

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Tibor Mišuth

Autoreferát dizertačnej práce

Aplikácia systémov hromadnej obsluhy v IP sieťach

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: 5.2.15 Telekomunikácie

Bratislava, máj 2012

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Tibor Mišuth**
 Ústav telekomunikácií FEI STU Bratislava
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Ivan Baroňák, CSc.**
 Ústav telekomunikácií FEI STU Bratislava
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný :

Obhajoba dizertačnej práce sa koná **o****hod.**

v zasadacej miestnosti ÚT FEI STU v Bratislave, blok B, 6. poschodie, B – 602,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

.....
doc. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3,
812 19 Bratislava

OBSAH

1	ÚVOD	2
2	PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY.....	2
3	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	4
4	NÁVRH MODELU PRE VÝPOČET PREVÁDZKOVÝCH PARAMETROV	5
4.1	Výpočet priemernej stratovosti.....	5
4.2	Výpočet priemerného jednosmerného oneskorenia	6
5	REALIZÁCIA SIMULÁCIÍ	6
6	POROVNANIE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV	7
7	PÔVODNÉ VEDECKÉ PRÍNOSY	11
8	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	13
9	PUBLIKÁCIE AUTORA	18
10	ÚČASŤ AUTORA NA PROJEKTOCH	19
11	RESUME.....	20

1 ÚVOD

Dátové komunikačné siete v histórii prešli rôznymi štádiami, v ktorých boli použité rozličné topológie, komunikačné protokoly a prenosové média. V niektorých oblastiach rôznorodosť pretrváva dodnes, avšak najmä v oblasti použitých protokolov na úrovni sieťovej vrstvy sa pre akýkoľvek prenos dát stal dominantným protokol IP (Internet Protocol – Internetový protokol). Toto masívne rozšírenie prispelo k tomu, že aj paketovo prepájané komunikačné siete, ktoré ho používajú sa začali označovať ako IP siete.

Pre zabezpečenie dostatočnej kvality poskytovaných moderných komunikačných služieb v reálnom čase musí byť v sieti dosiahnutá určitá úroveň kritických prevádzkových parametrov, ktorými sú napr. stratovosť paketov, jednosmerné oneskorenie, atď. Pre potreby odhadu hodnôt týchto veľmi dôležitých premenných je preto nevyhnutné zostrojiť dobrý matematický model, ktorého výsledky budú odpovedať charakteristikám reálnej dátovej prevádzky v IP sieti. Je zrejme, že vzhľadom na rôznorodosť zdrojov prevádzky a služieb, pre ktoré sa IP prevádzka využíva, je takmer nemožné obsiahnuť ju ako celok jedným modelom. Vhodnejšie sa teda javí použitie viacerých modelov pre každý konkrétny typ prevádzky a ich následná kombinácia.

Táto práca sa sústreďuje na prevádzku typu VoIP (Voice over Internet Protocol – Prenos hlasu internetovým protokolom), teda hlasovú komunikáciu v reálnom čase, ktorá na prenos informácie využíva siete IP. Cieľom práce je definovať modely dôležitých prevádzkových parametrov siete, ktoré majú výrazný vplyv na výslednú kvalitu poskytovaných služieb. Presnosť výsledkov jednotlivých modelov je následne porovnaná s už existujúcimi modelmi, resp. výsledkami simulácie a experimentálneho merania.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Merania a pozorovania IP prevádzky [8] ukázali, že niektoré charakteristiky IP prevádzky sú odlišné od dovedy používaných modelov pre klasické telekomunikačné systémy, a teda klasické modely nemusia poskytovať presné výsledky pre popis IP prevádzky. Najdôležitejšími štatistickými ukazovateľmi, ktoré sa odlišujú od klasických hovorov, sú variancia a korelácia dátovej prevádzky. Navyše dátová prevádzka má vysoko stochastický charakter.

Ukázalo sa, že dvoma najdôležitejšími vlastnosťami (charakteristikami) sú *samopodobnosť* (*self-similarity*) a dlhodobá závislosť autokorelačnej funkcie (long-range dependent - LRD). Samopodobnosť procesu (v tomto prípade objemu dát za jednotku času) je vlastnosť, ktorá určuje, do akej miery je realizácia procesu (priebeh náhodných hodnôt v čase) závislá od časovej mierky. V prípade, že proces spĺňa definíciu samopodobnosti, výsledný obrazec hodnôt procesu nezávisí od zvolenej časovej mierky (krátky časový úsek aj veľmi dlhé pozorovanie majú rovnaký charakter priebehu) a má teda charakter fraktálového obrazca. Prevádzka v IP sieťach sa k tejto vlastnosti asymptoticky približuje. Pre samopodobné procesy existuje charakteristický parameter H označovaný ako Hurstov parameter, ktorý popisuje práve časovú mierku, v akej k samopodobnosti procesu dochádza.

Merania prevádzky v IP sieťach ukázali, že v určitých prípadoch sú modely s pomaly klesajúcou autokorelačnou funkciou (LRD) výhodnejšie a presnejšie v popise prevádzky. V súvislosti s hodnotou Hurstovho parametra H platí, že proces spĺňa vlastnosť LRD v prípade, ak hodnota H je v intervale (0,5; 1).

Modely IP prevádzky je možné rozdeliť na 2 skupiny: user-oriented a black-box. User-oriented modely sa zameriavajú na populáciu užívateľov a každého z nich explicitne modelujú vrátane jeho konkrétneho správania sa. Do tejto skupiny modelov patria napr. ON/OFF modely alebo klasické markovove modely.

Markovove modely sú založené na teórii Poissonových procesov vzniku a zániku. Sieťová prevádzka je potom chápaná ako náhodný proces príchodov požiadaviek s Poissonovým rozdelením, resp. exponenciálne rozdeleným časom medzi jednotlivými príchodmi [23]. Typickým predstaviteľom tejto skupiny modelov používaným v klasickej telefónii je model M/G/m/m, kde požiadavky od účastníkov, teda volania, tvoria Poissonovský proces s frekvenciou príchodov λ , priemerný čas obsluhy požiadavky je $1/\mu$, a celkové prevádzkové zaťaženie $A = \lambda/\mu$. K dispozícii majú m transportných vedení, resp. kanálových intervalov. Jeho špeciálnym typom je Erlang B model M/M/m/m, kde sú časy obsluhy exponenciálne rozdelené. Ak sú všetky linky (agenti a pod.) obsadené, dochádza k blokovaniu volania a ide teda o systém s blokovaním. Pravdepodobnosť blokovania (a teda aj straty paketov v prípade IP sietí) je daná [1,2,4,6,8]:

$$P_B(m, A) = \frac{\frac{A^m}{m!}}{\sum_{i=0}^m \frac{A^i}{i!}} \quad (1)$$

Druhým príkladom je model M/G/ ∞ / ∞ . Aj v tomto prípade sú jednotlivé spojenia vytvárané ako Poissonovský vstupný prúd s frekvenciou λ a zostávajú vytvorené náhodný čas s priemernou hodnotou $1/\mu$. Potom pre n.p vyjadrujúcu okamžitý počet spojení i v systéme platí

$$P_i = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}{i!} e^{-\frac{\lambda}{\mu}} \quad (2)$$

Z hľadiska dátovej prevádzky predpokladáme, že počas trvania spojenia dochádza ku generovaniu dátovej prevádzky s rýchlosťou r . Ak však prevádzka generovaná všetkými aktívnymi spojeniami prekročí kapacitu linky, resp. dôjde k naplneniu vyrovnávacích pamätí, bude dochádzať k strácaniu prenášaných dát.

Použitie Markovovských modelov v tvare, v akom boli platné pre klasické telekomunikačné siete (teda Erlang B a Erlang C model) je možné pri využití konceptu tokov. To znamená, že každé komunikačné spojenie dvoch uzlov IP siete (jednoznačne definované pomocou zdrojovej a cieľovej IP adresy a zdrojového a cieľového portu) predstavuje jeden tok s určitým dátovým objemom, ktorý závisí od konkrétneho typu prevádzky. Článok [24] ukazuje, ako je pomocou pôvodného Erlang B modelu možné v takomto prípade odhadovať jednotlivé dôležité parametre.

