



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

THÈSE DE DOCTORAT

MÉTHODES ET TECHNIQUES D'INTÉGRATION DES ALGORITHMES DE CODAGE RÉSEAU DANS LES RÉSEAUX DE COMMUNICATION

Résumé

SOUS LA DIRECTION DE,
Prof. dr. ing. Mircea GIURGIU

2012

Table de matières

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Introduction | 4 |
| 1.1 | Motivation | 4 |
| 1.2 | Obiectifs | 4 |
| 1.3 | Contributions | 6 |
| 1.4 | Structure de la thèse | 7 |
| 2 | Etat de l'art | 9 |
| 2.1 | Techniques de codage réseau (Network Coding, NC) | 9 |
| 2.2 | Classification des techniques de codage réseau | 13 |
| 2.2.1 | Classification selon le mode de projection | 13 |
| 2.2.2 | Classification selon le mode opératoire | 13 |
| 2.2.3 | Classification selon le contexte | 14 |
| 2.3 | Les avantages des techniques NC | 15 |
| 2.4 | Propositions d'architecture pour l'Internet du futur | 16 |
| 3 | Principes de base d'intégration des NC dans les réseaux de télécommunications | 20 |
| 4 | Optimisation des réseaux de télécomm, dont le NC est intégré | 28 |
| 4.1 | Optimisation avec la multiplication de Lagrange discrète | 28 |
| 4.1.1 | Description générale de l'algorithme DLM | 29 |
| 4.1.2 | L'approche DLM pour NC | 30 |
| 4.2 | Optimisation du réseau avec des algorithmes génétiques | 50 |
| 4.2.1 | Adaptation des algorithmes génétiques pour l'optimisation du réseau | 51 |
| 4.3 | Conclusions | 57 |
| 5 | Intégration des techniques NC dans les réseaux sans fil centralisés | 59 |
| 5.1 | Techniques de codage à la base de l'opération XOR | 59 |
| 5.2 | Techniques de codage à la base des codes Reed-Solomon | 71 |
| 5.3 | Conclusions | 80 |
| 6 | Intégration des techniques NC dans les réseaux filaires | 82 |
| 6.1 | NC à la base de XOR pour les flux vidéo. Étude de cas | 82 |
| 6.1.1 | Codage des paquets | 82 |
| 6.1.2 | Activation dynamique du codage | 84 |
| 6.1.3 | Messages de signalisation | 85 |
| 6.1.4 | Principes de fonctionnement des noeuds | 85 |
| 6.1.5 | Résultats d'expérimentation | 88 |
| 6.2 | Implémentation des techniques type RMC pour les applications de streaming | 91 |
| 6.2.1 | Techniques de codage RNC | 91 |
| 6.2.2 | Adaptation des techniques RMC pour le unicast multiple | 92 |
| 6.2.3 | Implémentation et évaluation de la solution proposée | 95 |
| 6.3 | Conclusions | 98 |
| 7 | Intégration des NC dans les architectures proposées pour l'Internet du futur | 100 |
| 7.1 | L'architecture Generic Path | 100 |
| 7.1.1 | Considérations générales | 100 |
| 7.1.2 | L'architecture GP pour l'intégration du NC dans les réseaux WAN | 102 |
| 7.1.3 | L'architecture GP pour l'intégration du NC dans les réseaux sans fil | 110 |
| 7.2 | L'intégration de NC dans d'autres architectures proposées pour l'Internet du futur | 116 |
| 7.2.1 | L'architecture FARA | 116 |
| 7.2.2 | L'architecture FIND | 117 |
| 7.2.3 | Architecture à la base de services | 118 |
| 7.2.4 | L'architecture SILO | 119 |
| 7.2.5 | L'architecture RBA | 121 |
| 7.3 | Conclusions | 123 |
| 8 | Conclusions et contributions | 125 |
| 8.1 | Conclusions | 125 |
| 8.2 | Contributions | 127 |
| 8.3 | Annexe : Publications | 146 |

Mots clés

Codage réseau, réseau de communication, architectures, techniques d'intégration et d'optimisation.

