



**UNIVERSITATEA TEHNICĂ**  
DIN CLUJ-NAPOCA

FACULTATEA DE ELECTRONICĂ, TELECOMUNICAȚII ȘI  
TEHNOLOGIA INFORMAȚIEI

ing. Tudor Mihai BLAGA

# **TEZA DE DOCTORAT**

## **REZUMAT**

CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂTĂȚIREA RUTĂRII MULTICAST

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof.dr.ing. Virgil DOBROTĂ

2007



# Cuprins

<b>1</b>	<b>Introducere</b>	<b>1</b>
1.1	Transmisia multicast . . . . .	1
1.1.1	Modelul multicast IP . . . . .	1
1.1.2	Soluții alternative multicast . . . . .	2
1.2	Scopul tezei . . . . .	3
1.3	Organizarea tezei de doctorat . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Contribuții la îmbunătățirea rutării multicast</b>	<b>5</b>
2.1	Contribuții originale în această teză . . . . .	5
2.1.1	Studiul și clasificarea protocoalelor de rutare . . . . .	5
2.1.2	Studiul și clasificarea tehnologiilor AGCS . . . . .	5
2.1.3	Determinarea performanțelor rutării multicast . . . . .	6
2.1.4	Efectele tunelării bidirecționale în Mobile IPv6 . . . . .	7
2.1.5	Analiza automatului de stare BGP4 . . . . .	8
2.1.6	Determinarea performanțelor tehnologiilor AGCS . . . . .	8
2.1.7	Îmbunătățirea tehnologiei CastGate . . . . .	10
2.1.8	Extinderea tehnologiei CastGate . . . . .	10
2.1.9	Îmbunătățirea tehnologiei XCast/XCast+ . . . . .	11
2.1.10	Mecanism de translație multicast IPv4/IPv6 . . . . .	12
2.2	Remarci finale . . . . .	13
2.3	Premii obținute . . . . .	14
2.4	Publicații citate în teză . . . . .	14
2.5	Referate de doctorat și rapoarte tehnice . . . . .	15
2.6	Publicații în afara scopului acestei teze . . . . .	15
	<b>Bibliografie</b>	<b>17</b>



# Capitolul 1

## Introducere

Odată cu dezvoltarea Internetului au crescut și nevoile de comunicare, de la text s-a ajuns la text însoțit de imagini, accesibil prin WWW (World Wide Web), cerințele la ora actuală fiind conținut audio/video în timp real, de exemplu IPTV (Internet Protocol Television). Ca urmare modele și mecanismele folosite pentru comunicare trebuie să evolueze. Cerințele pentru distribuirea datelor audio-video în timp real la un număr foarte mare de clienți răspândiți în Internet diferă față de necesitățile transmisiei unei pagini web prin HTTP (HyperText Transfer Protocol) sau descărcării unui fișier prin FTP (File Transfer Protocol).

Modelele disponibile, *unicast* și *broadcast*, nu corespund noilor cerințe. Comunicarea *unicast* implică existența unei surse și a unei destinații, pentru transmiterea acelorași date la mai multe destinații fiind necesare căi diferite, pentru fiecare receptor fiind transmisă o copie a fluxului audio-video. Rezultă că folosirea *unicast* nu oferă o soluție deoarece odată cu creșterea numărului de receptori va crește încărcarea sursei, dar și a rețelei. Cealaltă alternativă este transmisia *broadcast* ce permite reducerea debitului ocupat, în comparație cu *unicast*. Pentru a trimite date tuturor stațiilor dintr-o rețea locală se transmite o singură copie a pachetului. Această soluție pare mai potrivită dar ea este insuficientă deoarece, foarte probabil, nu toți receptorii se vor găsi în aceeași rețea. O alternativă este oferită de modelul **multicast** ce permite comunicarea între mai multe surse și mai mulți receptori într-un mod optim.

### 1.1 Transmisia multicast

Transmisia multicast permite trimiterea datelor la mai mulți receptori, într-un mod eficient, fără a fi necesară o copie a pachetului pentru fiecare destinație. Receptorii pot fi localizați oriunde în Internet, ei decidând dacă doresc să recepționeze datele.

#### 1.1.1 Modelul multicast IP

Modelul multicast pentru IPv4 (Internet Protocol), referit în această teză și sub denumirea de *multicast nativ*, a fost propus de Stephen Deering în teza de doctorat, fiind apoi adoptat ca standard [Deering 89]. Caracteristicile acestuia sunt:

- **semantică IP:** sursa poate trimite pachete multicast în orice moment, fără să se înscrie sau să planifice transmisia. Modelul multicast IP folosește UDP (User Datagram Protocol), livrarea datelor fiind de tipul best-effort.

- **grup deschis:** sursa trebuie să cunoască doar adresa grupului multicast, fără a ști membrii grupului și fără a se înscrie la acel grup. Un grup poate avea un număr nelimitat de surse.
- **grup dinamic:** membrii grupului multicast pot să se înscrie sau să părăsească grupul oricând doresc, fără să trebuiască să negocieze cu vreo entitate de management centralizat.

Acest model se referă doar la stațiile finale, el nediscutând modalitățile în care rețeaua realizează rutarea multicast, în acest scop fiind folosite protocoale de rutare dedicate. Modelul nu specifică nici modul de alocare al adreselor multicast, mecanismele pentru asigurarea calității și securității serviciului.

Modelul multicast a fost introdus sub forma unei extensii în IPv4 acesta fiind motivul pentru care standardul IPv6 a fost proiectat de la început incluzând mecanismele necesare transmisiilor multicast, implementarea acestora fiind obligatorie pentru toate stațiile IPv6.

Pentru a distribui datele de la surse la receptori sunt necesare două tipuri de protocoale. Primul tip este folosit de stații pentru a se înscrie și pentru a părăsi grupul multicast, funcția de managementul grupului fiind realizată în IPv4 de IGMP (Internet Group Management Protocol) [Fenner 97], iar în IPv6 de MLD (Multicast Listener Discovery) [Vida 04]. Al doilea tip sunt protocoalele de rutare multicast propriu-zise ce construiesc arborii de distribuție a datelor de la surse la receptori. Rutarea multicast în interiorul unui sistem autonom se realizează cu ajutorul următoarelor protocoale: DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol) [Waitzman 88], MOSPF (Multicast extensions for Open Shortest Path First) [Moy 94], PIM (Protocol Independent Multicast) [Estrin 98] sau CBT (Core-Based Tree) [Ballardie 97]. Mecanismele folosite pentru transmisia multicast între sistemele autonome sunt mai complexe putând fi utilizate protocoalele MSDP (Multicast Source Discovery Protocol) [Fenner 03] și MBGP (Multiprotocol Border Gateway Protocol) [Bates 00]. Multe dintre routerele folosite în Internet implementează aceste protocoale dar nu le folosesc nepermitând astfel rutarea traficului multicast.

### 1.1.2 Soluții alternative multicast

Ca urmare a faptului că multicastul nativ nu este disponibil la scală largă în Internet, dar și pentru a rezolva o parte dintre limitările modelului multicast IP, au apărut o serie de tehnologii alternative multicast, sau servicii alternative de comunicare în grup, numite AGCS (Alternative Group Communication Service). Acestea grupează sub o singură denumire toate mecanismele care au abilitatea de a transmite informația de la o sursă simultan la mai mulți receptori.

