

Summary

The presented work “Optimization of Data Transmission in Channels with Highly Variable Throughput and Latency” deals with the design and optimization of control algorithm packet controller, which can effectively and automatically keep such amount of data in the packet network in order to maintain the maximum performance with the minimal transmission delay and loss. The packet controller is proposed as a part of the communication system which is capable to transmit the data by using several independent transmission paths in the IP network. The work describes a making of proposal packet controller, and optimization environment for wireless mobile networks. The thesis also proposes a methodology which was used for the function testing of the proposed controller in real conditions.

The thesis is divided into several chapters that focus not only on the progress of the solution of the presented problems, but also the achievements and benefits. The first section presents the motivation for writing this thesis, including the definition of the main goals. The selected processing methods and their use in the thesis are presented in the second chapter. Information about the current state of the topic in the academic and commercial sectors makes a part of the third chapter. This chapter is also conducted under research solution distributed in one of the free licenses. The objectives of the dissertation and its benefits are listed in the fourth chapter. The description of communication systems using the principle of inverse multiplex packet is a part of the chapter entitled “Analysis of the solution”. This chapter also provides the information about the use of theory regulators in the packet networks. The highlighting of the principle of the inter-layer cooperation is also included in this chapter. The design and optimization of the packet controller for mobile networking environment is elaborated in the chapter six. Its functional verification creates a part of the seventh chapter. The results presented in the dissertation are summarized in the chapter entitled “Conclusion”. The suggestions for further research opportunities in this area are also included in this chapter.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Optimalizace přenosu dat v kanálech se značně proměnnou propustností a zpožděním

Ing. Zbyněk Kocur

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Telekomunikační technika

Teze disertace k získání akademického titulu „doktor“, ve zkratce „Ph.D.“

Praha, Únor 2014

Resumé

Předložená práce se zabývá návrhem a optimalizací řídicích algoritmů paketového regulátoru, který dokáže efektivně a automaticky udržovat v paketové síti takové množství dat, aby byla zachována maximální výkonnost přenosu s minimálním zpožděním a ztrátovostí. Paketový regulátor je navrhován jako součást komunikačního systému schopného přenášet data pomocí několika nezávislých přenosových cest v IP síti. V práci je popsán jak samotný návrh paketového regulátoru, tak i jeho optimalizace pro prostředí bezdrátových mobilních sítí. Součástí práce je rovněž návrh metodiky, pomocí které byla funkce navrženého regulátoru ověřena v reálných podmínkách.

Disertační práce je rozdělena do několika kapitol, které mapují nejen samotný průběh řešení předložených problémů, ale i dosažené výsledky a jejich přínos. V první kapitole je představena motivace pro psaní této disertační práce včetně stanovení hlavních cílů. Zvolené metody zpracování a jejich použití v disertační práci jsou uvedeny ve druhé kapitole. Informace o aktuálním stavu řešené problematiky v akademické i komerční sféře jsou součástí třetí kapitoly. V této kapitole je provedena rovněž rešerše řešení šířených pod některou se svobodných licencí. Cíle disertační práce a její přínos jsou uvedeny ve čtvrté kapitole. Popis komunikačního systému využívající princip inverzního paketového multiplexu je součástí kapitoly nazvané „Rozbor řešení“. V této kapitole jsou rovněž uvedeny informace o možnosti využití teorie regulátorů v paketových sítích. Osvětlení principu mezi-vrstvové spolupráce je rovněž součástí této kapitoly. Návrh a optimalizace paketového regulátoru pro prostředí mobilních sítí je zpracován v kapitole šest. Jeho praktické ověření je pak součástí sedmé kapitoly. Výsledky představené disertační práce jsou shrnuty v kapitole nazvané „Závěr“. Náměty na další možnosti výzkumu v této oblasti jsou rovněž součástí této kapitoly.

Ohlasy

1. Z. Kocur, V. Machula, J. Kulda, and L. Vojtěch, “Analysis of Influence of Disturbance Level on Data Transmission in Wireless Networks,” in *TSP 2010 - 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, (Budapest), pp. 292–296, Asszisztencia Szervező Kft., 2010

Příspěvek byl citován dle WoS ve:

- Z. Mueller, M. Mueller, J. Svec, and J. Tlustý, “Advances in Distribution System Architecture,” in *PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ELECTRIC POWER ENGINEERING 2013* (Rusek, S and Gono, R, ed.), International Scientific Conference on Electric Power Engineering, pp. 439–443, Tech Univ Ostrava, 2013. 14th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, CZECH REPUBLIC, MAY 28-30, 2013
2. Z. Kocur and M. Šafránek, “High Speed Mobile Communication,” in *TSP - 31st International Conference Telecommunications and Signal Processing*, (Budapest), pp. –, Asszisztencia Szervező Kft., 2008