Introduction et motivation de la thématique choisie

Dans les deux dernières décennies, les réseaux de communication sont devenus des composants indispensables de la vie quotidienne. La croissance du nombre des utilisateurs, la diversité des périphériques utilisables pour se connecter, la multitude des services offerts sont devenus un problème de l'Internet, car son architecture n'a pas changé depuis 30 ans. Les techniques de codage réseau (Network Coding, NC), introduites par Ahlswede en 2000, représentent une solution prometteuse pour les problématiques de sécurité, de routage, utilisation efficace des ressources et l'assurance d'une transmission de bonne qualité.

Le concept de base des techniques de codage consiste dans le fait que les noeuds d'un réseau peuvent effectuer des opérations arithmétiques sur les paquets reçus. Il a été démontré que les protocoles de type multicast et broadcast ont des meilleures performances si des techniques NC y sont intégrées, ainsi que les protocoles de type unicast les utilisant ont des performances au moins équivalentes avec celles des protocoles sans NC. Les techniques de codage réseau ont des applications dans la transmission de données de type multicast, dans les réseaux pair à pair, les réseaux de capteurs, les réseaux sans fil, la sécurité, la surveillance du réseau, le stockage distribué etc. Dans la dernière décennie, des nombreuses études ont été publiées sur le codage réseau, dont la plupart sont théoriques et relativement peu portent sur la problématique d'intégration des techniques de codage réseau dans les réseaux de communication.

Les objectifs de la thèse

L'objectif principal de la thèse est l'intégration des techniques de codage dans différents types de réseaux de communication. Les techniques NC nécessitent une puissance de calcul et de transmission supplémentaire et c'est pour cela qu'il faut les activer uniquement si les conditions dans le réseau ne permettent pas la transmission de données sans codage. Les performances du codage réseau dépendent beaucoup de la topologie du réseau et la complexité de la solution de codage grandit avec la taille du réseau. Assez souvent, uniquement un sous-ensemble de noeuds du réseau doivent effectuer des opérations de codage. Le choix de ce sous-ensemble aura comme effet la diminution de la complexité computationnelle. Dans un réseau de communication, les flux de données transmis sont très divers et les algorithmes de codage/décodage, doivent en tenir compte. L'architecture actuelle des réseaux ne permet pas l'intégration directe des techniques de codage réseau et du coup, une nouvelle composante est nécessaire afin de faciliter l'implémentation des techniques de codage réseau.

Conformément avec le paragraphe précédent, nous nous proposons les objectifs suivants :

- la proposition d'algorithmes pour identifier les topologies du réseau dans lesquelles les techniques de codage peuvent s'appliquer ;
- l'optimisation des topologies de codage pour une utilisation plus efficace des ressources réseau ;
- l'optimisation des topologies pour une meilleure qualité de transmission ;
- la proposition des solutions pour la synchronisation des flux de données dans le but d'utiliser le codage réseau ;
- la proposition des solutions permettant d'utiliser les techniques de codage pour contrôler la congestion dans le réseau ;
- la définition des algorithmes d'activation/désactivation des opérations de codage et les messages de signalisation nécessaires ;
- la définition des composantes d'une architecture permettant l'intégration des techniques de codage réseau dans les réseaux de communication

Structure de la thèse

Le premier chapitre constitue l'introduction de la thèse avec sa motivation, la définition des objectifs et une synthèse des contributions scientifiques.

Le deuxième chapitre est une présentation et discussion de l'état de l'art. La première partie présente les aspects théoriques des techniques de codage réseau et leur classification. Nous continuons cette partie

avec une introduction des propositions d'architecture pour l'Internet du futur avec un accent particulier sur les projets de recherche en cours dans cette thématique.

Dans le troisième chapitre, nous introduisons les problématiques principales dans l'intégration des techniques de codage dans les réseaux de communication réels. Pour que cette intégration soit possible, il est nécessaire d'identifier le réseau de codage, d'une interaction forte entre les composants du réseau pour l'activation dynamique des opérations de codage et la sélection des noeuds capables d'effectuer ces opérations. Dans ce chapitre, nous avons proposé l'architecture théorique d'un réseau capable de codage, ayant identifié les composants principaux pour la gestion et traitement, l'architecture des noeuds capables de codage et un protocole de signalisation nécessaire pour le contrôle des opérations de codage/décodage. L'ensemble de ces contributions est détaillé dans les chapitres suivants.