Druhú skupinu modelov IP prevádzky tvoria „black-box“ modely. Ich základnou črtou je zameranie sa na agregovanú prevádzku, teda prevádzku prichádzajúcu z veľkého množstva zdrojov. V tomto prípade teda jednotliví užívatelia a ich konkrétne vlastnosti a správanie nehrajú príliš dôležitú úlohu. Modely agregovanej prevádzky najčastejšie vychádzajú z Gaussovských procesov. Pre modelovanie IP sietí sa veľmi často využíva proces *fractional Brownian movement* (čiastkový Brownov pohyb) [25], označovaný ako $Z(t)$ s parametrom H . Vhodnou voľbou Hurstovho parametra je tak možné dosiahnuť vlastnosť *LRD* v dátovom toku prevádzky, ktorý tento model generuje. Potom proces $A(t)$, teda množstvo dát v čase t je náhodný a definovaný nasledovným vzťahom[8]:

$$A(t) = mt + \sqrt{am}Z(t) \quad (3)$$

kde m je priemerná rýchlosť dát za jednotku času ($m > 0$), a je variancia v objeme dát za jednotku času ($a > 0$) a $Z(t)$ je štandardný fBm proces. Parameter m teda udáva kvantitu dát, zatiaľ čo a a Hurstov parameter H procesu $Z(t)$ udávajú ich kvalitu.

Okrem konkrétnej príkladov uvedených v predchádzajúcich dvoch častiach existuje veľké množstvo ďalších modelov agregovanej prevádzky (teda typu black-box). Literatúra [8] uvádza napr. čiastkový Lévy-ho model (fractional Levy), model založený na kombinácii viacerých čiastkových brownových pohybov, (multi – fBm), α - β model, mutlifraktálový model, atď. Podobne je možné vytvoriť aj model založený na BMAP (Batch Markovian Arrival Process - Markovov proces so skupinovými príchodmi) procese [26].

3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Problematika aplikácie systémov hromadnej obsluhy v IP sieťach je mimoriadne široká. Vo veľkej väčšine prípadov je však analýza založená na modeloch so štatistickými rozdeleniami z kategórie subexponenciálnych rozdelení.

Cieľom dizertačnej práce je príspevok k možnosti rozvoja aplikácie modelov platných v klasických telekomunikačných sieťach v prostredí moderných VoIP (Voice over Internet Protocol – Prenos hlasu internetovým protokolom) sietí. Tento proces je konkrétne možné rozložiť do nasledovných krokov:

1. návrh logického modelu VoIP siete spoločne so všetkými parametrami zdrojov prevádzky, uzlov siete a dátových tokov,
2. návrh matematického modelu pre popis dejov prebiehajúcich v definovanom logickom modeli a odhad dôležitých prevádzkových parametrov:
 - a) založeného na známych markovových modeloch pre náhodný proces vyjadrujúci počet aktívnych spojení,
 - b) založeného na nemarkovových modeloch s obmedzenou dĺžkou čakacieho radu pre náhodný proces vyjadrujúci počet dátových paketov prítomných v systéme.
3. implementácia simulácie uvedeného logického modelu v niektorom z dostupných simulačných nástrojov,
4. adaptácia vybraného matematického modelu na báze subexponenciálnych rozdelení pre definovaný logický model za účelom komparácie získaných výsledkov,
5. návrh a zostavenie experimentálneho pracoviska a realizácia experimentálneho merania s využitím rôznych úrovní prevádzkového zaťaženia,
6. vzájomná komparácia výsledkov získaných pomocou matematických modelov, simulácie a experimentálneho merania s cieľom potvrdenia alebo vyvrátenia vhodnosti použitia formulovaných modelov pre odhad kritických parametrov ovplyvňujúcich kvalitu poskytovanej služby.

4 NÁVRH MODELU PRE VÝPOČET PREVÁDZKOVÝCH PARAMETROV

Cieľom práce je sledovanie a modelovanie parametrov VoIP prevádzky, ktorá predstavuje príklad komunikačnej služby v reálnom čase. Prevádzka od zdrojov k cieľom je v časti siete prenášaná zdieľanou linkou s limitovanou kapacitou. K agregácii prevádzky dochádza v uzle siete, v ktorom je maximálny počet paketov čakajúcich na odoslanie (spolu s práve vysielaným paketom) limitovaný na hodnotu K . Sledovanými prevádzkovými parametrami v tomto systéme sú priemerná stratovosť paketov a priemerné jednosmerné oneskorenie paketov spôsobené čakaním paketov čakacom rade vysielacieho uzla.

Prevádzku v takomto systéme môžeme sledovať na dvoch úrovniach v závislosti od toho, aké informácie nás zaujímajú. Sledovanie môžeme realizovať na úrovni hovorov, kedy v podstate abstrahujeme samotné volania od použitej transportnej technológie alebo na druhej strane na úrovni paketov, kde sa sústreďujeme na analýzu agregovaného toku paketov od všetkých aktívnych zdrojov.

4.1 Výpočet priemernej stratovosti

Výpočet stratovosti (teda podiel počtu zahodených a celkového počtu vyslaných paketov) je prirodzene možné realizovať na úrovni paketov. Dá sa ukázať, že proces príchodov paketov do systému má Poissonovo rozdelenie s parametrom λ_p pre ktorý platí:

$$\lambda_p = \frac{NP_p}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\mu} \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

kde λ je intenzita vzniku nových hovorov, $1/\mu$ je priemerná doba trvania spojenia a τ je paketizačný interval. Keďže všetky pakety majú rovnakú veľkosť (uvažujeme prípad použitia rovnakého kodeku pre všetky spojenia), tak proces obsluhy je deterministický a čas obsluhy každého paketu závisí len od jeho veľkosti a rýchlosti výstupnej linky. Systém je teda možné opísať pomocou modelu $M/D/1/K$. Stratovosť paketov je potom rovná pravdepodobnosti, že v systéme je práve K paketov, teda P_K , čo je posledný prvok vektora finálnych pravdepodobností tohto modelu. Vektor je možné vypočítať pomocou vloženého Markovovho reťazca, ktorý popisuje systém práve v momentoch odchodov obslužených požiadaviek. Pre stratovosť potom platí [17]:

$$P_B = P_K = 1 - \frac{1}{p_{d,0} + \rho} \quad (5)$$

kde $p_{d,0}$ označuje finálnu pravdepodobnosť stavu 0 vloženého markovovho reťazca a ρ predstavuje relatívnu záťaž systému na úrovni paketov, teda λ_p/μ_p .

Odhad pravdepodobnosti straty paketov je však možné realizovať aj na úrovni modelu pre správanie sa volaní s tým, že poznáme informáciu o kapacite linky, resp. počte spojení, ktoré je možné pomocou tejto linky prenášať.

Tú môžeme vypočítať na základe známej šírky pásma (rýchlosti linky v bit/s) L , veľkosti jedného dátového paketu na fyzickej úrovni d_{fyz} v bitoch a dĺžke trvania paketizačného intervalu τ nasledovne:

$$m = \left\lfloor \frac{d_{fyz}}{L\tau} \right\rfloor \quad (6)$$

Potom vychádzajúc z modelu $M/G/\infty/\infty$ pre okamžitý počet aktívnych volaní vieme určiť pravdepodobnosti, že počet práve existujúcich volaní je väčší ako m . Stratovosť potom môžeme vypočítať ako

$$P_B = \frac{\sum_{i=m+1}^{\infty} (i-m) \cdot P_i}{\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot P_i} = \frac{\sum_{i=m+1}^{\infty} (i-m) \cdot P_i}{N} \quad (7)$$

4.2 Výpočet priemerného jednosmerného oneskorenia

Sledovaná hodnota jednosmerného oneskorenia je zložkou, ktorou k celkovému oneskoreniu prispieva uzol siete, v ktorom dochádza k agregácii prevádzky. Ide teda o čas, ktorý paket strávi čakáním v čakacom rade D_q a čas, ktorý zaberie vysielanie na linku D_s . Pre celkové priemerné sledované oneskorenie D_t platí

$$D_t = D_s + D_q = \frac{1}{\mu_p} + W \quad (8)$$

kde hodnota W je vypočítaná podľa odvodeného vzťahu:

$$W = \frac{(1 - P_0 - P_B) \frac{1}{2\mu_p} + \frac{1}{\mu_p} \left[\sum_{k=1}^{K-1} (k-1) P_k \right]}{(1 - P_B)} \quad (9)$$

v ktorom vystupujú prvky z vektora finálnych pravdepodobností modelu $M/D/1/K$ P_i . Tento výpočet na úrovni paketov si teda vyžaduje realizovať výpočet pravdepodobností finálnych stavov systému $M/D/1/K$ pomocou riešenia sústavy rovníc pre vložený Markovov reťazec.

