

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
Ústav telekomunikací

Autor : Ing. Jiří Prokeš

**Rovnoměrné uspokojování přenosových požadavků
spojení při řízení toku dat třídy služeb ABR**

**Fair Satisfaction of Connection Traffic Demands
for ABR Service Class Control**

Obor : Elektronika, měřicí a sdělovací technika

Školitel : Doc. Ing. Vladimír Kapoun, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Florián Makáň, CSc.
Doc. Ing. Izabela Krbilová, PhD.

Datum obhajoby: 17. 5. 2000

© 2000 Jiří Prokeš

ISBN 80-214-1631-9

OBSAH

ÚVOD	4
1. SDÍLENÍ PŘENOSOVÉ KAPACITY LINKY	5
1.1 Kriteria optimálního sdílení - úvaha	6
1.2 Předpoklady pro hodnocení kritérií optimálního sdílení	7
2. „DEMANDS SATISFYING ALLOCATION“ (DSA) KRITÉRIUM	8
2.1 Definice parametrů a význam použitých symbolů	8
2.2 „Demands Satisfying Allocation“ kritérium – definice	8
3. POROVNÁNÍ KRITÉRIÍ OPTIMÁLNÍHO SDÍLENÍ	9
3.1 Porovnávaná kritéria	9
3.1.1 Výsledky porovnání	9
4. ABR ALGORITMUS PŘEPÍNAČE	12
4.1 Cíle ABR algoritmu přepínače	12
4.2 DSA algoritmus přepínače	12
4.2.1 Model přepínače	13
4.2.2 Základní princip DSA algoritmu přepínače - určování stavu linek	14
4.2.3 Určení parametrů M a $P - M$	15
4.2.4 Míra uspokojení požadavků K	16
4.2.5 Chování DSA algoritmu – příjem	17
4.2.6 Chování DSA algoritmu – vysílání	21
4.2.7 Jedna hodnota optimální přenosové rychlosti během jednoho měřicího intervalu	21
5. OVĚŘENÍ ČINNOSTI A VÝSLEDKY SIMULACE	21
5.1 Základní konfigurace	22
5.2 Další testované konfigurace	22
5.3 Chování při různých parametrech ABR spojení	23
5.3.1 Parametry jednotlivých zdrojů pro konfiguraci „Upstream bottleneck“	23
5.3.2 Výsledky simulací	24
ZÁVĚR	28
INTRODUCTION	30
6. THE PRINCIPLE OF ABR SERVICE CLASS CONTROL	30
6.1 There are three ways for switches to give feedback to the sources	30
6.2 Traffic parameters	31
7. FAIR SHARE	31
7.1 „Demands Satisfying Allocation“ fairness criterion	32
8. DSA SWITCH ALGORITHM FOR ABR SERVICE CLASS CONTROL	33
9. EVALUATION OF DSA SWITCH ALGORITHM	34
CONCLUSION	34
LITERATURA	36
CURRICULUM VITAE	37

ÚVOD

V současné době je potřeba přenášet stále větší množství různých informací. Pokud uvážíme, že informace vnímáme nejen zrakem v podobě textů a statických obrázků, ale i prostřednictvím pohyblivého obrazu a zvuku, neudiví nás, proč jedním z nejčastěji užívaných výrazů v oblasti informačních technologií, jsou multimédia. Ty však vyžadují přenos informací z různých zdrojů a to s odlišnými požadavky na rychlost a kvalitu přenosu.

Takto odlišné požadavky kladou značné nároky na sdělovací síť. Jako standard pro přenos v těchto sítích byla vybrána technologie ATM (Asynchronous Transfer Mode) [3], [4], která je nezávislá na rychlosti a typu přenášené informace. Z tohoto důvodu byly služby poskytované sítí ATM rozděleny do čtyř tříd.

Přestože se již technologie ATM úspěšně využívá v páteřních počítačových sítích a také v rámci podnikových a akademických sítí, nejsou využity její hlavní přednosti. Pomalu se též začínají realizovat první projekty veřejné širokopásmové integrované sítě služeb (B-ISDN, Broadband – Integrated Services Digital Network). Tyto sítě jsou založeny na technologii ATM, ale využívají též současné přenosové sítě SDH (Synchronous Digital Hierarchy).

Vybudování veřejné B-ISDN, tak umožní nejen propojení lokálních počítačových sítí LAN, ale i vytváření rozsáhlých virtuálních sítí bez ohledu na fyzické umístění jejich uživatelů. S vybudováním B-ISDN se vytvoří širší nabídka možných druhů služeb jako například:

- videokonference,
- video na přání,
- poskytování interaktivních vzdělávacích kurzů,
- elektronické interaktivní nákupy zboží a další.

Pro přenos dat počítačových sítí je v současnosti využívána třída služeb UBR (Unspecified Bit Rate), která nezaručuje dodržení žádných přenosových parametrů. Přenos dat této třídy služeb funguje stejným způsobem jako v klasických počítačových sítích. Při přetížení ATM sítě dochází ke snížení efektivnosti přenosu vzhledem k opakování přenosu ztracených informací. Řešením tohoto problému může být přechod ke třídě služeb ABR (Available Bit Rate), která pomocí řízení toku dat [1], [3], [19] zajišťuje minimalizaci ztrát buněk a tedy dosahuje maximální efektivnosti přenosu. Většina doposud navržených kritérií sdílení dostupné přenosové kapacity pro třídu služeb ABR byla inspirována klasickými počítačovými sítěmi a nevyužívá proto všech dohodnutých přenosových parametrů spojení.

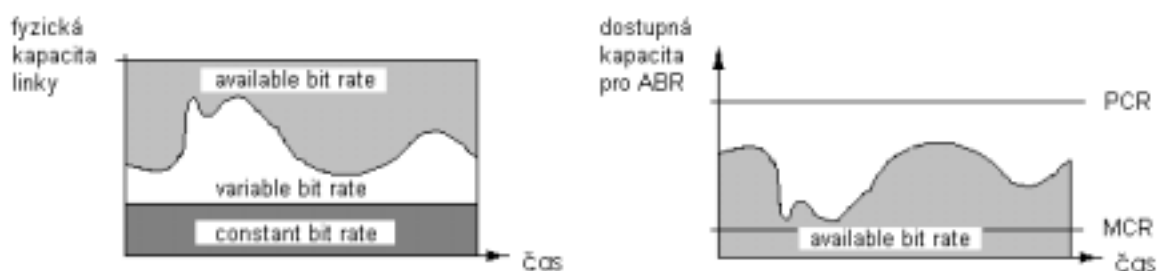
Tato disertační práce si klade za úkol navrhnout nové kritérium optimálního sdílení dostupné přenosové kapacity pro třídu služeb ABR. Dále pak navrhnout nový algoritmus přepínače pro řízení toku dat ABR třídy služeb, pracující s navrženým kritériem optimálního sdílení dostupné přenosové kapacity.

Hlavním cílem navrhovaného kritéria optimálního sdílení je umožnit rozdělení dostupné přenosové kapacity linky mezi jednotlivá spojení podle jejich celkových přenosových požadavků. Na základě tohoto kritéria jednotlivá spojení obdrží různě velkou část dostupné přenosové kapacity, ale relativní míra uspokojení požadavků všech spojení bude stejná.

Dalším z úkolů disertační práce je prověřit chování navrženého algoritmu přepínače pro různé konfigurace sítě. Chování navrženého algoritmu bude prověřeno pomocí speciálně upraveného simulačního programu „The NIST ATM/HFC Network Simulator“ [22] a [23], který bude doplněn o nový prvek. Novým prvkem zde bude přepínač s naprogramovaným algoritmem, navrženým v disertační práci. Závěrem bude provedeno zhodnocení navrženého algoritmu přepínače.

1. SDÍLENÍ PŘENOSOVÉ KAPACITY LINKY

Přenosová kapacita linky je sdílena všemi službami poskytovanými ATM sítí a to v závislosti na jejich prioritě [3], [21]. Nejprve jsou přenášeny data služeb třídy CBR a VBR, která mají nejvyšší prioritu (data citlivá na zpoždění). Když jsou všechna data těchto tříd služeb v daném okamžiku přenesena a zůstává ještě volná přenosová kapacita, začnou se přenášet data služeb třídy ABR. Třída služeb ABR se snaží využít veškerou zbývající přenosovou kapacitu linky. Pokud jsou i data ABR třídy služeb přenesena a zůstane volná přenosová kapacita, mohou se přenášet data služeb třídy UBR, která mají nejnižší prioritu. Na obrázku 1.1 a) je graficky znázorněn časový průběh sdílení přenosové kapacity linky a na obrázku 1.1 b) je graficky znázorněn časový průběh přenosové kapacity dostupné pro služby třídy ABR. Pokud se v průběhu přenášení dat s nižší prioritou objeví ve frontě data s vyšší prioritou, je další přenos dat s nižší prioritou odložen až do doby, kdy jsou přenesena všechna data s vyšší prioritou.



a) Sdílení fyzické kapacity linky
- ideální stav

b) Průběh dostupné kapacity pro služby
třídy ABR

Obr. 1.1: Přenosová kapacita linky a její rozdělení mezi třídy služeb

Vlastní přenos dat je prováděn po ATM buňkách, které se přenášejí maximální přenosovou rychlostí linky. Přenosové parametry spojení [1], [8], dohodnuté při jeho sestavování, PCR, MCR, SCR, ICR nám neudávají vlastní rychlost přenosu buněk, ale určují, jak často (v jakých časových intervalech) se buňka z daného zdroje může přenášet.

Jak vyplývá z výše uvedeného principu sdílení přenosové kapacity, nemohou třídy služeb CBR a VBR optimálně využít přenosovou kapacitu linky. Pokud požadavky služeb třídy CBR a VBR překročí určitou hranici, začne výrazně narůstat přenosové zpoždění a kvalita těchto služeb výrazně klesá. Tyto služby mají dohodnuté parametry, které jsou během přenosu konstantní.

Naproti tomu služby třídy ABR mají předem dohodnuté pouze mezní parametry PCR a MCR a aktuální přenosová rychlost je řízena v závislosti na okamžitém zatížení linky. Tato vlastnost předurčuje služby třídy ABR, jako nástroj pro optimální využití přenosové kapacity.

Služby třídy UBR dovedou přenosovou kapacitu využít také, ale se stoupajícím zatížením se značně snižuje efektivita přenosu vlivem ztrát při chvilkovém zahlcení sítě. Tyto ztráty mají často za následek opakování přenosu celého poškozeného bloku dat, a to vede k dalšímu zahlcení sítě.

Řízení toku dat služeb třídy ABR nám umožňuje dosáhnout vysoké efektivity přenosu. Nejdůležitější částí řízení toku dat třídy služeb ABR je výpočet optimální přenosové rychlosti pro jednotlivé zdroje.

1.1 Kriteria optimálního sdílení - úvaha

Na začátek krátké zamyšlení, co znamená optimální sdílení dostupné přenosové kapacity jednotlivými ABR zdroji. Problematiku optimálního sdílení můžeme rozdělit na dvě části:

- První z nich je efektivita využití dostupné přenosové kapacity linky. Tato oblast je primární a proto většina známých kritérií optimálního sdílení efektivity využití dostupné přenosové kapacity linky více či méně dosahuje.
- Druhou oblastí je spravedlivost rozdělení dostupné přenosové kapacity mezi jednotlivá spojení. V této oblasti je situace jiná, poněvadž většina známých kritérií optimálního sdílení dostatečně nevyužívá mezních parametrů PCR a MCR dohodnutých s uživatelem a přenosovou kapacitu přidělují bez ohledu na tyto požadavky.

Uvedme tři možné pohledy na spravedlivé rozdělení dostupné kapacity:

1. Dostupná přenosová kapacita linky je rovnoměrně rozdělena mezi všechny ABR zdroje. Výsledkem je, že všechny ABR zdroje budou vysílat stejnou přenosovou rychlostí. Příkladem může být „Max-Min“ kritérium optimálního sdílení [1].

Při prvním setkání s tímto pohledem, se nám jeví jako spravedlivý a tedy optimální. Když se však blíže zamyslíme, zjišťujeme, že daný pohled je skutečně optimální pouze za následujícího předpokladu.