Dans le quatrième chapitre nous avons proposé quelques méthodes de sélection des noeuds impliqués dans le NC et des topologies capables de le supporter. Nous utilisons pour cela des méthodes d'optimisation génériques, pouvant s'appliquer pour n'importe quel réseau. Il existe deux catégories de méthodes : déterministes et évolutives. Le multiplicateur de Lagrange discret, une méthode déterministe, est utilisé pour obtenir le contrôle de congestion dans un réseau de communication, sous condition de minimiser les ressources nécessaires pour la transmission. Nous présentons les aspects théoriques de la méthode, leurs adaptation pour la problématique de codage réseau et les résultats obtenus. Nous avons démontré que la solution proposée a une degré de scalabilité élevée et que c'est efficace d'un point de vue des ressources supplémentaires demandées. Dans la catégorie des méthodes évolutives, nous avons introduits les algorithmes génétiques pour la sélection des noeuds du réseau qui doivent effectuer les opérations de codage. Nous avons effectué des mesures pour adapter les paramètres de ces algorithmes pour une fonctionnement optimale dans le cas des topologies de réseau d'une complexité moyenne.

Le cinquième chapitre présente l'intégration des techniques de codage réseau dans les réseaux de communication type sans fil et coopératifs. Nous considérons deux types de codes réseau : XOR entre les paquets et l'application des codes Reed-Solomon. Sont décrits les modèles de réseau, l'analyse théorique de ces codes et sont proposés des méthodes de structuration des clusters de coopération. Pour la sélection des topologies dans lesquelles s'implémente le NC, nous utilisons les algorithmes génétiques. Avec l'optimisation, nous obtenons un cluster de coopération qui nécessite moins de ressources supplémentaires, mais assure des meilleurs performances que le cluster de départ. Nous décrivons l'adaptation des algorithmes génétiques pour ce type de problème, la définition des fonctions objectives et l'implémentation des simulateurs utilisés. Les résultats montrent que la solution est flexible et efficace. L'optimisation des graphes testée sur plusieurs graphes d'une complexité moyenne des connexions, a résulté dans une baisse significative de la probabilité de "outage" du réseau et également une baisse de la valeur moyenne BLER. La solution avec les codes Reed-Solomon a améliorée la qualité de la transmission dans les réseaux de capteurs, ayant une topologie de type arbre. Les résultats montrent qu'il est possible d'obtenir des améliorations du BLER et que les algorithmes génétiques permettent une sélection des noeuds qui seront impliqués dans le codage, d'une manière à ce que les performances globales soient les meilleures possibles.

Le sixième chapitre décrit l'intégration des techniques de codage réseau dans les réseaux de communication réels. Nous présentons l'implémentation de deux codes : XOR entre les paquets et RNC. Nous les avons testés dans des situations réelles et nous présentons également les scénarios de test. Nous décrivons les éléments principaux de l'intégration : les protocoles de signalisation, la structure de paquets, les en-têtes spécifiques à l'application, le contrôle de synchronisation des flux de données pour assurer le décodage correct des paquets. Les techniques de codage XOR s'utilisent pour les transmissions vidéo. La qualité de la transmission est évalué avec des critères objectives et subjectives. Les tests ont montré une croissance visible des performances, d'un point de vue du nombre de paquets perdus. Le cadre mathématique proposé pour l'utilisation RNC dans les application de dissémination de données se base sur la théorie des codes RNC utilisée dans la transmission multicast. Nous proposons une technique de construction des matrices permettant pour chaque destination de choisir les flux de données qu'il souhaite décoder. La méthode permet des transmissions unicast multiples entre des sources et des destinations dont le taux globale s'approche de la capacité du réseau. Les mesures montrent une amélioration significative des performances par rapport aux transmissions sans RNC.