Pre odhad priemernej hodnoty oneskorenia paketov realizovaný na úrovni sledovania spojení môžeme použiť nasledovný aproximačný prístup. Je zrejmé, že ak je okamžitý počet volaní v systéme väčší ako je kapacita virtuálnych liniek m , v konečnom čase dôjde k naplneniu čakacieho radu na plnú kapacitu. Paket, ktorý sa teda zaradí na posledné miesto čakacieho radu strávi v systéme čas, ktorý je rovný približne K násobku doby potrebnej pre vyslanie paketu na odchodziu linku D_s . Naopak, ak je v systéme menej aktívnych spojení ako je virtuálny počet liniek m , pri rovnomernom rozdelení vzniku spojení v rámci paketizačného intervalu τ bude v ideálnom prípade v momente vstupu paketu do uzla siete tento prázdny a odosielanie paketu začne okamžite. Oneskorenie sa teda bude rovnať práve D_s . Spoločne teda pre hodnotu priemerného oneskorenia platí (pri hodnote maximálnej kapacity systému K)

$$D_t = \frac{1}{\mu_p} \left[\sum_{i=0}^m P_i + K \sum_{i=m+1}^{\infty} P_i \right] \quad (10)$$

kde P_i predstavujú hodnoty finálnych pravdepodobností stavov systému z pohľadu existujúcich volaní podľa modelu $M/G/\infty/\infty$.

5 REALIZÁCIA SIMULÁCIÍ

Pre realizáciu simulácií som sa rozhodol použiť nástroj *Network Simulator 2* (NS2). Ide o pomerne rozsiahly a vo vedeckých kruhoch veľmi často používaný simulačný nástroj

realizujúci simulácie na báze postupnosti diskretných udalostí. Je zameraný práve na výskum prenosov informácií pomocou dátových sietí (klasických aj bezdrôtových), smerovacích algoritmov, protokolov, atď. [57]. Veľkou výhodou NS2 je otvorenosť jeho zdrojového kódu. Každý užívateľ si tak môže jednoducho doprogramovať moduly a funkcie podľa svojich požiadaviek. Túto možnosť som využil pre vytvorenie generátora prevádzky podľa charakteristiky kodeku G.711 a tiež pre implementáciu podpornej triedy, ktorá umožňuje realizovať detailnú analýzu jednosmerné oneskorenia samostatne pre každé spojenie.

Simulovaná topológia je nasledovná. V princípe ide o vytvorenie dvoch uzlov siete ($n0$ a $n1$) medzi ktorými existuje dátová linka s definovanou šírkou pásma L a prenosovým oneskorením linky D_l , pričom prevádzka je realizovaná jednosmerne od uzla $n0$ k uzlu $n1$. Každý z hovorov bol simulovaný ako samostatný zdroj typu G.711 pripojený k uzlu $n0$. Čas začiatku vysielania jednotlivého zdroja bol na začiatku simulácie stanovený na základe Poissonovho rozdelenia a parametra intenzity vzniku hovorov λ . Podobne aj čas, ktorý daný zdroj vysiela pakety do simulovanej siete bol stanovený vopred podľa definovaného rozdelenia pre dobu trvania hovoru.

Simulácie boli realizované na úrovni linkovej vrstvy OSI modelu. To znamená, že každý dátový paket pozostával z 58 bajtov tvorených hlavičkami protokolov a 160 bajtov užitočnej informácie. Šírka prenosového pásma pre jedno volanie je teda $(218 * 8) / 0.02 = 87\,200$ bit/s. Pre overenie modelov pri rôznych hodnotách prevádzkového zaťaženia som sa rozhodol pre simuláciu troch rôznych úrovní. Popis parametrov pre jednotlivé úrovne je uvedený v tab. 1.

Tab.1: Parametre simulácií pre rôzne stupne agregácie prevádzky

Úroveň	Prevádzkové zaťaženie A [Erl]	Intenzita vzniku volaní λ [sek ⁻¹]	Priemerný čas trvania hovoru [sek]	Kapacita linky [Erl]	Kapacita linky [bit/s]
1	6,0 – 10,5	0,06 – 0,105	100	10	872 000
2	30,0 – 52,5	0,30 – 0,525	100	50	4 360 000
3	60,0 – 105,0	0,6 – 1,05	100	100	8 720 000

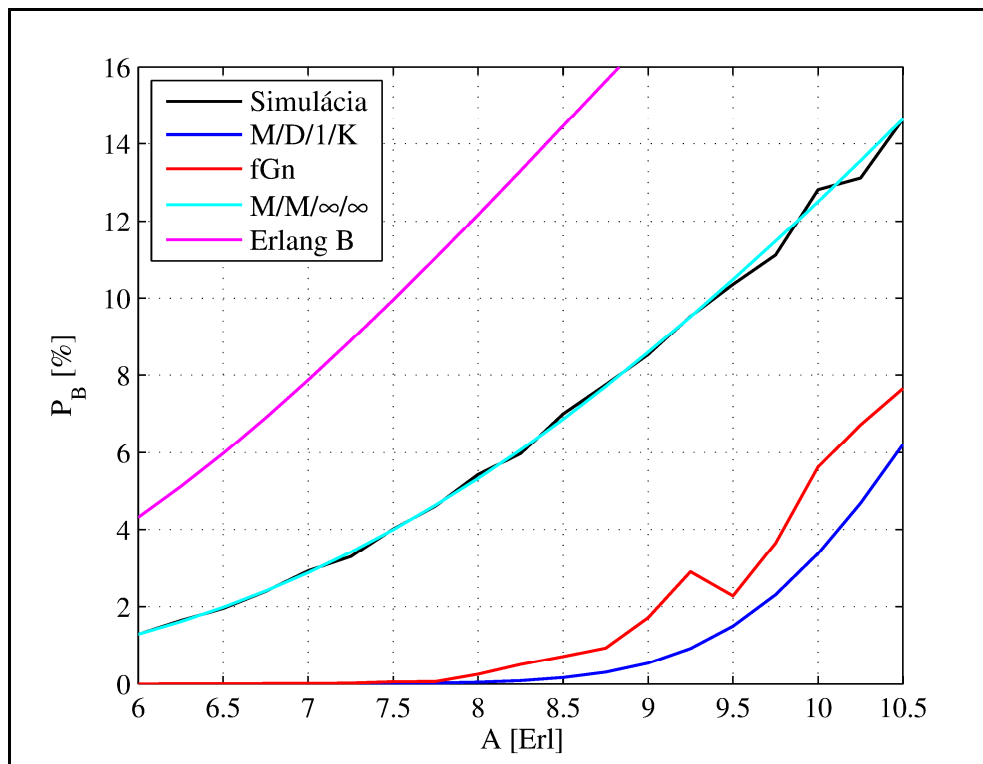
6 POROVNANIE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV

Na tomto mieste realizujem porovnanie získaných výsledkov navrhnutých matematických modelov, štandardne používaného modelu pre IP prevádzku na báze fGn a simulácií realizovaných v prostredí NS2 (Network Simulator 2). Získané výsledky sú porovnávané na dvoch úrovniach agregácie prevádzky – nízkej, s kapacitou linky 10 paralelných spojení kodekom G.711 (teda 10 Erl) a vysokej, s kapacitou linky 100 spojení (teda 100 Erl).

V prvom kroku prezentujem porovnanie výsledkov modelov stratovosti paketov. Keďže model na báze $M/G/\infty/\infty$ na úrovni hovorov pre výpočet stratovosti neuvažuje hodnotu maximálneho počtu paketov v systéme K , pri porovnávaní so simuláciami a výsledkami modelu $M/D/1/K$ uvažujem hodnotu $K = 15$. Simulácie ukázali, že ďalšie zvyšovanie hodnoty K má už len zanedbateľný vplyv na sledované parametre.

Obr. 1 prezentuje výsledky získané pri úrovni agregácie 1, teda pri kapacite linky 10 Erl. Z grafu sú zrejme 2 extrémny. Model Erlang B (fialová farba) sa výrazne odlišuje od výsledkov simulácií (čierna farba). Naopak model $M/G/\infty/\infty$ (tyrkysová farba) presne tieto výsledky kopíruje a v tejto úrovni je výrazne presnejší, ako výsledky modelu na úrovni paketov na báze $M/D/1/K$ (modrá farba) a modelu fGn (červená farba). Dôvodom je práve

schopnosť obsiahnuť variabilitu počtu aktívnych spojení, a tak pokryť zvýšené hodnoty stratovosti pri krátkodobom presiahnutí kapacity systému.