Předpoklad:

Všechny zdroje mají stejné požadavky na maximální přenosovou rychlost PCR, mají stejnou váhu (jsou stejně důležité) a všechny mají nulový požadavek na minimální přenosovou rychlost MCR (popř. MCR všech zdrojů jsou si rovny a jejich součet není větší než dostupná přenosová kapacita linky).

2. Dostupná přenosová kapacita linky je rozdělena mezi ABR zdroje podle parametru MCR. Zde můžeme uvést dva příklady kritérií optimálního sdílení :

a) „MCR plus equal share“ kritérium [1]

Všechny ABR zdroje budou vysílat rychlostí MCR zvětšenou o rovnoměrně rozdělený zbytek dostupné přenosové kapacity. Toto kritérium je optimální za následujícího předpokladu.

Předpoklad:

Rozdíl mezi PCR a MCR je pro všechny zdroje stejný.

b) „Allocation proportional to MCR“ kritérium [1]

Všechny ABR zdroje budou vysílat rychlostí poměrnou k MCR. Dané kritérium je optimální pouze za následujícího předpokladu.

Předpoklad:

Poměr mezi PCR a MCR je pro všechny zdroje stejný a všechny zdroje mají MCR různé od nuly.

3. Dostupná kapacita linky je rozdělena mezi všechny ABR zdroje podle celkových požadavků na spojení (PCR i MCR).

Výsledkem je, že všechny požadavky na spojení od všech ABR zdrojů budou rovnoměrně uspokojeny. Příkladem může být v disertační práci navržené „Demands Satisfying Allocation“ kritérium.

Toto kritérium je optimální při libovolných požadavcích jednotlivých ABR zdrojů.

1.2 Předpoklady pro hodnocení kritérií optimálního sdílení

Pro hodnocení jednotlivých pohledů na spravedlivé, tedy optimální sdílení dostupné přenosové kapacity, bylo nutno předem definovat předpoklady, o které se hodnocení bude opírat.

Předpoklady:

Uživatel (ABR zdroj) a poskytovatel (sít'), si při sestavování spojení dohodnou limitující parametry spojení MCR a PCR.

- Parametr MCR představuje pro uživatele minimální požadavky, které mu ještě dovolují danou službu použít.

- Parametr PCR představuje pro uživatele maximální požadavky, které je schopen využít, nebo které je síť schopna pro danou službu v době sestavování spojení poskytnout.
- V případě, že síť poskytuje spojení přenosovou kapacitu na úrovni MCR, je uživatel nespokojen.
- Na druhé straně, pokud síť poskytuje spojení přenosovou kapacitu na úrovni PCR, je uživatel spokojen.

Vyjdeme-li z těchto předpokladů, lze ukázat, že optimální rozdělení dostupné přenosové kapacity je na základě rovnoměrného uspokojení požadavků všech uživatelů.

2. „DEMANDS SATISFYING ALLOCATION“ (DSA) KRITÉRIUM

2.1 Definice parametrů a význam použitých symbolů

- A – Celková dostupná kapacita pro všechny ABR spojení na dané lince
 U – Součet kapacit spojení limitovaných na okolních linkách (včetně limitování parametrem PCR)
 $B = A - U$, kapacita určená pro sdílení na této lince
 N – Celkový počet aktivních spojení
 N' – Počet aktivních spojení limitovaných na okolních linkách
 $n = N - N'$, počet aktivních spojení pro sdílení na této lince.
 MCR (i) – Minimální přenosová rychlost MCR pro spojení *i*
 PCR (i) – Maximální přenosová rychlost PCR pro spojení *i*
 $M = \sum_{i=1}^n MCR(i)$ Součet MCR (i) všech *n* aktivních spojení
 $P = \sum_{i=1}^n PCR(i)$ Součet PCR (i) všech *n* aktivních spojení
 B(i) – Spravedlivě přidělená přenosová kapacita pro spojení *i*

2.2 „Demands Satisfying Allocation“ kritérium – definice

$$B(i) = MCR(i) + (PCR(i) - MCR(i)) * K \quad (2.1)$$

kde
$$K = \frac{B - M}{P - M} \quad (2.2)$$

Toto kritérium je navrženo v souladu se třetím vysvětlením co znamená optimální sdílení, protože žádné ze známých kritérií danému vysvětlení neodpovídá. Navíc je navrženo nejen s ohledem na efektivní využití celé dostupné kapacity, ale také s ohledem na spravedlivé rozdělení dostupné kapacity.

Při návrhu bylo nutno dbát na to, aby výsledné kritérium nebylo výpočtově náročné a nebránilo tak praktické implementaci do algoritmu přepínače, který pracuje v reálném čase. Proto byl navržen systém, kde parametr K - míra uspokojení požadavků - je vypočten jednou za dobu měřicího intervalu pro celou linku a parametr $B(i)$ - optimální přenosová kapacita i -tého spojení - je vypočtena pro každé spojení opět maximálně jednou za dobu měřicího intervalu.

3. POROVNÁNÍ KRITÉRIÍ OPTIMÁLNÍHO SDÍLENÍ

V této kapitole jsme porovnávali chování jednotlivých kritérií optimálního sdílení. Z daného porovnávání jsme vyloučili kritéria „Weighted allocation“ a „General fairness“, která jsou založena na nastavení váhových koeficientů [1], [5], [7], [13], [15]. Váhové koeficienty obou kritérií lze nastavit libovolně a proto jejich chování není stálé. Chování obou kritérií je značně závislé právě na nastavení váhových koeficientů a nelze je tedy v obecné formě porovnávat.

3.1 Porovnávaná kritéria

Za názvem každého kritéria je uvedena zkratka, pod kterou se dané kritérium nachází v tabulce na obrázku 3.1 (definice uvedeny v [1], [19] a [20]).

„Max-Min“ kritérium	-> Max-Min
„MCR plus equal share“ kritérium	-> MCR +
„Maximum z MCR nebo Max-Min share“ kritérium	-> Max MCR
„Allocation proportional to MCR“ kritérium	-> Proport. MCR
„Demands Satisfying Allocation“ kritérium	-> DSA

3.1.1 Výsledky porovnání

V tabulce na obrázku 3.1 jsou uvedeny příklady, jak jednotlivá kritéria zajišťují optimální rozdělení dostupné přenosové kapacity. Příklady zahrnují několik typů rozdílných požadavků. Kapacita linky $B = 120$ Mbit/s počet spojení $n = 3$.

Rovnice pro výpočet míry uspokojení požadavků K v %:

$$K * 100 = \frac{B(i) - MCR(i)}{PCR(i) - MCR(i)} * 100 \quad [%]$$

V tabulce na obrázku 3.1 jsou přehledně uspořádány výsledky porovnávání jednotlivých kritérií optimálního sdílení pro různé nastavení parametrů všech spojení MCR a PCR. Tři po sobě následující řádky tabulky tvoří jedno nastavení parametrů pro první až třetí spojení.

V tabulce jsou uvedeny některé zvláštní kombinace parametrů, aby se projeví omezení jednotlivých kritérií.

	i	MCR(i) Mbit/s	PCR(i) Mbit/s	Max-Min		MCR +		Max MCR		Proport. MCR		DSA	
				B(i) Mbit/s	K*100 %	B(i) Mbit/s	K*100 %	B(i) Mbit/s	K*100 %	B(i) Mbit/s	K*100 %	B(i) Mbit/s	K*100 %
A	1	10	60	40	60	35	50	40	60	26,7	33,4	29,23	38,46
	2	30	65	40	28,6	55	71,4	40	28,6	!! 80 !!	142,9	43,46	38,46
	3	5	115	40	31,8	30	22,7	40	31,8	13,3	7,5	47,31	38,46
B	1	0	70	40	57,1	30	42,9	40	57,1	0	0	28	40
	2	25	65	40	37,5	55	75	40	37,5	!! 100 !!	187,5	41	40
	3	5	120	40	30,4	35	26,1	40	30,4	20	13	51	40
C	1	0	70	40	57,1	40	57,1	40	57,1	x	x	33	47,1
	2	0	65	40	61,5	40	61,5	40	61,5	x	x	31	47,1
	3	0	120	40	33,3	40	33,3	40	33,3	x	x	56	47,1
D	1	20	70	40	40	30	20	40	40	26,7	13,4	29,375	18,75
	2	45	65	!! 40 !!	!! -25 !!	55	50	45	0	60	75	48,75	18,75
	3	25	115	40	16,7	35	11,1	40	16,7	33,3	9,2	41,875	18,75
E	1	10	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
	2	15	65	40	50	45	60	40	50	60	90	45	60
	3	5	55	40	70	35	60	40	70	20	30	35	60
F	1	10	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
	2	10	65	40	54,5	40	54,5	40	54,5	40	54,5	43	60
	3	10	55	40	66,7	40	66,7	40	66,7	40	66,7	37	60
G	1	10	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
	2	10	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60
	3	10	60	40	60	40	60	40	60	40	60	40	60

Obr. 3.1: Výsledné přidělené přenosové rychlosti a míra uspokojení požadavků jednotlivých spojení pro porovnávaná kritéria.

A) První nastavení parametrů, při kterém bylo provedeno porovnání chování jednotlivých kritérií je obecné. Při tomto nastavení mají všechny spojení konkrétní nenulové hodnoty parametrů.

Téměř všechna porovnávaná kritéria, kromě „Allocation Proportional to MCR“ kritéria, přidělila přenosovou kapacitu jednotlivým spojením efektivně, což znamená, že celá dostupná přenosová kapacita linky je využita. Rovnoměrně uspokojilo požadavky spojení pouze „DSA“ kritérium. Jak je možno vidět z hodnot v tabulce na obrázku 4.1, kritérium „Allocation Proportional to MCR“, přidělilo spojení 2 větší přenosovou kapacitu než je maximální požadovaná hodnota PCR. Spojení 2 nemůže využít přidělenou přenosovou kapacitu a tím dojde ke snížení využití linky.

B) Při druhém nastavení parametrů je situace obdobná jako v případě nastavení parametrů A. Jediným rozdílem při užití „Allocation proportional to MCR“ kritéria je, že spojení 1 nedostane přidělenou žádnou přenosovou kapacitu, protože parametr MCR daného spojení je roven nule. V této situaci dosáhneme ještě nižšího využití linky než v případě A.

C) V třetím případě nastavení parametrů je pro všechna spojení hodnota parametru MCR rovna nule. Situace je opět podobná situaci v předchozích dvou případech. Všechna porovnávaná kritéria, kromě kritéria „Allocation proportional to MCR“, přidělují přenosovou kapacitu efektivně a kritérium „DSA“ navíc i rovnoměrně uspokojuje požadavky všech spojení. Zmíněné kritérium „Allocation proportional to MCR“, pro dané nastavení parametrů nelze vůbec použít.

D) Ve čtvrtém případě nastavení parametrů má spojení 2 hodnotu parametru větší než je kapacita přidělovaná pomocí „Max-Min“ kritéria. Na první pohled je přidělení přenosových kapacit opět efektivní. Protože spojení 2 nedostane minimální požadovanou kapacitu MCR, má zdroj dvě možnosti jak se zachovat :

- pokračuje ve vysílání s přenosovou rychlostí MCR -> dojde k přetížení linky
- zruší spojení pro nedostatečnou přenosovou kapacitu -> linka je nevyužita

Kritérium „Maximum z MCR nebo Max-Min share“, poskytne spojení 2 přenosovou kapacitu na úrovni MCR, přičemž zachovává hodnoty přenosové kapacity pro spojení 1 a 3 na úrovni přidělené „Max-Min“ kritériem. Dojde k přetížení linky. Ostatní kritéria pracují efektivně. Kritérium „DSA“ opět rovnoměrně uspokojuje požadavky spojení.

V následujících třech nastaveních E, F a G je možno sledovat podmínky, za kterých i jiná kritéria než „DSA“ kritérium, rovnoměrně uspokojují požadavky jednotlivých spojení.

E) V případě E, kde je konstantní rozdíl parametrů PCR - MCR pro všechna spojení, uspokojuje rovnoměrně požadavky všech spojení kritérium „DSA“ a také kritérium „MCR plus equal share“.

F) V případě F, kde parametr MCR všech spojení je konstantní, uspokojuje rovnoměrně požadavky všech spojení pouze kritérium „DSA“.

G) V posledním případě nastavení parametrů jsou požadavky všech spojení stejné. Požadavky spojení uspokojují rovnoměrně všechna kritéria.