Příspěvek byl citován dle WoS ve:

- M. Voznak and J. Rozhon, “Performance testing and benchmarking of B2BUA and SIP Proxy,” in *TSP 2010: 33RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING*, pp. 497–503, Motorola, 2010. 33rd International Conference on Telecommunication and Signal Processing, Vienna, AUSTRIA, AUG 17-20, 2010
3. J. Vodrážka, Z. Kocur, L. Boháč, and Z. Brabec, “Postup při měření rychlosti přenosu dat v mobilních sítích dle standardu LTE,” 2013. Certifikovaná metodika
 - Veřejné připomínkové řízení, které bylo vedeno k Příloze 3 k Vyhlášení výběrového řízení za účelem udělení práv k využívání rádiových kmitočtů k zajištění veřejné komunikační sítě v pásmech 800 MHz, 1800 MHz a 2600 MHz.

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře Telekomunikační techniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Zbyněk Kocur
Katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6, Česká republika
zbynek.kocur@fel.cvut.cz

Školitel: Doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
Katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6, Česká republika
vodrazka@fel.cvut.cz

Oponenti: _____

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Telekomunikační technika v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možné se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....
předseda komise pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru
Telekomunikační technika
Katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6, Česká republika

1 Aktuální stav řešení problematiky

Z provedené analýzy dostupných možností pro regulaci datového provozu v paketových sítích provedené v disertační práci vyplývá, že stávající mechanismy jsou optimalizovány pro nasazení v běžných sítích s deterministickým chováním. Dnes běžně používané protokoly spojové, síťové a transportní vrstvy jsou optimalizované pro síť, kde se předpokládá, že veškerá ztrátovost je způsobena regulačními mechanismy ve třetí vrstvě. Ztráty způsobené jinými mechanismy než záměrným zahazováním paketů v síťových prvcích se jen velmi obtížně kompenzují.

Typickým příkladem jsou mobilní bezdrátové sítě, kde vlivem nestability přenosového kanálu a jeho nedeterministického chování lze jen velmi obtížně udržet přijatelnou kvalitu služby. Protokoly transportní vrstvy jsou pro kompenzaci těchto chyb velmi nepružné a pomalé. Existuje řada modifikací protokolu TCP [L1], které vykazují na konkrétním typu sítě lepší chování než jeho standardní implementace, ale jejich nasazení v síti Internet je díky malé podpoře ze strany operačních systémů velmi problematické.

Stávající přenosové technologie se snaží tento problém částečně obejít na fyzické a spojové vrstvě takovým způsobem, aby se přenosový kanál choval stabilněji i za cenu nižší propustnosti a tak umožnily řádnou funkci protokolům vyšších vrstev. Prováděné úpravy jsou specifické pro danou přenosovou technologii v konkrétní síti a použití takto upravené technologie v jiné síti nemusí řádně fungovat.

Velmi perspektivním řešením výše zmíněného problému jsou systémy, které dokáží využít více paralelních přenosových cest za účelem zvýšení celkové spolehlivosti nebo propustnosti datové sítě. Provedená analýza ukázala, že se na trhu vyskytuje řada zařízení, která tuto funkcionalitu řeší napříč všech vrstev referenčního modelu ISO/OSI. Analýza rovněž ukázala zásadní nedostatky u některých z dnes běžně dostupných řešení, která se opírají o stávající implementace protokolu TCP [L2, L3]. Hlavním problémem všech uvedených řešení je rychlost adaptace na změny v přenosovém kanále. Ty nejsou dostatečně rychlé, a proto v řadě situací vykazují tyto systémy velmi špatnou funkčnost.

Uvedené nedostatky všech jmenovaných systémů otevírají možnost pro další vývoj v této oblasti. Myšlenka využití několika paralelních komunikačních cest je opodstatněná a její přínos je zjevný. Uvedené nedostatky se snaží odstranit navržený komunikační systém, jehož součástí je navrhovaný paketový regulátor. Ten je rovněž stěžejním tématem této práce a jedním z hlavních přínosů doktoranda do řešené problematiky.

