detekčnú potrebu, ale k skutočnej diagnostike je jeho použitie málo významné. Ak teda stredná hodnota doby odpovede indikuje nevyhovujúci stav, môžeme pokračovať výpočtom ďalších parametrov.

Doplňme teda aritmetický priemer výpočtom rozptylu podľa vzorca:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \hat{x})^2, \quad (5.2)$$

kde n je znovu veľkosť štatistického súboru, x_j je iterátor nad štatistickým súborom a \hat{x} je aritmetický priemer vypočítaný podľa vzorca (5.1). Rozptyl nám pridá o dobe odpovede vzdialeného systému doplnujúcu informáciu. Presné hranice závisia od prípadu, ale vo všeobecnosti pokiaľ je pomer rozptylu k strednej hodnote malý, doba odpovede je stabilná, čo ukazuje na systémový problém v transportnom jadre mobilnej siete. Potenciálne dôvody sú napríklad využitie linky s vysokou latenciou alebo zlú konfiguráciu smerovania, kde sa využíva alternatívna linka s väčším počtom skokov k cieľu. Na druhú stranu ak je pomer rozptylu k strednej hodnote veľký, doba odpovede sa často mení, čo indikuje zahltenie prvku či linky po transportnej trase. Tu môžeme doplniť využitie minima štatistického súboru.

Ak by toto minimum spadalo dostatočne hlboko pod spomínanú detekčnú hranicu, problém bude čisto ohľadom zahľtenia prvku či linky, ak je blízke tejto hranici, jedná sa o akúsi kombináciu oboch problémov.

Ďalším vhodným indikátorom je výpočet šikmosti štatistického súboru podľa vzorca:

$$Y_1 = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \hat{x})^3}{n \cdot \sigma^3}, \quad (5.3)$$

kde n je veľkosť štatistického súboru, x_j je iterátor nad štatistickým súborom, \hat{x} je aritmetický priemer vypočítaný podľa vzorca (5.1) a σ je smerodajná odchýlka vypočítaná podľa vzorca:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (5.4)$$

dosadením do vzorca (5.2). Získaný parameter šikmosti popisuje asymetriu rozdelenia štatistického súboru, hodnota blízka nule znamená symetrické rozdelenie, kladná hodnota šikmosti indikuje výskyt odľahlých realizácií smerom k maximu, záporná zase smerom k minimu. Vyššie kladné hodnoty v prípade vyhodnocovania doby odpovede vzdialeného systému teda indikujú výskyt občasných realizácií s pridanou väčšou latenciou, čo je prípad napr. zariadenia po ceste nespĺňajúceho podmienky na systém pracujúci v reálnom čase.

Podobne je možné takýto postup aplikovať na ďalšie výkonnostné indikátory, na prvý pohľad sa ponúkajú doby obsluhy požiadaviek v riadiacej rovine, kde je podstata takmer identická. Prakticky ale podobne ide hodnotiť akýkoľvek výkonnostný indikátor po spracovaní potrebnej teórie a praktickom overení. Ďalej je možné skúmať využitie ďalších, pokročilejších štatistických nástrojov ako testy príslušnosti k rozdeleniu, množstvo parametrov vykazuje binomické či ešte viac modálne rozdelenia, tam je možné určovať podstatu zo vzájomných posunov módov a pod. Oba tieto prístupy sú plánované do projektu základného výskumu prezentovaného v [RK16]. Ďalej v časti [RK17] je popísaný návrh automatizovaného meracieho systému, v ktorom sa počíta s nasadením uvedených a obdobných postupov, kde systém bude samostatne analyzovať sieťovú premávku a upozorňovať na podozrivé parametre na základe vhodne zvoleného prahovania.

5.2 Korelácia výsledkov analýz riadiacej a používateľskej roviny

Analýza riadiacej roviny mobilných sietí je diagnostický prístup s dlhou tradíciou, pretože umožňuje overovať úspešnosť a ďalšie parametre na úrovni jednotlivých procedúr a teda jednoduchú kvantifikáciu stavu mobilnej siete. Podrobnejšie sa problematike analýzy riadiacej roviny venuje práca [37]. Prevažne sa ale pri analýze riadiacej roviny jedná o vyčísľovanie tzv. kľúčových výkonnostných indikátorov, väčšina z ktorých je definovaná projektom 3GPP, a usudzovanie stavu mobilnej siete z ich hodnôt.

Na druhú stranu analýza používateľskej roviny umožňuje pristupovať k diagnostike komunikačného systému všeobecne, a teda aj konkrétne v mobilných sieťach, ako k diagnostike bežných dátových sietí a komunikačných protokolov. Pri použití mobilnej siete ako prístupovej siete k Internetu v skutočnosti množstvo situácií vnímaných používateľmi ako degradácia kvality služby nie je zapríčinených zlyhaním konkrétneho mechanizmu, ale buď zdroj problémov leží mimo analyzovanú mobilnú sieť, alebo je problém spôsobený kombináciou viacerých faktorov v rámci infraštruktúry mobilných sietí. V oboch prípadoch je ale možné či už samostatný výskyt tohto stavu, tak následne aj jeho možné príčiny odhaliť

z analýzy prenášanej používateľskej komunikácie. Analýza používateľskej roviny sa v diagnostike mobilných sietí tiež dlhšie používa, ďalšie informácie je možné hľadať v [36].

V moderných mobilných sieťach, napr. v sieťach 4G, kde bola odstránená okruhovo spínaná doména, sú ale aj služby považované za inherentné prenášané ako OTT s využitím paketovo orientovaného prenosu dát. Typickým predstaviteľom takejto skupiny služieb je telefónia pomocou technológie VoLTE. Kvalitu takejto služby v podstate nie je možné samostatne kvantifikovať ani na základe analýzy performačných parametrov procedúr riadiacej roviny, ani na základe monitorovania dátových prenosov v používateľskej rovine. Problémy v oboch rovinách majú na službu VoLTE nezávislý vplyv. Znížená úspešnosť procedúr riadiacej roviny ako prihlásenie k sieti, pridelenie rádiových prostriedkov a pod. spôsobí, že v chybových prípadoch vôbec nie je možné pokračovať v relácii hovoru. Avšak úspešnosť týchto procedúr neznamená úspešnosť celej služby nakoľko môže dôjsť k chybe v relácií použitého signalizačného protokolu SIP, či problémom pri prenose hlasových dát, pre ktorý sa využíva protokol RTP. Pre reprezentatívny popis služby VoLTE je preto potrebné výsledky analýzy riadiacej a používateľskej roviny kombinovať.

Ďalším príkladom by mohla byť identifikácia a analýza dátových tokov patriacich jednému používateľovi v zachytených dátach, kde sa využívajú informácie z riadiacej roviny, komunikované pri zostavovaní nosičov, a z používateľskej roviny sa využije výpočet popisných parametrov tokov.

5.3 Relačná analýza

Analytická metóda autorom práce nazvaná relačnou analýzou čiastočne vychádza z myšlienok štatistického spracovania popísaného v kapitole 5.1. V podstate sa jedná o využitie distribuovaného snímacieho systému s mapovaním zodpovedajúcich relácií z viacerých meracích bodov v analyzovanej mobilnej sieti.

Identifikácia zodpovedajúcich relácii môže byť pomerne priamočiara, napr. v prípade prenosu dát v používateľskej rovine a jej analýze na oboch stranách linky pre diagnostiku stavu transportného jadra, alebo viac komplikovaná, napr. v prípade procedúr riadiacej roviny kde prichádzajúca požiadavka na jednom rozhraní vyvolá odchádzajúcu požiadavku na iný prvok mobilnej siete na rozhraní inom. V oboch prípadoch je ale postup zachytenia sieťovej premávky a následnej analýzy obdobný. Ďalšou možnosťou je oddeliť komunikáciu v jednom a druhom smere a pristupovať k obom ako k závislým realizáciám.