Z celkového pohledu na výsledky porovnávání je zřejmé, že kritérium „Demands Satisfying Allocation“ (DSA), rovnoměrně uspokojuje požadavky všech spojení. Můžeme tedy konstatovat, že DSA kritérium je z porovnávaných kritérií nejobecnější. Ostatní kritéria vykazují stejné chování pouze ve speciálních případech.

4. ABR ALGORITMUS PŘEPÍNAČE

ABR algoritmus přepínače je součástí řídicího algoritmu přepínače a zabývá se řízením toku dat pro třídu služeb ABR. Součástí ABR algoritmu přepínače musí být i návaznost na algoritmy obsluhující třídy služeb CBR a VBR, které mají vyšší prioritu a musí být v přepínači obslouženy jako první.

4.1 Cíle ABR algoritmu přepínače

Třída služeb ABR byla navržena tak, aby umožnila dosáhnout vysoké průchodnosti ATM sítě. Dalším z cílů je efektivita přenosu. Té je dosaženo řízením toku dat pomocí zpětné vazby. Správně fungující řízení toku dat nám minimalizuje ztráty buněk, čímž odpadá opakování přenosu poškozených dat a následně vzrůstá efektivita přenosu. V neposlední řadě je cílem algoritmu přepínače také spravedlivé rozdělení dostupné přenosové kapacity mezi jednotlivá spojení.

Řízení toku dat patří mezi procedury předcházení přetížení (Congestion Avoidance). Snaží se dosáhnout vysoké průchodnosti sítě a nízkého dopravního zpoždění. Jak vyplývá z definice třídy služeb ABR je dostupná přenosová kapacita pro tuto třídu služeb proměnlivá a to v závislosti na proměnné kapacitě potřebné pro třídy služeb s vyšší prioritou (CBR a VBR). Z proměnného charakteru dostupné přenosové kapacity vyplývá nutnost použití vyrovnávacích pamětí.

Vyrovnávací paměti jsou v přepínači nutné i v případě, že buňky ze dvou a více spojení jsou ve stejném okamžiku směrovány na jeden výstupní port. Z toho je vidět, že vyrovnávací paměť je nutná pro všechny třídy služeb, včetně CBR, která pracuje s konstantní přenosovou rychlostí.

4.2 DSA algoritmus přepínače

DSA algoritmus přepínače byl navržen a vyvíjen jako algoritmus pro „Explicit Rate“ přepínače, které budou využívat pro výpočet optimální přenosové rychlosti DSA kritéria optimálního sdílení.

V této kapitole je uvedena a popsána finální verze daného algoritmu, která splnila všechny požadavky kladené na ABR algoritmy přepínačů [2], [16], [17].

DSA algoritmus přepínače je navržen v souladu s doporučením ATM fóra [1]. Jeden z prvních problémů, který bylo nutno vyřešit při sladování algoritmu s doporučením je, že hodnota přenosového parametru spojení PCR není povinně přenášena v RM buňkách. Další přenosový parametr spojení MCR, který DSA algoritmus také využívá, v RM buňkách přenášen je.

Hodnota parametru PCR se ve většině případů objevuje ve Forward RM buňkách (FRM) vysílaných směrem od zdroje k cíli. Na hodnotu PCR je obvykle ve zdroji nastaveno ER pole těchto RM buněk, ale dané nastavení není závazné. Proto při návrhu algoritmu nelze hodnotu přenášenou v poli ER využít.

Tuto situaci lze řešit dvěma způsoby, které však předpokládají mírnou úpravu nebo doplnění doporučení ATM fóra [1].

První možností je nastavovat hodnotu pole ER ve FRM buňkách, vysílaných směrem od zdroje k cíli, závazně na hodnotu PCR. Hlavní nevýhodou této možnosti je, že některé ABR algoritmy přepínačů používají nastavování hodnoty pole ER již ve směru od zdroje k cíli. V daném případě by sice DSA algoritmus pracoval efektivně, ale spojení, jejichž hodnota v poli ER byla jiným přepínačem nastavena již ve směru od zdroje k cíli, by nedostaly spravedlivý díl přenosové kapacity.

Druhou možností je využít rezervovaná pole v RM buňkách pro přenos parametru PCR. Tato možnost nemá v podstatě žádné omezení a tedy pro realizaci optimální.

Třetí možností jak řešit danou situaci, je využít informací ze signalizační zprávy, která je vysílána v době sestavování spojení a obsahuje hodnoty obou využívaných přenosových parametrů PCR i MCR. Tato varianta nevyžaduje žádné úpravy doporučení a je tedy pro realizaci z daného pohledu výhodná. Její nevýhodou je však potřeba udržovat tabulku informací o všech sestavených spojeních, včetně těch, která nejsou aktivní.

Při ověřování činnosti DSA algoritmu přepínače simulací, byla použita druhá možnost využívající rezervované pole v RM buňkách. Třetí variantu nebylo možno použít, protože sestavování spojení pomocí signalizace použitý simulační program [22], [23] neumožňoval a jeho doplnění by značně daný program zkomplikovalo.

Při vytváření algoritmu přepínače je třeba vycházet z jeho určitého modelu.

4.2.1 Model přepínače

Přepínač propojuje množství linek. Podporuje vstupní a výstupní port ke každé lince. Každý z portů má přiřazenu určitou kapacitu vyrovnávací paměti. Vyrovnávací paměť každého z portů je logicky rozdělena do front. V našem případě využíváme systém organizace vyrovnávací paměti „Per-VC Accounting“. Tomu odpovídají čtyři fronty a to pro každou třídu služeb (CBR, VBR, ABR a UBR) jedna. Vlastní řízení front se pak provádí pomocí algoritmu FIFO (First In First Out). ABR algoritmus přepínače řídí přetížení v ABR frontách ve všech portech.

4.2.2 Základní princip DSA algoritmu přepínače - určování stavu linek

Přepínač průběžně monitoruje stav na všech linkách pomocí počítání buněk. Pro buňky třídy služeb CBR a VBR používá „Per-class“ počítání, což znamená, že všechny buňky dané třídy služeb ze všech spojení na dané lince jsou počítány dohromady.

Pro zjednodušení dalšího postupu při návrhu ABR algoritmu přepínače lze použít jedno počítadlo pro třídy služeb CBR a VBR, protože obě uvedené třídy služeb mají vyšší prioritu než třída služeb ABR a jejich buňky musí být obslouženy přednostně.

Pro buňky třídy služeb ABR přepínač používá „Per-VC“ počítání, což znamená, že buňky náležící jednotlivým spojení jsou sčítány samostatně.

Nad tímto základním mechanismem monitorování stavu linek působí mechanismus vyhodnocování stavu linek, který v pravidelných intervalech provádí vyhodnocení zatížení linek a výpočet míry uspokojení požadavků jednotlivých spojení. Délka intervalu je prvním parametrem DSA algoritmu přepínače a má označení MI (Measurement Interval).

Na konci každého měřicího intervalu se nejprve určuje celková dostupná přenosová kapacita linky „A“, která je určena pro všechna ABR spojení na dané lince. Výpočet „A“ je proveden podle následujícího vztahu:

$$A = \max \left(\left(\frac{\ln_speed * sw_Dutil}{100} - \frac{vbr_cbr_cells_count * 424.0}{sw_MeasureTime} \right), 0 \right)$$

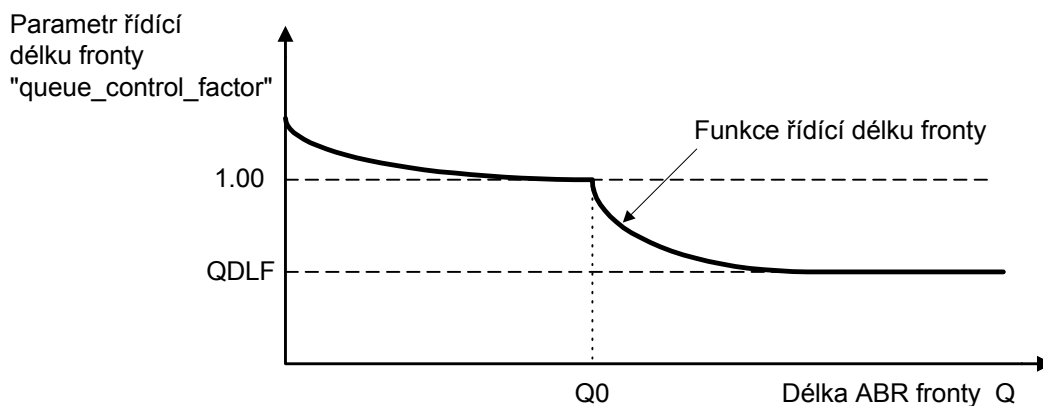
- A* - dostupná přenosová kapacita linky pro ABR třídu služeb v Mbit/s
ln_speed - přenosová rychlost linky v Mbit/s
sw_Dutil - požadované maximální využití linky v %
vbr_cbr_cells_count - počet buněk ze všech CBR a VBR spojení na dané lince za dobu měřicího intervalu MI
sw_MeasureTime - měřicí interval MI v μ s
424.0 - konstanta umožňující převod buněk na bity
(1 buňka = 53 bajtů, 1 bajt = 8 bitů => 53 * 8 = 424)

Od celkové přenosové kapacity linky, vynásobené jejím maximálním požadovaným využitím, se odečte kapacita potřebná pro přenos buněk s vyšší prioritou (buňky tříd služeb CBR a VBR).

Vliv délky fronty na dostupnou přenosovou kapacitu linky „A“

Dostupná kapacita linky je upravována vzhledem k délce fronty. Jako funkce řídicí délku fronty byla vybrána hyperbolická funkce viz. [2], [12] a [14]. Průběh dané řídicí funkce je znázorněn na obrázku 4.1.

- sw_T0* - zpoždění ve frontě v μs
- Q0* - délka fronty odpovídající zpoždění „*sw_T0*“ při dostupné přenosové kapacitě „*A*“ v buňkách
- queue_control_factor* - tento parametr určuje jaká část dostupné přenosové kapacity je použita na vyprazdňování fronty
- sw_QDLF* - Queue Drain Limit Factor - parametr funkce řídící délku fronty, který určuje minimální hodnotu parametru „*queue_control_factor*“. Není totiž žádoucí, aby byla celá dostupná kapacita linky použita na vyprazdňování fronty.



Obr. 4.1: Funkce řídící délku fronty pro DSA algoritmus přepínače

Vlastní výpočet výsledné dostupné přenosové kapacity je dán vztahem:

$$A = A * queue_control_factor$$

4.2.3 Určení parametrů M a P - M

Pro zjednodušení výpočtů máme pro každé sestavené spojení uloženy parametry „*MCR*“ a „*PCR_sub_MCR*“, což je hodnota určená vztahem:

$$PCR_sub_MCR = PCR - MCR$$

Provedeme součet parametrů pro všechna sestavená spojení.

Je-li spojení limitováno na okolních linkách, sčítáme následující parametry :

$$abr_cell_count_bot = abr_cell_count_bot + VC_activity$$

$$sum_bottle_MCR = sum_bottle_MCR + MCR$$

$$sum_bottle_PCRsubMCR = sum_bottle_PCRsubMCR + PCRsubMCR$$

Není-li spojení limitováno na okolních linkách a je-li hodnota parametru „*VC_activity*“ větší než 1 pak sčítáme parametry :

$$\begin{aligned} MCR_sum &= MCR_sum + MCR \\ PCRsubMCR_sum &= PCRsubMCR_sum + PCRsubMCR \end{aligned}$$

Nakonec nastavíme parametr „*VC_activity*“ na nulu a parametr „*seen_BRM*“ na hodnotu FALSE pro všechna sestavená spojení.

VC_activity - počet buněk jednoho ABR spojení, které se v přepínači objevili během měřicího intervalu. Pokud je hodnota „*VC_activity*“ větší než 1 je spojení považováno za aktivní.

Určení kapacity potřebné pro spojení limitované na okolních linkách „*U*“ :

$$U = \frac{abr_cell_count_bot * 424.0}{sw_MeasureTime}$$

abr_cell_count_bot - počet buněk všech ABR spojení limitovaných na okolních linkách, které se v přepínači objevili během měřicího intervalu.

