



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POS DRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI

OIPOSDRU



Investește în oameni!

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Axa prioritară: 1 „Educația și formarea profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”

Domeniul major de intervenție: 1.5 „Programe doctorale și postdoctorale în sprijinul cercetării”

Titlul proiectului: “Studii doctorale în științe inginerești în scopul dezvoltării societății bazate pe cunoaștere - **SIDOC**”

Cod Contract: POSDRU/88/1.5/S/60078

Beneficiar: Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

FACULTATEA DE ELECTRONICĂ, TELECOMUNICAȚII ȘI TEHNOLOGIA
INFORMAȚIEI

Ing. Zsuzsanna-Ilona KISS

TEZĂ DE DOCTORAT

METODE ȘI TEHNICI DE INTEGRARE A ALGORITMILOR DE CODARE DE REȚEA ÎN COMUNICAȚII

Rezumat

Conducător științific,
Prof. dr. ing. Mircea GIURGIU

2012

Cuprinsul tezei de doctorat

1	Introducere	4
1.1	Motivare	4
1.2	Obiective	4
1.3	Contribuții	6
1.4	Organizarea tezei	7
2	Stadiul actual al cercetării în domeniu	9
2.1	Tehnici de codare a rețelei (Network Coding, NC)	9
2.2	Clasificarea tehnicilor de codare a rețelei	13
2.2.1	Clasificare după modul de proiectare	13
2.2.2	Clasificare după modul de operare	13
2.2.3	Clasificare în funcție de context	14
2.3	Avantajele tehnicilor NC	15
2.4	Arhitecturi propuse pentru viitorul Internet	16
3	Principii generale de integrare a tehnicilor NC în rețele de comunicații	20
4	Optimizarea rețelelor de comunicații în care se implementează NC	28
4.1	Optimizare pe baza multiplicatorului Lagrange discret	28
4.1.1	Descrierea generală a algoritmului DLM	29
4.1.2	Metoda DLM pentru NC	30
4.2	Optimizarea rețelei folosind algoritmi genetici	50
4.2.1	Adaptarea algoritmilor genetici pentru optimizarea rețelei	51
4.3	Concluzii	57
5	Integrarea tehnicilor NC în rețele “wireless” centralizate	59
5.1	Tehnici de codare de rețea bazate pe operația XOR	59
5.2	Tehnici de codare de rețea bazate pe coduri Reed-Solomon	71
5.3	Concluzii	80
6	Integrarea tehnicilor NC în rețele fixe	82
6.1	NC bazat pe operația XOR pentru transmisii video. Studiu de caz	82
6.1.1	Codarea pachetelor	82
6.1.2	Activarea dinamică a codării	84
6.1.3	Mesajele de semnalizare	85
6.1.4	Principiile de funcționare ale nodurilor	85
6.1.5	Rezultate experimentale	88
6.2	Implementarea tehnicilor RNC pentru aplicații de “streaming”	91
6.2.1	Tehnici de codare RNC	91
6.2.2	Adaptarea tehnicilor RNC pentru transmisii unicast multiple	92
6.2.3	Implementarea și evaluarea soluției propuse	95
6.3	Concluzii	98
7	Integrarea tehnicilor NC în arhitecturile de rețele propuse pentru viitorul Internet	100
7.1	Arhitectura “Generic path”	100
7.1.1	Aspecte generale	100
7.1.2	Arhitectura GP pentru integrarea NC în rețele WAN	102
7.1.3	Arhitectura GP pentru integrarea NC în rețele “wireless”	110
7.2	Integrarea NC în alte arhitecturi propuse pentru viitorul Internet	116
7.2.1	Arhitectura FARA	116
7.2.2	Arhitectura FIND	117
7.2.3	Arhitectura pe baza serviciilor	118
7.2.4	Arhitectura SILO	119
7.2.5	Arhitectura RBA	121
7.3	Concluzii	123
8	Concluzii și contribuții	125
8.1	Concluzii	125
8.2	Contribuții	127
8.3	Anexe: Articole relevante	146

Cuvinte cheie

Codare de rețea, rețele de comunicații, arhitecturi, tehnici de integrare și de optimizare.