Tehnologiile AGCS permit depășirea limitărilor rutării multicast native, ele putând fi folosite pentru a interconecta regiunile care suportă multicast, sau în mediile în care rutarea nativă multicast nu este potrivită, cum ar fi rețelele ad-hoc și rețele mobile fără o infrastructură fixă. Altă situație ce poate fi rezolvată prin folosirea AGCS este cazul în care avem un număr mare de grupuri multicast cu un număr mic și foarte dinamic de receptori. Pentru acest exemplu încărcarea cauzată de schimbul de semnalizări datorat protocoalelor multicast native limitează scalabilitatea sistemului. Mecanismele de securitate ca autentificarea, autorizarea, criptarea nu sunt posibile pentru transmisiile multicast native, ele putând fi implementate cu ajutorul serviciilor alternative.

Există o sumedenie de propuneri de mecanisme alternative câteva exemple abordate în această teză fiind: UMTP (UDP Multicast Tunneling Protocol) [Finlayson 03], CastGate [Lie-

fooghe 02], XCast [Boivie 05], XCast+ [Shin 01], ESM (End System Multicast) [Chu 00] și HyperCast [Liebeherr 99].

## 1.2 Scopul tezei

În condițiile în care modelul multicast IP nu s-a răspândit în Internet s-a dorit determinarea caracteristicilor funcționale și a performanțelor protocoalelor de rutare multicast pentru a permite selecția protocolului optim de la caz la caz. În acest scop este necesară alegerea unor parametri obiectivi de performanță (întârzierea de înscriere la grup, traficul de control și întârzierea de rutare și jitterul asociat), determinarea acestora necesitând crearea unor topologii de test precum și o aplicație ce permite analiza traficului multicast.

Lipsa multicastului nativ a dus la apariția a numeroase propuneri alternative, în acest caz dorindu-se clasificarea lor, identificarea celor mai utilizate tehnologii de acest tip și determinarea performanțelor acestora utilizând parametrii corespunzători (stresul, utilizarea resurselor, întinderea, timpul până la primul pachet și traficul de control).

Se poate pune întrebarea cărui strat îi revine sarcina comunicării multicast. Pe o parte avem modelul multicast IP pe stratul rețea, iar pe cealaltă parte sunt propunerile alternative multicast bazate pe mecanisme de strat rețea sau aplicație. Soluția propusă, în urma studiului protocoalelor de rutarea multicast native și a tehnologiilor AGCS, implică folosirea protocolului PIM-SM pentru domeniul local iar pentru accesul multicast inter-domeniu folosirea unei tehnologii alternative, combinând astfel caracteristicile celor două abordări. Astfel au rezultat următoarele propuneri: routerul CastGate cu PIM-SM și XCast++ ce utilizează XCast/XCast+ și PIM-SM. Prima propunere combină un mecanism de strat rețea și unul de strat aplicație, în timp a doua propunere folosește două mecanisme diferite de strat rețea.

Ambele propuneri sunt bazate pe tehnologii existente lucru ce ușurează răspândirea lor. Determinarea performanțelor acestora permite compararea cu tehnologiile pe care sunt bazate, obținerea unor rezultate apropiate de transmisia multicast recomandând aceste propuneri ca o alternativă viabilă. Scopul final este oferirea de soluții intermediare ce duc la răspândirea utilizării multicast în Internet, până la generalizarea multicast IPv6.

Cazul particular al rețelelor mobile ad-hoc și protocoalele de rutare utilizate pentru acestea nu sunt studiate în această teză. Cele două soluții propuse, CastGate cu PIM-SM și XCast++, nu au fost proiectate pentru fi folosite în acest tip de rețele.

## 1.3 Organizarea tezei de doctorat

Spre deosebire de aceste rezumat, ce conține doar două capitole, teza de doctorat este organizată în șapte capitole, în modul următor:

**Capitolul 1**, intitulat „*Introducere*”, justifică nevoia de multicast în Internet, prezintă pe scurt mecanismele existente și specifică aspectele transmisie multicast vizate în teză.

**Capitolul 2**, intitulat „*Protocoale de rutare unicast și multicast*”, face o clasificare a protocoalelor existente, urmată de descrierea caracteristicilor principalelor protocoale unicast și multicast, accentul fiind pus pe rutarea multicast. Sunt abordate și protocoalele unicast, deoarece înțelegerea acestora este necesară pentru studierea protocoalelor multicast. Mai sunt prezentate principalele probleme ale acestor protocoale.

**Capitolul 3**, este dedicat studiului tehnologiilor AGCS fiind numit „*Servicii alternative de comunicare în grup*”. Clasificarea acestora este însoțită de o scurtă descriere a modului de operare și al mesajelor folosite de următoarele propuneri: CastGate, XCast, XCast+, ESM și HyperCast.

**Capitolul 4**, „*Îmbunătățirea rutării multicast IPv4/IPv6*”, face o analiză a protocoalelor de rutare multicast pornind de la definirea parametrilor de performanță folosiți: întârzierea de înscriere la grup, traficul de control, întârzierea de rutare și jitterul asociat. Pentru realizarea experimentelor a fost proiectată o arhitectură de test ce utilizează implementările de protocoale de rutare multicast IPv4 și IPv6 existente. Parametrii au fost determinați din capturile efectuate pe parcursul testelor, cu ajutorul unei aplicații de analiză a traficului multicast. Tehnologiile folosite la implementarea aplicației, precum și algoritmi de determinare a parametrilor doriți, sunt descriși în acest capitol, iar în continuare sunt prezentate rezultatele obținute. Tot în acest capitol se determină performanțele BGP4 ce influențează rutarea multicast interdomeniu, iar în final se analizează parametrii asociați funcționării Mobile IPv6, ce este utilizat în transmisia multicast pentru nodurile mobile.

**Capitolul 5**, numit „*Evaluarea performanțelor AGCS*”, abordează problema performanțelor tehnologiilor AGCS într-un domeniu local. Prin domeniu local se înțelege o grupare de rețele aflate sub administrație comună. Sunt definiți parametrii utilizați: stresul, utilizarea resurselor, întinderea, timpul până la primul pachet și traficul de control. Cu ajutorul acestora au fost determinate performanțele tehnologiilor CastGate, XCast, XCast+, ESM și HyperCast, pe baza rezultatelor obținute putând fi făcute recomandări privind utilizarea tehnologiilor AGCS.

**Capitolul 6**, propune un mecanism de creștere a eficienței tehnologiilor AGCS, la nivelul domeniului local, prin utilizarea acestora împreună cu protocolul de rutare multicast PIM-SM. În acest capitol, denumit „*Îmbunătățirea rutării multicast*”, se descrie în detaliu propunerea CastGate cu PIM-SM, iar apoi sunt evaluate performanțele acesteia. Se propune extinderea acestei tehnologii pentru a permite tunelarea traficului multicast IPv4 prin tunele IPv4. Se discută apoi efectele folosirii aceluiași mecanism împreună cu XCast, fiind determinate performanțele acestei propuneri numite XCast++. În final se propune și se implementează un nou mecanism de translație a traficului multicast și a mesajelor SAP/SDP asociate între domenii IPv4/IPv6.

**Capitolul 7**, „*Contribuții la îmbunătățirea rutării multicast*”, încheie teza prezentând concluziile obținute și sintetizând contribuțiile aduse la îmbunătățirea rutării multicast.



# Capitolul 2

## Contribuții la îmbunătățirea rutării multicast

### 2.1 Contribuții originale în această teză

În continuare sunt prezentate contribuțiile din teză și concluziile acestora, rezultatele fiind publicate în articole din reviste și la conferințe internaționale de specialitate.