Výsledná ABR dostupná přenosová kapacita „*B*“, která je následně spravedlivě rozdělena mezi spojení limitovaná na této lince, je dána vztahem:

$$B = \max((A - U), 0)$$

4.2.4 Míra uspokojení požadavků K

Je-li součet parametrů „*PCR_sub_MCR*“ pro všechna ABR spojení limitované na této lince větší než nula „*PCRsubMCR_sum*“ > 0 pak:

$$K = \max\left(\left(\frac{B - MCR_sum}{PCRsubMCR_sum}\right), 0.01\right)$$

Není-li „*PCRsubMCR_sum*“ > 0 a je-li součet parametrů „*PCR_sub_MCR*“ pro všechna ABR spojení limitované na okolních linkách větší než nula „*sum_bottle_PCRsubMCR*“ > 0 pak:

$$K = \max\left(\left(\frac{A - sum_bottle_MCR}{sum_bottle_PCRsubMCR}\right), 0.01\right)$$

Není-li „*PCRsubMCR_sum*“ > 0 ani „*sum_bottle_PCRsubMCR*“ > 0 pak:
 $K = 1$

Hodnota parametru „*K*“ má nastavené minimum 0,01 což je 1 % uspokojení požadavků. Pokud má spojení parametr $MCR = 0$ Mbit/s a míra uspokojení požadavku „*K*“ by klesla na nulu, spojení se stane neaktivní a po určité době může, opět začít vysílat a to s počáteční přenosovou rychlostí ICR .

Jestliže však použijeme minimální nastavení parametru „*K*“ nedojde k přerušení zpětnovazební smyčky a přepínač tak může stále řídit přenosovou rychlost daného spojení. Dojde-li k uvolnění přenosové kapacity, přepínač zajistí její rychlejší využití.

Poslední operaci na konci každého měřicího intervalu je vynulování všech součtových proměnných a počítadla prioritních buněk.

```
vbr_cbr_cells_count = 0  
abr_cell_count_bot = 0  
MCR_sum = 0  
PCRsubMCR_sum = 0  
sum_bottle_MCR = 0  
sum_bottle_PCRsubMCR = 0
```

Další chování DSA algoritmu přepínače lze rozdělit na dvě části :
- buňka je přijata
- buňka se vysílá

4.2.5 Chování DSA algoritmu – příjem

Když přepínač přijme buňku, zvětší o jedničku hodnotu parametru „*VC_activity*“ pro příslušné spojení. Je-li přijata Forward RM buňka (RM buňka ve směru od zdroje k cíli), jsou provedeny následující operace.

Pokud používáme pro získání hodnot parametrů „*MCR*“ a „*PCR_sub_MCR*“ informace obsažené ve FRM buňce, uložíme hodnoty obou parametrů do paměti.

Jednou z nejdůležitějších procedur, které se vykonávají při příjmu FRM buňky je určení, zda je spojení limitováno na této nebo na okolních linkách.

Hlavním měřítkem pro posuzování stavu spojení je vztah mezi poslední vypočtenou hodnotou optimálního sdílení pro dané spojení „*DSA_previous*“ a hodnotou aktuální přenosové rychlosti obsažené v CCR poli RM buňky „*rm -> acr*“.

Základní rozdělení:

Je-li hodnota „*DSA_previous*“ větší než hodnota „*rm -> acr*“ je spojení limitováno na okolních linkách.

$$VC_bot_elsewhere = TRUE$$

Pokud ne, je spojení limitováno na této lince.

$$VC_bot_elsewhere = FALSE$$

Tato základní procedura je funkční pro prostředí LAN, ve kterém je doba nutná k návratu RM buňky do zdroje kratší než je doba měřicího intervalu.

V prostředí WAN je však doba nutná k návratu RM buňky do zdroje několikrát delší než je doba měřicího intervalu (velké zpoždění na linkách). Proto docházelo k situaci, že aktuální přenosová rychlost zdroje „*rm -> acr*“ byla menší než vypočtená hodnota „*DSA_previous*“ vlivem zpoždění zpětnovazební informace. Tím docházelo k chybnému určení, zda je spojení limitováno na této lince či ne.

Proto bylo nutno základní proceduru doplnit další podmínkou pro prostředí WAN. Pro rozlišení, zda se jedná o prostředí LAN nebo WAN byla zvolena hodnota parametru „*sw_T0*“. Pro WAN je hodnota $sw_T0 \geq 500 \mu s$.

Pokud je základním rozdělením nastaven parametr „*VC_bot_elsewhere*“ na hodnotu TRUE a pracujeme v prostředí WAN, je třeba dále zjistit, je-li aktuální přenosová rychlost „*rm -> acr*“ také menší než minimální hodnota optimální přenosové rychlosti „*DSA_min*“. „*DSA_min*“ je minimální hodnota ze všech vypočtených a zpětnou vazbou do zdroje odeslaných hodnot parametru „*DSA_previous*“ a je vypočtena podle vztahu:

$$DSA_min = \min(DSA_min, DSA_previous)$$

Rozdělení pro WAN:

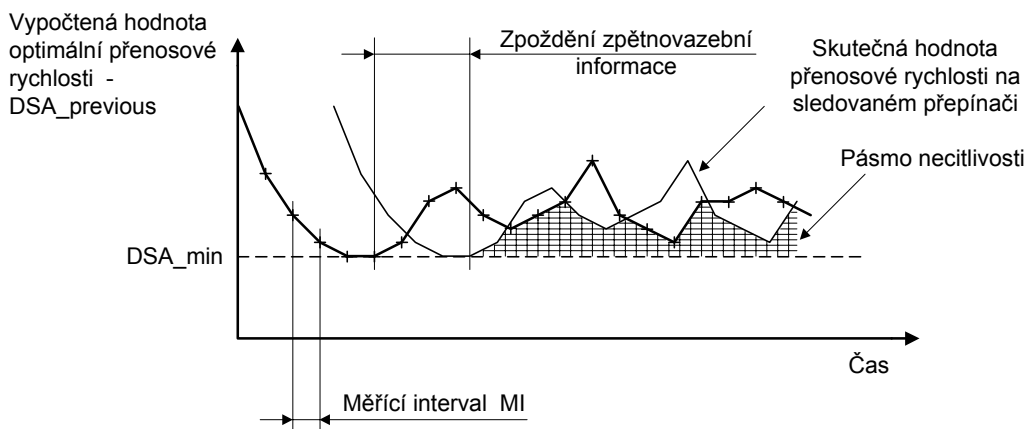
Pokud je „*rm -> acr*“ menší než „*DSA_min*“, pak je spojení limitováno na okolních linkách

$$VC_bot_elsewhere = TRUE$$

Pokud ne, je spojení limitováno na této lince

$$VC_bot_elsewhere = FALSE$$

Takto upravená procedura pracuje spolehlivě do okamžiku, kdy se objeví velké rozdíly dostupné přenosové kapacity např. vlivem VBR provozu.



Obr. 4.2: Vliv zpoždění zpětnovazební informace na aktuální přenosovou rychlost v prostředí WAN

Navržený systém s minimální hodnotou optimální přenosové rychlosti, má své omezení v tom, že hodnota parametru „*DSA_min*“ se upravuje pouze směrem dolů. Pokud například po počátečních výkyvech optimální přenosové rychlosti, dojde k jejímu ustálení nad hodnotou „*DSA_min*“, objeví se „pásmo necitlivosti“ viz. obrázek 4.2.

Když hodnota aktuální přenosové rychlosti „*rm* -> *acr*“ leží v „pásmu necitlivosti“ je spojení vyhodnoceno jako limitované na této lince, ačkoli je skutečně limitované na linkách okolních. Pro řešení vzniklého problému byl navržen systém „klouzavého minima“.

Princip systému „klouzavého minima“ spočívá v určování minimální hodnoty optimální přenosové rychlosti za dobu zpoždění zpětnovazební informace. Zpoždění zpětnovazební informace je přitom doba, která uběhne od odeslání hodnoty optimální přenosové rychlosti v Backward RM buňce (BRM), do přijetí Forward RM buňky (FRM) s aktuální přenosovou rychlostí rovnou odeslané hodnotě optimální přenosové rychlosti.

Zde se objevuje otázka: Jak určit dobu zpoždění zpětnovazební informace ?

Vyjdeme-li z definovaného chování zdrojů ABR provozu a ATM přepínačů před uzavřením zpětnovazební smyčky zjistíme, že aktuální přenosová rychlost zdrojů může klesat, ale nikdy nemůže stoupat. Abychom zjistili dobu zpoždění zpětnovazební informace, zaznamenanáme si čas, kdy odešleme BRM buňku s hodnotou optimální přenosové rychlosti větší než hodnota „*DSA_min*“.

Odeslanou hodnotu optimální přenosové rychlosti uložíme jako parametr „*DSA_min_new*“.

Poznámka: Při sestavení spojení je hodnota „*DSA_min*“ nastavena na maximální přenosovou rychlost linky.

Nyní v nově příchozích FRM buňkách porovnáváme hodnotu aktuální přenosové rychlosti s její hodnotou, která přišla v předešlé FRM buňce. V okamžiku, kdy je nově příchozí hodnota větší než hodnota minulá, si opět zaznamenáme čas. Rozdíl obou časů nám určuje zpoždění zpětnovazební informace.

Hodnotu „*DSA_min*“ přepíšeme hodnotou parametru „*DSA_min_new*“.

Znovu zaznamenáme čas první odeslané BRM buňky, která má hodnotu optimální přenosové rychlosti větší než „*DSA_min*“ a tuto hodnotu uložíme jako „*DSA_min_new*“. Následně čekáme po dobu zpoždění zpětnovazební informace. Během čekání ještě zjišťujeme, zda některá nově vypočtená hodnota optimální přenosové rychlosti není menší než „*DSA_min_new*“.

Pokud je, tak hodnotu „*DSA_min_new*“ nastavíme na novou hodnotu. Po uplynutí doby zpoždění zpětnovazební informace přepíšeme „*DSA_min*“ hodnotou „*DSA_min_new*“.

Pokud v průběhu celé operace dojde k situaci, že nově vypočtená hodnota optimální přenosové rychlosti je menší než hodnota „*DSA_min*“, aktualizujeme hodnotu „*DSA_min*“.

S nově nastavenou hodnotou „*DSA_min*“ začíná operace znovu, zaznamenáním času první odeslané BRM buňky s hodnotou optimální přenosové rychlosti větší než „*DSA_min*“.

Kapacita linky větší než součet maximálních rychlostí všech spojení na ní limitovaných

Tento poslední problém, který se vyskytl v oblasti určování, zda je spojení limitováno na této nebo na okolních linkách, byl jednoduše vyřešen. Aktuální přenosová rychlost u spojení, která jsou limitována na okolních linkách, je navíc porovnána s parametrem PCR daného spojení.

Rozdělení podle PCR:

Je-li aktuální přenosová rychlost „*rm -> acr*“ větší než parametr PCR je spojení limitované na této lince

VC_bot_elsewhere = FALSE

Pokud je „*rm -> acr*“ menší než PCR , je spojení skutečně limitováno na okolních linkách.

VC_bot_elsewhere = TRUE

Generování Backward RM buněk

Tato procedura je užitečná, hlavně v prostředí WAN tím, že podstatně snižuje nároky na množství vyrovnávacích pamětí. V případě, že je prepínač přetížen, předá zdroji první informaci o svém stavu a o požadované přenosové rychlosti ještě před uzavřením zpětnovazební smyčky. Prepínač přijme první FRM buňku daného spojení. Jestliže je vypočtená hodnota optimální přenosové rychlosti „*DSA_previous*“ menší než aktuální přenosová rychlost spojení „*rm -> acr*“ a délka ABR fronty v prepínači překročí určitou hodnotu, pak prepínač vygeneruje BRM buňku. V nově vygenerované BRM buňce nastaví všechny požadované hodnoty a pošle ji do zdroje.

4.2.6 Chování DSA algoritmu – vysílání

Když se v prepínači objeví první BRM buňka v daném měřicím intervalu je proveden výpočet optimální přenosové rychlosti.

$$DSA_previous = MCR + PCR_sub_MCR * K$$

Dále se provedou některé operace již dříve popsané v proceduře „klouzavé minimum“. Je-li třeba, nastaví se hodnota „*DSA_min*“.

