

UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI
FACULTATEA DE MATEMATICĂ ȘI INFORMATICĂ

Cămila și calul: Complexități și algoritmi în telecomunicație

TEZĂ DE ABILITARE
REZUMAT

Balázs Vass

Cluj Napoca, Romania
2025

Rezumat

ÎN timpul și după finalizarea doctoratului meu, cercetarea mea s-a concentrat întotdeauna într-un punct de echilibru între informatică, știința calculatoarelor, matematică și inginerie. În această teză, Cititorul are ocazia să descopere cele mai recente rezultate ale cercetării mele printr-un subset selectat al lucrărilor mele publicate în perioada de trei ani cuprinsă între lunile februarie ale anilor 2022 și 2025 – marcând astfel momentul obținerii titlului meu de doctor și redactarea acestor rânduri. În studiile selectate, contribuția mea ca postdoctorand a fost indispensabilă.

În general, îmi propun să abordez probleme ingineresti care par prea dificile pentru industrie, dar despre care am speranța că le pot rezolva în 1-2 ani, folosindu-mi pregătirea mea solidă de matematică, axată predominant pe algoritmi relate de grafuri, optimizare combinatorială și discretă.

Astfel de probleme necesită analize atente. Uneori, diferențe aparent minore în modul de formulare pot duce la rezultate algoritmice complet diferite. De exemplu, o formulare a unei probleme reale poate fi \mathcal{NP} -hard, însă, în anumite condiții potrivite, problema poate deveni optimizabilă într-un timp polinomial redus. Capitolul 2 ilustrează un astfel de caz norocos în formularea unei probleme de rutare, care anterior era considerată „dificilă”. Desigur, unele probleme pe care le abordăm se dovedesc a fi extrem de dificile, fără componente ușor de rezolvat sau măcar analizabile. Capitolul 3 prezintă încercările noastre de a înțelege limitările fundamentale și posibilitățile extinderii rețelelor rezistente la dezastre.

Din perspectiva teoriei complexității, cel mai interesant capitol ar putea fi Capitolul 4, unde am descoperit o perspectivă fascinantă asupra complexității unor probleme de mapare a programelor pe switch-uri hardware reconfigurabile: în afară de modelele noastre cele mai de bază, aceste probleme nu sunt doar \mathcal{NP} -hard, dar nici nu pot fi aproximabile cu un constant multiplicativ *arbitrară* într-un timp polinomial (adică nu aparțin clasei \mathcal{PTAS}); totuși, ele sunt aproximabile într-un factor constant *redus* (adică se încadrează în clasa \mathcal{APX}).

Ultimul capitol tehnic al acestei teze, Capitolul 5, prezintă o problemă de planificare a transmiterii pachetelor de date. Aici, deși nu am reușit să dezvoltăm un cadru matematic complet și riguros, pe baza mai multor modele simplificate și a observațiilor provenite din ramuri diferite ale matematicii, am conceput o euristică de planificare care a depășit performanțele algoritmilor anteriori considerați de referință.

ÎN cele ce urmează, ofer rezumate concise ale capitolelor tehnice incluse în lucrarea mea de abilitare, precedate de un scurt capitol introductiv, Capitolul 1. **Capitolul 2** se bazează pe lucrarea noastră [1], care este o versiune extinsă a publicației [2], și poate fi rezumat cum urmează. Cea mai bună practică actuală în rutarea supraviețuitoare este calcularea unor căi disjuncte la nivel de link sau nod în graful topologiei rețelei. Această metodă poate proteja împotriva defecțiunilor punctuale; totuși, anumite evenimente de avarie pot duce la întreruperea mai multor elemente de rețea simultan. Fiecare grup de linkuri de rețea expus la astfel de evenimente este denumit Grup de Linkuri cu Risc Comun (Shared Risk Link Group – SRLG) și este identificat în faza de planificare a rețelei. Din păcate, pentru orice listă dată de SRLG-uri, găsirea a două căi care să supraviețuiască unei singure defecțiuni SRLG este o problemă NP-completă. În această lucrare, propunem un algoritm polinomial de rutare care calculează căi SRLG-disjuncte pentru topologii de rețea planare și un set larg de SRLG-uri. Ne concentrăm pe defecțiunile regionale, în care elementele de rețea afectate nu sunt prea îndepărtate unele de altele. Definim flexibil defecțiunea regională, cu următoarele restricții: i) topologia este un graf planar, ii) fiecare SRLG formează un set de muchii conectate în dualul grafului, și iii) pentru fiecare nod v , linkurile incidente acestuia fac parte dintr-un SRLG. Algoritmul propus se bazează pe o teoremă max-min. Prin simulări ample, demonstrăm că algoritmul se scalează bine odată cu mărimea rețelei, iar una dintre căile returnate este, în medie, cu doar 4% mai lungă decât calea cea mai scurtă.