Po získaní námerov zodpovedajúcich relácií z rôznych geografických miest sa využijú metódy štatistického spracovania, napr. pomocou postupu popísaného v kapitole 5.1. Pre napr. rozstup dátových jednotiek, patriacich jednému toku, by za ideálnych podmienok malo platiť, že bude invariantný. Zmena parametrov popisujúcich tieto dva štatistické súbory následne indikuje problémový stav medzi meracími bodmi. Otázkou zostáva určenie vhodných popisných parametrov pre porovnanie. Vhodný popis je samozrejme závislý od konkrétnej sledovanej veličiny, ale vo všeobecnosti sú dobrými kandidátmi výkonnostné indikátory ako doba obsluhy požiadavku, bitová rýchlosť dátového toku, počet paketov za jednotku času či intervaly medzi po sebe v jednosmernom toku nasledujúcimi dátovými jednotkami. Pri vhodnom popise, resp. v kombinácii s inými diagnostickými metódami, je možné identifikovať možný zdroj problému, minimálne je ale možné lokalizovať postihnuté miesto, čo je často rovnako dôležité, resp. to väčšinou vedie k rýchlemu zisteniu podstaty chyby kvôli obmedzeniu stavového priestoru. Najväčšou výhodou tejto metódy je možnosť celkom jednoduchej automatizácie.

Automatizovaný systém integrujúci tieto postupy môže sledovať geograficky či topologicky podmienenú zmenu parametrov a notifikovať obsluhu v prípade štatisticky významných zmien.

5.4 Cielenie diagnostických zásahov

Pri praktickej diagnostike mobilných sietí je veľmi dôležité vhodné zacielenie diagnostických zásahov. Tento problém je nutné riešiť individuálne podľa podstaty diagnostického snaženia, napr. podľa predstavy zadávateľa o množine vyhodnocovaní parametrov. Typicky sa málo kedy diagnostikuje mobilná sieť ako celok, aj keď takýto postup je tiež možný, z veľkej časti preto, že správa mobilnej siete je organizačne delená do jednotiek, ktoré majú na starosti len konkrétne časti siete, či jej funkcie. Samozrejme pri takomto postupe s umelými administratívnymi prekážkami sa nie len znižuje efektívnosť diagnostiky, ale tiež je možné niektoré problémy, založené na vzájomnej interakcii jednotlivých subsystémov či funkcionality organizačných jednotiek zamaskovať natoľko, že ich odhalenie je prakticky nemožné.

Pri zameraní diagnostiky na konkrétnu časť mobilnej siete je ďalej vhodné obmedziť počet meracích miest, rozhraní a prvkov podľa konkrétnych požiadaviek. Toto umožňuje znížiť množstvo dát, ktoré je nutné spracovať, zjednodušuje technické riešenie diagnostiky a paradoxne to vedie k vyššej efektívnosti, pretože je možné vytvoriť popis presnejšie ilustrujúci konkrétny problém, obmedzenie služby či nedostatky prvku infraštruktúry. Rozsah diagnostických zásahov je nutné dobre naplánovať aj z organizačných dôvodov, napr. získanie povolenia k rozšíreniu pôsobnosti diagnostických činností pri ich výkone externým subjektom býva často, minimálne v krátkom čase, prakticky neriešiteľný administratívny problém.

Problémom býva aj vzdialený prístup k meracej infraštruktúre, pretože serverové miestnosti, kde sú prvky mobilnej siete obvykle inštalované, bývajú režimové pracoviská s obmedzeným pohybom osôb a často tiež bez možnosti prepojenia so sieťou Internet. V [RK9] je pre ukážku popísaný postup pre vytvorenie samo-obnoviteľného VPN spoja medzi analyzátorom a Laboratóriom konvergovaných sietí a integrovaných služieb. Takto je možné obmedziť nutnosť vstupu do serverovej miestnosti len na inštaláciu a odinštaláciu zariadenia. Ďalším kritériom pri celení diagnostických zásahov do mobilnej siete je minimalizácia ich vplyvu na funkcie siete. Náčrt prístupu rešpektujúceho túto potrebu, špeciálne pre zásahy do rádiovkej prístupovej siete RAN rôznych generácií, je uvedený v [44].

5.5 Modelovanie prvkov mobilnej siete pre diagnostické účely

Pri analýze signalizácie zachytenej z rozhraní mobilnej siete často dochádza k situácii, že nejaký parameter, typicky úspešnosť procedúry ktorej výsledok nie je oznamovaný druhej strane, nie je zo signalizácie viditeľný. Riešením v tomto prípade je korelácia so signalizáciou z iného rozhrania toho istého prvku, ale táto korelácia nebýva úplne priamočiara. Je preto nutné vytvoriť model zariadenia, ktorého vnútorným stavom požadovaný parameter je. Model často nemusí byť kompletný, ale stačí jeho špecializácia na analyzovaný parameter a teda spracovanie len vybranej časti signalizácie, či dát používateľskej roviny. Takémuto prvku sa potom prehráva zachytená komunikácia, špeciálne iniciačné správy signalizačných procedúr a na jej základe s nanútením špeciálneho chovania ktoré je možné z rôznych zdrojov vypožorovať, je budovaný kontext.

Podporné inžinierske činnosti pre realizáciu tejto myšlienky boli riešené v rámci [41], kde sa analyzovalo využívanie predkonfigurovaných virtuálnych strojov ako efektívnych kontajnerov pre modely zariadení sieťovej infraštruktúry. Modely sú väčšinou založené na bežnom OS s na mieru vytvoreným programovým vybavením, čo skraca čas vývoja, ale v nutných prípadoch je možné prebrať aj firmware existujúceho zariadenia a vykonať v ňom potrebné zásahy, samozrejme za podmienky, že to umožňuje licencia. Ďalej využitie simulácie s priamym vykonávaním kódu bolo riešené v rámci [33]. Táto technológia umožňuje nasadiť do siete pozostávajúcej zo simulovaných prvkov, napr. prehrávajúcich zachytenú sieťovú premávku, prvok založený na vykonávaní reálneho programu implementujúceho sieťové funkcie. Takto môže byť nasadené napr. jadro operačného systému, konkrétne Linux, a nad ním ďalšie potrebné programové vybavenie. Aj keď možnosti v tejto oblasti sú pomerne obmedzené, vďaka úsiliu dobrovoľníkov dosť výrazne rastú. Problémom pri simulácii prvkov a virtualizácii systémov, najmä v prípade virtualizácie HW nekompatibilného s hostiteľom, je relatívne malý výkon takto realizovaného systému. Možnosťami akcelerácie výpočtov pomocou grafických procesorov sa zaoberala práca [39].

Nasadenie modelov prvkov mobilnej siete v diagnostickom procese je záležitosť dosť zložitá, pracná a ťažko zovšeobecniteľná. Spravidla je vhodnejšie najprv preskúmať možnosti získania parametrov popisujúci vnútorný stav prvkov mobilnej siete z iných zdrojov. V odôvodnených situáciách, napr. v prípade potreby overiť validitu, obmedzenia či pochybenia vo výsledkoch získaných z iných zdrojov, sa jedná o veľmi výkonný nástroj. Predchádzajúce využitie tohto postupu nie je známe, ale autorom bolo s výhodou využité pri riešení zmluvného výskumu diagnostiky mobilných sietí.

5.6 Kľúčové výkonnostné indikátory

Vo všeobecnosti môžeme pri telekomunikačných systémoch hovoriť o výkonnostných indikátoroch, viažucich sa k procesom, procedúram či jednotlivým parametrom. Napr. [2] definuje množinu všeobecných výkonnostných indikátorov, ktoré sú platné pre posúdenie parametrov v podstate ľubovoľného telekomunikačného systému. Takto je možné popisovať všeobecný komunikačný či proste obsluhový systém. Pre diagnostiku a výkonnostné testovanie mobilných sietí sa používa sada tzv. kľúčových výkonnostných indikátorov, množinou parametrov definovanou organizáciou 3GPP, ohľadom ktorých je všeobecný konsenzus, že požadovaný popis siete a chovania služieb dokážu zabezpečiť.

Organizácia 3GPP venovala kľúčovým výkonnostným indikátorom množstvo dokumentov, napr. [24] pre všeobecné KPI z riadiacej roviny, ďalej [25] a [26] zamerané na rádiovú prístupovú sieť 3,9G a 4G; KPI pre 2G a 3G sú zase v [29]. Kľúčovými výkonnostnými indikátormi v IMS sa zaoberá [27], KPI pre jadro siete 3,9G a 4G rieši [28].

Okrem KPI definovaných organizáciou 3GPP je množstvo doplnkových, s ktorými prichádzajú operátori mobilných sietí a tiež výrobcovia zariadení infraštruktúry mobilných sietí. Proces a výsledok návrhu nového výkonnostného indikátora je zdokumentovaný v [RK5]. Dobrý úvod do problematiky poskytuje [20].