Poslední operace, která se provádí, je nastavení optimální přenosové rychlosti v RM buňce. Je-li vypočtená hodnota „*DSA_previous*“ menší než hodnota nastavená v ER poli RM buňky „*rm -> er*“, nastaví se hodnota v ER poli na hodnotu „*DSA_previous*“. Pokud je hodnota „*DSA_previous*“ větší než hodnota v ER poli RM buňky „*rm -> er*“, pak se hodnota v ER poli nezmění.

4.2.7 Jedna hodnota optimální přenosové rychlosti během jednoho měřícího intervalu

Z principu DSA algoritmu prepínače vyplývá, že během jednoho měřícího intervalu se vypočte optimální přenosová rychlost „*DSA_previous*“ pouze jednou. Pokud se v prepínači objeví několik BRM buněk během jednoho měřícího intervalu, všechny přenášejí do zdroje stejnou hodnotu optimální přenosové rychlosti. To neplatí pouze v případě, že hodnota v ER poli RM buňky „*rm -> er*“ je menší než vypočtená hodnota optimální přenosové rychlosti „*DSA_previous*“.

5. OVĚŘENÍ ČINNOSTI A VÝSLEDKY SIMULACE

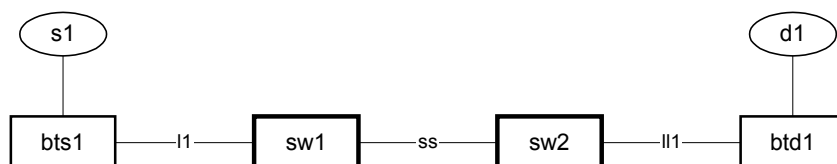
Pro prezentaci výsledků ověřování činnosti pomocí simulace bylo vybráno několik jednoduchých konfigurací viz. [2], [16], [17], které přispívají k odhalení jednotlivých vlastností zkoumaného algoritmu. Využitím jednoduchých konfigurací

dosáhneme nejnázornějších výsledků a v neposlední řadě také úsporu času nutného pro každou ze simulací.

5.1 Základní konfigurace

Nejprve je třeba algoritmus přepínače testovat na efektivnost využití přenosové kapacity linky. Pro tento test nám poslouží nejjednodušší konfigurace s jedním zdrojem viz. obrázek 5.1. Základními prvky této konfigurace jsou dva ATM přepínače (sw1 a sw2) propojené pomocí linky (ss). K jednomu z přepínačů je pomocí linky (l1) připojeno síťové zakončení (bts1) se zdrojem provozu (s1) a k druhému je připojeno síťové zakončení (btd1) s cílem (d1). Od zdroje k cíli je sestaven jeden virtuální kanál (VC).

Zdroj je aktivní po celou dobu simulace. Pokud by algoritmus správně nepracoval při této jednoduché konfiguraci, nebylo by třeba jej dále testovat.



Obr. 5.1: Konfigurace s jedním zdrojem

5.2 Další testované konfigurace

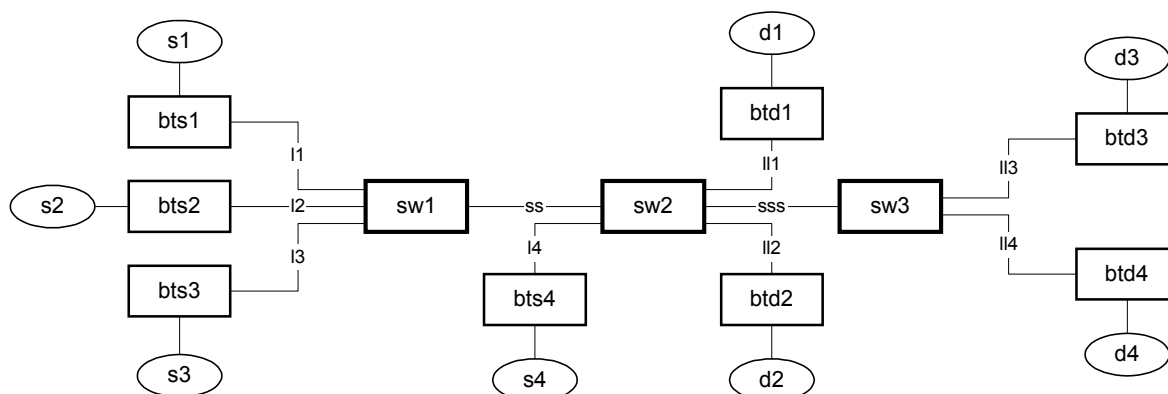
- Konfigurace se dvěma zdroji, které sdílí jednu společnou linku. Pomocí konfigurace s více zdroji testujeme minimální zpoždění a délku fronty.
- Konfigurace se třemi stejnými zdroji, které sdílí jednu společnou linku. Tato konfigurace prověřuje chování algoritmu přepínače v případě, že počáteční přenosové rychlosti zdrojů ICR jsou různé.
- Konfigurace se dvěma zdroji – nestálý provoz. Tato konfigurace zkoumá vliv připojení nového zdroje provozu na ostatní sestavená spojení a následně vliv odpojení zdroje provozu na ostatní sestavená spojení s ohledem na využití linky.
- Konfigurace „Parking lot“. Tato konfigurace je užitečná pro detailnější sledování, zda přidělování dostupné přenosové kapacity probíhá spravedlivě.
- Konfigurace „Upstream bottleneck“. Také tato konfigurace prověřuje, zda je algoritmus přepínače schopen spravedlivě rozdělit dostupnou přenosovou kapacitu a přitom optimálně využít dostupnou přenosovou kapacitu linky.
- Konfigurace se dvěma zdroji a VBR provozem. Tato konfigurace prověřuje chování algoritmu přepínače při proměnné ABR kapacitě.

- Konfigurace se dvěma zdroji, kde jeden zdroj je stálý a druhý zdroj vysílá shluky buněk. Tato konfigurace prověřuje chování algoritmu přepínače při provozu se shluky.

5.3 Chování při různých parametrech ABR spojení

V předchozích simulacích byly použity zdroje provozu se stejnými přenosovými parametry MCR a PCR, aby bylo možno porovnat výsledky simulací pro DSA algoritmus přepínače s výsledky simulací pro některý jiný algoritmus přepínače. Například pro algoritmus přepínače ERICA nebo ERICA+ viz. [2].

V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulace pro již dříve uvedenou konfiguraci „Upstream bottleneck“ viz. obrázek 5.2. Zdroje provozu v konfiguraci mají rozdílné požadavky na spojení (rozdílné přenosové parametry MCR a PCR). Daná konfigurace ověřuje hlavní přínos DSA algoritmu přepínače, což je rozdělení dostupné přenosové kapacity linky mezi spojení podle celkových požadavků jednotlivých zdrojů.



Obr. 5.2: Konfigurace „Upstream bottleneck“ se čtyřmi zdroji provozu

5.3.1 Parametry jednotlivých zdrojů pro konfiguraci „Upstream bottleneck“

Tato konfigurace umožňuje prověřit, zda je DSA algoritmus přepínače schopen spravedlivě rozdělit přenosovou kapacitu a přitom optimálně využít dostupnou přenosovou kapacitu linky, při různých požadavcích zdrojů na spojení.

- s1 -> PCR1 = ICR1 = 70 Mbit/s , MCR1 = 0 Mbit/s
- s2 -> PCR2 = ICR2 = 65 Mbit/s , MCR2 = 25 Mbit/s
- s3 -> PCR3 = ICR3 = 120 Mbit/s , MCR3 = 5 Mbit/s
- s4 -> PCR4 = ICR4 = 100 Mbit/s , MCR4 = 30 Mbit/s

Hodnoty parametrů algoritmu přepínače při simulaci

1. Všechny linky mají délku 1 km v prostředí LAN a 1000 km v prostředí WAN
2. Měřicí interval stavu uzlu je v prostředí LAN 300 μs a v prostředí WAN 1000 μs
3. Parametry a, b (průsečík dvou hyperbol ve funkci řídicí zpoždění ve frontě) jsou v prostředí LAN $a=1,15$; $b=1,05$ a v prostředí WAN $a=1,15$; $b=1$
4. Zpoždění ve frontě T_0 je v prostředí LAN 100 μs a v prostředí WAN 500 μs
5. Parametr omezující maximální část dostupné kapacity určené k vyprazdňování fronty QDLF (Queue Drain Limit Factor) je v prostředí LAN 0,8 a v prostředí WAN 0,5

Všechny linky pracují s přenosovou rychlostí 155,52 Mbit/s. Simulace byly provedeny v prostředí LAN i WAN s odpovídajícími parametry algoritmu přepínače. V prostředí LAN byla navíc provedena simulace pro nastavení parametru $b = 1$.

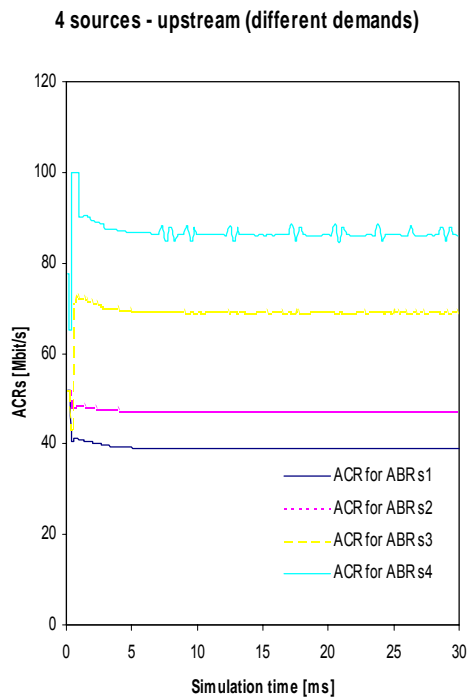
5.3.2 Výsledky simulací

Na obrázku 5.3 a obrázku 5.4 jsou graficky znázorněny výsledky simulace v prostředí LAN. Zdroje s_1 , s_2 a s_3 sdílejí linku „ss“ a jsou limitovány přenosovou kapacitou této linky. Při daném nastavení parametrů zdrojů je maximální požadovaná přenosová rychlost zdroje s_4 větší než zbytková dostupná kapacita linky „sss“, což je dostupná kapacita linky „sss“ po odečtení kapacity přidělené zdroji s_3 , který je limitován na lince „ss“. Za této situace dosahuje využití obou linek hodnoty 100% viz. obrázek 5.4 a) i b).

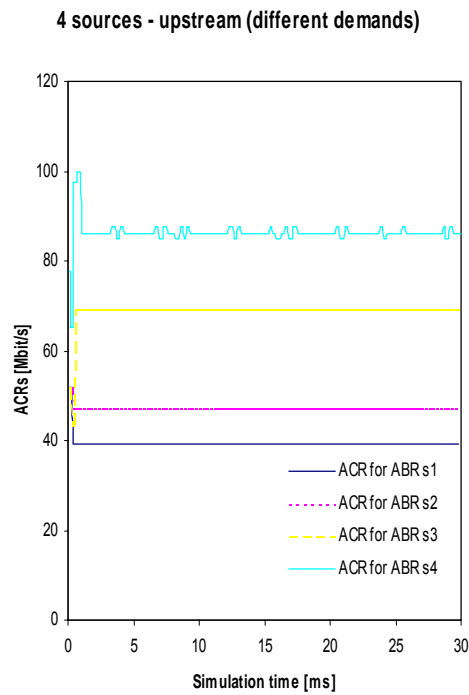
Pro konfiguraci „Upstream bottleneck“ dochází k ustálení přenosových rychlostí. Lepších výsledků je zde dosaženo pro nastavení parametru algoritmu přepínače $b = 1$. Drobné výkyvy přenosové rychlosti zdroje s_4 jsou opět způsobeny vlivem vypočtu průměrného počtu přenesených buněk během měřicího intervalu.

Na obrázku 5.5 jsou graficky znázorněny výsledky simulace v prostředí WAN. Jak je možno vidět z daného obrázku 5.5, opět dochází k ustálení přenosových rychlostí na požadovaných hodnotách a využití obou linek se rovněž ustálí na hodnotě 100%.