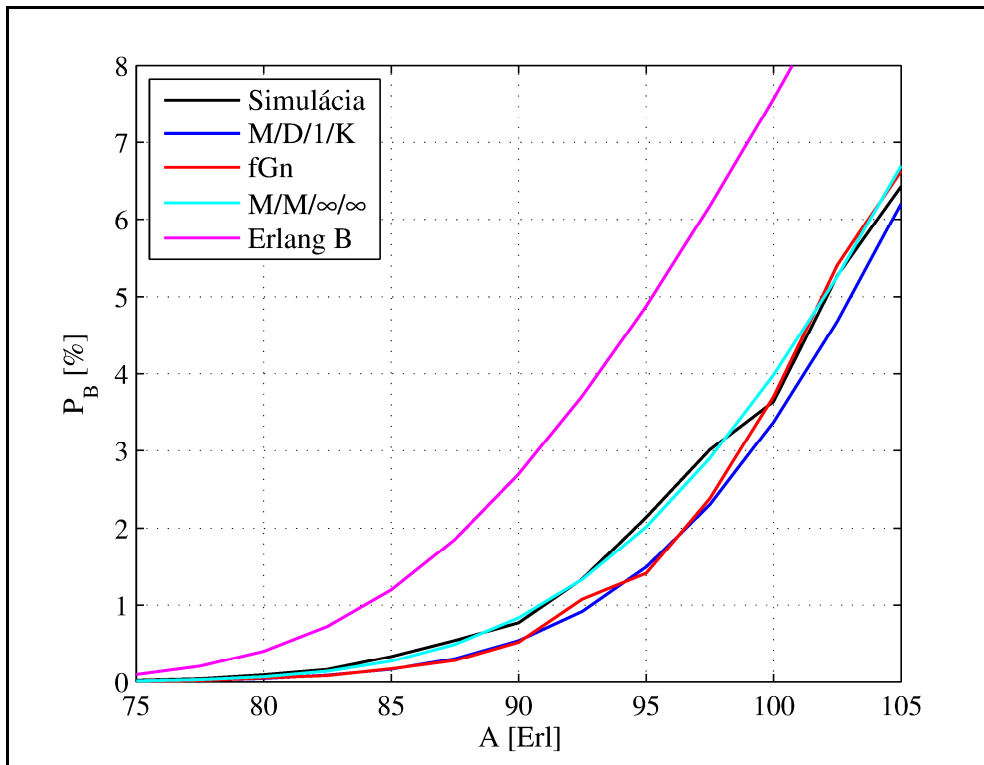


Obr. 1: Porovnanie výsledkov modelov a simulácie stratovosti paketov pri eliminovanom vplyve maximálnej kapacity systému ($K=15$) (kapacita linky 10 Erl).

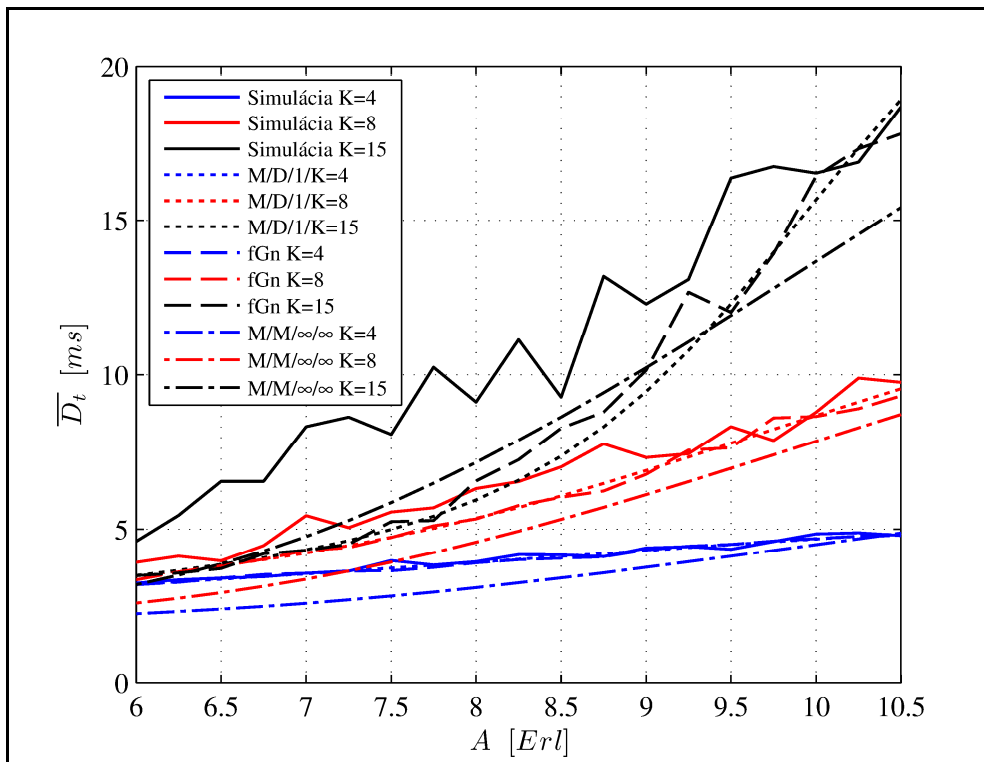
Pri vysokej úrovni agregácie (obr. 2) sa potvrdzuje presnosť modelu na báze $M/G/\infty/\infty$, ktorého odchýlka od výsledkov simulácie je takmer nulová. Zároveň však už na tejto úrovni je presnosť modelu na úrovni paketov $M/D/1/K$ a modelu fGn porovnateľná.

Z hľadiska stratovosti je teda možné konštatovať, že model na úrovni paketov $M/D/1/K$ (5) je s rastúcim stupňom agregácie prevádzky viac a viac presný. Jeho použitie pri nízkych úrovniach prevádzkového zaťaženia je však nevhodné vzhľadom na pomerne veľkú negatívnu odchýlku výsledkov v tejto oblasti. Naopak model na úrovni hovorov $M/G/\infty/\infty$ (7) presne pokrýva celé spektrum hodnôt agregácií, jeho negatívom však je len výpočet hodnoty stratovosti, ku ktorej sa reálna hodnota s rastom kapacity systému približuje. V reálnych situáciách však nedochádza k použitiu čakacích radov s dĺžkou menšou ako 10 prvkov, a teda pre praktickú aplikáciu je tento nedostatok nepodstatný. Model Erlang B sa javí ako nevhodný pre odhad stratovosti, pretože jeho výsledky výrazne prevyšujú skutočné hodnoty. Je ho však možné použiť pre výpočet horného ohraničenia stratovosti systému aj pri teoreticky veľmi krátkych čakacích radoch.

V druhom kroku porovnávam získané výsledky priemerného oneskorenia D_t podľa modelu na úrovni paketov $M/D/1/K$ (8) (v grafoch označené bodkovanou čiarou), modelu na úrovni hovorov $M/G/\infty/\infty$ (10) (označené bodko-čiarkovane), modelu na báze fGn (čiarkovaná čiara) a realizovanej simulácie (súvislá čiara). Porovnanie je realizované pri 3 rôznych nastaveniach maximálnej kapacity systému $K = 4, 8$ a 15 paketov (modrá, červená a čierna farba v grafoch).



Obr. 2: Porovnanie výsledkov modelov a simulácie stratovosti paketov pri eliminovanom vplyve maximálnej kapacity systému ($K=15$) (kapacita linky 100 Erl).

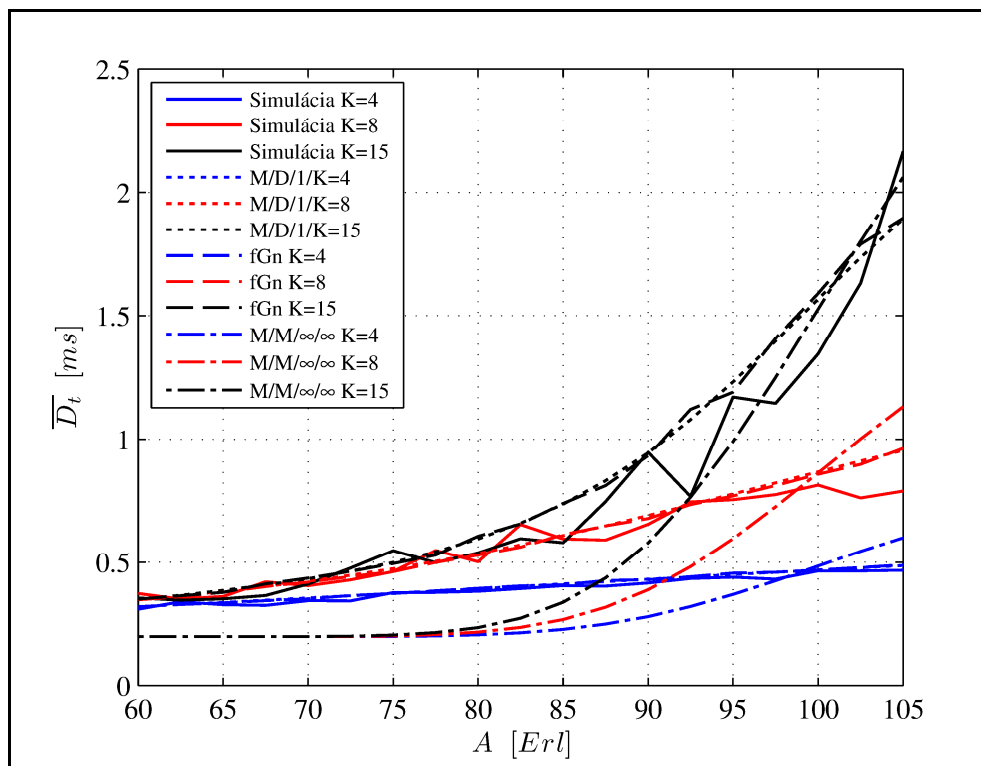


Obr. 3: Porovnanie výsledkov modelov a simulácie oneskorenia paketov v závislosti od prevádzkového zaťaženia A (úroveň 1) a max. počtu paketov v systéme K .