Introducere și motivarea temei

Rețelele de comunicații au devenit în ultimele două decenii o parte importantă a vieții de zi cu zi. Creșterea numărului de utilizatori, diversitatea dispozitivelor conectate la rețelele de comunicații, multitudinea serviciilor oferite au devenit o problemă a Internetului, a cărui arhitectură de bază nu s-a schimbat în ultimii 30 de ani. Tehnicile de codare de rețea (Network Coding, NC) introduse de Ahlswede în anul 2000 reprezintă o soluție promițătoare pentru rezolvarea problemelor legate de securitate, rutare, utilizarea eficientă a resurselor și asigurarea calității transmisiei.

Ideea de bază a tehnicilor de codare de tip Network Coding este aceea că nodurile rețelei pot efectua operații aritmetice asupra pachetelor recepționate. S-a demonstrat că protocoalele de tip multicast și broadcast au performanțe mai bune dacă se folosește NC, iar protocoalele de tip unicast folosind NC au performanțe cel puțin la fel de bune ca protocoalele fără NC. Tehnicile NC au o aplicabilitate largă în transmisiuni de date de tip multicast, rețele “peer-to-peer”, rețele de senzori, rețele fără fir, securitate, monitorizare de rețea, stocare distribuită, etc. În ultimul deceniu au apărut numeroase studii referitoare la NC, însă majoritatea acestora sunt pur teoretice, studiile referitoare la integrarea tehnicilor NC în rețele de comunicație reale fiind relativ puține.

Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivul principal al tezei este integrarea tehnicilor de codare de rețea în diferite tipuri de rețele de comunicații. Tehnicile NC necesită resurse computaționale și de transmisie suplimentare și din această cauză trebuie activate numai atunci când condițiile din rețea nu permit transmiterea datelor fără utilizarea tehnicilor NC. Performanțele NC depind în mod semnificativ de topologia de rețea în care se aplică, iar complexitatea soluției de codare crește cu dimensiunea rețelei. De multe ori nu este necesar ca toate nodurile rețelei să efectueze operațiile de codare. Selectând numai un subset de noduri la care se realizează codarea se va reduce semnificativ complexitatea computațională. Într-o rețea de comunicații sunt transmise fluxuri de date având caracteristici diferite și algoritmi de codare/decodare NC trebuie să fie capabili de codarea/decodarea acestor fluxuri de date. Arhitectura rețelelor actuale nu permite integrarea directă a tehnicilor de codare de rețea, fiind nevoie de definirea, identificarea și implementarea unor module de arhitectură noi care facilitează implementarea tehnicilor NC.

În conformitate cu problemele enumerate mai sus obiectivele tezei de doctorat sunt:

- propunerea algoritmilor de identificarea topologiilor de rețea în care se pot aplica tehnicile de codare de rețea;
- optimizarea topologiilor de codare pentru utilizarea cât mai eficientă a resurselor rețelei;
- optimizarea topologiilor pentru îmbunătățirea calității transmisiei;
- propunerea soluțiilor pentru controlul și sincronizarea fluxurilor de date în scopul folosirii NC;
- propunerea soluțiilor care permit folosirea tehnicilor de codare de rețea pentru controlul congestiei;
- definirea algoritmilor de activare/dezactivare a operațiilor de codare și mesajele de semnalizare necesare;
- definirea elementelor de arhitectură care permit integrarea tehnicilor NC în rețele de comunicații.

Organizarea tezei

Primul capitol reprezintă introducerea tezei incluzând motivarea temei, definirea obiectivelor principale ale cercetării și sinteza contribuțiilor tezei.

Al doilea capitol prezintă stadiul actual al cercetării în domeniu. Prima parte prezintă aspectele teoretice legate de tehnicile de codare de rețea și clasificarea acestora, iar a doua parte descrie propunerile de arhitectură pentru viitorul Internet, trecând în revistă unele dintre cele mai importante proiecte de cercetare existente care se ocupă de acest aspect.