4. Z. Kocur, P. Macejko, and V. Mařík, “Adaptabilní systém pro zvýšení rychlosti a spolehlivosti přenosu dat v přenosové síti,” 2011. Užitený vzor — **45% podíl autora na výsledku**
5. Z. Kocur and V. Machula, “Systém vysokorychlostního bezdrátového přenosu dat z rychle se pohybujících objektů,” 2009. Užitený vzor
6. Z. Kocur, M. Neruda, M. Šafránek, and J. Zavrtálek, “Cena rektora III. stupně za aplikaci výsledků výzkumné práce v praxi.” Rektor ČVUT v Praze, 2009

Seznam konferenčních příspěvků

1. Z. Kocur, P. Macejko, P. Chlumský, J. Vodrážka, and O. Vondrouš, “Adaptable System Increasing the Transmission Speed and Reliability in Packet Network by Optimizing Delay,” in *KTTO 2013 Proceedings of Extended Abstracts*, (Ostrava), pp. 13–14, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013
2. Z. Kocur, P. Chlumský, P. Macejko, M. Kozák, L. Vojtěch, and M. Neruda, “Measurement of Mobile Communication Devices on the Testing Railway Ring,” in *15th International Conference on Research in Telecommunication Technologies*, (Bratislava), pp. 34–37, Slovak University of Technology in Bratislava, 2013
3. Z. Kocur, V. Machula, J. Kulda, and L. Vojtěch, “Analysis of Influence of Disturbance Level on Data Transmission in Wireless Networks,” in *TSP 2010 - 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, (Budapest), pp. 292–296, Asszisztencia Szervező Kft., 2010
4. Z. Kocur and M. Šafránek, “High Speed Mobile Communication,” in *TSP - 31st International Conference Telecommunications and Signal Processing*, (Budapest), pp. –, Asszisztencia Szervező Kft., 2008

Seznam vybraných prací disertanta vztahujících se k disertaci

Tam, kde není uvedeno jinak, jsou podíly na výsledku všech spoluautorů shodné.

Seznam impaktovaných publikací

1. P. Chlumský, Z. Kocur, and V. Machula, “Simulation of the Data Transmission from the Aerobatic Plane,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 2b/2013, pp. 199–204, 2013 — **50% podíl autora na článku**

Seznam recenzovaných publikací

1. P. Chlumský, Z. Kocur, P. Mcejko, and J. Vodrážka, “Adaptable System Increasing the Transmission Speed and Reliability in Packet Network by Optimizing Delay ,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2014 — **bude vydán v únoru 2014, 50% podíl autora na článku**
2. P. Chlumský, Z. Kocur, and J. Vodrážka, “Comparison of Different Scenarios for Path Diversity Packet Wireless Networks,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 10, pp. 199–203, 11 2012
3. P. Chlumský, Z. Kocur, and J. Vodrážka, “Comparison Methodology of the Simulation Models Based on the IEEE 802.11 Standard,” *Elektrorevue*, vol. 3, pp. 32–38, April 2012

Seznam aplikovaných výsledků

1. Z. Kocur, J. Vodrážka, P. Mcejko, and V. Mařík, “Adaptabilní systém pro zvýšení rychlosti a spolehlivosti přenosu dat v paketové síti s optimalizací zpoždění,” 2014. Patentová přihláška — **50% podíl autora na výsledku**
2. Z. Kocur, J. Vodrážka, P. Mcejko, and V. Mařík, “Adaptabilní systém pro zvýšení rychlosti a spolehlivosti přenosu dat v paketové síti s optimalizací zpoždění,” 2013. Užitiný vzor — **50% podíl autora na výsledku**
3. J. Vodrážka, Z. Kocur, L. Boháč, and Z. Brabec, “Postup při měření rychlosti přenosu dat v mobilních sítích dle standardu LTE,” 2013. Certifikovaná metodika

2 Cíle disertační práce

Předložená práce se zabývá návrhem paketového regulátoru, který dokáže efektivně a automaticky udržovat v paketové síti takové množství dat, aby byla zachována maximální výkonnost přenosu s minimálním zpožděním ve smyčce a minimální ztrátovostí. Paketový regulátor je navrhován jako součást komunikačního systému schopného přenášet data pomocí několika nezávislých přenosových cest v IP síti.

Stanovené cíle této disertační práce jsou následující:

1. **Analýza přínosu inverzního paketového multiplexoru využívajícího paketový regulátor pro navýšení přenosové rychlosti v paketové síti.** Rozbor teoretického principu činnosti a jeho praktické implementace v podobně navrženého komunikačního systému. Návrh inteligentního systému rozřazování paketů před přenosem a jejich opětovného složení po přenosu několika komunikačními kanály.
2. **Provedení rešerše podobných řešení využívající vícekanálový paketový přenos v komunikačních sítích.** Provedení rešerše komerčních, nekomerčních i vědeckovýzkumných aktivit v této oblasti.
3. **Návrhu paketového regulátoru, který vytvoří příznivé podmínky ke sdružování více datových kanálů za účelem navýšení přenosové rychlosti.** Provedení teoretického návrhu paketového regulátoru pro prostředí IP sítí.
4. **Optimalizace návrhu paketového regulátoru pro nasazení v mobilních sítích.** Úprava návrhu paketového regulátoru takovým způsobem, aby mohl být nasazen v běžně používaných mobilních sítích technologií GPRS, EDGE, UMTS a LTE.
5. **Návrh a realizace metodiky měření paketových sítí založený na využití principu mezivrstevové spolupráce.** Měření paketových sítí dle navržené metodiky by mělo zohlednit nejen chování komunikačního kanálu na úrovni měřící aplikace, ale mělo by využít i informací z ostatních komunikačních vrstev za účelem zpřesnění získaných výsledků a korelaci událostí k identifikaci negativních jevů.