Ukážka záverečnej správy z merania vyhotovenej v rámci jedného z projektov diagnostiky komerčnej mobilnej siete je napr. [RK15], jedná sa o doplnkový výstup zameraný na osoby realizujúce riadenie v organizačnej štruktúre mobilného operátora, kde je vykonaná práca sumarizovaná a na jej základe sú vykonávané exekutívne rozhodnutia.

6 Výskum a aplikácie diagnostiky mobilných sietí

I keď je v oblasti diagnostiky telekomunikačnej infraštruktúry zložité rozlíšiť základný a aplikovaný výskum kvôli potrebe vývoja a testovania na reálnych zariadeniach, vývoj metodiky diagnostiky mobilných sietí je orientovaný primárne na základný výskum. V rámci spolupráce s priemyselnou sférou autor zistil potrebu hlbšieho základného výskumu v oblasti, pretože obmedzenie na existujúce diagnostické prístupy väčšinou nevedlo k uspokojivým výsledkom. Z toho dôvodu bolo v praxi potrebné na poslednú chvíľu vyvíjať špecializované diagnostické postupy, čo sa ukázalo ako komplikované a nepraktické financovať zo zmluvného výskumu zameraného na aplikovaný výskum a experimentálny vývoj. Navyše je potrebné základný výskum financovať z nezávislých grantov aby bolo možné dosiahnuť výsledky bez skreslenia, dostatočne všeobecné a bez zamerania na konkrétnu implementáciu či technológiu.

6.1 Metodika diagnostiky mobilných sietí

Základy práce na princípoch diagnostiky a výkonnostného testovania mobilných sietí boli vykonané v rámci organizácie 3GPP, ktorá zastrešuje vývoj a štandardizáciu mobilných sietí od tretej generácie ďalej, niekoľkými z jej subkomisií. Pôvodne sa väčšina práce sústredila na verifikáciu procedúr riadiacej roviny, neskôr sa zameranie mierne posunulo smerom k analýze používateľskej roviny ako OTT služby, kapitola 1.3.2, nabrali na dôležitosť.

Používateľská rovina mobilných sietí sa stáva stále dôležitejšou s tým ako sa mení architektúra mobilných sietí smerom k všeobecnej prístupovej dátovej sieti a poskytované služby konvergujú s tými bežnými v oblasti informačných technológií. Moderné služby cielené na nahradenie klasických telekomunikačných služieb, ako napr. VoLTE namiesto okruhovo spínaného prenosu hlasu, využívajú mobilnú sieť v podstate len čisto ako prenosové médium a takmer všetka komunikácia, či už signalizácia, tak aj prenos hlasových dát, je realizovaná v používateľskej rovine. Zlyhanie signalizácie v riadiacej rovine mobilnej siete je samozrejme stále závažným problémom, špeciálne vo fáze nasadzovania technológie, t.j. budovania infraštruktúry mobilnej siete, pretože tiež bráni realizácii služby. Z týchto dôvodov sú pre analýzu a diagnostiku poslednej generácie telekomunikačných služieb v mobilných sieťach potrebné pokročilejšie korelačné techniky ako sú aktuálne dostupné.

Existuje niekoľko zavedených diagnostických procedúr pre analýzu mobilných sietí, napr. drive-testing, použitie pasívnych sond na rozhraniach mobilnej siete, použitie aktívnych agentov na používateľských koncových zariadeniach a využitie dohľadového subsystému mobilnej siete, ako detailnejšie popisuje kapitola 2. Všetky majú svoje výhody a nevýhody (napr. varianta drive-testing je nákladná a výrazne obmedzuje geografickú oblasť na ktorej je ju možné reálne použiť; pasívne sondy rozhraní sú relatívne lacné ale aktuálne je zložité z nich získať výsledky porovnateľné s tými získanými metódou drive-testing či z dohľadového subsystému; dohľadový subsystém je prítomný v každej mobilnej sieti, ale vo všeobecnosti nie je jednoducho konfigurovateľný pre konkrétne diagnostické zásahy), čo ich predurčuje pre rôzne aplikácie či z diagnostického hľadiska na analýzu rôznych typov problémov. Dôležitou možnosťou je kombinácia viacerých diagnostických procedúr pre využitie ich silných stránok a obmedzenie ich nedostatkov. Okrem rozdielov v možnostiach a vlastnostiach výsledkov zavedených diagnostických procedúr pre analýzu mobilných sietí, každý výrobca technológie mobilnej

siete vyvíja metodiky diagnostiky, ktoré sú celkom pochopiteľne zamerané na jeho vlastné zariadenia a možnosti využitia mimo túto doménu sú hrubo obmedzené. Navyše tieto metodiky diagnostiky sú vo všeobecnosti výrobcami udržiavané ako obchodné tajomstvo a je problematické ich využitie v prípade heterogénnych sietí. Heterogénne siete, t.j. také kde sa v rámci infraštruktúry jednej mobilnej siete využívajú zariadenia a programové prostriedky od viacerých výrobcov, sú v dnešnej dobe hojne využívané pretože umožňujú znížiť náklady na celkovú infraštruktúru a tiež kvôli tomu, že rôzni výrobcovia sú v rôznych oblastiach inak pokročilí a ich technológia je na rôznej úrovni. Akékoľvek ucelené techniky pre hľadanie a analýzu technickej podstaty problémov v mobilnej sieti sú však v prípade heterogénnych sietí len ťažko aplikovateľné a výrobcovia technológie v takomto prípade spravidla nebývajú príliš nápomocní. Taktiež existuje niekoľko spoločností ponúkajúcich diagnostické nástroje pre mobilné siete. Tieto však bývajú zamerané len na konkrétne rozhrania mobilnej siete alebo poskytujú len všeobecné štatistiky a povrchné informácie, aké je možné získať aj z dohľadového subsystému. Oba tieto typy informácií sú pri analýze a lokalizácii podstaty problému len málo nápomocné.

Z toho dôvodu existuje potreba pre všeobecnú metodiku diagnostiky mobilných sietí, nezávislú na dodávateľovi technológie, pokrývajúcu mobilnú sieť ako celok, ako riadiacu tak aj používateľskú rovinu, umožňujúcu segmentáciu vedúcu k lokalizácii, pochopeniu a odstráneniu podstaty technických problémov.

6.1.1 Ciele

Hlavným cieľom projektu tvorby metodiky diagnostiky mobilných sietí je ustanovenie teoretickej roviny a vykonanie experimentálneho overenia rôznych diagnostických prístupov mobilných sietí, zavŕšené vytvorením celistvej metodiky použiteľnej ako základnej kostry k diagnostike mobilných sietí. Vytvorená metodika bude pozostávať zo skupiny pravidiel, kľúčových výkonnostných indikátorov a procedúr pre aplikáciu na diagnostikovanú mobilnú sieť a jej častí prístupom odspodu nahor, ale s viacerými nezávislými vstupnými bodmi pre uľahčenie špecializácie na konkrétnu diagnostickú úlohu a prípad.

Čiastočné ciele zahŕňajú detailnú analýzu zavedených diagnostických prístupov, či už tých ustanovených organizáciou 3GPP, dodávateľmi technológie mobilných sietí alebo výrobcami diagnostických nástrojov, ďalej vývoj a testovanie kooperatívnych a korelatívnych prístupov v prípade využitia viacerých diagnostických metód pre posilnenie výhod a elimináciu nevýhod a v neposlednom rade aplikáciu analytických, štatistických a relačných metód do diagnostiky mobilných sietí pretože toto sa aktuálne v priemyselnej praxi deje len veľmi obmedzene. Základný výskum založený na týchto myšlienkach má potenciál priniesť nové riešenia pre použitie v diagnostike mobilných sietí.