În capitolul al treilea sunt prezentate problemele generale legate de integrarea tehnicilor NC în rețelele de comunicații reale. Ca această integrare să fie posibilă este nevoie de identificarea rețelei de codare, de o interacțiune puternică între diferitele componente ale rețelei pentru activarea dinamică a operațiilor de

codare și de selecția nodurilor capabile de implementarea acestor operații. În acest capitol a fost propusă arhitectura de principiu a unei rețele capabile de NC, fiind identificate cele mai importante module de procesare și management, arhitectura nodurilor capabile de NC care conțin modulele identificate și un protocol de semnalizare necesar pentru controlul operațiilor de codare/decodare. Metodele și principiile propuse în acest capitol reprezintă baza soluțiilor de integrare prezentate în celelalte capitole.

În al patrulea capitol sunt propuse unele metode de selecție a nodurilor implicate în NC și a topologiilor capabile de NC. Pentru procesul de selecție sunt folosite metode de optimizare care pot fi aplicate în orice rețea, independent de tipul acestora. Metodele de optimizare considerate se încadrează în două categorii: metode deterministe și metode evolutive. Multiplicatorul Lagrange discret, care reprezintă o metodă deterministă, este folosit pentru a obține controlul congestiei într-o rețea de comunicații în condiția minimizării resurselor necesare pentru transmisie. Sunt descrise aspectele teoretice legate de această metodă, adaptarea lor la problema NC și rezultatele experimentale obținute. S-a arătat că soluția propusă are un grad de scalabilitate ridicat și este eficientă din punctul de vedere al resurselor suplimentare necesare. Din categoria metodelor evolutive au fost prezentați algoritmi genetici, care se folosesc pentru selecția nodurilor din rețea care trebuie să realizeze operațiile de codare. Performanțele de complexitate, scalabilitate și de timp de procesare ale algoritmului genetic implementat au fost evaluate în funcție de parametrii principali ai acestui algoritm. Această evaluare a avut ca scop determinarea unui set optim de parametri ai algoritmului astfel încât acesta să ofere soluții de optimizare bune pentru topologii de rețea de complexitate medie.

Al cincilea capitol prezintă integrarea tehnicilor de codare de rețea în rețele de comunicații "wireless" cooperative. Sunt considerate două tipuri de coduri de rețea: XOR între pachete și folosirea codurilor Reed-Solomon. Sunt descrise modelele de rețea, analiza teoretică a acestor coduri și sunt propuse metode de structurare a clusterelor de cooperare. Pentru selecția topologiilor de rețea în care se implementează NC se folosesc algoritmi genetici. Prin optimizare se obține un cluster de cooperare care necesită mai puține resurse suplimentare și asigură performanțe mai bune decât clusterul inițial. Este descrisă adaptarea algoritmilor genetici la aceste probleme, definirea funcțiilor obiectiv și implementarea simulatoarelor folosite. Rezultatele experimentale arată că algoritmul propus pentru structurarea și optimizarea clusterului de cooperare, în care se folosește codare XOR, pe baza algoritmilor genetici reprezintă o metodă flexibilă și eficientă în condițiile în care există cerințe multiple impuse topologiilor cooperative. Optimizarea propusă a grafurilor, testată pe mai multe grafuri de conexiune de complexitate medie, a furnizat o scădere semnificativă a probabilității de "outage" a rețelei și o valoare BLER medie mai mică. Soluția NC pe baza codurilor Reed Solomon îmbunătățește calitatea transmisiei în rețele de senzori având topologie de tip arbore. Rezultatele arată că se pot obține îmbunătățiri ale BLER-ului, iar algoritmi genetici permit selecția nodurilor care vor fi implicate în operațiile NC astfel încât performanțele globale să fie cât mai bune posibil.

