Rétvári Gábor „Interdisciplinary Approaches to Open Problems in Network Communications” címmel benyújtott MTA doktori értekezésének bírálata

Készítette: Kolumbán Géza, az MTA doktora, Fellow of IEEE

Rétvári Gábor elbírálás alatt álló MTA doktori disszertációja a csomagkapcsolt hálózatok útvonalválasztási, forgalomtovábbítási, skálázhatósági és a forgalomtovábbítási táblák tömöríthetőségi kérdéseivel foglalkozik egy új, interdiszciplináris megközelítésben. A szerző kutatásai során a kezdetektől, azaz a modellalkotástól kezdve konzekvensen új, az irodalomból ismert hagyományos eljárásoktól eltérő interdiszciplináris módszereket alkalmaz, és így jelentősen kibővíti a hálózati problémák megoldásának lehetséges eszköztárát. A szerző által bevezetett új módszerek lehetővé teszik a hagyományos modelleken alapuló eljárások számos korlátjának feloldását, például az allokációk optimalizálása során nincs szükség az átviteli utak előzetes rögzítésére. Az interdiszciplináris módszerek lehetővé teszik egyes régóta nyitott tudományos kérdések megválaszolását, és a rendelkezésre álló hálózati erőforrások jobb kihasználását.

Napjainkban az okos eszközök tömeges használata, a 5G rendszer és a vezetéknélküli szenzor hálózatok széleskörű alkalmazása, az Internet alapú szolgáltatások robbanásszerű elterjedése egyre nagyobb kihívást jelent a hálózatok tervezéséért és üzemeltetéséért felelős szakemberek számára. Manapság az adatcsomagoknak a véges erőforrású idővariáns hálózaton minimális késleltetéssel való átvitele az informatika egyik legfontosabb problémájává vált. Az MTA disszertáció ezen hálózati problémákra ad új, interdiszciplináris megközelítésen alapuló megoldásokat és elméleti válaszokat.

A fentiek alapján megállapítom, hogy **a disszertáció témája igen aktuális és korszerű. Az alkalmazott interdiszciplináris módszerek indokoltak és újszerűek, a tézisekben foglalt eredmények elméleti fontosságukon túlmenően igen nagy gyakorlati relevanciával is bírnak.**

Az értekezés 23 angol és 5 magyar nyelvű referált folyóiratcikken, 2 angol nyelvű könyvfejezeten, és 60 konferencia cikken alapul. A publikációs listában önálló szerzős referált folyóirat cikkek és könyvfejezetek nem találhatók, Rétvári Gábor 4 angol nyelvű folyóiratnak és egy angol nyelvű könyvfejezetnek első szerzője. A továbbiakban felteszem, hogy a társszerzői nyilatkozatok csatolva lettek a pályázathoz. A csatolt publikációs listából és az Interneten át elérhető adatbázisokból megállapítható, hogy Rétvári Gábor a témakör nemzetközileg elismert kutatója, amit a bírálat készítésekor a Google Scholar-ban található adatok is jól tükröznek: 1.221 hivatkozás, h-index=19 és i10-index=38. A két első szerzős közleményének idézettsége 95 ill. 84, ezek a szerző legtöbbet hivatkozott közleményei.

A fentiek alapján megállapítom, hogy **a jelölt a tudományos publikációk, nemzetközi elismertség és idézettség tekintetében teljesíti az MTA doktora cím eléréséhez szükséges feltételeket.**

Az angol nyelven elkészített disszertáció tömörsége ellenére jó színvonalú és logikus felépítésű. A munka nagyon jó angolsággal, angol gondolatmenet szerint íródott, és a szerző