#### 2.1.1 Studiul și clasificarea protocoalelor de rutare

În această teză s-a realizat o clasificare a protocoalelor de rutare unicast și multicast, intradomeniu și interdomeniu. Partea teoretică a fost însoțită de experimente practice pentru protocoalele de rutare bazate pe vector distanță (RIPv1, RIPv2, RIPv3) și pentru protocoalele de rutare bazate pe starea legăturii (OSPFv2, OSPFv3). S-a urmărit realizarea unei infrastructuri de testare pentru protocoalele de rutare multicast (DVMRP și PIM). Soluția fiind bazată pe Linux/FreeBSD, a fost posibilă implementarea ulterioară a contribuțiilor propuse în teză.

Clasificarea este realizată în funcție de caracteristicile funcționale ale protocoalelor de rutare, rezultând următoarele criterii: unicast/multicast, static/dinamic, cale unică/cale multiplă, liniar/ierarhic, nod inteligent/router inteligent, rutare interioară/exterioară, bazate pe starea legăturii/vector distanță, bazate pe clase de adrese/fără clase de adrese, pentru rețele mobile ad-hoc. Cele mai folosite protocoale de rutare sunt prezentate în tabela 2.1.

Publicații: [Blaga 04a, Blaga 04b, Blaga 04c, Blaga 04d, Blaga 04e]

#### 2.1.2 Studiul și clasificarea tehnologiilor AGCS

S-au studiat și clasificat tehnologiile alternative de comunicare în grup, cum ar fi: **CastGate**, **XCast**, **XCast+**, **ESM** și **HyperCast**. Aceste tehnologii, apărute ca o alternativă la rutarea nativă multicast, sunt clasificate în funcție de mecanismele folosite pentru distribuția datelor: reflector unicast/multicast, tunelară permanentă, topologie suprapusă (overlay) și servicii de rutare specifice.

CastGate asigură acces la conținut multicast prin autotunelare, utilizând o versiune extinsă a protocolului UMTTP (UDP Multicast Tunneling Protocol). Datele sunt transmise printr-un tunel unicast de la un server localizat într-o regiune cu acces multicast din Internet și clientul tunel care se găsește la utilizator.

Protocol	Domeniu		Tip algoritm		Metrică		Versiune IP		Distanță Admin.	Cale		Unicast/ Multicast	
	Intra	Inter	D	L	S	C	IPv4	IPv6		U	M	U	M
RIP	x		x		x		x		120	x		x	
RIPv2	x		x		x		x		120	x		x	
RIPng	x		x		x			x	120	x		x	
IGRP	x		x			x	x		100		x	x	
EIGRP	x		x	x		x	x		90/170		x	x	
OSPFv2	x			x	x		x		110		x	x	
OSPFv3	x			x	x		x	x	110		x	x	
MOSPF	x			x	x		x						x
IS-IS	x			x	x		x	x	115		x	x	
DVMRP	x		x		x		x						x
PIM	x						x	x					x
EGP		x					x		140	x		x	
BGP4	x	x	x				x	x	20/200		x	x	x

Tabela 2.1: Principalele protocoale de rutare

XCast și XCast+ oferă un serviciu multicast explicit bazat numai pe rutarea unicast, sursa trebuind să cunoască adresa IP a tuturor destinațiilor, pe care o include într-un antet special. Routerile intermediare determină hopul următor pentru fiecare destinație din listă folosind tabela de rutare unicast, iar în funcție de interfața de ieșire din router lista cu destinatari este împărțită în mai multe seturi. În cazul XCast pachetul este livrat destinatarului prin procedeul X2U (XCast to Unicast), iar în cazul XCast+ se folosește procedeul X2M (XCast to Multicast).

ESM (End System Multicast) este o tehnologie în care toate funcțiile multicast: managementul grupului, rutarea datelor și replicarea pachetelor sunt implementate de stația finală (end system) folosind doar transmisii unicast. Protocolul Narada a fost dezvoltat pentru a implementa conceptul ESM, acesta permițând auto-organizarea clienților într-o topologie overlay în mod distribuit, luând în considerare obținerea unei structuri cât mai eficiente.

HyperCast permite crearea și menținerea topologiilor logice overlay între aplicații, oferind astfel posibilitatea transferului multicast de date între acestea. Aplicațiile se auto-organizează formând o rețea logică suprapusă, datele fiind transmise pe căile acestei rețele cu ajutorul mecanismelor unicast.

Publicații: [Blaga 06b, Blaga 06c, Blaga 07b]

### 2.1.3 Determinarea performanțelor rutării multicast

**Determinarea întârzierii de înscriere la grup, a traficului de control, a întârzierii de rutare și a jitterului asociat pentru protocoalele de rutare multicast DVMRP, PIM-DM și PIM-SM.** S-a implementat un analizor de trafic bazat pe o stație de captură, un analizor Ethereal/Wireshark, un program de parsare a fișierelor XML rezultate, de analiză și de interfațare grafică.

Semnificația parametrilor de performanță:

- **întârzierea de înscriere la grup (join latency)**, măsurată la apariția unui nou receptor, reprezentând timpul scurs de la trimiterea unei cereri de înscriere la grup până la recepția primului pachet de date.

- **traficul de control (control overhead)**, determină traficul datorat mesajelor de control asociate fiecărui protocol, putând fi exprimat prin numărul de pachete sau în octeție pe secundă.
- **întârzierea de rutare și jitterul asociat (forwarding delay and jitter)**, parametru ce definește performanța echipamentului de rutare, acesta incluzând întârzierea datorată procesul de comutație a pachetelor de pe o interfață pe alta și timpul necesar pentru verificarea tabelului de rutare pentru a identifica interfața de ieșire.

Pentru măsurarea parametrilor prezențați a fost proiectată o arhitectură de test ce utilizează implementări ale protocoalelor de rutare multicast IPv4 și IPv6 (DVMRP, PIM-DM și PIM-SM). Mai este necesară o aplicație de analiză a traficului multicast, ce determină și reprezintă grafic parametrii vizati din capturile efectuate pe parcursul testelor, pentru implementarea acestora fiind utilizate mai multe tehnologii: XML, baze de date relaționale Access și SQL.

Valorile măsurate ale întârzierii de înscriere la grup contrazic ipoteza prezentată de L. Wei în *Multicast Routing in Dense and Sparse Mode: Simulation Study of Tradeoffs and Dynamics*, ce susținea că întârzierea de înscriere la grup este comparabilă cu RTT (Round Trip Time) și că ea poate fi neglijată. Pe parcursul fiecărui test s-a determinat valoarea parametrului RTT între receptor și sursă, valorile obținute fiind în fiecare caz mai mici de o milisecundă, în timp ce întârzierea de înscriere la grup a fost în toate cazurile cu cel puțin un ordin de mărime mai mare. Se mai observă o diferență mare între PIM-DM și PIM-SM, explicația fiind dată de modul diferit de operare al celor două protocoale. În modul de lucru dens traficul multicast este distribuit prin inundare în toată rețeaua, astfel, în momentul în care receptorul se înscrie la grup, traficul dorit poate să fie prezent pe legătura receptorului sau pe legătură routerului ce deservește receptorul. În modul răsfiat datele multicast ajung la routerul RP (Rendezvous-Point) mai întâi încapsulate în mesaje PIM Register, doar în pasul următor ele fiind distribuite numai prin multicast de la sursă la receptor. În cazul traficului de control și a întârzierii de rutare și jitterul asociat nu se constată diferențe majore între protocoalele de rutare multicast analizate.