Ďalším pohľadom na ciele je že k diagnostike a optimalizácii zameranej na ľudských používateľov a služby ktoré takíto používatelia bežne využívajú sa navyše stáva stále dôležitejšou potreba vyvinúť prostriedky pre diagnostiku služieb komunikácie medzi prístrojmi, pretože tieto služby sa od tých pôvodných výrazne líšia v požiadavkách na zabezpečenie kvality služby, procese zabezpečenia symptomatického popisu v prípade porúch a celkovej podstate komunikácie, kde sú roly producenta a konzumenta informácií výrazne viac prepletené a generovaná sieťová premávka vykazuje iné charakteristiky v porovnaní s klasickými, na ľudských používateľov zameranými, telekomunikačnými službami. Táto potreba platí aj vo všeobecnosti pre viaceré nové telekomunikačné služby, bez ohľadu na podstatu koncového používateľa, pretože neodsúšané typy služieb sa správajú odlišne od klasických a

často majú špeciálne požiadavky na kvalitu služby čo znamená potrebu špecializovaných diagnostických prístupov. Vyhradenú pozornosť je v rámci vývoja metodiky diagnostiky mobilných sietí nutné venovať aktuálnym myšlienkam preberaným v rámci organizácie 3GPP ako sú samo-optimalizujúce sa mobilné siete, samo-organizujúce sa mobilné siete, samo-uzdravujúce sa mobilné siete a tiež iniciatívam ako napr. minimalizácia drive-testing diagnostiky.

6.1.2 Výskumný plán a kľúčové aktivity

Ako dôležitých pre projekt vývoja metodiky diagnostiky mobilných sietí bolo identifikovaných niekoľko kľúčových aktivít. Tieto boli navrhnuté tak, aby sa predišlo blokovaniu na základe vzájomných závislostí.

6.1.2.1 Konsolidácia medzi metódami zberu kľúčových výkonnostných indikátorov

Vykonávanie kľúčovej aktivity 1 (KA1) je rozvrhnuté na celé prvé dva roky projektu. KA1 je navrhnutá tak, aby riešila problém nekompatibility medzi rôznymi spôsobmi zberu bežne používaných kľúčových výkonnostných indikátorov, ktorá spôsobuje že získané výsledky nie sú priamo numericky porovnateľné. Obsahom preto je zostavenie zoznamu používaných kľúčových výkonnostných indikátorov podľa metodiky 3GPP, rôznych výrobcov technológie mobilných sietí, operátorov mobilných sietí a organizácií zaoberajúcich sa optimalizáciou mobilných sietí. Následne ide o vývoj metodiky merania pre každé z kľúčových výkonnostných indikátorov a pre použitie zvlášť s metódami drive-testing, dohľadový subsystém, pasívne sondy rozhraní a agentov na používateľských koncových zariadeniach, s prihliadnutím na konsolidáciu získaných výsledkov. Výsledkom KA1 je unifikovaný prístup k získavaniu kľúčových výkonnostných indikátorov s použitím ktoréhokoľvek z týchto prostriedkov.

6.1.2.2 Diagnostika infraštruktúry zdola nahor

Kľúčová aktivita 2 (KA2) beží paralelne s KA1 a jej vykonávanie je rozvrhnuté na celé prvé dva roky projektu. KA2 je cieleňá vývoj diagnostických metód pre infraštruktúru mobilných sietí. Prístup k diagnostike bude smerom zdola nahor, ale s viacerými vstupnými bodmi pre podporu lepšej špecializácie pre konkrétny prípad. Aktuálne využívané diagnostické prístupy orientované zhora nadol sa ukázali ako neefektívne pre použitie v reálnych mobilných sieťach, špeciálne v prípade heterogénnych sietí kde sú jednotlivé komponenty mobilnej siete poskytované rôznymi výrobcami. Navrhovaný diagnostický prístup sa v prvom rade zaoberá problémami transportného jadra mobilnej siete a až následne vysokoúrovňovou infraštruktúrou, prvkami mobilnej siete, jednotlivými subsystémami a procedúrami, čo umožňuje obísť zmienené nedostatky aktuálnych diagnostických prístupov.

6.1.2.3 Integrácia podpory nových technológií a služieb

Kľúčová aktivita 3 (KA3) sa vykonáva s počiatkom pol roka po započatí KA1 a KA2 a trvá jeden a pol roka, t.j. ukončí sa zároveň s KA1 a KA2. KA3 je zameraná na včlenenie myšlienok, technológií, štandardov a špecifikácií, ktoré neboli známe pred započatím projektu. Vo fáze prípravy a realizácie je niekoľko takýchto oblastí, napr. samo-organizujúce sa mobilné siete, samo-optimalizujúce sa mobilné siete, samo-uzdravujúce sa mobilné siete či technológie prenechania prenosu dát rôznym technológiám rádiového prenosu dát. Vynechanie týchto myšlienok, technológií a zmien by malo výrazne negatívny vplyv na kvalitu a použiteľnosť výstupov projektu, čomu má KA3 predísť.

6.1.2.4 Vývoj nových kľúčových výkonnostných indikátorov

Kľúčová aktivita 4 (KA4) sa vykonáva s počiatkom rok po započatí KA1 a KA2 a trvá jeden a pol roka, takže sa ukončí pol roka po skončení KA1, KA2 a KA3. V čase začatia sú už dostupné čiastočné výsledky KA1, KA2 a KA3 na čom KA4 stavia a pridáva nové špecializované kľúčové výkonnostné indikátory zamerané na posúdenie kvality služby, zdravia mobilnej siete či mapovania, posúdenia a porovnania výkonnosti a úrovne služby. KA4 počíta s návrhom kľúčových výkonnostných indikátorov pre posúdenie konkrétnych služieb či aspektov infraštruktúry mobilných sietí. Existuje pokračujúca potreba výkonnostných indikátorov lepšie popisujúcich stav mobilnej siete a prebiehajúce procesy, ako aj kvalitatívne vlastnosti jednotlivých služieb, KA4 je cieleňá na naplnenie tejto potreby.

6.1.2.5 Príprava metodiky diagnostiky mobilných sietí

Kľúčová aktivita 5 (KA5) sa vykonáva so začiatkom pol roka po započatí projektu a trvá jeden a pol roka. KA5 je zameraná na zostavenie finálnej metodiky diagnostiky mobilných sietí. Dôležitým aspektom KA5 je zosúladenie pripravených diagnostických prístupov, navrhnutých kľúčových výkonnostných indikátorov a optimalizačných postupov s existujúcou legislatívou a štandardami. Výsledná metodika diagnostiky mobilných sietí je pripravená so zreteľom na poskytnutie pravidiel a procedúr pre diagnostický proces pre mobilné siete, jednotlivé prvky ich infraštruktúry a služby cez mobilné siete realizované. Výsledkom je rozsiahly zoznam kľúčových výkonnostných indikátorov pre jednotlivé podoblasti diagnostiky mobilných sietí a súprava analytických, štatistických a relačných prostriedkov pre meranie, výpočet a vyčíslenie kľúčových výkonnostných indikátorov a vyplývajúcich optimalizačných odporúčaní pre konkrétne identifikované príčiny problémov.

6.2 Automatizovaný analyzátor rozhraní mobilných sietí

Pasívne sondy rozhraní sa pre analýzu mobilných sietí používajú už niekoľko rokov. Aktuálne preferovaný spôsob ich nasadenia je pre online analýzu a monitorovanie signalizácie v riadiacej rovine a dátových prenosov v rovine používateľskej. Toto využitie koliduje s možnosťami monitorovania a zbierania štatistických dát dohľadového subsystému, ktorý je v mobilnej sieti komerčných parametrov vždy nasadený a vo všeobecnosti tieto úlohy plní na dostatočnej úrovni.

Ďalším, avšak aktuálne minoritným, spôsobom využitia pasívnych sond rozhraní mobilnej siete je diagnostika problémov a následná analýza a odstránenie ich príčin. Táto aplikácia je však obmedzená skutočnosťou že komerčne dostupné pasívne sondy rozhraní mobilných sietí sú výrazne zamerané na online analýzu a teda že ich schopnosti v oblasti plného zachytávania sieťovej premávky sú prakticky nulové či veľmi obmedzené v lepšom prípade. Ďalej možnosti pasívnych sond rozhraní v oblasti zbierania štatistických dát sú buď limitované na malú množinu napevno určených výkonnostných indikátorov, alebo v prípade využitia všeobecného nástroja pre hĺbkovú analýzu sieťovej premávky je množina vyhodnotiteľných výkonnostných indikátorov veľmi veľká, avšak slabo dokumentovaná a ťažko mapovateľná na presne definované kľúčové výkonnostné indikátory, napr. tie definované organizáciou 3GPP. Je samozrejme možné vypočítať z týchto výkonnostných indikátorov užitočné štatistické informácie o analyzovanej mobilnej sieti, avšak vyžaduje to proces pokus-omyl a veľa manuálnej práce vysoko kvalifikovanej obsluhy. Vylepšenie v týchto dvoch kritických oblastiach by umožnilo širšiu aplikáciu pasívnych sond rozhraní v diagnostike mobilných sietí. Preto vznikol projekt cieleňý na vývoj systému

schopného zachytávať sieťovú premávku na linkovej rýchlosti a úplnú, zahŕňajúcu hlavičky dátových jednotiek, transportované dáta aj metadáta o časovaní, pre neskoršiu offline analýzu, ktorá sa ukázala pre reálnu identifikáciu príčin problémov ako veľmi dôležitá. Ohľadom post-hoc analýzy zachytených dát vyvíjaný systém využíva niekoľko existujúcich analytických riešení a riešení pre hĺbkovú inšpekciu sieťovej premávky pre vyčíslenie všeobecných kľúčových výkonnostných indikátorov, ale aj s možnosťou použiť ďalšie analytické nástroje ako zásuvné moduly. Dôležitými aspektami sú jednoduchosť konfigurácie výsledného riešenia ohľadom vyhodnocovania kľúčových výkonnostných indikátorov, automatizovaná prevádzka realizovaného systému, vysoká štatistická presnosť výsledkov a možnosť jednoduchej definície vlastných výkonnostných indikátorov.