Obr. 3 zobrazuje situáciu pre nízku úroveň agregovanej prevádzky. Presnosť všetkých troch modelov je pre nízke hodnoty K dostatočná v celom rozsahu zaťaženia. S nárastom hodnoty parametra K dochádza k prehlbovaniu rozdielov medzi výsledkami modelov a výsledkami získanými simuláciou. Model $M/D/1/K$ má výraznú odchýlku najmä pri nižšej hodnote prevádzkového zaťaženia, neskôr sa však výsledky viac približujú simulácií. Veľmi podobné správanie má aj model na báze fGn. Model na úrovni hovorov (10) sa svojimi výsledkami odlišuje od ostatných dvoch modelov. Ukazuje sa, že pri nízkej úrovni agregácie je najmä v rozsahu 70 – 90% využitia kapacity linky o niečo presnejší, ako ostatné dva modely. S ďalším rastom zaťaženia však jeho presnosť klesá.

Zvýšením agregácie prevádzky (obr. 4) dochádza k nasledovným zmenám. Výsledky modelov $M/D/1/K$ a fGn veľmi presne kopírujú výsledky simulácie v celom rozsahu skúmaného zaťaženia a tiež pre všetky uvedené hodnoty parametra K . Na druhej strane sa ukazujú pomerne výrazné odchýlky vo výsledkoch modelu na úrovni hovorov s výnimkou výsledkov v úzkom intervale okolo využitia kapacity linky na úrovni 100%.

Komparácia teda ukazuje, že model na úrovni hovorov $M/G/\infty/\infty$ (8) je vhodné použiť len pre nízke hodnoty agregácie, kedy sú jeho výsledky presnejšie ako výsledky získané ostatnými opísanými modelmi. Naopak so zvyšovaním zaťaženia je nutné výpočet realizovať pomocou zložitejšieho modelu na úrovni paketov $M/D/1/K$ (10), čo však zabezpečí pomerne vysokú presnosť získaných výsledkov.



Obr. 4: Porovnanie výsledkov modelov a simulácie oneskorenia paketov v závislosti od prevádzkového zaťaženia A (úroveň 3) a max. počtu paketov v systéme K .

7 PÔVODNÉ VEDECKÉ PRÍNOSY

Na základe naštudovanej problematiky som sa rozhodol pre skúmanie možností modelovania prevádzkových parametrov (parametrov QoS) pri realizácii telefónnych hovorov vo VoIP sieťach. Celkovým cieľom je návrh a verifikácia modelu pre výpočet priemernej stratovosti paketov a priemerného jednosmerného oneskorenia pri agregovaní prevádzky z viacerých zdrojov na spoločnú dátovú linku s obmedzenou kapacitou. Postup realizácie tohto cieľa je možné rozdeliť do nasledovných krokov:

1. Definoval som logický model VoIP siete, na ktorej som realizoval výskum. Okrem definície topológie skúmanej siete som v tomto kroku charakterizoval všetky parametre týkajúce sa zdrojov prevádzky, použitých transportných technológií, protokolov a formát dátového rámca a tiež všetky parametre zdieľanej dátovej linky.
2. Uvedený logický model som opísal dvojicou navzájom nezávislých modelov, ktoré opisujú systém na úrovni:
 - a) realizovaných hovorov pomocou markovovho modelu na báze $M/G/\infty/\infty$,
 - b) prenosu paketov pomocou nemarkovovho modelu s obmedzenou dĺžkou čakacieho radu $M/D/1/K$.a pre oba modely odvodil príslušné vzťahy pre výpočet stratovosti ((5) a (7)) a jednosmerného oneskorenia ((8) a (10)), pričom v prípade modelu $M/D/1/K$ som odvodil vzťah (9) pre priemerný čas strávený požiadavkami v čakacom rade, ktorý nebol v žiadnom zo študovaných zdrojov uvedený.
3. Pre overenie výsledkov oboch modelov som v prostredí NS2 realizoval veľké množstvo simulácií s rôznymi vstupnými parametrami. Samotnej realizácii pritom predchádzalo rozšírenie zdrojového kódu simulátora najmä o podporu pre meranie jednosmerného oneskorenia na úrovni jednotlivých samostatných hovorov.
4. Pre lepšiu možnosť komparácie získaných výsledkov som uvedený logický model opísal pomocou modelu agregovanej prevádzky na báze fGn, ktorý patrí k bežne používaným modelom pre popis prevádzky v IP sieťach.
5. Z dôvodu praktického overenia výsledkov som zostavil jednoduché experimentálne pracovisko a realizoval experimentálne meranie stratovosti a oneskorenia s použitím reálnych sieťových prvkov.
6. Porovnal som všetky získané výsledky jednotlivých matematických modelov, simulácií a experimentu, ktoré pre odhad stratovosti, resp. jednosmerného oneskorenia potvrdili nasledovné:
 - a) vhodnosť použitia markovovho modelu na úrovni hovorov pre odhad konvergovanej hodnoty priemernej stratovosti v závislosti od maximálneho počtu paketov uzle siete nezávisle na úrovni prevádzkového zaťaženia a úrovni agregácie prevádzky,
 - b) vhodnosť použitia nemarkovovho modelu na úrovni paketov pre odhad stratovosti najmä v prípade vyššieho stupňa agregácie prevádzky, pri nízkych úrovniach má model tendenciu podhodnotiť výsledok,
 - c) nevhodnosť priamej aplikácie Erlangovho B modelu (1. Erlangovej rovnice) pre odhad stratovosti,

- d) vhodnosť použitia markovovho modelu na úrovni hovorov pre odhad jednosmerného oneskorenia len v prípade nízkeho stupňa agregácie prevádzky,
- e) vhodnosť použitia nemarkovovho modelu na úrovni paketov pre odhad oneskorenia s dostatočnou presnosťou pri všetkých úrovniach agregácie prevádzky,
- f) zhodu výsledkov modelu na báze fGn s výsledkami nemarkovovho modelu na úrovni paketov,
- g) zhodu výsledkov modelov s výsledkami experimentálneho merania.

Všetky výpočty, resp. simulácie a experiment boli realizované pre VoIP prevádzku pomocou kodeku G.711. Použitie modelov však nie je limitované touto kombináciou, naopak model je možné uplatniť pre akýkoľvek typ dátovej prevádzky typu CBR bez ohľadu na prenášaný obsah. Toto zovšeobecnenie zároveň otvára priestor pre ďalší výskum možností aplikácie týchto modelov napr. pre

- kombináciu viacerých tokov typu CBR,
- toky CBR s prerušovaním vysielania – napr. funkcia VAD pri VoIP,
- dátové toky typu VBR s rôznym stupňom variability,
- správanie sa modelov pri popise zložitejších sieťových topológií.