Selecția modului de lucru, dens sau răsfiat, și implicit a protocolului de rutare se realizează pe baza întârzierii de înscriere la grup, deoarece ceilalți parametri nu diferă în mod semnificativ pentru cele două moduri de lucru. Astfel se recomandă utilizarea modului dens pentru aplicațiile sensibile la întârzieri și modul de lucru răsfiat în cazul aplicațiilor tolerante la întârzieri.

Publicații: [Blaga 04e, Blaga 04f, Blaga 05b, Blaga 06e]

#### 2.1.4 Efectele tunelării bidirecționale în Mobile IPv6

**Determinarea efectelor tunelării bidirecționale în Mobile IPv6**, prin implementarea unei arhitecturi de testare cuprinzând un nod mobil MN, un agent în rețeaua de reședință HA și un nod corespondent CN. Rezultatele au arătat că se pot obține valori duble ale RTT (Round Trip Time) pentru comunicarea MN cu CN în situația în care MN este în rețeaua vizitată. Dacă MN, CN și HA nu sunt deservite de același router (cazul cel mai frecvent în practică), atunci RTT poate fi mult mai mare decât valoarea obținută când MN este în rețeaua de reședință. Această concluzie este importantă întrucât, din păcate, în rutarea multicast pentru noduri mobile, procesele de înscriere la grup și recepția traficului se fac prin tunelare bidirecțională între HA și MN. Optimizarea rutei pentru evitarea fenomenului de rutare în triunghi nu poate fi aplicată în acest caz.

Publicații: [Blaga 03]

### 2.1.5 Analiza automatului de stare BGP4

**S-a studiat protocolul de rutare interdomeniu BGP4, prin analiza în detaliu a automatului de stare** (stările Idle, Connect, Active, OpenSent, OpenConfirm, Established) **prin simulare cu ns-2**. Dacă procesul de stabilire a conexiunii BGP decurge normal timpul petrecut în stările Connect, OpenSent și OpenConfirm este aproximativ de două ori întârzierea de propagare de pe legătură. Starea Established este singura stare în care se pot schimba informații de rutare unicast și multicast, de aceea este de preferat ca o conexiune să rămână în această stare cât mai mult posibil, și să fie închisă numai când este necesar pentru administrare sau reconfigurare. Influența asupra performanțelor protoalelor de rutare multicast este în acest caz minimizată, reducându-se la întârzierea dată de conexiunea TCP între cele două domenii de rutare.

Testarea protocolului BGP (Border Gateway Protocol), utilizat pentru rutarea interdomeniu a traficului multicast și unicast, s-a făcut prin simulare utilizând ns-2 deoarece accesul la echipamente BGP în funcțiune într-o rețea operațională nu a fost posibil. S-au determinat următorii trei parametri: timpul de stabilire al sesiunii BGP în funcție de întârzierea de propagare și de debitul legăturii, timpul petrecut în fiecare din stările ASF BGP, și utilizarea legături cauzate de BGP.

S-a constatat că procesul de stabilire a conexiune durează cel puțin de șase ori cât întârzierea de propagare de pe legătura, sau chiar mai mult pentru rate de transfer mici. De asemenea, acest timp crește liniar cu întârzierea pe legătură, rata de transfer având o influență mai mică asupra acestui parametru. Peste un anumit prag, timpul necesar este în jur de șase ori întârzierea de propagare. În cazul unei legături de 10 Mbps și utilizând valori ale întârzierii între 1 și 200 ms s-au măsurat timpi de stabilire a conexiunii între 6.35 ms și 1.2 secunde.

Tot prin simulare s-a măsurat timpul petrecut în fiecare stare a automatului cu stări finite BGP. În starea Idle se așteaptă timpul dat de timerul Start (între 5 – 9 secunde), sau dacă o conexiune a fost oprită manual se rămâne în starea Idle până la repornire. Dacă procesul de stabilire a conexiunii BGP decurge normal timpul petrecut în stările Connect, OpenSent și OpenConfirm este aproximativ de două ori întârzierea de propagare de pe legătură. Starea Established este singura stare în care se pot schimba informații de rutare unicast și multicast, de aceea este de preferat ca o conexiune să rămână în această stare cât mai mult posibil, și să fie închisă numai când este necesar pentru administrare sau reconfigurare.

S-a studiat volumul traficului generat de BGP în diferite condiții. Prin stabilirea conexiunii BGP (inclusiv stabilirea primei conexiuni TCP care este închisă) și anunțarea rutelor s-a generat un trafic total de 1264 octeți, dintre care doar 344 sunt date transmise efectiv de BGP. Restul se datorează antetelor TCP/IP și segmentelor care transportă confirmări TCP (ACK). Rulând simularea timp de 5 minute, traficul adițional este de 632 octeți, datorat mesajelor KEEPALIVE, trimise la fiecare 60 de secunde, acestea ocupând o bandă de 21 bps. Prin setarea intervalului KeepAlive la 30 de secunde, traficul total este de 2686 octeți, cu 790 mai mult decât în cazul precedent.

Publicații: [Katona 05]

### 2.1.6 Determinarea performanțelor tehnologiilor AGCS

**S-au determinat următorii parametri de performanță ai tehnologiilor AGCS: stres, utilizarea resurselor, întinderea, timpul până la primul pachet, traficul de control.** Cu ajutorul acestora s-au evaluat comparativ CastGate, XCast, XCast+, ESM și HyperCast,

folosind o arhitectură de test cu minim 17 stații de recepție a traficului multicast, deoarece varianta cu 9 stații nu conține toate scenariile posibile.

Definirea parametrilor de performanță determinați:

- **stres (stress)**: definește încărcarea unei legături ca fiind numărul de pachete ce conțin aceleași date utile, chiar dacă pachetele nu sunt identice în totalitate, valoarea optimă unu obținându-se în cazul rutării multicast native.
- **utilizarea resurselor (resource usage)**: se definește drept suma produsului între întârziere și stres pe toate legăturile  $l$  care participă la distribuția datelor (ecuația 2.1). Acest parametru evaluează efectul asupra întregii rețele, presupunând că legăturile cu întârzieri mari sunt mai costisitoare.

$$R = \sum_{i=1}^l d_i * s_i \quad (2.1)$$

A fost determinat considerând aceiași întârziere pe toate legăturile cu o valoare relativă unu. Ca urmare aceasta se obține prin însumarea valorile stres corespunzătoare fiecărei legături.

- **întinderea (stretch)**: este raportul între întârzierea dintre noduri folosind topologia AGCS și întârzierea pe calea unicast între acestea. Acest parametru se mai numește întârziere relativă între sursă și receptor (RDP - Relative Delay Penalty), valorile putând diferi în funcție de receptorul considerat.
- **timpul până la primul pachet (time to first packet)**: definește timpul după care un nou membru al grupului începe să recepționeze datele, fiind echivalentul parametrului întârziere de înscriere la grup determinat în cazul rutării multicast native.
- **traficul de control (control overhead)**: exprimă costul menținerii topologiei AGCS din punctul de vedere al informație de control schimbate, ca numărul total de octeți primiți respectiv recepționați, și debitul ocupat de acestea în octeți pe secundă.