6.2.1 Ciele a kľúčové aktivity

Hlavným cieľom projektu je vytvorenie programového vybavenia a konštrukcia funkčného vzorku systému pre automatizovanú diagnostiku mobilných sietí využívajúceho pasívne sondovanie rozhraní mobilnej siete, analýzu premávky v riadiacej aj používateľskej rovine, štatistickú analýzu a vyhodnotenie kľúčových výkonnostných indikátorov. Oproti existujúcim riešeniam bude výrazne rozšírená podpora vyhodnocovania štandardizovaných kľúčových výkonnostných indikátorov definovaných organizáciou 3GPP, projektu internet2 a ďalších. Veľmi dôležitými vlastnosťami vyvíjaného systému sú opakovateľnosť, vysoká štatistická presnosť s vyhodnotením miery dôvery vo výsledok či automatizované poskytnutie strojového rozboru situácie, ktoré spolu vedú k zníženiu záťaže obsluhy náhodnou zložitou diagnostikou mobilných sietí. Vývoj cieľi na návrh systému umožňujúceho jednoduché rozširovanie množiny podporovaných kľúčových výkonnostných indikátorov ale tiež podporovaných externých analyzátorov mobilných sietí či nástrojov pre hĺbkovú inšpekciu paketovo orientovanej sieťovej premávky, ktoré slúžia na realizáciu meraní a zbieranie štatistických dát.

6.2.2 Popis realizácie automatizovaného analyzátoru rozhraní mobilných sietí

Realizáciu riešenia ako celku je možné rozdeliť z niekoľkých uhlov pohľadu. Za prvé je to z hľadiska dekompozície problému rozdelenia systému na niekoľko vzájomne viac či menej prepojených funkčných celkov, ktoré spolu umožňujú kompletnú funkcionálnosť. Za druhú je to z hľadiska výskumných a experimentálnych nadväzností a posúdenia časovej náročnosti jednotlivých dielčích úloh vytvorenia časového plánu etáp riešenia. Nasleduje popis funkčných podsystémov, ktorých tvorba je náplňou projektu. Tvorba programového vybavenia bude realizovaná pomocou tzv. agilných programovacích techník.

6.2.2.1 Subsystém riadenia

Tento subsystém kvôli architektúre systému klient+server pozostáva z dvoch oddelených programových častí. Serverová časť beží na analyzačnom hardware, kde prijíma pokusy o napojenie z klientskej časti. Ďalej sa stará o logické riadenie celého systému a predávanie riadenia iným subsystémom pre vykonanie ich činností. Klientská časť beží na počítači operátora systému a poskytuje mu grafické používateľské rozhranie pre interakciu so systémom a ovládanie všetkých exponovaných funkcií systému ako celku a tiež má na starosti prezentáciu výsledkov meraní a analýz.

6.2.2.2 *Subsystém zachytávania sieťovej komunikácie*

Tento subsystém sa skladá za prvé z hardwareovej časti realizujúcej fyzické rozhranie pre technológie používané pre prepojovanie prvkov mobilných sietí, konkrétne rozhrania Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, 10G Ethernet a tiež rozhranie s pevným časovým delením prenosových kanálov E1/T1. Za druhé je potrebná programová podpora pre zachytávanie sieťovej premávky, opatrenie jednotlivých zachytených dátových jednotiek časovými značkami a uloženie do jednotného formátu PCAP pre uloženie k ďalšiemu spracovaniu bez ohľadu na spôsob prenosu dát.

6.2.2.3 *Subsystém štruktúrovaného ukladania a prístupu k dátam*

V prípade tohto subsystému sa jedná o logickú abstrakčnú vrstvu pracujúcu s nameranými a vypočítanými dátami. Tieto majú väčšinou relačnú logickú štruktúru a iným subsystémom musia byť podľa potreby sprístupňované pre vyhodnocovanie či ďalšie výpočty. Výstupy rôznych analyzačných nástrojov a systémov pre hĺbkovú paketovú inšpekciu musia byť katalogizované a uschovávané, čo je hlavnou náplňou tohto subsystému.

6.2.2.4 *Subsystém správy analyzačných nástrojov*

Tento programový prvok bude realizovať komunikáciu s jednotlivými podporovanými analyzačnými nástrojmi a systémami pre hĺbkovú paketovú inšpekciu. Dôležitou vlastnosťou je všeobecnosť pre neskoršie jednoduché rozširovanie podpory externých analyzačných nástrojov. Tento subsystém zabezpečuje predávanie dát výkonným prvkom a späť a taktiež monitorovanie ich činnosti. Rôzne analyzačné nástroje a systémy pre hĺbkovú inšpekciu paketov je nutné mať možnosť spúšťať paralelne pre skrátenie celkovej doby diagnostickej analýzy.

6.2.2.5 *Subsystém dekompozície kľúčových výkonnostných indikátorov*

Vzhľadom k tomu, že podpora vyčíslenia konkrétnych kľúčových výkonnostných indikátorov je medzi dostupnými analyzačnými systémami prakticky neexistujúca, je potrebné kľúčové výkonnostné indikátory rozložiť na jednoduchšie čiastkové výkonnostné indikátory, ktoré je možné jednotlivými nástrojmi vypočítať. Následne je nutné vybrať pre každý dielčí výkonnostný indikátor vhodný analyzačný nástroj a skompilovať zoznam parametrov k vyhodnoteniu pre jednotlivé analyzáto, pozostávajúci z dielčích indikátorov od všetkých počítaných kľúčových výkonnostných indikátorov.

6.2.2.6 *Subsystém štatistického spracovania a vyhodnotenia*

Úlohou tohto subsystému je štatistické spracovanie súborov hodnôt pre kľúčové výkonnostné indikátory, určenie štatistických momentov a vlastností rozložení týchto súborov a následné vyhodnotenie nameraných dát z hľadiska hladinovania a reprezentácie výsledkov. Taktiež je vyhodnotená miera dôvery v zistený výsledok a nejednoznačné výsledky sú označené.

6.2.2.7 *Subsystém tvorby správ o meraní*

Tento podsystém realizuje formátovanie nameraných a interpretovaných dát pre zobrazenie ľudskej obsluhy systému a tiež pre tvorbu výstupných správ. Získané údaje sú organizované do tabuliek, použijú sa pre vykreslenie ilustračných grafov a sú doplnené textovým popisom, rozborom a zisteniami.

6.3 Využitie navrhutej metodiky pre diagnostiku komerčnej mobilnej siete

Pre praktické overenie navrhutej metodiky diagnostiky mobilných sietí boli realizované merania v reálnych komerčných mobilných sieťach, kde diagnostické ciele vyplývali z prezentovaných problémov jednotlivých operátorov mobilných sietí.

6.3.1 Analýza úspešnosti a výkonu paketovo orientovaných dátových služieb

Meranie bolo realizované na jednom rádiovom subsysteme mobilnej siete, riadeným jedným RNC (Radio Network Controller – kontrolér rádiovkej siete); dáta pre výkonnostnú analýzu boli získané pomocou pasívnej sondy rozhraní mobilnej siete. Zámerom bolo vyhodnotenie parametrov ako obojcestná doba odozvy RTT a jednocestné oneskorenie pre služby realizované v používateľskej rovine a tiež časovanie a pomer úspešnosti procedúr riadiacej roviny.