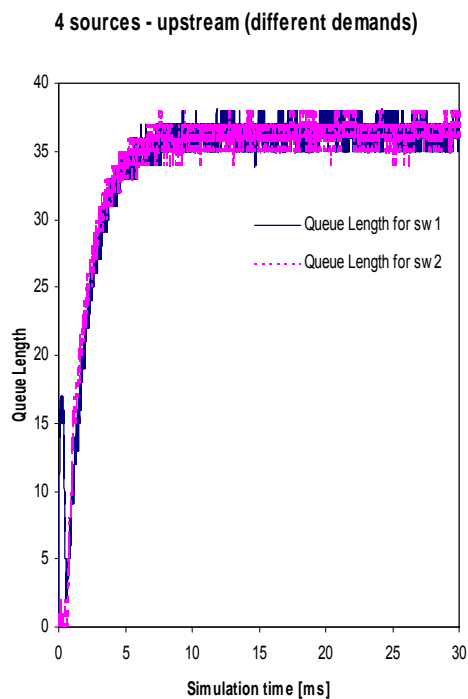
Hlavním rozdílem mezi prostředím LAN a WAN je doba potřebná k tomu, aby se první řídicí buňka RM vrátila do zdroje. Zatím co v prostředí LAN je tato doba pro zdroj s_1 v testované konfiguraci „Upstream bottleneck“ 30 μs , je tato doba v prostředí WAN pro stejnou konfiguraci tisíckrát větší a to 30 ms.



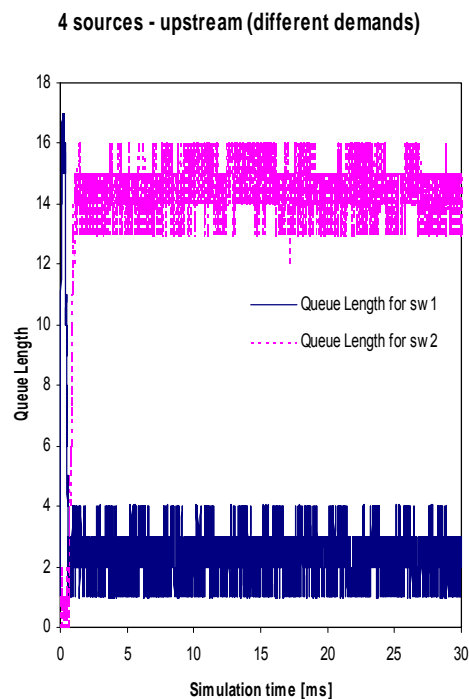
a) Přenosová rychlost při $b = 1,05$



b) Přenosová rychlost při $b = 1$



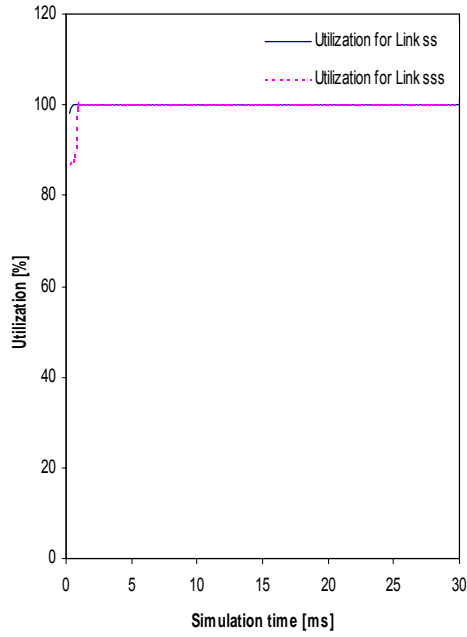
c) Délka fronty při $b = 1,05$



d) Délka fronty při $b = 1$

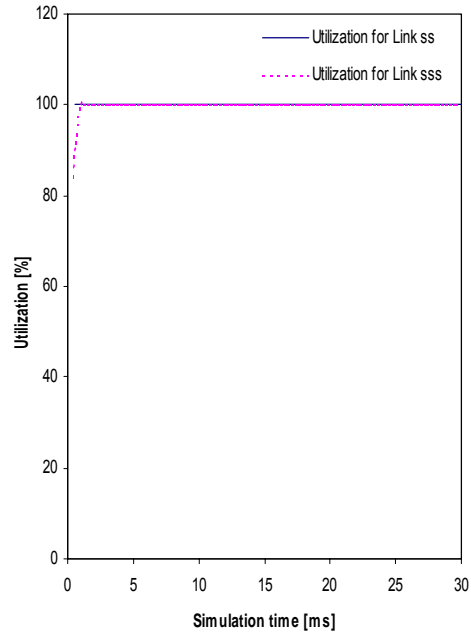
Obr. 5.3: Výsledky simulace pro konfiguraci „Upstream bottleneck“ se čtyřmi zdroji v prostředí LAN pro různé zdroje, kapacity linek jsou 155,52 Mbit/s

4 sources - upstream (different demands)



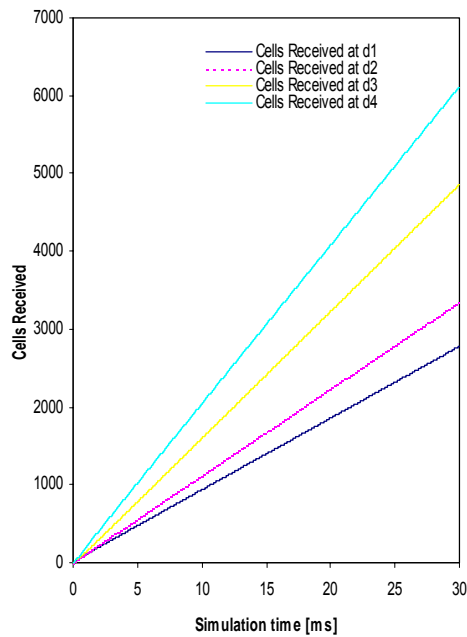
a) Využití linky při $b = 1,05$

4 sources - upstream (different demands)



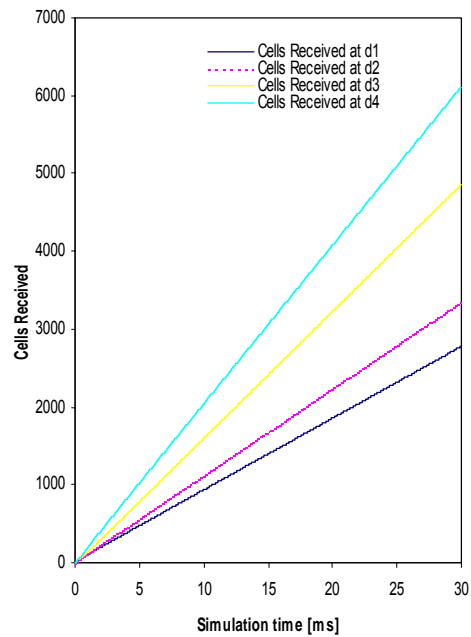
b) Využití linky při $b = 1$

4 sources - upstream (different demands)



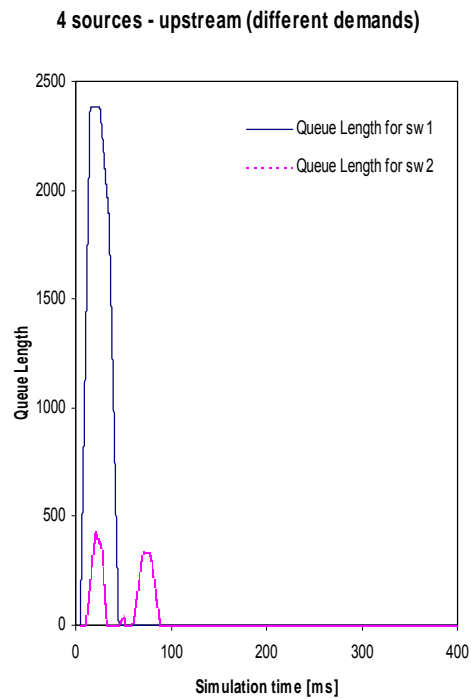
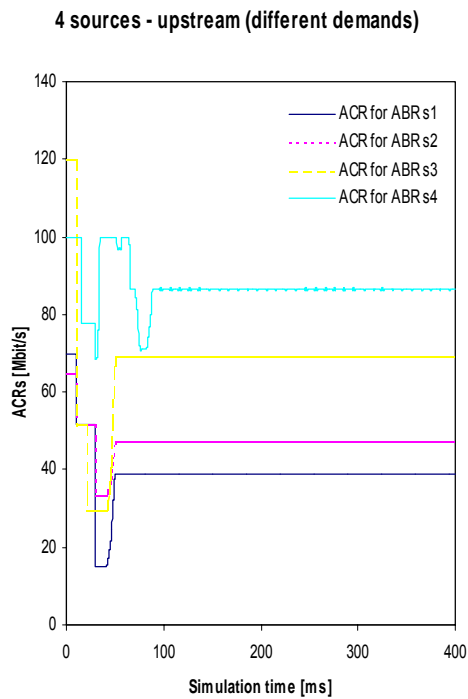
c) Přenesené buňky při $b = 1,05$

4 sources - upstream (different demands)



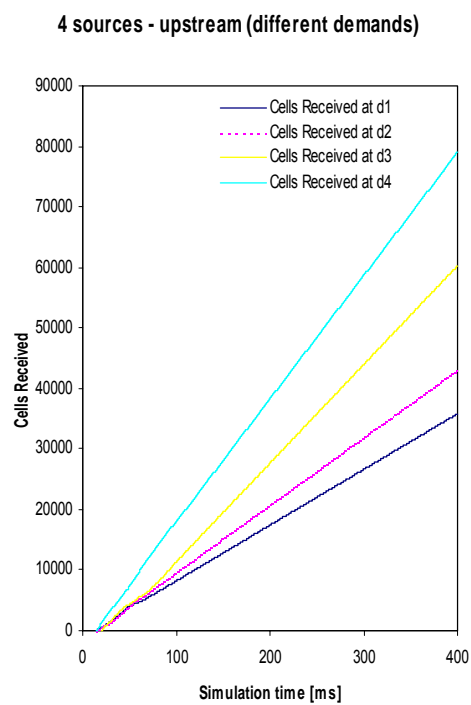
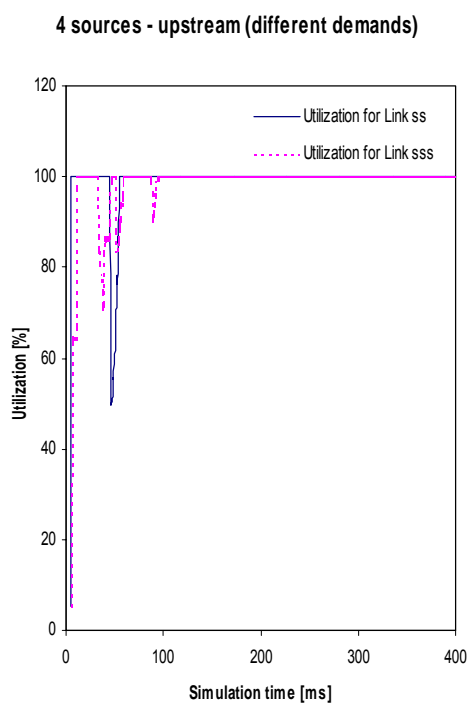
d) Přenesené buňky při $b = 1$

Obr. 5.4: Výsledky simulace pro konfiguraci „Upstream bottleneck“ se čtyřmi zdroji v LAN pro různé zdroje, kapacity linek jsou 155,52 Mbit/s (pokračování)



a) Přenosová rychlost

b) Délka fronty



c) Využití linky

d) Přenesené buňky

Obr. 5.5: Výsledky simulace pro konfiguraci „Upstream bottleneck“ se čtyřmi zdroji v prostředí WAN pro různé zdroje, kapacity linek jsou 155,52 Mbit/s

ZÁVĚR

Disertační práce je logicky rozdělena do dvou částí. První část se věnuje optimálnímu sdílení dostupné přenosové kapacity. V této části práce jsem se zabýval studiem problematiky řízení toku dat pro třídu služeb ABR. V době zpracování práce již byla k dispozici doporučení ATM fóra „Traffic Management Specification Version 4.0“ [1]. Toto doporučení specifikuje mechanismus řízení toku dat a to formou Zpětné vazby pomocí speciálních řídicích RM buněk. Doporučení dále specifikuje strukturu informací přenášených v RM buňkách.

Určení hodnoty parametru ER (Explicit Rate), který je důležitý pro „Explicit Rate“ přepínače, je ponecháno na výrobcích přepínačů. Výpočet správné hodnoty ER zajišťuje algoritmus přepínače na základě některého z kritérií optimálního sdílení dostupné přenosové kapacity.