În tabela 2.2 sunt prezentate valorile pentru parametrii utilizarea resurselor și întindere. Raportat la soluția multicast, soluția alternativă cu cea mai bună performanță este XCast+ cu suport în rețea, care deși are o utilizarea a resurselor mai mare cu 15%, are aceeași întindere (adică 1). Soluții alternative cum ar fi clientul CastGate, HyperCast și XCast cu X2U prematur s-au dovedit a avea performanțe la fel de scăzute ca și transmisia unicast din punctul de vedere al resurselor utilizate. Din punct de vedere al întinderii, trebuie evitate scenariile XCast/XCast+ cu tunelare semipermeabilă. În general cu creșterea numărului de legături și/sau a numărului de stații de recepție a traficului multicast, performanțele scad în raport cu configurația minimă de test.

Din cele nouă variante studiate doar una singură se apropie ca eficiență de transmisia multicast nativă. În această situație se impune găsirea de soluții mai performante decât tehnologiile evaluate, sau dacă este posibil propunerea unor modalități de îmbunătățire a acestora.

Publicații: [Blaga 05b, Blaga 06a, Blaga 06b, Blaga 06c, Blaga 06d, Blaga 07b]

	Utilizarea resurselor	Întinderea
HyperCast cu HC	53	1.33
Unicast	49	1
Client CastGate	49	1
XCast cu X2U prematur	49	1
HyperCast cu DT	37	1.66
XCast cu tunelare semipermeabilă	24	2.33
XCast cu suport în rețea	20	1
Router CastGate	17	1.33
XCast+ cu tunelare semipermeabilă	16	2.33
XCast+ cu suport în rețea	8	1
Multicast	7	1

Tabela 2.2: Comparație tehnologii AGCS

### 2.1.7 Îmbunătățirea tehnologiei CastGate

**Îmbunătățirea tehnologiei CastGate prin utilizarea routerului CastGate împreună cu protocolul de rutare multicast PIM-SMv2 în IPv4.** Codul sursă scris în C++ sub Linux a fost intergrat în implemmentarea existentă. Din punctul de vedere al parametrilor AGCS performanțele extensiei propuse sunt superioare soluțiilor anterioare bazate pe CastGate. CastGate cu PIM-SM se aproprie ca performanțe de transmisia multicast (o utilizarea a resurselor mai mare cu 15%), cu observația că plasarea neoportună în rețea (adică nu pe legătura de acces) poate duce la creșterea întinderii.

Soluția propusă, CastGate împreună cu un protocol de rutare multicast, folosește tunelarea pentru a aduce datele multicast în domeniu local de unde ele sunt distribuite prin multicast nativ (figura 2.1). Dintre protocoalele de rutare disponibile cea mai bună alegere o reprezintă PIM-SM deoarece construiește arbori partajați cu rădăcină comună, numită RP (Rendezvous Point), și folosește un model cu înscriere explicită. Înscrierea explicită înseamnă că un router care dorește să recepționeze trafic multicast trebuie să solicite acest lucru, iar datorită rădăcinii comune toată informația despre activitatea multicast din domeniu, surse și receptori, ajunge la RP. Un protocol de rutare multicast similar este CBT (Core Based Tree) dar acesta deși a fost standardizat, nu a fost implementat de producătorii de echipamente de rutare, acest lucru constituind un motiv suplimentar pentru alegerea lui PIM-SM.

Implementarea a fost realizată în C++ sub Linux, constând într-un modul cu funcționalitate parțială PIM-SM ce fost introdus în codul sursă al routerului CastGate. Munca la această propunere s-a desfășurat în cadrul unei burse Socrate-Erasmus la VUB (Vrije Universiteit Brussel), sub coordonarea creatorului CastGate dr. Pieter Liefoghe.

Publicații: [Blaga 05a, Blaga 05b, Blaga 06a, Blaga 06c, Blaga 06d]

### 2.1.8 Extinderea tehnologiei CastGate

**Extinderea tehnologiei CastGate în vederea transmisiei traficului multicast IPv6 prin tunele IPv4.** Acest lucru a fost realizat prin modificarea antetului Enhanced UMTF și prin introducerea unei comenzi și opțiuni noi care permit negocierea tunelării. Această contribuție nu afectează performanțele CastGate, fiind doar o soluție până la generalizarea multicast IPv6.

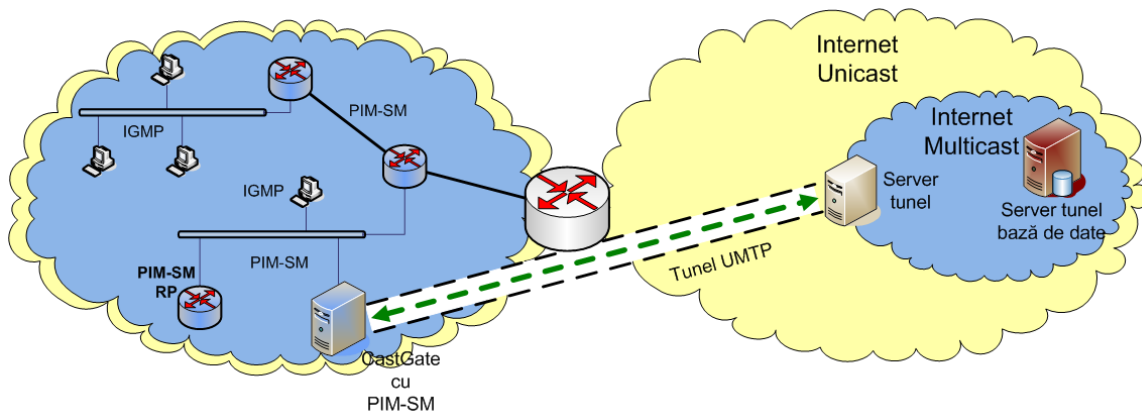


Figura 2.1: CastGate cu PIM-SM

CastGate a fost gândit pentru IPv4 dar poate fi extins pentru a permite tunelarea datelor multicast IPv6. Acest lucru se poate realiza folosind Enhanced UMTF și modificând antetul astfel încât acesta să poată include adresele IPv6 care sunt pe 128, față de cele IPv4 ce au doar 32 de biți. Ca urmare a acestor modificări antetele rezultate vor avea 24, respectiv 40 de octeți. Câmpul TTL își modifică semnificația în Hop Limit, ce este folosit în IPv6. Odată cu această modificare se propune introducerea unei comezi noi, *IPv6\_DATA*, ce va indica tunelarea traficului multicast IPv6, negocierea suportului pentru IPv6 realizându-se prin opțiunea *OPT\_IPV6*. Oferirea unui acces multicast IPv6 prin CastGate necesită modificări și la nivelul entităților CastGate. Astfel clientul CastGate și serverul tunel CastGate trebuie să implementeze versiunea capabilă de IPv6 a protocolului Enhanced UMTF, transmiterea datelor între cele două entități făcându-se prin IPv4. Routerul CastGate trebuie să implementeze versiunea pentru IPv6 a protocolului IGMP, numită MLD, iar modulul PIM-SM din routerul CastGate cu PIM-SM trebuie să fie modificat pentru a captura și interpreta mesajele de rutare IPv6. Utilizarea acestei extensii facilitează migrarea la IPv6 pe arhitecturi CastGate.

Publicații: [Blaga 05b]

### 2.1.9 Îmbunătățirea tehnologiei XCast/XCast+

**Îmbunătățirea tehnologiei XCast/XCast+ prin introducerea protocolului de rutare multicast PIM-SMv2 pe routere sau stații.** Această contribuție se bazează pe faptul că protocolul PIM-SMv2 și-a dovedit eficiența pentru tehnologia CastGate, sugerând generalizarea ideii și pentru alte tehnologii AGCS.