elkerülte azt a sokszor érezhető problémát, hogy számos, nem angol anyanyelvű szerző gondolatait anyanyelvén fogalmazza meg magában, és azokat ülteti át angolra. A 103 érdemi oldalt és 14 ábrát tartalmazó értekezés 4 fő fejezetét minden esetben egy, a kapcsolódó munkákat áttekintő összefoglalás zárja, ahol a jelölt az általa elért eredményeket elhelyezi a nemzetközi tudományos életben. A disszertáció köszönetnyilvánítással kezdődik, majd a bevezetésben nagyon röviden összefoglalásra kerülnek az alkalmazott módszerek, az elért új tudományos eredmények és ismertetésre kerül a disszertáció felépítése. Az értekezés 4 fő fejezete (77 oldal) a tézisfüzetnek megfelelő bontásban tárgyalja az új tudományos eredményeket. A disszertáció a tézisek ismertetésével, irodalomjegyzékkel és tárgymutatóval zárul. Nagy kár, hogy az értekezésből hiányzik egy, az irodalmi előzményeket összefoglaló fejezet, amely kontexusba helyezné az értekezés kutatási témáját, és sokat segítene a hálózati problémák kutatásában nem járatos olvasónak az új eredmények megértésében. Ezen fejezet szerepét csak részben tölti be a bizonyos mértékig hasonló célkitűzésű, de mondanivalóját tekintve teljesen eltérő, az egyes fejezetek végén található, a kapcsolódó munkákat áttekintő összefoglalás. Nem szerencsés, hogy több kérdés igazolását a szerző az olvasóra bízza. Ugyancsak hiányzik a dolgozatból a használt rövidítések jegyzéke, azonban a legfontosabbak jelentése megtalálható a tárgymutatóban. A disszertációra jellemző a jól követhető egyértelmű fogalmazás, a logikus felépítés és a jó olvashatóság. Értelemzavaró gépelési hibát nem találtam.

A magyar nyelven elkészített tézisfüzet jelentős érdeme, hogy megadja az egyes angol nyelvű kifejezések magyar megfelelőjét. Ez alapvető fontosságú, hiszen a hálózatok elméletének igen gyors ütemű fejlődése az Internetes korszakkal kezdődött, és még nem volt idő a konszenzuson alapuló, letisztult magyar terminológia kialakulására.

Az elmondottak alapján megállapítom, hogy a bírálat alatt álló **értekezés megfelel az MTA doktori értekezésekkel szemben támasztott formai követelményeknek.**

Történelmileg az egyes új tudományágak mindig izoláltan alakulnak ki. Az értekezés bevezetése rámutat az interdiszciplináris megközelítés fontosságára, mivel az izolált megközelítésmód előbb-utóbb eléri korlátjait, és a tovább lépéshez az interdiszciplinaritásból származtatható új modellekre és eszközökre, sokszor paradigmaváltásra van szükség. Különösen igaz ez a hálózati problémák területére, ahol egy erősen idővariáns és elosztott rendszert kell optimalizálni, ahol sok szempontból a „Dealing with the unknown” elvet (Prof. Anthony Williams) kell alkalmazni. A disszertáció 4 érdemi fejezete a jelölt által elért új tudományos eredményeket ismerteti, amelyek mindegyike a kommunikációs hálózatok optimális felépítésére és működtetésére ad interdiszciplináris elven alapuló megoldásokat:

1. hálózati erőforrások max-min fair allokációja,
2. adaptív útvonalválasztás szabályozáselméleti megközelítésben,
3. skálázható útvonalválasztás az algebrai útvonalválasztás alapján,
4. forgalomtovábbítási táblák tömörítése.

A második fejezet a szerző által bevezetett geometriai vizsgálatmód alapján a hálózatok korrekt (fair) erőforrás allokációjával foglalkozik. A cél a hálózat erőforrásainak oly módon való kiosztása, hogy az egyes felhasználók számára allokált átviteli kapacitások feleljenek meg a hálózatok tervezése és üzemeltetése során alkalmazott, az értekezés 8. oldalán összefoglalt korrektségi-igazságossági feltételeknek. Ezek röviden: a felhasználók késztetése az

erőforrások megosztására, az eltúlzott hamis igénylésből eredő csalások kizárása, irigységmentesség biztosítása, és az adott hálózatban maximális hatékonyság elérése. A korábban publikált eljárásokkal szemben Rétvári Gábor célja az volt, hogy az optimalizálás kezdetekor ne legyen szükség az átviteli útvonalak előzetes rögzítésére.

Korábban a hálózati erőforrások allokációja egy folyamatelméleti modell alapján, a hálózati folyamatok analízise alapján történt meg. Ezen módszer igen erős korlátja, hogy az optimalizálás megkezdése előtt rögzíteni kell az egyes felhasználók számára allokált átviteli utakat, és így az átviteli sebességek kiosztása után kapott hálózat csak az előre rögzített átviteli útvonalak felett biztosít max-min fair allokációt. Ez a módszer nyilvánvalóan meggátolta a rendelkezésre álló hálózati erőforrások optimális és teljes kihasználását hiszen nem zárható ki, hogy egy megváltoztatott útvonalkiosztás jobb átviteli sebeség allokációkat tenne lehetővé.