Cílem této části práce bylo navržení nového kritéria optimálního sdílení, které by rovnoměrně uspokojovalo přenosové požadavky všech spojení. Přenosové požadavky jsou dohodnuty při sestavování spojení.

V disertační práci bylo navrženo „Demands Satisfying Allocation“ (DSA) kritérium optimálního sdílení přenosové kapacity. DSA kritérium bylo následně porovnáno s dalšími známými kritérii. Z porovnávaných kritérií vyšlo navržené DSA kritérium nejlépe, protože splnilo cíl rovnoměrně uspokojit přenosové požadavky ve všech testovaných případech.

Při návrhu DSA kritéria byla pozornost věnována též chování kritéria při provozu. Optimálním případem rozdělení přenosové kapacity v síti je rozdělení Max-Min. Toto rozdělení zajistí nejefektivnější využití linek v síti. Navržené DSA kritérium splňuje i požadavek na Max-Min chování a zajišťuje tedy efektivní využití linek.

Druhá část disertační práce se věnuje implementaci DSA kritéria optimálního sdílení do algoritmu přepínače.

V disertační práci byl navržen nový DSA algoritmus přepínače, který řídí tok dat třídy služeb ABR a pro přidělování optimální přenosové kapacity jednotlivým spojením využívá DSA kritéria.

Dalším významným dílem této části práce bylo vytvoření přepínače s navrženým DSA algoritmem v simulačním prostředí [22],[23]. V upraveném simulačním prostředí bylo provedeno komplexní ověřování činnosti DSA algoritmu přepínače. Počítačové simulace chování algoritmu byly provedeny pro několik testovacích konfigurací sítě viz. [2], [16], [17]. Výsledky simulací byly zpracovány do grafů.

Výsledky simulací pro zdroje provozu se stejnými přenosovými parametry MCR a PCR byly porovnány s odpovídajícími výsledky simulací pro algoritmus přepínače ERICA + [2]. Z tohoto porovnání vyplývá, že navržený DSA algoritmus přepínače dosahuje srovnatelné efektivity při stejných hodnotách přenosových parametrů MCR a PCR jednotlivých zdrojů. DSA algoritmus přepínače navíc pracuje efektivně a

spravedlivě i při rozdílných hodnotách přenosových parametrů MCR a PCR jednotlivých zdrojů.

DSA algoritmus přepínače, navržený v disertační práci, je plně funkční algoritmus řízení toku dat ABR třídy služeb pro „Explicit Rate“ přepínače. Jak je patrné z výsledků simulací, je daný algoritmus stabilní ve všech testovaných stavech. Což znamená, že vždy dojde k ustálení přenosové rychlosti zdrojů a nebo k udržení konečné délky fronty v přepínačích.

Chování navrženého DSA algoritmu přepínače lze ovlivnit nastavením jeho parametrů. Při řízení chování pomocí nastavení parametrů DSA algoritmu přepínače můžeme sledovat dva významné cíle. Jeden z cílů je dosažení rychlého ustálení přenosových rychlostí zdrojů a druhý je maximální využití dostupné přenosové kapacity linky. Tyto dva požadované cíle chování DSA algoritmu přepínače jsou často protichůdné a proto je nutno nastavení parametrů DSA algoritmu přepínače volit kompromisem.

Věřím, že závěry této disertační práce, bude možno využít při dalším zkoumání a implementaci ABR třídy služeb a jejího řízení do síťových přepínačů.

INTRODUCTION

The ABR (Available Bit Rate) service class is one of ATM (Asynchronous Transfer Mode) service classes [3], [4]. The key feature of ABR is that the source performs dynamic traffic shaping based on the feedback received from the network. The source thus adapts its rate to changing network conditions. This feature enables the ABR service to achieve high utilisation of link capacity in ATM networks.

The link capacity is shared by all ATM service classes. The CBR (Constant Bit Rate) and the VBR (Variable Bit Rate) service classes have a higher priority than the ABR service class. Therefore the CBR and the VBR get a share of the link bandwidth first. The “left-over” capacity is used by the ABR and the UBR (Unspecified Bit Rate) services, with ABR typically having priority over UBR [2].

The switch algorithm in each switch calculates the information which is conveyed as a feedback. The main part of this algorithm is the calculation of fair share. For the calculation of fair share it is possible to use several fairness criteria.

6. THE PRINCIPLE OF ABR SERVICE CLASS CONTROL

The sources generate forward RM cells (FRMs) and send them together with data cells to destinations through the network. All switches and destinations can modify important information (such as available bandwidth in ER (Explicit Rate) field, state of congestion in CI (Congestion Indication) field, and impending congestion in NI (No Increase) field), which is conveyed in RM cells, according to their actual state. The destinations receive FRMs, they set their state information and send them back to the sources as backward RM cells (BRMs). The switches usually modify only BRMs because only decreasing of ER field and setting of CI and NI fields are possible. When the sources receive BRMs, they adapt their current rate according to the received information. The source, destination and switches have a specified behaviour for a variety of the network states. For a detailed description of all specified behaviours see [1].

6.1 There are three ways for switches to give feedback to the sources

First, each cell header contains an EFCI (Explicit Forward Congestion Indication) bit, which can be set by a congested switch. Such switches are called “binary” or “EFCI” switches. The destinations then collect this EFCI bit information and send it back to the source in BRMs.

Second, congested switches can set CI and NI fields of BRM cells. Such switches are called “relative rate marking” switches.

Third, congested switches can reduce the ER field in BRMs to any desired value. Such switches are called “explicit rate” switches.

6.2 Traffic parameters

At the time of connection setup, the ABR sources negotiate several operating parameters with the network.

PCR – Peak Cell Rate – represents the maximum rate at which the ABR source may ever send. The actual rate is subject to the control information.

MCR – Minimum Cell Rate – may be specified as zero. The bandwidth available from the network may vary, but shall not become less than MCR.

ACR – Allowed Cell Rate – the rate at which a source is allowed to send at any particular instant. The ACR is dynamically changed between PCR and MCR.

ICR – Initial Cell Rate – the rate which is used at the beginning of the connection and after long idle intervals.

For a complete list of the ABR parameters see [1], [2].

7. FAIR SHARE

Fair share computation is the most important part of the switch algorithm for “explicit rate” switches. There are several ways how to explain what fair share means. For example:

- All connections get an equal part of available bandwidth regardless of their different demands. (Max-Min fairness criterion) [1]
- Connections get a proportional part of available bandwidth depending on their minimum demands, but regardless of their maximum demands. (MCR plus equal share, Allocation proportional to MCR fairness criteria) [1]
- Connections get a proportional part of available bandwidth depending on their different demands. All connection demands are equally satisfied. (Demands Satisfying Allocation fairness criterion)

Define the following parameters:

- A – Total available bandwidth for all ABR connections on a given link
U – Sum of bandwidths of connections bottlenecked elsewhere (including those limited by PCR)
 $B = A - U$, bandwidth to be shared by connections bottlenecked on this link
MCR (i) – Minimum Cell Rate of connection i
PCR (i) – Peak Cell Rate of connection i
n – number of active connections bottlenecked on this link

$$M = \sum_{i=1}^n MCR(i) \quad \text{Sum of MCRs of active connections within } n$$

$$P = \sum_{i=1}^n PCR(i) \quad \text{Sum of PCRs of active connections within } n$$

$$B(i) \quad - \quad \text{Fair allocation for connection } i$$

7.1 „Demands Satisfying Allocation“ fairness criterion

$$B(i) = MCR(i) + (PCR(i) - MCR(i)) * K \quad (2.1)$$

$$\text{where} \quad K = \frac{B - M}{P - M} \quad (2.2)$$

This criterion was designed according to the third explanation of fair share (as defined above). For the calculation of fair share (2.1) three parameters are used. The first and the second are connection parameters MCR and PCR, which represent the minimum and maximum bandwidth demands. The third parameter is fair share factor K , which represents the satisfying of user demands. Fair share factor K is calculated by equation (2.2) from available bandwidth B , sum of MCRs M and sum of PCRs P of active connections bottlenecked on this link.

Example: there are three connections - MCRs are (0, 25, 5) Mbps, PCRs are (70, 65, 120) Mbps and available link capacity is 120 Mbps. Suppose that all connections are bottlenecked on this link.

$$P = \sum_{j=1}^n PCR(j) = \sum_{j=1}^3 PCR(j) = 255 \text{ Mbit} / s$$

$$M = \sum_{j=1}^n MCR(j) = \sum_{j=1}^3 MCR(j) = 30 \text{ Mbit} / s$$

$$K = \frac{B - M}{P - M} = \frac{120 - 30}{255 - 30} = 0.4$$

$$B(1) = MCR(1) + (PCR(1) - MCR(1)) * K = 0 + (70 - 0) * 0.4 = 28 \text{ Mbit} / s$$

$$B(2) = MCR(2) + (PCR(2) - MCR(2)) * K = 25 + (65 - 25) * 0.4 = 41 \text{ Mbit} / s$$

$$B(3) = MCR(3) + (PCR(3) - MCR(3)) * K = 5 + (120 - 5) * 0.4 = 51 \text{ Mbit} / s$$

Hence allocation is (28, 41, 51) Mbps and Satisfying of all connections is 40%.

DSA fairness criterion is one of fairness criteria but it is the only one which equally satisfies all demands from all users. Existing fairness criteria give a part of available bandwidth to the connections with regard to their minimum demands or regardless of their demands.

8. DSA SWITCH ALGORITHM FOR ABR SERVICE CLASS CONTROL

The main goal of switch algorithms for “explicit rate” switches is achieving a fair and effective share of link capacity. The switch algorithms, which use existing fairness criteria, achieve the Max-Min fair share based on equal share. It means that fair share is calculated from the available bandwidth and from the number of connections.

The DSA switch algorithm uses Demands Satisfying Allocation (DSA) fairness criterion and it is designed to achieve the Max-Min fair share based on equal satisfaction of demands. Practical implementations of DSA fairness criterion in the DSA switch algorithm are given in the next part of the paper.

First of all we use cell counting through the measurement interval. For VBR (Variable Bit Rate) and CBR (Constant Bit Rate) cells we use per-class counting, and for ABR cells we use per-connection (per-VC) counting. At the end of measurement interval we have to calculate the DSA parameters which were defined in the previous section: Total available bandwidth “A” for all ABR connections on a given link, sum “U” of bandwidths of ABR connections bottlenecked elsewhere, sum “M” of MCR (i) of active connections within n , and sum “P” of PCR (i) of active connections within n .

Bandwidth “B” to be shared by connections bottlenecked on this link:

$$B = \max((A - U), 0)$$

From these parameters we calculate fair share factor “K” by equation (2.2).

The above calculations are performed once per switch per measurement time interval. When the switch receives the RM cell in backward direction, it will calculate the DSA share by equation (2.1).

The DSA share is calculated once per connection per measurement time interval.

When the switch receives the RM cell in forward direction, it will decide whether or not the connection is bottlenecked elsewhere.

9. EVALUATION OF DSA SWITCH ALGORITHM

The DSA switch algorithm was tested for different network configurations by simulation [2], [16], [17]. In these configurations, sources with equal traffic parameters MCR and PCR were used. The simulation results from tested network configurations were compared with results for the ERICA+ switch algorithm [2]. The simulation results for both algorithms are comparable when the sources used have equal traffic parameters MCR and PCR.

For the next network configuration, „Upstream bottleneck“, we used sources with different traffic parameters MCR and PCR. The main goal of DSA switch algorithm was tested in this configuration. It means that we tested the satisfaction of connection demands.