Folosirea XCast++ în domeniul local necesită prezența unei stații ce va îndeplini rolul de router XCast++, în timp ce sursa XCast rămâne nemodificată, iar receptori nu implementează XCast, din punctul lor de vedere domeniul local dispunând de acces multicast. Figura 2.2 prezintă modul de distribuție a datelor folosind Xcast++. Sursa XCast trimite datele inserând în lista de destinații din antetul XCast adresa stației c17, ce îndeplinește rolul de router XCast++ pentru stațiile din domeniul local. Aceasta, folosind procedeul X2M, va expedia prin multicast datele către toți receptorii locali.

Rezultatele obținute prin introducerea de suport PIM-SM demonstrează o eficiență similară cu XCast+ cu suport în rețea, cea mai performantă soluție XCast. Valoarea parametrului întindere mai mare este compensată de ușurința de utilizare a XCast++ ce nu necesită utilizarea

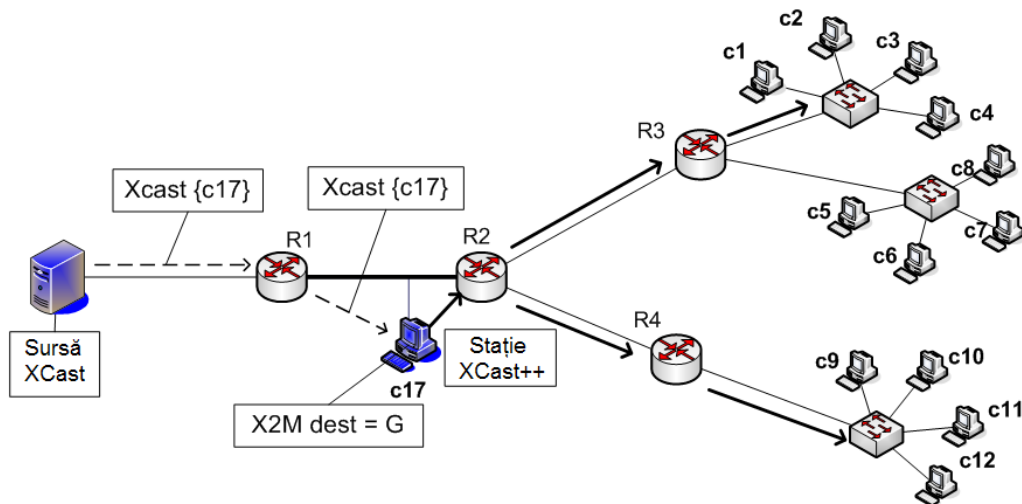


Figura 2.2: Arhitectura Xcast++

de rutare specializate în domeniul local, funcțiile de rutare fiind îndeplinite de una dintre stații. Eficiența utilizării XCast++ este doar cu 15% inferioară transmisiei multicast.

Publicații: [Blaga 06b]

### 2.1.10 Mecanism de translație multicast IPv4/IPv6

**Proiectarea și implementarea unui nou mecanism de translație multicast a datelor și a mesajelor SAP/SDP asociate.** Ideea se bazează pe integrarea PIM-SM cu IGMP (Internet Group Management Protocol) și MLD (Multicast Listener Discovery), translația fiind realizată doar în cazul în care există receptori. Noutatea se referă la utilizarea PIM-SM în ambele domenii, adică atât în IPv4 cât și în IPv6. Soluția existentă (UNINETT) folosea PIM-SM numai în IPv6.

Implementarea s-a realizat sub forma a două module software, câte unul pentru fiecare sens al translației (IPv4 la IPv6 și IPv6 la IPv4), testarea acestora urmărind corectitudinea procesului de translație (prin analiza traficului), precum și întârzierea introdusă de procesul de translație (figura 2.3).

Avantajele mecanismului propus sunt:

- translatarea este pornită doar în cazul în care există clienți doritori de conținut multicast, fiind astfel economisite resursele rețelei;
- aplicația a fost gândită să funcționeze ca un serviciu Windows (celelalte mecanisme existente au implementări doar pentru Linux/Unix);
- soluția este bazată pe fire de execuție (mai mulți clienți pot fi conectați simultan), un fir de execuție se ocupă de recepționarea, modificarea și trimiterea pachetelor UDP multicast, celălalt fir de execuție are rolul de a detecta existența clienților IPv4 fiind de fapt un modul de ascultător PIM-SM iar ultimul fir de execuție se ocupă de recepționarea, modificarea și trimiterea anunțurilor SAP/SDP;
- instalare și configurare facilă, rezumându-se la modificarea fișierului de configurare;



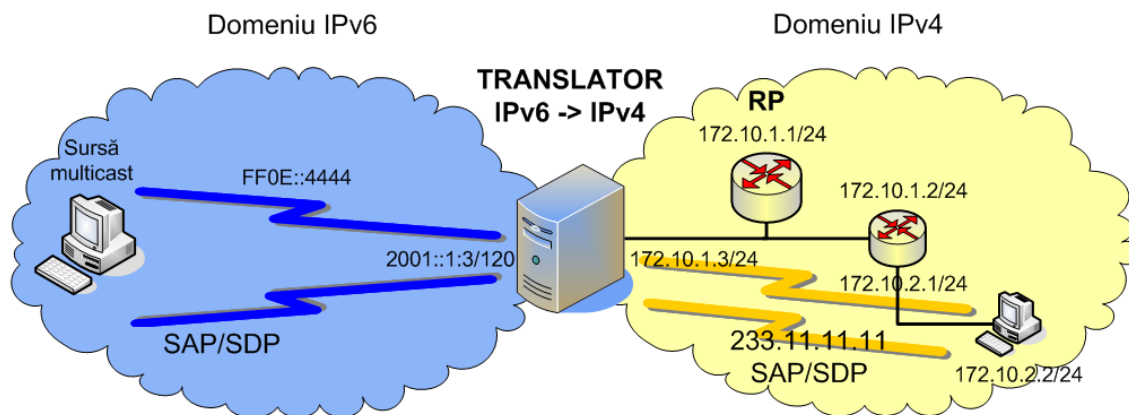


Figura 2.3: Translației multicast de la IPv6 la IPv4

- este posibilă utilizarea independentă a celor două module software responsabile de realizarea translației între domeniile IPv4 și IPv6, în cazul în care nu se dorește translația bidirecțională.

Ca dezavantaje ale soluției menționăm:

- necesită configurare din partea administratorului de rețea;
- pentru a realiza translația simultană a mai multor grupuri multicast este necesară lansarea în execuție a mai multor instanțe ale serviciului.

Întârzierile măsurate pentru cele două sensuri de translație au valori neglijabile, valoarea medie fiind sub o milisecundă. Astfel întârzierea medie a translației pachetelor UDP de la IPv6 la IPv4 este de 0.521 ms, iar întârzierea medie a translației pachetelor UDP de la IPv4 la IPv6 este de 0.956 ms.

Publicații: [Blaga 07a]

## 2.2 Remarci finale

Teza „Contribuții la îmbunătățirea rutării multicast” a fost concepută pentru a rezolva **problema răspândirii în Internet a tehnicilor de distribuție a pachetelor prin multicast** (pentru aplicații de tip IPTV, VOD, etc).