Keďže meranie bolo realizované v spolupráci s firmou EXFO ktorá dodala meracie systémy, dáta boli zachytávané využitím pasívnej sondy rozhraní EXFO PowerHawk, počas siedmich súsledných dní. Zachytávanie dát používateľskej roviny bolo obmedzené na dve hodiny denne počas hlavnej prevádzkovej doby určenej pre analyzovaný segment siete. Celkové zachytené množstvo dát bolo 7TB. Zachytené boli dáta v GTP-U tuneli medzi RNC a GGSN, t.j. na tzv. „Direct Tunnel“ rozhraní. Dáta riadiacej roviny boli zachytávané na rozhraní Iu-PS medzi RNC a SGSN, nepretržite počas celej analyzovanej doby, t.j. 24x7 hodín a neskôr spracované pomocou analyzátoru EXFO TravelHawk Pro. Do siete sa pasívna sonda pripájala cez existujúcu nízko-úrovňovú dohľadovú infraštruktúru GIGAMON, kde boli odbočené virtuálne okruhy prenášajúce požadované spoje.

Podrobne sú meranie, zistené výsledky a výsledné odporúčania popísané v dokumente [RK15]. Novinkou z pohľadu diagnostických zvyklostí bolo zaradenie vyhodnocovania štatistických momentov vyššieho rádu pri vyčíslení doby trvania jednotlivých procedúr, ako je popísané v kap. 5.1. Tento postup umožnil identifikáciu takých kľúčových výkonnostných indikátorov, ktoré s vyššou pravdepodobnosťou ukazovali na možný problém v sieti, čo v prípade použitia len aritmetického priemeru nešlo. Realizované výsledky dopĺňali iné existujúce meranie metódou drive-testing, s tým rozdielom, že lepšie zodpovedali spätnej väzbe získavanej operátorom mobilnej siete od používateľov.

6.3.2 Porovnanie KPI v rádiovkej prístupovej sieti odlišných dodávateľov technológie

Meranie malo za cieľ verifikovať podmienky pre akceptačné testovanie inštalovanej siete základňových staníc, ktoré mali nahradiť predtým používanú technológiu iných výrobcov. Obmena technológie sa vykonávala po častiach a vždy sa vykonali rozsiahle testy pred a po výmene v konkrétnej oblasti. Porovnávané boli dosahované výsledky výkonu a výkonnosti pred a po výmene ako aj rozdiely vo výsledkoch výkonnosti rádiovkej siete medzi rôznymi geografickými oblasťami v jednom čase, najmä pre určenie zmeny záťaže siete kvôli korekcii nameraných dát. Základňové stanice jednotlivých výrobcov boli primárne dohľadované systémami dodanými týmito výrobcami. Pretože vzniklo podozrenie na inkonzistenciu vyčísľovania KPI, vyvstala potreba toto preskúmať a určiť korigovanú metodiku porovnávacích testov. Pre porovnanie výkonnosti základňových staníc jednotlivých výrobcov preto boli paralelne nasadené pasívne sondy rozhraní.

Z údajov získaných sondami a ich porovnaním s výsledkami z jednotlivých dohľadových systémov bolo zistené, že dohľadové systémy rôznych výrobcov počítajú identicky identifikované KPI rôzne, najčastejšie ako súčet rôznych množín čiastkových výkonnostných indikátorov⁵. Takýmto spôsobom boli preverené všetky procedúry riadiacej roviny a testy v používateľskej rovine, ktoré boli súčasťou akceptačného testovania. Výsledkom analýzy boli nové vzorce pre jednotlivé KPI tak, aby tieto boli vyhodnotené identicky pre základňové stanice všetkých výrobcov.

Sekundárnym výsledkom boli zaujímavé štatistiky porovnávajúce nízkoúrovňové indikátory výkonnosti základňových staníc, napr. boli zistené rozdiely v majoritných dôvodoch zlyhania jednotlivých procedúr riadiacej roviny medzi výrobcami. U jedného výrobcu bol identifikovaný problém s uvoľňovaním pridelených časových slotov za určitých podmienok, čo časom viedlo k vyčerpaniu prostriedkov napriek tomu, že reálne nedochádzalo k ich využitiu. V inom prípade bolo zistené, že jedno riešenie trpelo veľmi častým rozpadom už nadviazaného spojenia kvôli problémom s časovaním procedúr napriek tomu, že v ostatných KPI dosahovalo veľmi vysokú spoľahlivosť. Zaujímavý bol problém porovnania dvoch systémov, kde jeden vykazoval vysokú úspešnosť procedúr ale dlhšiu dobu ich trvania, druhý mal úspešnosť zníženú ale procedúry boli dokončené v kratšom čase. Druhý typ vykazoval lepšie výsledky pri meraní metódou drive-testing pred uvedením do prevádzky, ale pri bežnom vyťažení poskytoval výrazne menej kvalitné služby používateľom, nasadenie pasívnych sond rozhraní umožnilo detailne popísať prebiehajúce deje a identifikovať príčiny tohto nesúladu.

6.3.3 Porovnanie jednotlivých variantov Circuit Switched Fallback

Technológia CSFB, prevod hlasového hovoru cez okruhovo spínanú doménu staršej generácie paralelne vybudovanej mobilnej siete v prípade chýbajúceho pokrytia či nemožnosti zabezpečiť kvalitatívne požiadavky služby v čisto paketovo spínanej mobilnej sieti, umožňuje postupné nasadzovanie hlasového volania cez paketovo prepínané mobilné siete, tzv. VoLTE, bez nutnosti vybudovania kompletného pokrytia a nutnosti VoLTE podporovať v každej bunke. CSFB existuje viacero variantov, najmä z pohľadu generácie okruhovo prepínanej siete, smere prevodu hovoru a konfigurácie mobilnej infraštruktúry, konkrétnych prítomných prvkov a prepojení medzi nimi.

Výsledkom merania bola okrem časovania procedúr prevodu hlasového hovoru v jednotlivých variantoch tiež hlbšia analýza príčin degradácie v prípade variantov s horšími výsledkami. Ukázalo sa, že v tejto úlohe sú rozdiely nielen medzi prvkami pre prepínanie hovorov ale tiež subsystémami základňových staníc, ktoré nešli vždy vyriešiť aktualizáciou software. Systematicky vyššie hodnoty trvania procedúr riadiacej roviny pri okruhovo spínanej službe sa v prípade kombinácie s paketovo prepínanou sieťou a prenosu hlasového hovoru do nej prejavili na úspešnosti takejto operácie.

6.3.4 Akceptačné testovanie VoLTE rôznymi diagnostickými nástrojmi

VoLTE je technológia pre prenos hlasových hovorov paketovo spínanou mobilnou sieťou so zabezpečením kvality služby. Takéto riešenie umožňuje realizáciu hlasových hovorov v mobilných sieťach, ktoré nemajú podporu prenosu okruhovo spínaných dát, bez potreby paralelnej prevádzky mobilnej siete

⁵ Príkladom môže byť výrobca, ktorý pre výpočet počtu zlyhaných pokusov pre vytvorenie pripojenia k paketovo prepínanej sieti používal súčet len niektorých dôvodov zlyhania, pričom iné ignoroval

staršej generácie. Pre nasadenie technológie VoLTE v komerčnej sieti je potrebné najprv overiť výkonnostné charakteristiky takéhoto riešenia, čo sa deje akceptačným meraním. Toto meranie je v podstate zovšeobecneným variantom merania popísaného v kap. 6.3.3, so zvýšeným zreteľom na hovor čisto realizovaný v paketovo spínanej mobilnej sieti a zameraný viac na analýzu výkonu než na kompletnú diagnostiku. Výrazným rozšírením je využitie maximálneho množstva diagnostických metód nevyžadujúcich prístup k infraštruktúre mobilnej siete pod správou tretej strany, čiže metódy drive-testing, agentov na používateľských koncových zariadeniach, pasívnych sond rozhraní medzi jednotlivými kľúčovými prvkami siete a v obmedzenej miere tiež štatistík získaných z dohľadového subsystému mobilnej siete.