Al șaselea capitol descrie integrarea tehnicilor de codare de rețea în rețele de comunicații reale. Este prezentată implementarea a două tipuri de coduri de rețea: cea bazată pe operația XOR între pachete și cea bazată pe RNC. Tehnicile de codare de rețea au fost implementate practic, fiind testate pe sisteme reale, a căror configurație este de asemenea prezentată. Sunt descrise și aspectele cele mai importante legate de integrare: protocoalele de semnalizare definite, structura pachetelor, antetele specifice aplicației, controlul și sincronizarea fluxurilor de date pentru a asigura decodarea corectă a pachetelor. Tehnicile pe baza operației XOR sunt folosite pentru transmisii video, calitatea transmisiei fiind evaluată atât după criteriile obiective cât și după criteriile subiective. Testele efectuate au arătat că din punctul de vedere al pachetelor pierdute, folosirea tehnicilor de codare NC a condus la creșterea semnificativă a performanțelor. Cadrul matematic propus pentru utilizarea RNC în aplicațiile de diseminare a datelor se bazează pe teoria codurilor RNC folosite pentru transmisii multicast. Se propune modul de construire a matricilor de codare astfel încât să fie posibil pentru fiecare destinație să selecteze fluxurile de date pe care vrea să le decodare în condițiile în care rata însumată a fluxurilor de date sursă este mai mare decât capacitatea rețelei. Metoda dezvoltată permite transmisii unicast multiple între sursă și destinații a căror rată globală se apropie de capacitatea rețelei. Soluția propusă a fost evaluată folosind un banc de testare care permite ajustarea fizică a ratei de transfer pe anumite legături. Măsurătorile efectuate arată performanțe semnificativ mai bune decât transmisiile fără RNC.

Al șaptelea capitol conține descrierea unor arhitecturi de rețea propuse pentru viitorul Internet, pe care autorul le-a identificat ca fiind potrivite pentru integrarea tehnicilor NC. Sunt prezentate mai multe arhitecturi, cea mai importantă fiind cea propusă în cadrul proiectului de cercetare FP7 4WARD.

Sunt identificate principalele elemente de arhitectură care permit integrarea tehnicilor NC. S-a propus arhitectura entității care generează căile generice capabile de NC, a fost elaborat o secvență de semnalizare între componentele rețelei capabile de NC, adică între modulul GPF și INM CLQ. A fost propusă o metodă de instanțiere a unor căi generice multipunct la multipunct pe baza proprietății de moștenire a căilor generice simple. Bancul de testare a fost extins pentru a evalua conceptele și metodele propuse și interacțiunile dintre ele. Au fost propuse de asemenea arhitecturile punctelor de mediere care participă în procesul de codare/decodare NC și acestea au fost particularizate pentru integrarea tehnicilor NC în rețele wireless. Sunt analizate soluții pentru integrarea tehnicilor NC și în alte arhitecturi propuse pentru viitorul Internet, printre care: FIND, arhitectura pe baza serviciilor, FARA, SILO și RBA. Au fost propuse două soluții de integrare concrete considerând arhitectura SILO și RBA.

Contribuțiile tezei

Contribuția 1: Identificarea problemelor și cerințelor legate de integrarea tehnicilor de codare de rețea în rețele de comunicații cu propunerea de soluții practice privind identificarea topologiilor de rețea în care se pot aplica tehnicile Network Coding, arhitectura nodurilor capabile de Network Coding și protocolul de semnalizare pentru activarea/dezactivarea dinamică a operațiilor de codare. Contribuțiile sunt incluse în capitolul 3 și o parte din aspectele prezentate au fost publicate în articolele [Pol09] și [Kis11].

Contribuția 2: Elaborarea unei metode de identificare și optimizare a topologiilor de rețea utilizând multiplicatorul Lagrange discret și aplicarea ei la implementarea unei soluții de control a congestiei pe bază de Network Coding. Această contribuție se referă la elaborarea modelului matematic adaptat la cerințele problemei de identificare și optimizare a topologiilor simple, instanțiate în jurul legăturii gătuite, capabile de NC, generalizarea soluției pentru diverse tipuri de topologii care acționează împreună pentru controlul congestiei, implementarea unor simulatoare pentru verificarea algoritmilor bazați pe modelul matematic definit, evaluarea algoritmului de optimizare și validarea modelului matematic prin simulări pentru diferite cazuri.