8 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] UNČOVSKÝ, L. *Stochastické modely operačnej analýzy*. 1. vyd. Bratislava : ALFA, 1980. 416 s. ISBN 63-557-80.
- [2] BOLCH G., et al. *Queueing Networks and Markov Chains*. 2nd ed. Hoboken (New Jersey, USA) : John Wiley, c2006. 878 s. ISBN 0-471-56525-3.
- [3] PEŠKO, Š., SMIEŠKO, J. *Stochastické modely operačnej analýzy*. 1. vyd. Žilina : EDIS vydavateľstvo ŽU, 1999. 242 s. ISBN 80-7100-570-3.
- [4] HAYES, J. F., GANESH BABU, T. V. J. *Modeling and Analysis of Telecommunications Networks*. 1st. ed. Hoboken (New Jersey, USA) : John Wiley, c2004. 399 s. ISBN 0-471-34845-7.
- [5] KLEINROCK, L. *Queueing systems : Volume 1 : Theory*. 1st ed. Hoboken (New Jersey, USA) : John Wiley, c1975. 471 s. ISBN 0-471-49110-1.
- [6] POLEC, J., KARLUBÍKOVÁ, T. *Stochastické modely v telekomunikáciách 1*. 1. vyd. [Bratislava] : Fond Jozefa Murgaša pre telekomunikácie n.f. vo vydavateľstve FABER, 1999. 128 s. ISBN 80-968125-0-5.
- [7] GUSAK, D., et al. *Theory of Stochastic Processes : With Application to Financial Mathematics and Risk Theory*. 1st ed. New York (USA); Dordrecht; Heidelberg; London (UK) : Springer Science + Business Media, 2010. 375 s. Problem books in Mathematics. ISBN 978-0-387-87862-1.
- [8] GRIMM, Ch., SCHLÜCHTERMANN, G. *IP Traffic Theory and Performance*. Berlin; Heidelberg : Springer, 2008. 487. s. ISBN 978-3-540-70603-8.
- [9] KOROLIUK, V. S., LIMNIOS, N. *Stochastic Systems in Merging Phase Space*. [online]. Singapore : World Scientific Publishing, 2005. 348 s. Dostupné na internete: <http://www.worldscibooks.com/etextbook/5979/5979_chap1.pdf>. ISBN 978-9812565914
- [10] MAJING, B., Stochastic Processes.[online]. Hong Kong, HK University of Science and Technology, 2007-09-04. [cit 2011-10-06]. 7 s. Dostupné na internete: <<http://www.math.ust.hk/~majing/M501/ch2.pdf>>.
- [11] NUALART, D. Stochastic Processes. [online]. Barcelona : Universitat de Barcelona, 2003-04-07. [cit. 2011-10-07]. 148 s. Dostupné na internete <<http://www.mat.ub.edu/~nualart/StochProc.pdf>>.
- [12] STEHLÍKOVÁ, B. *Stochastické procesy*. [online prezentácia]. Bratislava : Univerzita Komenského, 2012-02-17. [cit. 2012-03-26]. 29 s. Dostupné na internete: <<http://www.iam.fmph.uniba.sk/institute/stehlikova/fd12svf/prednasky/stochastika.pdf>>.
- [13] LALLEY, S. P. Gaussian Processes; Kolmogorov – Chentsov Theorem. [online]. [Galton] (USA) : University of Chicago, 31.3.2011. [cit. 2011-10-07]. 13 s. Dostupné na internete: <<http://galton.uchicago.edu/~lalley/Courses/385/GaussianProcesses.pdf>>.
- [14] CLEGG, R. G. *Lecture 4 – Notes (Little’s Theorem)*. [online]. [Londýn], University College London, [cca. 2006]. [cit. 2011-09-16]. Dostupné na internete: <http://www.richardclegg.org/networks2/Lecture4_06.pdf>.
- [15] LITTLE, J. D. C., GRAVES, S. C. Little’s Law In CHHAJED, D., LOWE, T. J. *Building Intuition : Insights from Basic Operations Management Models and Principles*. [online]. 1st ed. New York (USA) : Springer Science + Business Media, c2008. [cit. 2011-09-16]. 186 s. Internation Series in Operations Research and Management Science. Dostupné na internete: <<http://web.mit.edu/sgraves/www/papers/Little%27s%20Law-Published.pdf>>. ISBN 978-0-387-73698-3. Kapitola 5, Little’s Law, s. 81 – 100.

-
- [16] BAROŇÁK, I. *Parametre telekomunikačnej prevádzky : Spojovacie systémy II.* [elektronická pošta, prezentácia]. [Bratislava] : FEI STU, 2006. Dostupné na intranete KTL FEI STU.
- [17] BOSE, S. K. *Analysis of a M/G/1/K Queue without Vacations.* [online]. [Guwahati] (India) : Indian Institute of Technology Guwahati, dátum neznámy. [cit. 2011-11-11]. 14 s. Dostupné na internete: < http://www.iitg.ernet.in/skbose/qbook/MG1K_Queue.PDF>.
- [18] MANDJES, M. R. H., ZURANIEWSKI, P. *M/G/infinity transience, and its applications to overload detection.* [online]. Amsterdam : Centrum Wiskunde & Informatica, 2009-05-14. [cit. 2011-11-15]. 22 s. Dostupné na internete: <<http://oai.cwi.nl/oai/asset/14082/14082D.pdf>>. ISSN 1386-3711.
- [19] RISKÁ, A. *Aggregate Matrix-analytic Techniques and their Applications.* [online]. Williamsburg (Virginia, USA) : College of William & Mary, 2003-01-13. [cit. 2011-11-17]. Dostupné na internete: <<http://www.cs.wm.edu/~riska/PhD-thesis-html/main.html>>. Kapitola 2.3, Heavy tailed distributions.
- [20] PITMAN, E. J. G. Subexponential Distribution Functions. In *Journal of the Australian Mathematical Society.* [online]. 1980, vol. 29, issue 03 [cit. 2011-11-17]. s. 337 – 347. Dostupné na internete < <http://journals.cambridge.org/action/displayFulltext?type=1&pdftype=1&fid=4902988&jid=JAZ&volumeId=29&issueId=03&aid=4902980>>. ISSN: 1446-7887.
- [21] COOKE, R. M., NIEBOER, D. *Heavy-Tailed Distributions : Data, Diagnostics, and New Developments.* [online]. Washington (USA) : Delft University of Technology, march 2011. [cit 2011-11-17]. Dostupné na internete < <http://www.rff.org/RFF/Documents/RFF-DP-11-19.pdf>>.
- [22] ŽVIRONIENĚ, A., NAVICKAS, Z., RINDZEVIČIUS, R. Bursty traffic simulation by ON – OFF model. In *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, Telekomunikacijų inžinerija.* 2006, 6. vyd. str. 65 – 68. ISSN 1392 – 1215.
- [23] ChANDRASEKARAN, S. *Internet Traffic Modeling – Poisson Model vs. Self-Similar Model.* [prezentácia, online]. Houston : University of Houston, [cit. 2009-12-03]. Dostupné na Internete: < www2.cs.uh.edu/~schandr3/Internet%20Traffic%20Modeling_2.ppt>.
- [24] KIST, A. A. Erlang B as a Performance Model for IP Flows. In *15th IEEE International Conference on Networks, ICON 2007.* Adelaide : IEEE, 19-21 November 2007. ISBN 1-4244-1230-7. pp. 37 – 41.
- [25] MANDEJS, M., MEENT, R., QUEIJA, S. N. *A classification of IP traffic models.* [online]. Enschede (Holandsko) : University of Twente, 2003-12-22. [cit. 2009-10-29]. Dostupné na Internete: <<http://arch.cs.utwente.nl/projects/m2c/m2c-D21.pdf>>.
- [26] KLEMM, A., LINDEMANN, Ch., LOHMANN, M. Modeling IP traffic using the batch Markovian arrival process. [online]. In *Performance Evaluation*, roč. 2003, vyd. 54, str. 149 – 173. [cit. 1.12.2009]. Dostupné na Internete: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.5777&rep=rep1&type=pdf>>.
- [27] KOVÁČIK, M. *Hodnotenie kvality služieb VoIP.* [online elektornická prezentácia]. Banská Bystrica : Výskumný ústav spojov, 2010-09-29/30. Dostupné na internete <http://www.voip-forum.sk/archiv/Kovacik_hodnotenieVoIP.pdf>. Príspevok na seminári *Slovenská VoIP telefónia.*
- [28] DEMICHELIS, C., CHIMENTO, P. *IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM).* Network Working Group. [s.l.] : The Internet Society, November 2002. Dostupné na internete <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3393.txt>>. Dokument RFC3393.
-