3 Zvolené metody zpracování

V průběhu plnění cílů předložené práce bylo postupně použito několik výzkumných metod. Kromě základního procesu shromažďování a třídění získaných informací bylo využito řady vědecko-výzkumných metod [L4] pro zpracování a nalezení řešení předložených problémů. Popisem použitých metod a postupů se zabývá tato kapitola.

3.1 Shromažďování a třídění informací

Problematika paketové regulace vztažená k omezování množství dat v síti Internet je velmi diskutovaným tématem. Řada odborných publikací i komerčních řešení se tímto problémem zabývá. Navržené řešení se snaží vyplnit mezeru, která je v implementaci komunikačních protokolů do přenosových technologií, které nejsou schopny garantovat poskytovanou službu.

V rámci analýzy novosti představeného řešení byly významným zdrojem informací publicistické a vědecké články, dále bylo hledání zaměřeno i na monografie a kvalifikační práce české i zahraničí. Neocenitelným pomocníkem byly informace získané ze sítě Internet. Významným zdrojem informací byla rovněž důkladná rešerše patentových databází v ČR i zahraničí.

Veškeré výše provedené analýzy byly provedeny před samotným započítáním vědecko-výzkumné práce. O úspěšně provedené rešerši svědčí i to, že na základě užitého vzoru PUV-25772, který vznikl v rámci vědecko-výzkumných aktivit, byla podána patentová přihláška PV-2013-252, která úspěšně prošla rešeršním řízením. Samotný patent bude zapsán v první polovině roku 2014.

3.2 Aplikace zvolené metodiky zpracování

Návrh paketového regulátoru vyžaduje využít řadu empiricky zjištěných informací z měření reálných komunikačních sítí. Ze získaných informací lze na základě pozorování provést zobecnění, díky kterému lze vyvodit řadu závěrů důležitých pro návrh paketového regulátoru. Návrh pak postupně vylepšovat na základě jeho simulací na modelu komunikační sítě a v pozdější fázi i v reálném prostředí. Uvedený popis jednoznačně odpovídá *induktivnímu* přístupu řešení vědecko-výzkumných projektů.

Pro úspěšné vyřešení jednotlivých problémů spojených s návrhem a ověřením řádné funkce paketového regulátoru, muselo být provedeno několik činností.

Konkrétně by měl být další vývoj směřován do následujících oblastí:

- Automatizace návrhu řídicích funkcí založený na aktuálním stavu komunikačního kanálu. Měřicí systém by umožňoval přímo vypočítat koeficienty lomené řídicí funkce po ukončení každého měření. Na základě průběžného měření lze koeficienty adaptabilně měnit.
- Pro použití v mobilním prostředí by bylo vhodné implementovat možnost dynamické změny řídicí funkce dle aktuálního profilu zpoždění v přenosových kanálech. Vhodným mechanismem může být fuzzy logika.
- Implementace jiných způsobů regulace jak do stávajícího statického, tak i mobilního přístupu účastníka k síti. Možným regulačním mechanismem se jeví aplikace PID/PSD regulátoru.

Seznam v tezích použité literatury

- [L1] M. Hassan and R. Jain, eds., *High performance TCP/IP networking: concepts, issues, and solutions*. 2004.
- [L2] M. Karlsson, M. Bergek, M. Agevald, and K. Axelsson, “A system for data transmission via several communication routes.” Patent, 01 2005. EP 1175757 B1.
- [L3] S. Kissel, “System and method for transmitting a data flow via bundled network access links as well as an auxiliary transmitter and receiver device and transmission and receiving methods therefore.” Patent Application, 10 2008. US 2008/0253282 A1.
- [L4] Z. Molnár, *Pokročilé metody vědecké práce*. Věda pro praxi, Profess Consulting, 2012.
- [L5] M. Meloun and J. Militký, *Statistická analýza experimentálních dat*. Academia, 2004.
- [L6] Š. Voráčová and L. Csachová, *Atlas geometrie: geometrie krásná a užitečná*. Atlas (Academia), Academia, 2012.

v rámci provedené analýzy, ale i vlastním praktickým ověřením této funkcionality.