Contribuția 3: Optimizarea, din punctul de vedere al costurilor a topologiilor de rețele în care se implementează NC utilizând algoritmi genetici, pentru identificarea nodurilor la care trebuie să aibă loc operațiile de codare. Contribuția constă în implementarea unui simulator pentru verificarea performanțelor algoritmului genetic și determinarea parametrilor optimali ai algoritmului genetic pentru problema de optimizare în cazul unor topologii de complexitate medie. Contribuțiile 2 și 3 sunt descrise în capitolul 4, iar rezultatele au format baza publicațiilor [Kis10], [Kis11a] și [Kis12a].

Contribuția 4: Elaborarea unei soluții de optimizare a topologiilor de rețele "wireless" centralizate care implementează tehnici NC în scopul îmbunătățirii performanțelor transmisiei folosind algoritmi genetici. Contribuția include adaptarea algoritmilor genetici la problemele topologiilor de rețele "wireless", implementarea unor simulatoare pentru validarea metodelor de optimizare și evaluarea prin simulări a algoritmilor genetici folosiți. Această contribuție este prezentată în capitolul 5. Activitatea de cercetare în această direcție a condus la elaborarea articolelor [Pol12], [Kis12d] și [Bot10].

Contribuția 5: Integrarea tehnicilor de codare de rețea pe baza operației XOR într-o rețea de comunicații reală. În acest scop au fost elaborate metodele de codare/decodare dinamice, a fost realizat un protocol de semnalizare folosit pentru activarea/dezactivarea operațiilor NC, au fost implementate metode pentru sincronizarea fluxurilor de date la codor și la decodor, au fost implementate modulele software integrate într-o rețea reală și soluția a fost testată practic.

Contribuția 6: Elaborarea soluției de codare RNC pentru transmisii unicast multiple în rețele direcționate și evaluarea acesteia într-o rețea de comunicații reală. Contribuția include elaborarea bazei matematice a codurilor RNC pentru transmisii unicast multiple, definirea modelului de trafic al fluxurilor de test, elaborarea metodelor practice de codare/decodare și de sincronizare a fluxurilor, implementare software a acestor tehnici de codare și testarea soluției RNC. Contribuțiile 5 și 6 se regăsesc în capitolul 6 și au stat la baza publicației [Kis12c].

Contribuția 7: Integrarea tehnicilor de codare de rețea în diferite arhitecturi propuse pentru viitorul Internet. În acest scop a fost definit un model de integrare în conceptele de arhitectură propuse în proiectul de cercetare FP7-4WARD, au fost identificate alte arhitecturi propuse pentru rețelele viitorului care permit integrarea tehnicilor de codare de rețea și au fost propuse soluții de integrare concrete. Această contribuție este prezentată în capitolul 7 și rezultatele au fost publicate în articolele [Kis11b], [Kis12b], [Rus10] și [Cor11].

Lista de publicații

Rapoarte de cercetare

- [KisR1] **Z. Kiss**, “Stadiul actual în dezvoltarea metodelor de integrare a tehnicilor de codare de rețea în rețele de comunicații”, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, ianuarie 2011.
- [KisR2] **Z. Kiss**, “Soluții propuse pentru integrarea tehnicilor de codare de rețea în rețele de comunicații”, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, iulie 2011.
- [KisR3] **Z. Kiss**, “Evaluarea soluțiilor propuse pentru integrarea tehnicilor de codare de rețea în rețele de comunicații”, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, ianuarie 2012.