Interesul pentru acest subiect în ultima vreme este dovedit și prin includerea tematicii ca prioritate în proiectele internaționale de tip FP7, de exemplu **4WARD (Wired & Wireless World Wide ARchitecture and Design for the Future Internet)**. Se dorește proiectarea unei arhitecturi radicale pentru Internetul viitorului. Conceptele folosite sunt virtualizarea resurselor din rețea, arhitecturi cu auto-management și un model de comunicare centrat pe informație (informație-centric) care va înlocui modelul actual centrat pe stație (host-centric). Pentru realizarea comunicație multicast este propus conceptul de cale generică (generic path) ce constituie un canal de informație ce pune la dispoziția straturilor superioare caracteristicile fizice ale multiplelor căi disponibile. Implicarea personală în acest proiect va permite valorificarea cunoștințelor dobândite prin această teză prin aportul adus la dezvoltarea specificațiilor multicast a viitorului Internet.

Contribuțiile din această teză rămân valabile în contextul proiectului 4WARD și se poate trece de la faza îmbunătățirii rutării multicast la faza optimizării rutării dacă vor fi implementate concepte noi cum ar fi comunicarea între straturi (Cross-Layering).

## 2.3 Premii obținute

1. *Premiul Ericsson pentru Excelență în Telecomunicații*, pentru lucrarea: "**XCast++: Proposed Extension for Explicit Multicast Protocol**", București, 30 iunie 2006.
2. *Winner of the 5th RoEduNet IEEE Internatinal Conference Student Paper Contest*, pentru lucrarea: "**Performance Metrics for AGCS Applied to CastGate Technology and Native Multicast**", Sibiu, 3 iunie 2006.

## 2.4 Publicații citate în teză

1. [Blaga 03] - **T. Blaga**, V. Dobrota, D. Zinca, C.M. Vancea, **Mobile IPv6: Configuration and Trials**, Proceedings of the 2nd RoEduNet International Conference "Networking in Education and Research", Iasi, June 5-6, 2003, pp. 27-34, ISBN 973-85791-9-8.
2. [Blaga 04d] - **T. Blaga**, V. Dobrota, **Routing Protocols in IPv4/IPv6 Using Linux**, Proceedings of the IEEE International Conference "Communications 2004", Military Technical Academy, Politehnica University of Bucharest and IEEE Romanian Section Bucharest, 3-4 June, 2004, pp. 453-458, ISBN 973-640-035-2.
3. [Blaga 04e] - **T. Blaga**, V. Dobrota, **Testing IPv4/IPv6-Based Unicast/Multicast Routing Protocols Using Linux and FreeBSD**, COST290, 1st Management Committee Meeting, Malta, October 7-9, 2004.
4. [Blaga 04f] - **T. Blaga**, V. Dobrota, D. Zinca, G. Lazar, **Multicast Routing in IPv4/IPv6 Using Linux and FreeBSD**, Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Romania, Transactions on Electronics and Communications, Tom 49(63), Fascicola 1, October 2004, pp. 383-387, ISSN 1583-3380.
5. [Katona 05] - I. Katona, V. Dobrota, **T. Blaga**, G. Lazar, **Performance Evaluation of BGP-4+ in IPv4/IPv6**, Proceedings of the 4th RoEduNet International Conference "Education/Training and Information/Communication Technologies - ROEDUNET '05", Sovata, Targu-Mures, May 20-22, 2005, pp. 66-75, ISBN 973-7794-26-5.
6. [Blaga 05b] - **T. Blaga**, V. Dobrota, K. Steenhaut, I. Trestian, G. Lazar, **Steps Towards Native IPv6 Multicast: CastGate Router with PIM-SM Support**, Proceedings of 14th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks "LANMAN 2005", Chania, Greece, 18-21 September 2005.
7. [Blaga 06a] - **T. Blaga**, V. Dobrota, **Evaluating and Improving Alternative Multicast Solutions: CastGate and CastGate with PIM-SM**, COST290, 5th Management Committee Meeting, Delft, The Netherlands, February 9-10, 2006.

8. [Blaga 06b] - **T. Blaga**, V. Dobrota, **XCAST++: Proposed Extension for Explicit Multicast Protocol**, Ericsson Telecommunication Awards 2006, First place.
9. [Blaga 06c] - **T. Blaga**, V. Dobrota, G. Lazar, B. Moraru, **Alternative Solutions toward IPv4 / IPv6 Multicast**, Proceedings of the International Conference on Computers, Communications & Control "ICCCC 2006", Baile Felix Spa, Oradea, June 1-3, 2006, pp. 80-85, ISSN 1841-9836.
10. [Blaga 06d] - **T. Blaga**, G. Lazar, B. Moraru, V. Dobrota, **Performance Metrics for AGCS Applied to CastGate Technology and Native Multicast**, Proceedings of the 5th RoEduNet International Conference, Sibiu, June 1-3, 2006, pp. 176-180, ISBN 973-739-277-9.
11. [Blaga 06e] - **T. Blaga**, I. Trestian, G. Lazar, V. Dobrota, **Performance Evaluation of IP Multicast Routing**, Proceedings of the IEEE International Conference "Communications 2006", Military Technical Academy, Politehnica University of Bucharest and IEEE Romanian Section Bucharest, 8-10 June, 2006, pp. 317-320, ISBN 973-718-479-3.
12. [Blaga 07a] - **T. Blaga**, F. Szasz, R. Vidrascu, V. Dobrota, **An On-Demand IPv4/IPv6 Multicast Translator**, Proceedings of the 6th RoEduNet International Conference, Craiova, November 23-24, 2007, in curs de publicare.
13. [Blaga 07b] - **T. Blaga**, G. Hegedus, V. Dobrota, **Experimental Performance Determination of End System Multicast and Hypercast**, The Scientific Bulletin "Acta Technica Napocensis" Electronics And Telecommunications, Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Romania, vol. 48, nr. 1, 2007, pp.21-28.

## 2.5 Referate de doctorat și rapoarte tehnice

1. [Blaga 04a] - **T. Blaga**, *Referat de doctorat I: Stadiul actual al implementării protocoalelor de rutare*, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 2004.
2. [Blaga 04b] - **T. Blaga**, *Referat de doctorat II: Protocoale de rutare interioară IPv4/IPv6*, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 2004.
3. [Blaga 04c] - **T. Blaga**, *Referat de doctorat III: Optimizarea rutării multicast*, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 2004.
4. [Blaga 05a] - **T. Blaga**, *PIM-SM Listener: Extending the Functionality of the CastGate Router*, raport de activitate bursă Socrates-Erasmus, Vrije Universiteit Brussel, 2005.

## 2.6 Publicații în afara scopului acestei teze

1. V. Dobrota, D. Zinca, C. M. Vancea, B. Moraru, **T. Blaga**, F. Copaciu, G. Lazar, **PSTN/ISDN /VoIP-Based Solution for Voice Communications within Cluj-Napoca Academic MAN**, Proceedings of the 3rd RoEduNet International Conference "Networking in Education and Research", Timisoara, May 27-29, 2004, pp. 107-112, ISSN 1224-600X.

2. F. Copaciu, V. Dobrota, **T. Blaga**, B. Moraru, **Performance Analysis of Stream Control Transmission Protocol**, Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Romania, Transactions on Electronics and Communications, Tom 49(63), Fascicola 1, October 2004, pp. 388-392, ISSN 1583-3380.
3. G. Lazar, V. Dobrota, **T. Blaga**, **Cross-Layer Architecture for H.264 Video Streaming in Heterogeneous DiffServ Networks**, COST290, 9th Management Committee Meeting, University of Coimbra, Portugal, May 22-23, 2007.
4. G. Lazar, V. Dobrota, **T. Blaga**, **Performance of Wireless IEEE 802.11e-Based Devices with Multiple Hardware Queues**, COST290, 10th Management Committee Meeting, Vienna University of Technology, Austria, October 1-2, 2007.
5. A. Buzila, G. Lazar, **T. Blaga**, V. Dobrota, **Evaluation of QoS Parameters for IPTV**, The Scientific Bulletin "Acta Technica Napocensis" Electronics And Telecommunications, Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Romania, vol. 48, nr. 3, 2007, pp.9-14.