Capitolul 3 abordează complexitatea problemelor legate de identificarea rutelor de cablu eficiente din punct de vedere al costului și rezistente la dezastre. Analizăm diverse probleme matematice studiate în vederea extinderii unei rețele de bază pentru a-i crește rezistența la defecțiunile regionale. Aceste probleme vizează fie adăugarea unui singur cablu, a mai multor cabluri sau chiar a unor noduri suplimentare. Modelele de defecțiuni regionale utilizate variază de la cele simpliste la cele sofisticate, iar obiectivul este fie identificarea punctelor slabe ale rețelei, fie minimizarea costului investiției raportat la riscul de întrerupere a rețelei. Investigăm compromisurile matematice existente în formularea aceleiași probleme reale, observând că modelele mai sofisticate conduc la probleme computaționale mai dificile. Am constatat că algoritmi de geometrie computațională pot rezolva eficient probleme simplificate chiar și pentru rețele de dimensiuni mari. În acest capitol, ne propunem să înțelegem de ce diferite modele matematice formulate pentru aceeași problemă din lumea reală pot sau nu pot fi rezolvate eficient. În particular, arătăm că și modele matematice simpliste duc la formulări NP-hard. Conținutul acestui capitol se bazează pe lucrarea noastră [3], o versiune extinsă a [4].

Capitolul 4 tratează problemele legate de P4, un limbaj de programare specific domeniului (DSL) utilizat pe scară largă pentru planurile de date programabile. Un pas critic în compilarea P4 este găsirea unei mapări fezabile și eficiente a structurilor din codul sursă P4 pe resursele fizice expuse de hardware-ul de bază, respectând în același timp dependențele de flux de date și control din program.

În acest capitol, analizăm dintr-o nouă perspectivă aspectele algoritmice ale acestei probleme, având ca motivație înțelegerea limitelor teoretice fundamentale, îmbunătățirea mapării pipeline-urilor P4 și accelerarea timpilor practici de compilare P4 pentru arhitecturile RMT și dRMT. Rezultatele noastre sunt mixte: demonstrăm că compilarea P4 este o problemă computațională dificilă chiar și într-o formulare extrem de relaxată și că nu există o aproximare în timp polinomial cu precizie arbitrară (dacă $\mathcal{P}=\mathcal{NP}$ nu este adevărat). Vestea bună este că, în ciuda complexității sale, compilarea P4 este aproximabilă în timp liniar cu un factor constant redus, chiar și pentru cele mai complexe modele aproape reale. Conținutul acestui capitol se bazează pe lucrarea noastră [5], o versiune combinată și extinsă a [6] și [7].

Capitolul 5 prezintă rezultatele noastre privind programarea pachetelor de date. Push-In First-Out (PIFO) este un model hardware teoretic pentru programarea pachetelor, permițând reconfigurarea comprehensibilă și dinamică a politicilor de programare. SP-PIFO este o emulare practică a PIFO, implementabilă pe switch-uri P4 standard. Eficiența SP-PIFO se bazează pe o euristică simplă, Push-Up/Push-Down (PUPD), care mapează dinamic pachetele de intrare către un set fix de cozi cu priorități stricte, minimizând rata erorilor de programare față de un model PIFO ideal. În acest capitol, realizăm prima analiză formală a algoritmului PUPD. Analiza noastră de competitivitate arată că capacitatea PUPD de a emula un model PIFO optim se deteriorează liniar pe măsură ce adăugăm mai multe cozi de priorități în sistem. Motivați de această constatare, propunem o schemă offline optimă care, având un model stocastic al intrării, determină configurația optimă SP-PIFO în timp polinomial. De asemenea, introducem o euristică online care încearcă să aproximeze optimul offline fără a necesita un model stocastic al intrării. Simulările noastre arată că algoritmul online poate îmbunătăți performanța SP-PIFO cu un factor de $2x$ în anumite configurații. Conținutul acestui capitol se bazează pe lucrarea [8].

PARTEA a II-a oferă o prezentare generală a direcțiilor mele actuale și viitoare de cercetare. În Capitolul 6, este descris și un plan de dezvoltare didactică și academică, cu accent pe activitățile didactice anterioare, prezentând noile cursuri propuse și legătura dintre activitățile didactice, academice și principalele direcții viitoare de cercetare. Această parte descrie, de asemenea, planurile de colaborare cu parteneri academici și industriali. Fiecare secțiune din această parte pune în perspectivă planurile specifice.