2. Provedení rešerše podobných řešení využívající vícekanalový paketový přenos v komunikačních sítích.

V rámci provedené rešerše byla potvrzena neexistence univerzálního řešení sdružování paketů na úrovni třetí vrstvy, které by bylo transparentní napříč celou rodinou protokolů TCP/IP. Autorem představené řešení je natolik unikátní, že mu byl udělen užitečný vzor číslo „PUV-25772“ a rovněž byla podaná patentová přihláška číslo „PV-2013-252“, která úspěšně prošla rešeršním řízením. Samotný patent bude zapsán v první polovině roku 2014.

3. Návrhu paketového regulátoru, který vytvoří příznivé podmínky ke sdružování více datových kanálů za účelem navýšení přenosové rychlosti.

Provedený návrh paketového regulátoru byl úspěšně ověřen v reálném komunikačním systému.

4. Optimalizace návrhu paketového regulátoru pro nasazení v mobilních sítích.

Optimalizace paketového regulátoru pro nasazení v mobilních sítích byla úspěšně ověřena v reálném komunikačním systému.

5. Návrh a realizace metodiky měření paketových sítí založený na využití principu mezivrstevové spolupráce.

Představená metodika byla úspěšně ověřena jak reálným měřením paketového regulátoru, tak i nasazením v řadě jiných měřicích systémů.

Jak vyplývá z předloženého souhrnu a závěrů všech dílčích kapitol této práce, všechny vytyčené cíle byly splněny.

5.2 Náměty na další směry výzkumu v dané oblasti

Další kroky by měly směřovat k činnostem spojeným se zlepšením stability a účinnosti regulace. Velkým přínosem by rovněž bylo zautomatizování konfigurace navrženého regulátoru. Stávající systém regulace je určen pro stacionární pozici komunikačního terminálu. Další vylepšení by měla proto směřovat i do návrhu a realizace regulátoru pro mobilní přenosový kanál.

1. Výchozí měření parametrů komunikačních kanálů. Získání zobecněných informací a modelů přenosové rychlosti, zpoždění ve smyčce a ztrátovosti.
2. Návrh paketové regulátoru dle získaných informací.
3. Ověření navrženého paketového regulátoru pomocí simulací a měření v reálné síti.
4. Pokud jsou výstupy ověření nedostatečné, je nutná úprava parametrů paketového regulátoru dle výsledku simulací a měření v reálné síti. Následně je nutné upravený návrh opětovně ověřit [L5] (návrat do kroku 3.).
5. Jakmile se výsledky ověření shodují s požadavky, lze přejít ke dlouhodobým ověřovacím měřením v reálné komunikační síti. Jejich cílem je ověřit dlouhodobou stabilitu navrženého řešení v reálném prostředí.

4 Výsledky

4.1 Zhodnocení možností paketové regulace

Provedená analýza paketových regulátorů poukázala na rozdílnost chování regulačního obvodu v paketové síti, pokud je regulace prováděna dle informací o *přenosové rychlosti, zpoždění ve smyčce* nebo *ztrátovosti*.

Nejproblematictější způsobem regulace se jeví regulace dle *přenosové rychlosti*. Ta umožňuje velmi přesně definovat požadovanou přenosovou rychlost, ale pokud komunikační síť vykazuje velmi nestabilní průběh zpoždění ve smyčce a ztrátovosti, vede použití tohoto typu regulátoru k přehlcování komunikačního kanálu nadměrným množstvím odesílaných dat. Tento nedostatek odsuzuje použití tohoto regulátoru zejména do pevných sítí, které vykazují konstantní zpoždění ve smyčce a minimální ztrátovost.

Primární oblastí nasazení vyvíjeného komunikačního systému je prostředí mobilních sítí a sítí, které vykazují výraznou nestabilitu, ať už v oblasti zpoždění ve smyčce, tak i ztrátovosti. Pro toto prostředí se nejvíce hodí popsané regulátory dle *zpoždění ve smyčce* a *ztrátovosti*. Ty při vhodném nastavení dokáží uzpůsobit množství dat, které vstupuje do regulovaného komunikačního kanálu takovým způsobem, aby nedocházelo k jeho přetěžování a tím k výraznému zhoršování zpoždění ve smyčce a ztrátovosti.

V rámci prvotní analýzy celého problému paketové regulace byly dohledány i jiné způsoby regulace množství dat v přenosovém kanále, ale díky jejich složitosti, nebo naopak jednoduchosti nebyl jejich přínos potvrzen. Z tohoto důvodu byl i konečný výběr omezen jen na veličiny jako je přenosová rychlost, zpoždění ve smyčce a ztrátovost. Problematika dostupných řešení regulace množství dat v komunikačním kanále na jednotlivých vrstvách OSI modelu je detailně popsána v disertační práci.