Conferințe internaționale

- [Kis12c] **Z. Kiss**, Z. Polgar, “Random Network Coding Based Solution for Resource Efficient Data Dissemination”, *8th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*, Cluj-Napoca, Romania, August 30 - September 1 2012.
- [Kis12d] **Z. Kiss**, Z. Polgar, M. Stef, V. Bota, “Network Coding Solution for Improving Transmission Reliability in Wireless Sensor Networks Employed in Industrial Monitoring”, *35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, Prague, Czech Republic, 3-4 July 2012.
- [Kis11a] **Z. Kiss**, Z. Polgar, M. Giurgiu, V. Dobrota, “Resource Efficient Network Coding Based Congestion Control for Streaming Applications”, *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, Budapest, Hungary, 18-20 August 2011.
- [Kis11b] **Z. Kiss**, Z. Polgar, A. B. Rus, V. Dobrota, “Integration of Coding and Cooperation Techniques into Communication Networks: An Architecture Framework”, *10th RoEduNet International Conference*, Iași, Romania, 23-25 June 2011.
- [Bot10] A. Botos, Z. Polgar, **Z. Kiss**, “FECTCP for High Packet Error Rate Wireless Channels”, *8th International Conference on Communications*, Bucharest, Romania, 10-12 June 2010.
- [Rus10] A. B. Rus, M. Barabas, G. Boanea, **Z. Kiss**, Z. Polgar, V. Dobrota, “Cross-Layer QoS and Its Application in Congestion Control”, *17th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks*, Long Branch, New Jersey, USA, 5-7 May 2010.
- [Pol09] Z. Polgar, **Z. Kiss**, A. B. Rus, G. Boanea, M. Barabas, V. Dobrota, “Preliminary Implementation of Point-to-Multi-Point Multicast Transmission Based on Cross-Layer QoS and Network Coding”, *17th International Conference on Software, Telecommunications & Computer Networks*, Split-Hvar-Korcula, Croatia, 24-26 September 2009.

Reviste de specialitate

- [Kis12a] **Z. Kiss**, Z. Polgar, M. Giurgiu, V. Dobrota, “Network Coding Based Resource Efficient Congestion Control for Video Streaming”, *Telecommunication Systems*, ISSN: 1572-9451 (Online), ISSN: 1018-4864 (Print), Springer.
- [Pol12] Z. Polgar, **Z. Kiss**, M. Stef, A. Hosu, V. Bota, “Improving Link Reliability through Network Coding in Cooperative Cellular Networks”, *Radioengineering*, ISSN: 1210-2512, Vol. 21., No. 2., pp. 673-682, Brno, Czech Republic, June 2012.
- [Kis12b] **Z. Kiss**, Z. Polgar, G. Medan, M. Giurgiu, “Integration of Network Coding Techniques in Future Internet Architectures”, *Acta Technica Napocensis, Electronics and Telecommunications*, ISSN: 1221-6542, Vol. 53., No. 1., pp. 31-36, Cluj-Napoca, Romania, March 2012.
- [Kis11] **Z. Kiss**, Z. Polgar, C. Vinti, M. Varga, A.B. Rus, V. Dobrota, “Network Coding-based Congestion Control at Network Layer: Protocol Design and Evaluation”, *International Journal of Computer Networks & Communications*, ISSN: 0974-9322 (Online), ISSN: 0975-2293 (Print), Vol. 3., No. 1., pp. 119-138, Academy & Industry Research Collaboration Center, India, January 2011.
- [Kis10] **Z. Kiss**, Z. Polgar, M. Giurgiu, “Genetic Algorithms for Network Coding Optimization”, *Acta Technica Napocensis, Electronics and Telecommunications*, ISSN: 1221-6542, Vol. 51., No. 4., pp. 51-56, Cluj-Napoca, Romania, December 2010.

Contribuție capitol de carte

- [Cor11] L. Correia, H. Abramowicz, M. Johnsson, K. Wunstel (editors), A.B. Rus, A. Botos, G. Lazar, G. Boanea, M. Barabas, V. Dobrota, Z. Polgar, **Z. Kiss** (included in list of contributors) et al., “Architecture and Design for the Future Internet - 4WARD Project”, Prototype Implementations, Chapter 12, pp. 270-273, Springer, 1st Edition, Signals and Communications Technology Series, ISBN: 978-90-481-9345-5, e-ISBN: 978-90-481-9346-2, ISSN: 1860-4862, 10 January 2011.