- [29] ERLANG, A. K. The Theory of Probabilities and Telephone Conversations. In *Nyt Tidsskrift for Matematik*. 1909, vol. 20, no. B. s. 33 – 39. Dostupné na internete: <<http://oldwww.com.dtu.dk/teletraffic/erlangbook/pps131-137.pdf>>.
- [30] BROWN, L., et. al. *Statistical Analysis of a Telephone Call Center : A Queueing – Science Perspective*. In *Journal of the American Statistical Association*. [online]. marec 2005, vol. 100, no. 469 [cit. 2011-12-05]. s. 36 – 50. Dostupné na internete <http://www-stat.wharton.upenn.edu/~lzhao/papers/MyPublication/CallCenter_JASA_2005.pdf>. ISSN 0162-1459.
- [31] XI, B., CHEN, H., CLEVELAND, W. S., TELKAMP, T. Statistical analysis and modeling of Internet VoIP traffic for network engineering. In *Electronic Journal of Statistics*. [online]. 2010, vol. 4. s. 58 – 116. Dostupné na internete <http://projecteuclid.org/DPubS/Repository/1.0/Disseminate?view=body&id=pdfview_1&handle=euclid.ejs/1264775213>. ISSN 1935-7524.
- [32] DANG, T. D., SONKOLY, B., MOLNÁR, S. *Fractal Analysis and Modeling of VoIP Traffic*. In *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium. NETWORKS 2004, 11th International*. Budapešť : IEEE, 2004-10-25. ISBN 3-8007-2840-0. s. 123 – 130.
- [33] De MATTOS, C. I., RIBEIRO, E. P., PEDROSO, C. M. A New Model for VoIP Traffic Generation. In *The 7th International Telecommunications Symposium : ITS 2010*. [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010. [cit. 2011-12-15]. Dostupné na internete: <http://www.eletrica.ufpr.br/pedroso/Artigos/artigo_its_final_temp_its.pdf>.
- [34] BOLOTIN, A. Modeling Call Holding Time Distributions for CCS Network Design and Performance Analysis. In *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Apríl 1994, vol. 12, no. 3. s. 433 – 438. Dostupné na internete <<http://www.cse.iitb.ac.in/~varsha/allpapers/network-misc/callHoldingTimes.pdf>>. ISSN 0733-8716.
- [35] WHAI-EN, Ch., HUI-NIEN, H., YI-BING, L. Modeling VoIP Call Holding Times for Telecommunications. In *IEEE Network*. November - December 2007, vol. 21, issue 6. s. 22 – 28. ISSN 0890-8044.
- [36] GUSTAFSON, F., LINDAHL, M. *Evaluation of Statistical Distributions for VoIP Traffic Modelling*. [online]. Trollhättan (Švédsko) : University West, 2008-05-27. [cit. 2011-12-17]. 48 s. Dostupné na internete: <<http://hv.diva-portal.org/smash/get/diva2:232836/FULLTEXT01>>.
- [37] L1 ASSOCIATES. *An Introduction to VoIP*. [online]. [s.l.] : L1 Associates, 2003-12-18. [cit. 2012-01-15]. 10 s. Dostupné na internete: < <http://www.l1associates.com/Introduction%20to%20VoIP.pdf> >.
- [38] IPSUPERMARKET.COM *Multimedia – Codecs*. [online]. [Bangalore (India); Stuttgart] : DMC, c2010. [cit. 2012-01-15]. Dostupné na internete: <<http://www.ipsupermarket.com/Multimedia-Codecs/dynamic/group/1.htm>>.
- [39] SCHULZRINNE, H. *Audio codecs*. [online]. New York (USA) : Columbia University, rev. 2008-10-01 00:39:22 UTC. [cit. 2012-01-15]. Dostupné na internete: <<http://www.cs.columbia.edu/~hgs/audio/codecs.html>>.
- [40] VoIP THINK. *Codec Summary Table*. [online]. [s.l.] : VoIP Think, dátum neznámy. [cit. 2012-01-15]. Dostupné na internete: < <http://www.en.voipforo.com/codec/codecs.php> >.
- [41] MICROSOFT. *Encoding Methods*. [online]. [s.l.] : Microsoft, 2012-03-06. [cit. 2012-03-18]. Dostupné na internete: < <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ff819095%28v=vs.85%29.aspx> >.

-
- [42] VOIP-SIP.ORG. *VoIP Codecs : VoIP Codecs – general overview*. [online]. [s.l.] : VoIP-SIP.org, dátum neznámy. [cit. 2012-01-16]. Dostupné na internete: <<http://www.voip-sip.org/voip-codecs/>>.
- [43] VOS, K., JENSEN, S., SOERSEN, K. *SILK Speech Codec*. [online]. [Luxembourg] : Skype Technologies S.A., 2010-09-09. [cit. 2012-01-16]. Dostupné na internete: <<http://developer.skype.com/silk/draft-vos-silk-02.txt>>.
- [44] SPEEX. *Codec Quality Comparison*. [online]. [s.l.] : Xiph.org, c2006. [cit. 2012-01-17]. Dostupné na internete: <<http://www.speex.org/comparison/>>.
- [45] VOIP-INFO.ORG. *ITU G.711*. [online]. [s.l.] : Voip-Info.org, 2008-06-05. [cit. 2012-01-18]. Dostupné na internete: <<http://www.voip-info.org/wiki/view/ITU+G.711>>.
- [46] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies : ITU – T Recommendation G.711*. [online]. Geneva : ITU, 1988. [cit. 2012-01-18]. Dostupné na internete: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.711-198811-I/en>>.
- [47] ČUCHRAN, J. *Digitalizácia hlasového signálu*. [Bratislava] : FEI STU, február 2007. Prednáška z predmetu Digitálne prenosové systémy a siete.
- [48] SCHULZRINNE, H. CASNER, S. *RTP Profile for Audio and Video Conferences with Minimal Control*. Network Working Group. [s.l.] : The Internet Society, júl 2003. [cit. 2012-01-18]. Dostupné na internete: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3551.txt>>. Dokument RFC 3551.
- [49] SCHULZRINNE, H., et. al. *RTP : A Transport Protocol for Real-Time Applications*. Network Working Group. [s.l.] : The Internet Society, júl 2003. [cit. 2012-01-18]. Dostupné na internete: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt>>. Dokument RFC 3550.
- [50] Le BOUDEC, J. Y., et. al. *Real Time Protocol (RTP)*. [elektronická prezentácia, online]. Ecublens (Švajčiarsko) : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003-01-29. [cit. 2012-01-18]. Dostupné na internete: <<http://icapeople.epfl.ch/thiran/CoursED/RTP.pdf>>.
- [51] FAIRHURST, G. *Ethernet Frame Calculations*. [online]. [Aberdeen (Veľká Británia)] : University of Aberdeen, 2001-10-01. [cit. 2012-02-04]. Dostupné na internete <<http://www.erg.abdn.ac.uk/~gorry/eg3567/lan-pages/enet-calc.html>>.
- [52] VOSE SOFTWARE. *ModelRisk online help file*. [online]. Gent; Vladikavkaz; State College (USA) : Vose Software, c2007. [cit. 2012-01-18]. Dostupné na internete: <http://www.vosesoftware.com/ModelRiskHelp/index.htm#Probability_theory_and_statistics/Stochastic_processes/Deriving_the_Poisson_distribution_from_the_Binomial.htm>. Kap. *Deriving the Poisson distribution from the Binomial*.
- [53] SCHOLZ, F.W. *Poisson – Binomial Approximation*. [online]. Seattle (USA) : University of Washington, 2011-02-08. [cit. 2012-01-18]. 3 s. Dostupné na internete: <http://www.stat.washington.edu/fritz/FallMathStat394A_2011/POIBIN.pdf>.
- [54] VAN MIEGHEN, P. *Performance Analysis of Communications Networks and Systems*. 1st ed. Cambridge; New York; Melbourne; Madrid; Cape Town; Singapore; São Paulo : Cambridge University Press, 2006. 542 s. Dostupné na internete: <http://www.nas.ewi.tudelft.nl/people/Piet/CUPbookChapters/PACUP_Poisson.pdf>. ISBN 978-0-521-10873-7. Kapitola 7, Poisson Process, s. 115 – 135.
- [55] SINCLAIR, B. *Solving Discrete-Time Markov Chains*. [online]. Verzia 2.3. Houston (USA) : Connexions, 2005-06-09. [cit. 2012-01-20]. Dostupné na internete: <<http://cnx.org/content/m10835/latest/>>. Dostupné tiež v PDF na: <<http://cnx.org/content/m10835/2.3/?format=pdf>>.

- [56] *Probability of Intersecting Intervals*. [online]. [s.l.] : [s.n], [cit. 2012-02-25]. Dostupné na internete: <<http://www.mathpages.com/home/kmath580/kmath580.htm>>.
- [57] INFORMATION SCIENCES INSTITUTE. *The Network Simulator – ns-2*. [online]. Marina del Rey (CA, USA); Arlington (VA, USA) : Information Sciences Institute, dátum neznámy. [cit. 2012-02-01]. Dostupné na internete: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Dokumentácia dostupná aj na: <http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Main_Page>.
- [58] WING CHEONG, L., et. al. Self-similar traffic generation: the random midpoint displacement algorithm and its properties. [online]. In *Communications, 1995. ICC '95 Seattle, 'Gateway to Globalization', 1995 IEEE International Conference on Communications*. Seattle (USA) : IEEE, 1995. s. 466 - 472.
- [59] MING, L. *Fractional Gaussian Noise and Network Traffic Modeling*. [online]. In *8th WSEAS International Conference on Applied Computer and Applied Computational Science*. [Hangzhou (Čína)] : WSEAS, 2009. Dostupné na internete: <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/hangzhou/ACACOS/ACACOS03.pdf>>. ISSN 1790-5117. s. 34 – 39.
- [60] DIEKER, A. B., MANDJES, M. *On spectral simulation of fractional Brownian motion*. [online]. Enschede (Holandsko), Amsterdam : University of Twente. [cit. 2012-02-04]. Dostupné na internete: <<http://www2.isye.gatech.edu/~adieker3/publications/specsim.pdf>>.
- [61] PAXSON, V. Fast, approximate synthesis of fractional Gaussian noise for generating self-similar network traffic. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. Október 1997, vol. 27, issue 5. s. 5 – 18. ISSN 0146-4833.
- [62] TORAL, H., et. al. Self-Similarity, Packet Loss, Jitter, and Packet Size : Empirical Relationships for VoIP. [online]. In *18th International Conference on Electronics, Communications and Computers, CONIELECOMP 2008*. Chochula Puebla (Mexiko) : IEEE, 2008. [cit. 2012-02-05]. Dostupné na internete <<http://biblioteca.coqcyt.gob.mx/bvic/Captura/upload/SELF-SIMILARITY-PACKET-ARTREV.pdf>>. ISBN 9781424442300. s. 11-16.
- [63] BOTTA, A., DAINOTTI, A., PESCAPÉ, A. *A tool for generation of realistic network workload for emerging networking scenarios*. In *Computer Networks*. 2012-03-24. [cit. 2012-04-05]. V tlači. Dostupné na internete: <http://wpage.unina.it/pescap/ doc/pescap_workload_comnet_2012.pdf>. ISSN 1389-1286.
- [64] *Force local IP traffic to an external interface*. [online]. [s.l.] : StackExchange.com, 2010-04-02. [cit. 2012-04-06]. Dostupné na internete : <<http://serverfault.com/questions/127636/force-local-ip-traffic-to-an-external-interface>>.