Modulární návrh komunikačního systému umožňuje relativně snadné nasazení jakéhokoli z výše zmíněných typů paketového regulátoru. Jelikož je navržený komunikační systém primárně situován do prostředí mobilních bezdrátových sítí, pro které se jeví jako nejúčinnější způsob regulace dle aktuálního *zpoždění ve smyčce*, budou i dále provedené návrhy paketových regulátorů ve své konečné podobě optimalizovány právě pro tento případ.

4.2 Návrh a optimalizace paketového regulátoru

Navrhovaný paketový regulátor je součástí řídicí jednotky komunikačního systému. Jeho úkolem je optimalizovat množství dat, které vstupuje do jednotlivých přenosových kanálů tak, aby nedocházelo k negativnímu zhoršování zpoždění ve smyčce a ztrátovosti. Svou činností ovlivňuje množství dat, která vstupují do komunikačního kanálu. Každý přenosový kanál disponuje svým vlastním paketovým regulátorem s nezávislou logikou řízení.

Každý paketový regulátor je možné nasadit vždy jen do jednoho směru komunikace (vzestupný/sestupný). Veškeré dále uvedené informace jsou platné pro vzestupný směr komunikace (Uplink). Pro návrh paketového regulátoru do sestupného směru komunikace (Downlink) lze postupovat obdobným způsobem.

Proces řízení je založen na periodické úpravě vstupních paketových filtrů dle aktuálního stavu komunikačních kanálů, který je získáván jejich pravidelným monitorováním. Tento proces je detailněji popsán v následující kapitole.

Samotný návrh paketových regulátorů je proveden s ohledem na nasazení do prostředí bezdrátových mobilních sítí. Monitorování komunikačních kanálů je z tohoto důvodu zaměřeno na analýzu zpoždění ve smyčce. Díky analýze zpoždění ve smyčce odpadá rovněž nutnost samostatného měření zpoždění pro vzestupný a sestupný směr komunikace a následná, velmi náročná, korelace naměřených hodnot.

aby se předešlo výraznému přetížení komunikačního rozhraní. Popsaná situace může nastat při provozu regulátoru v síti, ve které dochází k výrazné relokaci zdrojů. Typickým příkladem je provoz mobilní sítě na místě, kde se hromadně připojují a odhlašují noví uživatelé (zastávky MHD, metro, shromáždění apod.). Ve většině případů stačí i v této oblasti regulovat dle zjištěné směrnice, čili s parametrem $M_{-2} = 1$.

Polohu bodu ΔT_{-2}^{RT} je dobré zvolit s ohledem na reálné možnosti komunikační sítě a maximální velikost jednoho regulačního zásahu ΔV_{-2}^P . Jak bylo napsáno výše, pokud by nedošlo k omezení velikosti regulačního zásahu, mohlo by v případě výrazné velikosti regulační odchylky dojít k přílišnému uzavření paketového filtru, které by způsobilo rozpad všech sestavených spojení. Z tohoto důvodu je poloha bodu P_{-2} klíčová i z hlediska definice maximální velikosti akčního zásahu.

Přesný matematický popis návrhu tohoto úseku řídicí funkce je uveden v kapitole 6 předložené disertační práce.

5 Závěr

Předložená práce se zabývá návrhem a optimalizací řídicích algoritmů paketového regulátoru, který dokáže efektivně a automaticky udržovat v paketové síti takové množství dat, aby byla zachována maximální výkonnost přenosu s minimálním zpožděním a ztrátovostí. Paketový regulátor je navrhován jako součást komunikačního systému schopného přenášet data pomocí několika nezávislých přenosových cest v IP síti. V práci je popsán jak samotný návrh paketového regulátoru, tak i jeho optimalizace pro prostředí bezdrátových mobilních sítí. Součástí práce je rovněž návrh metodiky, pomocí které byla funkce navrženého regulátoru ověřena v reálných podmínkách.

5.1 Splnění vytyčených cílů

Zhodnocení splnění cílů disertační práce je provedeno v následujících bodech:

1. **Analýza přínosu inverzního paketového multiplexoru využívajícího paketový regulátor pro navýšení přenosové rychlosti v paketové síti.**

Přínos použití inverzního paketového multiplexoru pro navýšení přenosové rychlosti v paketové rychlosti byl potvrzen nejen nalezenými informacemi

Komunikační systém může být nakonfigurován v tomto úseku řídicí funkce ve dvou režimech:

1. V prvním režimu není vůbec II. kvadrant pro regulaci využit. Jakmile je regulátorem zjištěna záporná regulační odchylka $-\Delta T^{RT}$ je paketový filtr vyřazen z provozu. K jeho reaktivaci dojde jen pokud je detekována kladná regulační odchylka. Bližší popis tohoto režimu lze nalézt v disertační práci.
2. Ve druhém případě je paketový filtr otevírán postupně dle navržené lomené čáry. Rychlost nárůstu by měla korelovat s možnostmi vytvořeného datového kanálu, proto i směrnice růstu K_1 by neměla být strmější než změřena K_{v^P} .