Pe scurt, aș dori să includ în acest rezumat proiectele de cercetare aflate în desfășurare, în care sunt director de proiect (Principal Investigator):

- Algoritmi scalabili de rutare multipath pentru telecomunicații rezistente la dezastre (SMR-A-DRT), contract de finanțare nr. PN-IV-P2-2.1-TE-2023-1977, Unitatea Executivă pentru Finanțarea Învățământului Superior, a Cercetării, Dezvoltării și Inovării (UEFISCDI), 2025-2026 (100.000 EUR).

- Proiectul de postdoctorat Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA), Îmbunătățirea calității serviciilor prin rutare rezistentă și învățare automată (QoSeRM), contract de finanțare nr. 101155116, Horizon Europe, 2024-2026 (~ 150.000 EUR).

Alte proiecte de cercetare, actuale și finalizate, sunt detaliate în Capitolul 6 al acestei lucrări de abilitare. În calitate de PI, am obținut finanțări în valoare totală de aproximativ 268.000 EUR până în prezent.

Lucrarea de abilitare se încheie cu Capitolul 7, care prezintă pe scurt activitățile mele de cercetare desfășurate după obținerea titlului de doctor, prin listarea publicațiilor din această perioadă. Pe scurt, în cei trei ani de la obținerea titlului de doctor în februarie 2022 și redactarea acestei lucrări în februarie 2025, am fost autor a 6 articole în reviste și 9 lucrări conferință. Dintre acestea, 3 publicații au apărut în locații care corespund categoriilor A*, alte 6 în categoria A și încă 3 în categoria B, conform criteriilor actuale de abilitare.

VOI încheia acest scurt rezumat explicând semnificația cămillei și a calului din titlul tezei mele de abilitare. În martie 2023, am ascultat discursul de inaugurare al lui János Pach la Academia Maghiară de Științe (MTA). Domnul Pach este un matematician de renume mondial, specializat în combinatorică de dimensiuni mici. Titlul discursului său menționa, de asemenea, aceste două animale, iar motivul este următorul. Se pare că, în 1858, un cercetător numit Ferencz Kubinyi a susținut un discurs de inaugurare la MTA, bazat pe cartea sa intitulată „Cămila și calul”. Fără a intra în detalii, caii erau romantizați, meritele lor fiind exagerate, iar defectele uitate, în timp ce cămilele erau desconsiderate ca fiind animale urât mirositoare, cu puțină utilitate. Totuși, pentru a fi corect față de Ferencz Kubinyi, acesta menționa în studiul său că cămilele sunt extrem de rezistente și pot funcționa în condiții mult mai dure decât nobilii cai. János Pach a recunoscut că domeniul său de cercetare nu este la fel de general și de prestigios ca alte ramuri ale matematicii, dar cel puțin oferă mai multe răspunsuri la unele probleme practice. În legătură cu această interpretare, consider că eforturile mele de cercetare sunt asemănătoare cu cele ale unui crescător de cămile, în deșertul problemelor ingineresti deosebit de dificile.

Bibliografie

- [1] B. Vass, E. Bérczi-Kovács, A. Barabás, Z. L. Hajdú, and J. Tapolcai, “A whirling dervish: Polynomial-time algorithm for the regional srlg-disjoint paths problem,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2023.
- [2] —, “Polynomial-time algorithm for the regional SRLG-disjoint paths problem,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, London, United Kingdom, May 2022.
- [3] B. Vass, B. E. Nagy, B. Brányi, and J. Tapolcai, “The complexity landscape of disaster-aware network extension problems,” in *Networks*, Wiley, 2023, pp. 1–14.
- [4] B. Vass, B. Brányi, B. E. Nagy, and J. Tapolcai, “On the complexity of disaster-aware network extension problems,” in *2022 12th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM)*, 2022, pp. 1–8.
- [5] B. Vass, E. R. Bérczi-Kovács, Á. Fraknói, C. Raiciu, and G. Rétvári, “Charting the complexity landscape of compiling packet programs to reconfigurable switches,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2024.
- [6] B. Vass, E. Bérczi-Kovács, C. Raiciu, and G. Rétvári, *Compiling Packet Programs to Reconfigurable Switches: Theory and Algorithms*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3426744.3431332>
- [7] B. Vass, A. Fraknói, E. Bérczi-Kovács, and G. Rétvári, “Compiling packet programs to drmt switches: Theory and algorithms,” in *Proceedings of the 5th P4 Workshop in Europe*, ser. EuroP4’22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, p. 1–7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3565475.3569080>
- [8] B. Vass, C. Sarkadi, and G. Rétvári, “Programmable Packet Scheduling With SP-PIFO: Theory, Algorithms and Evaluation,” in *IEEE INFOCOM Workshop on Networking Algorithms (WNA)*, London, United Kingdom, May 2022.