9 PUBLIKÁCIE AUTORA

ADE - Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

- [1] MIŠUTH, T., BAROŇÁK, I. Performance Forecast of Contact Centre with Differently Experienced Agents. In *Elektrorevue* [online elektronický časopis]. June 2010, vol. 1, no. 2. p. 41-47. Dostupné na internete: <<http://elektrorevue.cz/en/download/performance-forecast-of-contact-centre-with-differently-experienced-agents/>>. ISSN 1213-1539.
- [2] CHROMÝ, E., MIŠUTH, T., KAVACKÝ, M. Erlang C Formula and Its Use In the Call Centers. In *Journal AEEE : Information and Communication Technologies and Services*. March 2011, vol. 9, no. 1. p. 7-13. Dostupné na internete: <<http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/view/34>>. ISSN 1804-3119.
- [3] CHROMÝ, E., MIŠUTH, T., WEBER, A. Application of Erlang Formulae in Next Generation Networks. In *International Journal of Computer Network and Information Security*. February 2012, vol. 4, no. 1 p. 59-66. ISSN 2074-9104.
- [4] MIŠUTH, T., BAROŇÁK, I. Packet Loss Probability Estimation Using Erlang B and M/G/1/K Models in Modern VoIP Networks. In *Istanbul University - Journal of Electrical & Electronics Engineering*. [článok odoslaný 28.2.2012, prebieha recenzné konanie].

ADF - Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

- [5] MIŠUTH, T., BAROŇÁK, I. On Queueing Systems Application in IP Networks. In *EE : Časopis pre elektrotechniku a energetiku*. [elektronický časopis na CD-ROM]. Október 2010, roč. 16, mimoriadne č. ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2010, ELOSYS, Trenčín, 5 - 8 Október, 2010. p. 91-94. ISSN 1335-2547.

AFC - Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [6] CHROMÝ, E., MIŠUTH, T. The Erlang Formulas and Traffic Description in Contact Centers. [CD-ROM]. In *11th International Conference RTT 2009 : Research in Telecommunication Technology*, Srby, Czech Republic, 2 - 4 September, 2009. Prague : CTU, 2009. ISBN 978-80-01-04410-0, p. 1 - 4.
- [7] MIŠUTH, T., CHROMÝ, E., KAVACKÝ, M. Prediction of traffic in the Contact Center. In *ELECO 2009 : 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, 5-8 November, 2009. Bursa (Turkey) : EMO Chamber of Turkish Electrical Engineers - Bursa Section, 2009. ISBN 978-9944-89-820-1, p. 111-114.
- [8] MIŠUTH, T., CHROMÝ, E., BAROŇÁK, I. Method for Fast Estimation of Contact Centre Parameters Using Erlang C Model. [CD-ROM]. In *The Third International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service : CTRQ 2010*, 13-19 June, 2010, Athens/Glyfada, Greece. Los Alamitos : IEEE Computer Society, 2010. ISBN 978-0-7695-4070-2, p. 181-185.
- [9] MIŠUTH, T., CHROMÝ, E., BAROŇÁK, I. Performance Estimation of Contact Centre with Variable Skiled Agents. [CD-ROM]. In *Telecommunications and Signal Processing TSP 2010 : 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, 17-20 August, 2010, Baden near Vienna, Austria. Budapest : Asszisztencia Szervező Kft., 2010. ISBN 978-963-88981-0-4, p. 391 - 396.

- [10] MIŠUTH, T., BAROŇÁK, I. Application of Erlang B Model in Modern VoIP Networks. [CD-ROM]. In *Telecommunications and Signal Processing TSP 2011* : 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Budapest, Hungary, 18.-20 August 2011. Brno : VUT v Brně, 2011. ISBN 978-1-14577-1409-2, p. 235-239.
- [11] MIŠUTH, T., BAROŇÁK, I. Packet Loss Probability Estimation Using Erlang B Model in Modern VoIP Networks. In *ELECO 2011* : 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey, 1-4 December, 2011. Bursa (Turkey) : EMO Chamber of Turkish Electrical Engineers - Bursa Section, 2011. ISBN 978-9944-89-820-1, p. 239-243.
- [12] MIŠUTH, T., BAROŇÁK, I. Application of M/G/1/K model for aggregated VoIP traffic packet loss estimation. In *Telecommunications and Signal Processing TSP 2012* : 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Praha, Česká republika, 3. – 4. July 2012. [príspevok akceptovaný, čaká na vydanie].
- AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách**
- [13] MIŠUTH, T., CHROMÝ, E. Simulácia prevádzky v kontaktných centrách. [cd-rom]. In *ŠVOČ 2009* : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník víťazných prác. Bratislava, 29.4.2009. Bratislava : STU v Bratislave, 2009. ISBN 978-80-227-3094-5.
- [14] CHROMÝ, E., MIŠUTH, T., KAVACKÝ, M. The Contact Center Traffic Description Using Erlang Formulas. [CD-ROM]. In *ICETA 2009* : 7th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, Stará Lesná, Slovakia, 19-20 November, 2009. Košice : Elfa, 2009. ISBN 978-80-8086-128-5.

10 ÚČASŤ AUTORA NA PROJEKTOCH

- [V1] Projekt *AV-015-Bar* - Optimalization Multimedia Traffic in NGN Network. Katedra telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2007 – 2009.
- [V2] Projekt *VEGA 1/0565/09* - Modelling of traffic parameters in NGN telecommunication systems and networks. Ústav telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2009 – 2011.
- [V3] Projekt *ITMS 26240120005, OPVaV - 2008/4.1/01-SORO* - Operating program research and development. Center of excellence – SMART technologies, networks and Services I. (IMS Platform for NGN). Ústav telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2009 – 2011.
- [V4] Projekt *ITMS 26240120029, OPVaV - 2008/4.1/02-SORO* - Operating program research and development. Center of excellence – SMART technologies, networks and Services II. (IMS Platform for NGN). Ústav telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2010 – 2013.

11 RESUME

The scope of this thesis is focused on the design and verification of models for performance parameters (QoS parameters) estimation in modern VoIP networks. Models for average packet loss and average one way packet delay estimation are derived for an aggregated multiple source traffic that shares common data link with limited capacity. Traffic on shared link can be analysed from two perspectives – call level perspective (number of currently active calls) and packet level perspective.

Based on defined logical model of VoIP network (topology and traffic parameters on call and packet levels) separate mathematical models are proposed for:

- packet loss and one way delay estimation based on $M/D/1/K$ model on packet level,
- packet loss and one way delay estimation based on $M/G/\infty/\infty$ on call level.

Results obtained from proposed models were compared to results of extensive simulations implemented and executed using Network Simulator 2 software with various input parameters combinations. Furthermore standard fGn based aggregated IP traffic model results and simple experimental results were compared against results of proposed models.

Comparisons then confirm following original scientific results:

- Packet loss estimation can be carried out on call level using proposed $M/G/\infty/\infty$ based model on any level of traffic aggregation and irrespective of current traffic load. There are no significant differences between model and simulation results.
- Model based on $M/G/\infty/\infty$ for one way delay estimation on call level has sufficient precision only for lower levels of traffic aggregation.
- Packet loss and one way delay estimations on packet level using $M/D/1/K$ model are valid especially for higher levels of traffic aggregation where their precision is significantly better then for lower aggregation levels.
- Standard fGn based model results are confirmed to be identical with $M/D/1/K$ model on packet level
- Experimental packet loss results are in line with proposed mathematical models results.