Přesný popis návrhu tohoto úseku řídicí funkce je uveden v kapitole 6 předložené disertační práce.

Oblast $(P_0; P_{-1})$

V oblasti $(P_0; P_{-1})$ by mělo docházet k omezování množství procházejících dat takovým tempem, které koreluje s rychlostí plnění paketových zásobníků v komunikační síti. Pomalé uzavírání přenosového kanálu nezpůsobuje výraznou ztrátovost uživatelských dat a přitom umožňuje udržovat přenosový kanál v blízkosti maximální přenosové rychlosti v_{max}^P a minimálního dosažitelného zpoždění T_{min}^{RT} .

Bod P_0 lze v případě potřeby posunout do oblasti II. kvadrantu. Tento posun umožní lépe zvládnout situace, kdy zpoždění ve smyčce výrazně roste se vzrůstajícím zatížením přenosové sítě. Typickým příkladem jsou velmi vytížené lokality v centrech měst.

Praktická měření ukázala, že pozvolný pokles přenosové rychlosti korelující s rychlostí naplňování paketových zásobníků v síti je vhodný do velikosti zpoždění ve smyčce odpovídající $2 \cdot T_{req}^{RT}$. Hodnotu je možné i zvýšit, ale s rizikem zhoršení reakční doby na změny sítě. Kratší interval není vhodné používat z důvodu výrazného snížení účinnosti regulace.

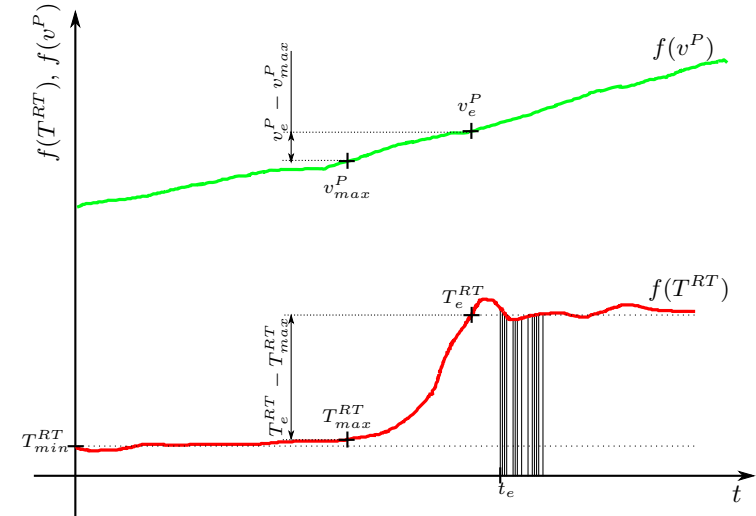
Přesný matematický popis návrhu tohoto úseku řídicí funkce je uveden v kapitole 6 předložené disertační práce.

Oblast $(P_{-1}; P_{-2})$

Oblast $(P_{-1}; P_{-2})$ je vyhrazena pro výrazné regulační zásahy. Typicky jde o situace skokových změn T^{RT} , kdy je nutné provést významný regulační zásah,

Analýza změřených průběhů

Principiálně je měření založeno na kontinuálním zvyšování množství dat v komunikačním kanále při současném sledování změn zpoždění ve smyčce jak ukazuje schématický graf uvedený na Obr. 1.



Obr. 1: Princip odečtu hodnot statických a dynamických veličin

U všech uvedených průběhů lze rozeznat několik shodných oblastí, které se vyznačují určitým specifickým chováním. Jejich popisu je věnován následující výčet.

1. Pokud je mobilní síť všech přenosových technologií nezatížená jiným provozem a množství dat vstupujících do sítě odpovídá množství dat, které je schopná síť bezztrátově přenést, lze v naměřených průbězích pozorovat relativně konstantní průběh zpoždění ve smyčce T_{min}^{RT} .
2. Jakmile je dosaženo mezní kapacity přenosového kanálu V_{max}^P , odpovídá této rychlosti i zpoždění T_{max}^{RT} viz $(T_{max}^{RT} \approx T_{min}^{RT})$.

- Po překročení rychlosti v_{max}^P dochází k výraznému nárůstu zpoždění ve smyčce, pro které platí, že $T^{RT} \gg T_{max}^{RT}$. K výskytu ztrátovosti v této fázi nedochází.
- Po dosažení zaplnění všech zásobníků, se začne síť bránit zahlcení zahazováním paketů. To i při zvyšujícím se množství generovaných dat zachová hodnotu zpoždění v určitém rozmezí, ale za cenu neustále se zvyšující ztrátovosti. Zpoždění ve smyčce, při kterém jsou paketové zásobníky zaplněny a v komunikaci se začíná projevovat ztrátovost je v grafech označena bodem T_e^{RT} a jemu odpovídající kritická přenosová rychlost pak v_e^P .