Le septième chapitre contient la description de quelques architectures pour l'Internet du futur, dont l'auteur de ces travaux considère comme pertinentes pour y intégrer les techniques NC. Plusieurs

architectures sont présentées, la plus importante étant celle du projet de recherche FP7 4WARD. Sont identifiés les composants principaux permettant l'intégration des techniques de codage réseau. Nous avons proposé l'architecture de l'entité qui génère les chemins capables de codage réseau, nous avons élaboré une séquence de signalisation entre les composants du réseau capables de codage, çàd. entre les modules GPF et INM CLQ. Nous avons proposé une méthode d'instantiation de quelques chemins génériques multipoint à multipoint à la base des propriétés d'héritage des chemins génériques simples. Des tests ont permis d'évaluer l'ensemble des concepts et méthodes proposés et leurs interactions. Nous avons également proposé l'architecture pour les points de médiation qui participent dans le processeur de codage/décodage NC et nous les avons configuré pour l'intégration des techniques NC dans les réseaux sans fil. Nous analysons les solutions pour l'intégration des techniques NC dans d'autres architectures de l'Internet du futur, comme FIND, FARA, SILO et RBA. Pour SILO et RBA, nous avons proposé deux solutions d'intégration.

Contributions

Contribution 1 : Identification des besoins pour l'intégration des techniques de codage dans les réseaux de communication avec la proposition des solutions pratiques pour l'identification des topologies du réseau dans lesquelles les techniques type Network Coding peuvent s'appliquer, l'architecture des noeuds capables d'effectuer le codage et le protocole de signalisation pour l'activation/désactivation dynamique des opérations de codage. Les contributions sont incluses dans le chapitre 3 et publiées dans [Pol09] et [Kis11].

Contribution 2 : La conception d'une méthode d'identification et optimisation des topologies du réseau en utilisant le multiplicateur de Lagrange discret et son application dans l'implémentation d'une solution de contrôle de congestion se basant sur le Network Coding. Cette contribution se concrétise dans l'élaboration du modèle mathématique adapté au problème d'identification et optimisation des topologies simples.

Contribution 3 : L'optimisation d'un point de vue des coûts des topologies du réseau dans lesquelles NC est implémenté, en utilisant des algorithmes génétiques pour identifier les noeuds qui doivent effectuer les opérations de codage. La contribution se concrétise sous la forme d'un simulateur, permettant de vérifier les performances des algorithmes génétiques et de déterminer la configuration optimale de l'algorithme pour l'optimisation dans le cas d'un réseau de complexité moyenne. Les contributions sont présentées dans le chapitre 4 et dans les publications [Kis10], [Kis11a] et [Kis12a].

Contribution 4 : Une solution pour optimiser les topologies des réseaux sans fil centralisés qui implémentent les techniques NC dans un but d'amélioration des performances de la transmission utilisant les algorithmes génétiques. La contribution consiste dans l'adaptation de ces algorithmes pour prendre en compte les problèmes des topologies des réseaux sans fil, l'implémentation d'un simulateur pour valider la méthode d'optimisation et une évaluation avec les algorithmes génétiques utilisés. Cette contribution se trouve dans le chapitre 5 et les résultats ont été publiés dans [Pol12], [Kis12d] et [Bot10].

Contribution 5 : L'intégration des techniques de codage se basant sur l'opération XOR dans un réseau de communication réel. Dans ce but, des techniques de codage/décodage dynamiques ont été mises en place et un protocole de signalisation permettant d'activer/désactiver les opérations de NC réalisé. Des méthodes de synchronisation des flux ont été implémentées pour le codeur et le décodeur et l'ensemble des propositions a été testé dans un réseau réel.

Contribution 6 : Une solution de codage RNC pour les transmissions unicast multiples dans les réseaux dirigés et leur évaluation dans un réseau de communication réel. La contribution consiste à la définition d'un modèle mathématique pour les codes RNC pour les transmissions unicast multiples, la définition du modèle de trafic pour les flux de test, l'élaboration des techniques pratiques de codage/décodage et de synchronisation des flux et l'implémentation de ces solutions sous forme de composant logiciel. Les contributions 5 et 6 se trouvent dans le chapitre 6 et les résultats ont été publiés dans [Kis12c].

Contribution 7 : L'intégration des techniques de codage dans différentes architectures proposées pour l'Internet du futur. Un modèle d'intégration des résultats a été proposé pour l'architecture dans le projet de recherche FP7-4WARD et d'autres architectures pour l'Internet du futur ont été identifiées, qui permettent d'intégrer les techniques de codage. Ces contributions se trouvent dans le chapitre 7 et dans les publications [Kis11b], [Kis12b], [Rus10] et [Cor11].

Liste des publications

Rapports de recherche

- [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.

Conférences internationales

- [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.

Reuves scientifiques

- [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.

Chapitres de livre

- [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.