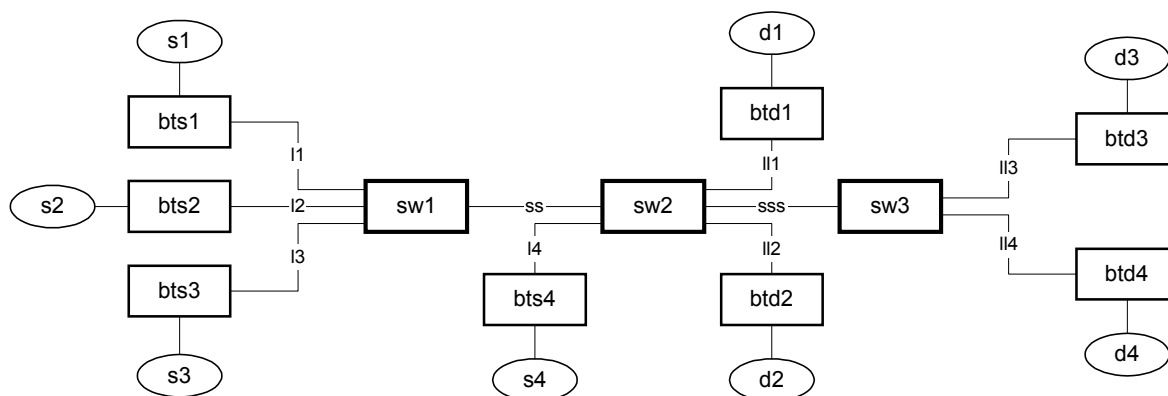


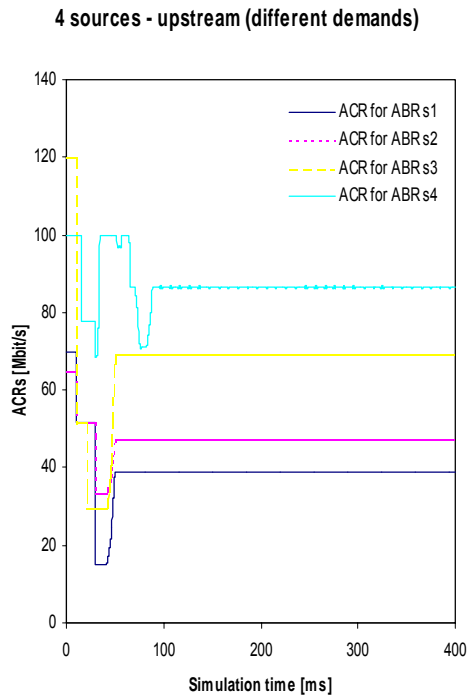
Figure 9.1: Configuration „Upstream bottleneck“ with four different sources

Simulation results for the configuration in Figure 4.1 in WAN are graphically presented in Figure 4.2. For the WAN network feedback time is longer than measurement time interval. The network therefore takes some time, which is proportional to feedback time, to achieve steady state.

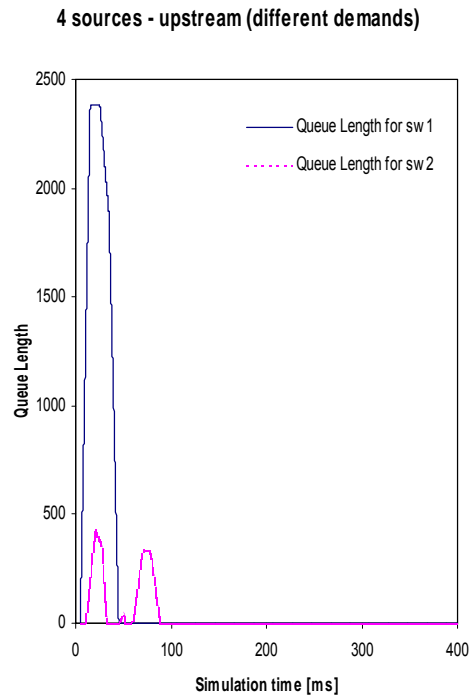
CONCLUSION

In the PhD Dissertation the principle of ABR traffic flow control was described. The ABR parameters were presented and several fairness criteria discussed. A new fairness criterion, “Demands Satisfying Allocation” (DSA), was proposed and the DSA switch algorithm for “explicit rate” switches was designed. Finally, the behaviour of DSA switch algorithm was evaluated by simulation.

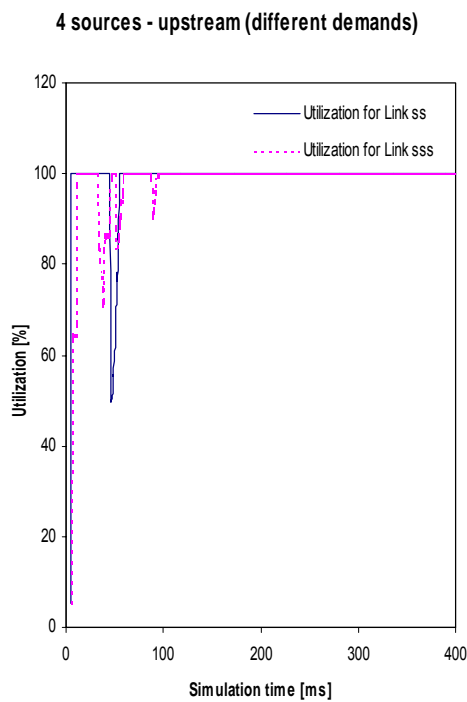
The switch component with DSA switch algorithm was programmed in “ATM/HFC Network Simulator” simulation program, version 4.0 [22], [23], and it was tested for different network configurations.



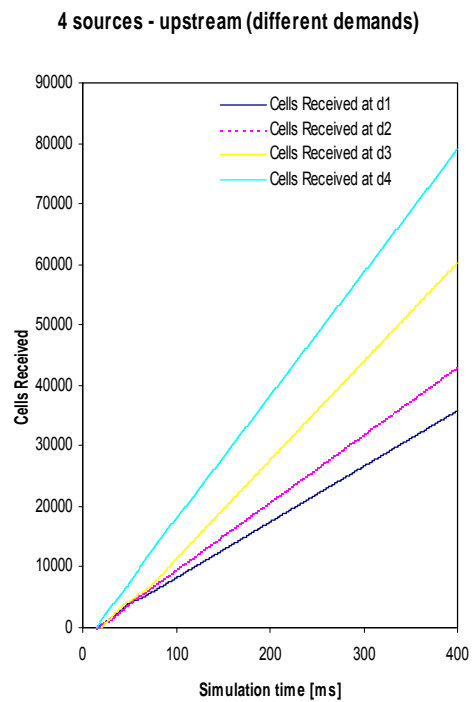
a) Available Cell Rate



b) Queue Length



c) Link Utilization



d) Cells Received

Figure 9.2: Simulation results for configuration „Upstream bottleneck“ with four different sources in WAN, links' capacity is 155.52 Mbit/s. $PCR1=ICR1= 70$ Mbit/s, $MCR1= 0$ Mbit/s, $PCR2=ICR2= 65$ Mbit/s, $MCR2= 25$ Mbit/s, $PCR3=ICR3= 120$ Mbit/s, $MCR3= 5$ Mbit/s, $PCR4=ICR4= 100$ Mbit/s, $MCR4= 30$ Mbit/s

LITERATURA

- [1] ATM Forum. The ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0. April 1996.
- [2] Kalyanaraman, S. Traffic Management for the Available Bit Rate (ABR) Service in Asynchronous Transfer Mode (ATM) Networks. *PhD Thesis*. The Ohio State University, August 1997, 429 p.
- [3] Klačka, L. ATM – zatracovaná i vyzdvižovaná budoucnost. *CONNECT*. č. 6, 1996 – č. 3, 1998.
- [4] Siegmund, G., Prager, E. *ATM technika pro širokopásmové sítě ISDN*. 1. české vyd., Praha: Hüthig & Beneš, 1997, 325 s.
- [5] Vandalore, B., Fahmy, S., Jain, R., Goyal, R., Goyal, M. Overload Based Explicit Rate Switch Schemes with MCR Guarantees. *ICCCN '99 Boston*, October 11-13, 1999, 7 p.
- [6] Duresi, A., Jain, R., Babic, G. Experience with ATM Switch Performance Testing. *Accepted at ICON'99*, September 1999.
- [7] Vandalore, B., Fahmy, S., Jain, R., Goyal, R., Goyal, M. General Weighted Fairness and its Support in Explicit Rate Switch Algorithms. *Submitted to Computer Communications Journal*, February 1999, 28 p.
- [8] Fahmy, S., Jain, R., Goyal, R., Vandalore, B. ABR Engineering: Roles and Guidelines for Setting ABR Parameters. *Submitted to the Journal of Computer Networks*, February 1999.
- [9] Goyal, R., Jain, R., Cai, X., Fahmy, S., Vandalore, B. A Rate Allocation Scheme for ATM-ABR Virtual Source Virtual Destination Networks. *Submitted to Journal of Computer Networks*, January 1999.
- [10] Fahmy, S., Jain, R., Goyal, R., Vandalore, B. Fairness for ABR multipoint-to-point connections. *Proceedings of SPIE Symposium on Voice, Video and Data Communications*, Vol. 3530, Conference on Performance and Control of Network Systems II, Boston, MA, November 1998, p. 131-142.
- [11] Goyal, R., Cai, X., Jain, R., Fahmy, S., Vandalore, B. Per-VC Rate Allocation Techniques for ATM-ABR Virtual Source Virtual Destination Networks. *Proceedings of Globecom '98*, Australia, November 1998.
- [12] Vandalore, B., Jain, R., Goyal, R., Fahmy, S. Dynamic Queue Control Functions for ATM ABR Switch Schemes: Design and Analysis. *(to appear) Computer Networks and ISDN Systems*, November 1998, 19 p.
- [13] Vandalore, B., Fahmy, S., Jain, R., Goyal, R., Goyal, M. A Definition of General Weighted Fairness and its Support in Explicit Rate Switch Algorithms. *Proceedings of Sixth International Conference on Network Protocols 1998 (ICNP'98)*, Austin, TX, October 13-16, 1998, p. 22-30.

- [14] Vandalore, B., Jain, R., Goyal, R., Fahmy, S. Design and Analysis of Queue Control Functions for Explicit Rate Switch Schemes. *Proceedings of IC3N '98*, Lafayette, LA, October 1998, p. 780-786.
- [15] <http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/papers.html>
- [16] Golmie, N., Su, D. Analysis of the Rate-Based Flow Control Mechanism for Available Bit Rate Traffic in ATM Networks. *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, Maryland 20899, USA.
- [17] Golmie, N., Saintillan, Y., Su, D. ABR Switch Mechanism: Design ISSUES and Performance Evaluation. *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, Maryland 20899, USA.
- [18] Prokeš, J. DSA Switch Algorithm for ABR Service Class Control. *Proceeding of International Seminar: Reserch in Telecommunication Technology - RTT'99*, Praha, Karlštejn, September 1999, s. 67-70.
- [19] Prokeš, J. The principle of ABR service class control. *Proceedings of International Conference Telecommunications and Signal Processing – TSP 99*, Brno, September 1999.
- [20] Prokeš, J., Kapoun, V. Kritéria optimálního sdílení přenosového pásma pro třídu služeb ABR. *Sborník prací studentů a doktorandů*, VUT FEI Brno 1999.
- [21] Prokeš, J. Třídy služeb ATM a jejich význam. *Sborník konference Telekomunikace 98*, FEI VUT, Brno 1998.
- [22] Golmie, N. The NIST ATM/HFC Network Simulator - Operation and Programming Guide. Version 4.0, NISTIR 5703R2, *National Institute of Standards and Technology*, USA, December 1998.
- [23] http://w3.antd.nist.gov/Hsntg/prd_atm-sim.html

CURRICULUM VITAE

Narodil jsem se 31. 1. 1973 v Brně. Po absolvování základní školy jsem byl přijat na střední průmyslovou školu elektrotechnickou v Brně, kterou jsem v roce 1991 ukončil maturitou. Ve stejném roce jsem byl přijat na Fakultu elektrotechniky a informatiky VUT v Brně. V roce 1996 jsem úspěšně složil státní závěrečnou zkoušku na Ústavu telekomunikací FEI VUT Brno. Ve stejném roce jsem byl na tomto ústavu přijat na interní postgraduální doktorandské studium.

V červnu roku 1998 jsem úspěšně složil rigorózní zkoušku. Během svého studia jsem se zaměřoval na technologii vysokorychlostních sítí ATM, zvláště pak na rozvoj služeb poskytovaných těmito sítěmi. V roce 1999 jsem v rámci projektu SOCRATES/ERASMUS absolvoval tříměsíční studijní pobyt na ESIEE v Paříži, kde jsem spolupracoval na vývoji standardů pro třetí generaci mobilních přístupových sítí UMTS.

Publikoval jsem celkem 9 prací. V průběhu doktorandského studia jsem spolupracoval na řešení dvou grantů z FRVŠ a jednoho grantu VUT Brno.