Bod T_e^{RT} se nachází v místě, kde se protíná průběh naměřeného zpoždění $f(T^{RT})$ se střední hodnotou ustáleného průběhu zpoždění ve smyčce po výskytu prvního zahozeného paketu vlivem dosažení kritické přenosové rychlosti v_e^P .

- Pokud vstupní datový tok ustane, jsou díky rychlé páteřní síti všechny zásobníky téměř okamžitě vyprázdněny a hodnota zpoždění ve smyčce se navrátí do svého původního stavu bez zatížení. Tento proces je téměř okamžitý jak ilustrují grafy uvedené v příloze disertační práce.

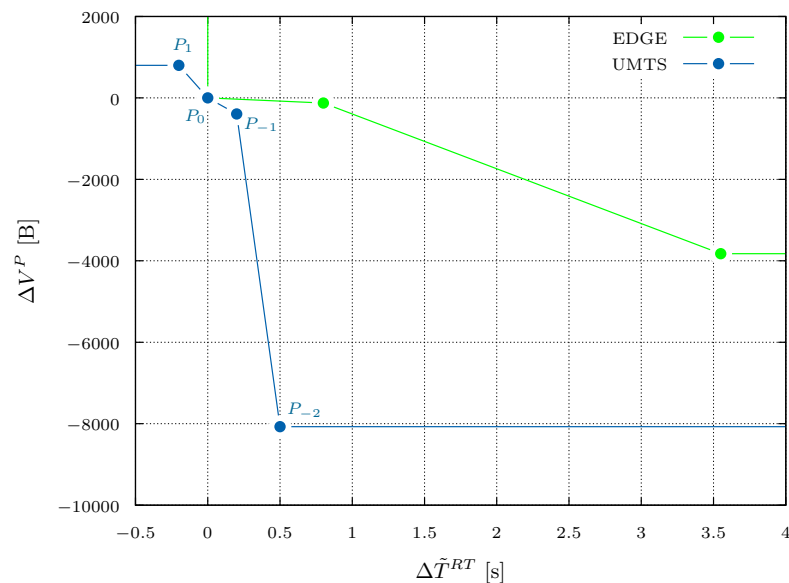
4.3 Popis návrhu řídicí funkce

Návrh řídicí funkce vychází z výsledků provedené analýzy komunikačního kanálu. Na základě získaných statických a dynamických parametrů přenosového kanálu lze navrženou metodikou určit jednotlivé koeficienty řídicí funkce.

Kromě představeného způsobu regulace dle lomené čáry, byla při návrhu mechanismů regulace ověřována i možnost aproximovat řídicí funkci $\Delta V^P = f(T^{RT})$ pomocí polynomu. Návrh i praktická realizace tohoto způsobu aproximace se ukázala jako velmi komplikovaná. Její výsledky nebyly zároveň lepší než ty dosažené popisovanou regulací dle lomené čáry, proto bylo od dalšího použití upuštěno.

Regulace dle lomené čáry

Lomená čára je vytvořena propojením vzájemně různých bodů v rovině $P_0P_1P_2\dots P_n$ kde ($n \geq 2$) takovým způsobem, že vytvářejí řadu úseček P_0P_1, P_1P_2 až po $P_{n-1}P_n$, které na sebe navazují, přitom žádné dvě sousední úsečky neleží v jedné přímce [L6]. Typické ukázky lomených řídicích čar jsou uvedeny v grafu na Obr. 2.



Obr. 2: Ukázky lomené řídicí funkce

Návrh lomené čáry je založen na výpočtu jednotlivých bodů z informací získaných ze statických a dynamických parametrů přenosové sítě, které byly popsány v disertační práci. Obecně lze realizovat n zlomů, ale z provedeného experimentálního ověření se nepotvrdil přínos více než 2 bodů ve III. kvadrantu a jednoho bodu ve II. kvadrantu grafu řídicí funkce. Pokud je lomená čára viz Obr. 2 správně navržena, pohybuje se aktivní oblast regulace mezi body P_1 a P_{-1} a v ojedinělých případech se přiblíží k bodu P_{-2} . Z důvodu přílišného otevření nebo naopak uzavření paketového filtru v bodech P_1 případně P_{-2} je na jejich úrovni řídicí funkce omezena.

Následující popis je věnován chování a vlivu jednotlivých úseků lomené čáry na nastavení paketového filtru.

Oblast $\langle P_0; P_1 \rangle$

V oblasti $\langle P_0; P_1 \rangle$ dochází k otevírání paketového filtru v důsledku záporné regulační odchylky ΔT^{RT} .