# Bibliografie

- [Ballardie 97] A. Ballardie. *Core Based Trees (CBT) Multicast Routing Architecture*. RFC 2201 (Experimental), September 1997.
- [Bates 00] T. Bates, Y. Rekhter, R. Chandra & D. Katz. *Multiprotocol Extensions for BGP-4*. RFC 2858 (Proposed Standard), June 2000. Obsoleted by RFC 4760.
- [Blaga 03] Tudor Mihai Blaga, Virgil Dobrotă, Daniel Zinca & Cristian Mihai Vancea. *Mobile IPv6 Configuration and Trials*. In Proceedings of the 2nd RoEduNet International Conference “Networking in Education and Research”, pages 27–34, June 2003.
- [Blaga 04a] Tudor Mihai Blaga. *Referat de doctorat I: Stadiul actual al implementării protocoalelor de rutare*. Technical report, UTCN, 2004.
- [Blaga 04b] Tudor Mihai Blaga. *Referat de doctorat II: Protocoale de rutare interioară IPv4/IPv6*. Technical report, UTCN, 2004.
- [Blaga 04c] Tudor Mihai Blaga. *Referat de doctorat III: Optimizarea rutării multicast*. Technical report, UTCN, 2004.
- [Blaga 04d] Tudor Mihai Blaga & Virgil Dobrotă. *Routing protocols in IPv4/IPv6 Using Linux*. In Proceedings of the IEEE International Conference “Communications 2004”, pages 453–458, June 2004.
- [Blaga 04e] Tudor Mihai Blaga & Virgil Dobrotă. *Testing IPv4/IPv6-Based Unicast/Multicast Routing Protocols Using Linux and FreeBSD*. In COST290, 1st Management Committee Meeting, October 2004.
- [Blaga 04f] Tudor Mihai Blaga, Virgil Dobrotă, Daniel Zinca & Gabriel Lazăr. *Multicast Routing in IPv4/IPv6 Using Linux and FreeBSD*. Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Romania, Transactions on ELECTRONICS AND COMMUNICATIONS, vol. 49(63), pages 383–387, October 2004.
- [Blaga 05a] Tudor Mihai Blaga. *PIM-SM Listener: Extending the Functionality of the Cast-Gate Router*. Technical report, Vrije Universiteit Brussel, 2005.
- [Blaga 05b] Tudor Mihai Blaga, Virgil Dobrotă, Kris Steenhaut, Ionuț Trestian & Gabriel Lazăr. *Steps Towards Native IPv6 Multicast: CastGate Router with PIM-SM Support*. In Proceedings of the 14th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks LANMAN 2005, September 2005.

- [Blaga 06a] Tudor Mihai Blaga & Virgil Dobrotă. *Evaluating and Improving Alternative Multicast Solutions, CastGate and CastGate with PIM-SM*. In COST290, 5th Management Committee Meeting, February 2006.
- [Blaga 06b] Tudor Mihai Blaga & Virgil Dobrotă. *XCAST++: Proposed Extension for Explicit Multicast Protocol*. In Ericsson Telecommunication Awards 2006, April 2006.
- [Blaga 06c] Tudor Mihai Blaga, Virgil Dobrotă, Gabriel Lazăr & Bogdan Moraru. *Alternative Solutions toward IPv4/IPv6 Multicast*. International Journal of Computers, Communications & Control, vol. 1, pages 80–85, June 2006.
- [Blaga 06d] Tudor Mihai Blaga, Gabriel Lazăr, Bogdan Moraru & Virgil Dobrotă. *Performance Metrics for AGCS Applied to CastGate Technology and Native Multicast*. In Proceedings of the 5th RoEduNet International Conference, pages 176–180, June 2006.
- [Blaga 06e] Tudor Mihai Blaga, Ionuț Trestian, Gabriel Lazăr & Virgil Dobrotă. *Performance Evaluation of IP Multicast Routing*. In Proceedings of the IEEE International Conference “Communications 2006”, pages 317–320, June 2006.
- [Blaga 07a] Tudor Mihai Blaga, Szasz Ferenc, Vidrașcu Romeo & Virgil Dobrotă. *An On-Demand IPv4/IPv6 Multicast Translator*. In în curs de publicare, 2007.
- [Blaga 07b] Tudor Mihai Blaga, Gabor Hegedus & Virgil Dobrotă. *Experimental Performance Determination of End System Multicast and Hypercast*. ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, vol. 48, pages 21–28, 2007.
- [Boivie 05] R. Boivie, N. Feldman, Y. Imai, W. Livens, D. Ooms & O. Paridaens. *Explicit Multicast (Xcast) Basic Specification*. draft-ooms-xcast-basic-spec-09.txt, December 2005.
- [Chu 00] Y. Chu, S. Rao & H. Zhang. *A Case for End System Multicast*. In ACM SIGMETRICS, 2000.
- [Deering 89] S.E. Deering. *Host extensions for IP multicasting*. RFC 1112 (Standard), August 1989. Updated by RFC 2236.
- [Estrin 98] D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M. Handley, V. Jacobson, C. Liu, P. Sharma & L. Wei. *Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification*. RFC 2362 (Experimental), June 1998. Obsoleted by RFC 4601.
- [Fenner 97] W. Fenner. *Internet Group Management Protocol, Version 2*. RFC 2236 (Proposed Standard), November 1997. Obsoleted by RFC 3376.
- [Fenner 03] B. Fenner & D. Meyer. *Multicast Source Discovery Protocol (MSDP)*. RFC 3618 (Experimental), October 2003.
- [Finlayson 03] Ross Finlayson. *The UDP Multicast Tunneling Protocol*. draft-finlayson-umtp-09.txt, 2003.

- [Katona 05] Istvan Katona, Virgil Dobrotă, Tudor Mihai Blaga & Gabriel Lazăr. *Performance Evaluation of BGP-4+ in IPv4/IPv6*. In Proceedings of the 4th RoEduNet International Conference “ Education Training and Information Communication Technologies - ROEDUNET '05”, pages 66–75, May 2005.
- [Liebeherr 99] J. Liebeherr & Tyler K. Beam. *HyperCast: A Protocol for Maintaining Multicast Group Members in a Logical Hypercube Topology*. In Proceedings of the First International Workshop on Networked Group Communication (NGC '99), July 1999.
- [Liefoghe 02] Pieter Liefoghe. *An Architecture for Seamless Access to Multicast Content*. Phd thesis, Vrije Universiteit Brussel, 2002.
- [Moy 94] J. Moy. *Multicast Extensions to OSPF*. RFC 1584 (Proposed Standard), March 1994.
- [Shin 01] M.K. Shin, Y.J. Kim, J. Lee & S.H. Kim. *Explicit Multicast Extension (Xcast+) Supporting Receiver Initiated Join*. draft-shin-xcast-receiver-join-01.txt, 2001.
- [Vida 04] R. Vida & L. Costa. *Multicast Listener Discovery Version 2 (MLDv2) for IPv6*. RFC 3810 (Proposed Standard), June 2004. Updated by RFC 4604.
- [Waitzman 88] D. Waitzman, C. Partridge & S.E. Deering. *Distance Vector Multicast Routing Protocol*. RFC 1075 (Experimental), November 1988.