Konečným výsledkom merania boli samozrejme výkonnostné parametre realizovaných hovorových služieb, podstata však ležala v porovnaní jednotlivých diagnostických metód a výbere najvhodnejších možností pre konkrétne podmienky. Výhody a nevýhody metód boli popísané v kap. 2, ich aplikovateľnosť do veľkej miery vychádza z ich intrinzických charakteristík, situáciu ale komplikujú rôzne administratívne obmedzenia. Pre akceptačné testovanie je nutné využitie aktívnych metód, pasívne metódy sú ale vhodným doplnením pre prípadnú hlbšiu analýzu a hľadanie príčin v prípade nedostatočnej výkonnosti. Ďalšou, kľúčovou, výhodou súčasného využitia pasívnych metód pri akceptačných testoch je možnosť následného monitorovania v dobe pilotnej prevádzky, čo umožní overiť výkon pri zaťažení siete bežnou používateľskou premávkou a jeho vzťah k výkonu zisteného pomocou aktívnych, do určitej miery syntetických, testov.

7 Záver

Predložený dokument prezentuje výsledky dlhodobej práce autora v oblasti diagnostiky mobilných sietí. Veľkou časťou práce bolo vybudovanie experimentálneho pracoviska pre podporu výskumu diagnostiky mobilných sietí. Ďalej veľká časť teoretickej a aplikovanej výskumnej práce autora bola započatá či inšpirovaná riešením zmluvného výskumu smerovaného na diagnostiku mobilných sietí. Okrem v priemyselnej sfére bežných diagnostických zásahov ale boli požadované aj analýzy, ktoré v histórii diagnostiky mobilných sietí nemali obdoby. To viedlo k nutnosti vyvinúť nové prístupy, ktoré následne boli prakticky okamžite overené. V práci prezentované diagnostické prístupy boli všetky s výhodou využité pre diagnostiku reálnych, komerčne nasadených, mobilných sietí. Z pohľadu tejto práce je špeciálne dôležitá aplikácia pasívnych sond rozhraní ako primárneho diagnostického nástroja mobilných sietí. Dôležitým teoretickým nástrojom, ktorý umožňuje praktické nasadenie sond rozhraní je relačná štatistická analýza relácií. Tá spolu s modelovaním jednotlivých prvkov mobilnej siete umožňuje nasadenie pasívnych sond ako diagnostického nástroja a porovnanie výsledkov s tými získanými inými metódami. Tak je zabezpečená historická súslednosť pri nahradení minulých metód využitím pasívnych sond rozhraní ale tiež interoperabilita viacerých diagnostických nástrojov pre získanie presnejšieho obrazu stavu mobilnej siete.

Z pohľadu cieľov práce definovaných v kap. 3, naplnenie prvého cieľa, vybudovanie experimentálneho pracoviska pre výskum, je dokumentované v kap. 4 a časť vybudovania experimentálnej mobilnej siete vo väčšom detaile tiež v [RK8]. Realizácia druhého cieľa, využitie pasívnych sond rozhraní pre diagnostické zásahy do infraštruktúry mobilných sietí, je popísané v kap. 5. Naplnenie tretieho cieľa, vytvorenie metodiky diagnostiky mobilných sietí, je popísané v kap. 6.1 a realizácia automatizovaného meracieho systému pracujúceho podľa tejto metodiky v kap. 6.2. Popis projektov v ktorých sa výsledky práce prakticky overili je uvedený v kap. 6.3.

Bohužiaľ väčšina výstupov vedeckej práce autora v oblasti diagnostiky mobilných sietí je dnes vzhľadom k pôvodu v zmluvnom výskume pokladaná za intelektuálne vlastníctvo tretích strán. Prezentované výsledky sú tie, ku ktorým sa podarilo získať súhlas, za čo patrí autorova vďaka Dariuszovi Łaneckému.

Výsledky vedeckej práce sú doplnené pedagogickým úsilím autora, preto napr. niekoľko z autorových publikácií sú skriptá zamerané na podporu výuky, lepšie pochopenie problematiky cez laboratórne úlohy či naznačenie architektúry a využitia komunikačných systémov.

Vybudované pracovisko diagnostiky mobilných sietí má vzhľadom na svoje bohaté prístrojové vybavenie presah aj do ďalších oblastí výskumu. Kvôli tomu sa predpokladá jeho využívanie pre základný výskum ale tiež aplikovaný výskum a experimentálny vývoj v oblasti mobilných sietí a širšie všeobecne komunikačných systémov, moderných služieb a interakcie mobilných sietí, telekomunikačných a telematických služieb a ľudskej spoločnosti, čo sa potvrdzuje už v súčasnosti. V prípade ďalšieho financovania môže byť toto pracovisko základňou pre výskum ďalších generácií mobilných sietí.

Použitá literatúra

- [1] HORST CZICHOS, editors. Handbook of technical diagnostics fundamentals and application to structures and systems. Berlin: Springer, 2013. ISBN 9783642258503.
- [2] ZELINKA, Tomáš a Miroslav SVÍTEK. *Telekomunikační řešení pro informační systémy síťových odvětví*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 218 s. Průvodce (Grada). ISBN 978-80-247-3232-9.
- [3] PRCHAL, J. *Teorie pravděpodobnosti v sdělovací technice*. Vydání I. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1975. ISBN OS-31-022/76.
- [4] SMITH, Clint a Daniel COLLINS. *3G Wireless Networks*. New York: McGraw-Hill, 2002. McGraw-Hill telecom professional. ISBN 00-713-6381-5.
- [5] USN9810 (MME) Data Configuration Training (4G). Huawei Technologies Co., Ltd., 2010.
- [6] USN ATCA Platform Operation and Maintenance Training: Training Material. Huawei Technologies Co., Ltd., 2010.
- [7] UGW Routine Operation and Maintenance Training: Training Material. Huawei Technologies Co., Ltd., 2012.
- [8] UGW (SGW/PGW) Data Configuration Training (4G). Huawei Technologies Co., Ltd., 2010.
- [9] VUT - HUAWEI LTE eRAN6.0 Operation & Configuration training: Training Material. Huawei Technologies Co., Ltd., 2014.
- [10] LTE eRAN6.0 Synchronization and Troubleshooting Training. Huawei Technologies Co., Ltd., 2010.
- [11] *IMS Overview Training*. Huawei Technologies Co., Ltd., 2013.
- [12] IMS ATCA Platform (Hardware/CGP) Training. Huawei Technologies Co., Ltd., 2013.
- [13] IMS Routine Maintenance (First Line) Training. Huawei Technologies Co., Ltd., 2012.
- [14] iManager M2000 (IMS) Client Application Operation and Maintenance Training. Huawei Technologies Co., Ltd., 2013.
- [15] VUT - HUAWEI iManagerM2000 Client Training: Training Material. Huawei Technologies Co., Ltd., 2013.
- [16] *Fundamentals of the IMS: IP multimedia subsystem*. Technical Basic. Praha: Trainingpoint ČVUT FEL, Velflíkova 10, 2007.
- [17] 3GPP 23.246. Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS): Architecture and functional description. Release 13. 3GPP, 2015.
- [18] AGPLv3. *GNU Affero General Public License: Version 3, 19 November 2007*. Version 3. <http://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.html>: GNU, Free Software Foundation, 2007.
- [19] GRAJA, Hubert, PERRY, Philip a MURPHY, John. A statistical analysis of IP packet delay and jitter in cellular networks. 5 s. Available from: <http://pel.ucd.ie/files/statistical%20analysis.pdf>
- [20] KREHER, Ralf. UMTS Performance measurement: a practical guide to KPIs for the UTRAN environment. Chichester: John Wiley, 2007, xii, 213 p. ISBN 04-700-3249-9.
- [21] *Circuit-switched fallback: The first phase of voice evolution for mobile LTE device*. QUALCOMM, Ericsson, 2012, 11 s.
- [22] WALLS, Karla: How mobile usage changes when customers get 4G speeds. In: CIQUAL: Customer Insight [online]. 2012-11-05. Available from: <http://www.ciqua.com/blog/how-mobile-usage-changes-when-customers-get-4g-speeds/>

- [23] *Digital News Report 2016*. Thomson Reuters Foundation. Oxford: Reuters Institute for the Study of Journalism, 2016, 124 s. Dostupné z: <http://reutersinstitute.politics.ox.ac.uk/news/digital-news-report-2016-out-now>
- [24] 3GPP TS 32.410; Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for UMTS and GSM. 12.0.0. 3GPP. <http://www.3gpp.org/DynaReport/32410.htm>
- [25] 3GPP TS 32.450; Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Definitions. 12.0.0. 3GPP. <http://www.3gpp.org/DynaReport/32450.htm>
- [26] 3GPP TS 32.451; Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Requirements. 12.0.0. 3GPP. <http://www.3gpp.org/DynaReport/32451.htm>
- [27] 3GPP TS 32.454; Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for the IP Multimedia Subsystem (IMS); Definitions. 12.0.0. 3GPP. <http://www.3gpp.org/DynaReport/32454.htm>
- [28] 3GPP TS 32.455; Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for the Evolved Packet Core (EPC); Definitions. 12.0.0. 3GPP. <http://www.3gpp.org/DynaReport/32455.htm>
- [29] 3GPP TS 32.814; Telecommunication management; UTRAN and GERAN Key Performance Indicators (KPI). 7.0.0. 3GPP, 2017-06-07. <http://www.3gpp.org/DynaReport/32814.htm>
- [30] OBRŠLÍK, Lukáš. Sběr dat o síťové komunikaci z koncových zařízení: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 69 s. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.
- [31] GARGULÁK, L. Sběr dat o síťové komunikaci ze zařízení síťové infrastruktury: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 94 stran. Vedoucí práce Ing. Radko Krkoš.
- [32] BARNIAK, Martin. Analýza výkonu zariadení sieťovej infraštruktúry: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 79 s. Vedúci práce bol Ing. Radko Krkoš.
- [33] TRÁVNÍČEK, M. Simulace datových sítí s využitím přímého vykonávání kódu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radko Krkoš.
- [34] ZICHA, K. Multimediální přenosy v bezdrátových sítích: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 65 s. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.
- [35] PETROVSKÝ, Peter. Multicast v IP sieťach: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2013. 54 s. Vedúci práce bol Ing. Radko Krkoš.
- [36] Velsh, I. Analýza uživatelské roviny mobilných sítí 4. generace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2014. 122 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Radko Krkoš.
- [37] HAJN, Pavel. Analýza řídicí roviny mobilných sítí 4. generace: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 113 s. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.

- [38] MAUREROVÁ, Lenka. Vliv protokolu HTTP 2.0 na moderní datové sítě: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 53 s. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.
- [39] LUKAČOVIČ, Martin. Využitie grafických procesorov pre univerzálne výpočty v priemyselných systémoch: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 59 s. Vedúci práce bol Ing. Radko Krkoš.
- [40] OBRŠLÍK, Lukáš. Implementace triple-play služeb v heterogenní síti: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 92 s. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.
- [41] CHAPČÁK, David. Využití virtualizace při simulaci datových sítí: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 63 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Radko Krkoš.
- [42] HANÁK, Filip. Monitorování stavu transportní infrastruktury mobilních sítí: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. Nevypracováno. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.
- [43] TKÁČ, Peter. Autentizácia, autorizácia a účtovanie paketových prenosov v mobilných sieťach: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 54 s. Vedúci práce bol Ing. Radko Krkoš.
- [44] DUDA, Michal. Rádiová přístupová síť mobilní sítě: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 70 s. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.
- [45] MAUREROVÁ, Lenka. Diagnostika a monitorování transportních sítí: diplomová práce. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 78 s. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.
- [46] SCHALLER, Lukáš. Mobilní sítě 5. generace: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 97 s. Vedoucí práce byl Ing. Radko Krkoš.
- [47] SPIŠŠÁK, Filip. Kvalita služby v mobilných sieťach: diplomová práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 97 s. Vedúci práce bol Ing. Radko Krkoš.
- [48] UHER, T. Komerční mobilní sítě jako kritická infrastruktura. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radko Krkoš.

Vlastné publikácie

- [RK1] MÁCHA, T.; KRKOŠ, R. A novel approach to OSPF metric calculation. In Research in Telecommunication Technologies 14th International Conference Proceedings. 2012. s. 85-91. ISBN: 978-80-554-0570-4.
- [RK2] MÁCHA, T.; KRKOŠ, R.; NOVOTNÝ, V. OSPF Alternate Costing Strategy. In 2012 International Conference on Telecommunication Systems, Modeling and Analysis (ICTSM2012). Prague: Czech Technical University in Prague, 2012. s. 136-140. ISBN: 978-0-9820958-6-7.
- [RK3] MÁCHA, T.; KRKOŠ, R.; NOVOTNÝ, V. Proposal of load aware routing for OSPF routing protocol. Communications, 2013, roč. 15, č. 2a/ 2013, s. 139-144. ISSN: 1335- 4205.
- [RK4] KRKOŠ, R. Quality of Service Packet Marking Driver for Windows based Terminal Devices. In Student EEICT: Proceedings of the 18th conference, Volume 3. 2012. s. 452-456. ISBN: 978-80-214-4462-1.
- [RK5] KRKOŠ, R. Preloading Time of Multimedia Stream as Key Performance Indicator for Cellular Networks. In Student EEICT: Proceedings of the 19th conference. 2013. s. 9-13. ISBN: 978-80-214-4695-3.
- [RK6] NOVOTNÝ, V.; NAGY, L.; KRKOŠ, R. Architektura sítí - laboratorní cvičení. Architektura sítí - laboratorní cvičení. Brno, ČR: VUT v Brně, 2013. s. 1-102. ISBN: 978-80-214-4723-3.
- [RK7] NOVOTNÝ, V.; KRKOŠ, R.; ŠEDÝ, J. Možnosti využití technologie mobilní sítě 4. generace firmy Huawei. Možnosti využití technologie mobilní sítě 4. generace firmy Huawei. 1. VUT v Brně, Brno, ČR: VUT v Brně, 2014. s. 1-34.
- [RK8] NOVOTNÝ, V.; KRKOŠ, R.; ŠEDÝ, J. Mobilní experimentální síť LTE-WiFi-EPC-IMS na FEKT VUT Brno. Mobilní experimentální síť LTE-WiFi-EPC-IMS na FEKT VUT Brno. 1. VUT v Brně, Brno, ČR: VUT v Brně, 2015. s. 1-53.
- [RK9] KRKOŠ, R. a kol. Travelhawk Remote Access. darlan, 2013. s. 1-3.
- [RK10] NOVOTNÝ, V.; KRKOŠ, R.; ŠEDÝ, J. Komunikační služby, protokoly a technologie. Komunikační služby, protokoly a technologie. 1. Brno, ČR: VUT v Brně, 2015. s. 1-212.
- [RK11] PYATTAEV, A.; HOŠEK, J.; JOHNSON, K.; KRKOŠ, R.; GERASIMENKO, M.; MAŠEK, P.; OMETOV, A.; ANDREEV, S.; ŠEDÝ, J.; NOVOTNÝ, V.; KOUCHERYAVY, Y. 3GPP LTE-Assisted Wi-Fi Direct: Trial Implementation of Live D2D Technology. ETRI JOURNAL, 2015, roč. 37, č. 5, s. 877-887. ISSN: 1225-6463.
- [RK12] NOVOTNÝ, V.; SYSEL, P.; ŠIFTA, R.; MÜNSTER, P.; LATTENBERG, I.; KRKOŠ, R. Výzkumná zpráva k řešení projektu MPO FR-TI4/ 696. VUT v Brně: Vysoké učení technické v Brně, 2015. s. 1-126.
- [RK13] KRKOŠ, R.; ŠEDÝ, J.; NOVOTNÝ, V. Analysis, troubleshooting and assessment of 4G cellular networks and services. Unpublished. 2015.
- [RK14] NOVOTNÝ, V.; KRKOŠ, R.; MÜNSTER, P.; ŠIFTA, R.; ŠTEFL, J.; POSPÍCHAL, P.; MALÝ, Z. The Opto-Fiber Sensory System is used for Intrusion Detection Monitored Areas and to Prevent Damage. Czech Defence Industry Review, 2015, roč. 22, č. 1/ 2015, s. 22-23. ISSN: 1802- 4300.
- [RK15] KRKOŠ, R. a kol. 3G Network Performance Report. June 2014. s. 1-28.
- [RK16] KRKOŠ, R. a kol. Diagnostic methods for mobile networks. VUT v Brně, 2014. s. 1-8.
- [RK17] KRKOŠ, R. Automated Mobile Network Interface Analyser. VUT v Brně, 2015. s. 1-6.
- [RK18] HORVATH, Tomas, Radko KRKOS a Lubos DUBRAVEC. Deep Data Analysis in GPON Networks. Optica Applicata. 0078-5466, 2017, 47(1), 2018. ISSN 0078-5466.