Az értekezés 2. fejezete szakít a hagyományos megközelítéssel, azaz az útvonalak előzetes rögzítésével, és egy új, geometriai megközelítésen alapuló max-min fair allokációs eljárást javasol. Az új geometriai modell bevezetése megkövetelte a hálózatok optimalizálása során használt fogalmaknak ezen új geometriai platformon való definiálását. A 2. fejezet egyik fő mondanivalója az új modell, és a geometriai modellen alapuló definíciók bevezetése.

A geometriai megközelítés az ún. átviteli politóp modellen alapul, amely leírja az adott hálózatban meglévő, megengedett és útvonalfüggetlen erőforrás-allokációk halmazát. Az értekezés a politóp modell alapján először elvégzi a max-min fair allokációt. Ehhez geometriai definíciót ad a max-min fair allokációra és a hálózat szűk keresztmetszeteinek reprezentálására, majd a water-filling módszerrel megkeresi az átviteli sebességek max-min fair allokációját. Megmutatja, hogy a geometriai modellben definiált szűk keresztmetszetek megfelelnek a hálózat irányított gráfjának egyes kritikus vágásaival. Végezetül megkeresi azt az útvonalkiosztást, amely realizálja ezt a max-min fair allokációt. A kapott erőforráskiosztás optimális lesz abban az értelemben, hogy az adott hálózatban nem található egy nagyobb átviteli sebességeket biztosító, megvalósítható allokáció még akkor sem, ha megváltoztatjuk az egyes felhasználók által használt átviteli utakat.

A szűk keresztmetszetek módszere széleskörben használt a hálózatok tervezése és üzemeltetése során. Az értekezés 2. fejezete megmutatja, hogy a szerző által bevezetett geometriai szűk keresztmetszet fogalma megfelel a hagyományos értelemben vett szűk keresztmetszet fogalom kiterjesztésének. A geometriai és a gráfelméleti modellek közti összefüggés feltárása komoly segítséget ad a hagyományos hálózattervezők és üzemeltetők számára a hálózataikban fellépő erőforráshiányok feltárásában.

Az értekezés 3. fejezete az adaptív útvonalválasztás problématikájával foglalkozik, és a kis és közepes méretű hálózatokra javasol egy új, szabályozáselméleti alapokon nyugvó megoldást. A kidolgozott ORAR (Optimal Rate-Adaptive Routing) optimalizálási eljárás az egyes felhasználók útvonalait és az azokon átvitt forgalom mennyiségét valós időben szabályozza úgy, hogy a forgalomelvezetés megengedett, stabil és optimális lesz, továbbá biztosítja, hogy egyetlen összeköttetésben se alakuljon ki torlódás.

A javasolt módszer adaptivitását az biztosítja, hogy szabályozási időrések (periódusok) kerülnek bevezetésre, ahol az egy időrésben alkalmazott ORAR szabályozó a θ allokáció folytonos és affin függvénye. A javasolt módszer főbb jellemzői: központi vezérlésen alapul, nincs szükség a forgalom előzetes ismeretére vagy becslésére, és a rendszer a szabályozási

időréseken keresztül adaptív módon illeszkedik a hálózatban fellépő változó igényekhez. Az ORAR útvonalválasztó szabályozó periodikusan szkenneli a hálózatot, lekérdezi az átviteli kapacitás igényeket, elvégzi a hálózati erőforrások kiosztását, majd végezetül a feltölti az adott szabályozási időrésben optimális forgalomtovábbítási táblákat a hálózat routereibe. Szemben a jelenleg használt folyamatelméleti modellekkel (lásd TCP protokoll), az értekezés szabályozáselméleti módszert alkalmaz a probléma megoldására.

A 3. fejezet először megadja az adaptív útvonalválasztásnak a 2. fejezetben bevezetett terminológiájához illeszkedő modelljét, majd analitikus összefüggésekkel definiálja az elvégzendő optimalizálási feladatot. Az ORAR optimalizálási algoritmus adottnak veszi a hálózat G_c konfigurációját, kezdeti feltételként a korábbi időréshez tartozó θ allokációból indul ki és megadott feltételek mellett optimalizál egy költségfüggvényt.

A fejezet fő eredménye az ORAR útvonalválasztási szabályozó eljárás kidolgozása. A 3. fejezet második részében a disszertáció válaszol a szabályozáselméletből jól ismert kérdésekre, úgymint megfigyelhetőség, vezérelhetőség és stabilitás. Végezetül egy új metrikát kapunk az útvonalválasztó algoritmusok komplexitásának meghatározására, majd a szerző ezen új metrika alapján kiértékeli az általa kidolgozott adaptív útvonalválasztási eljárás komplexitását.

Kivülálló számára a 4. fejezet az értekezés legnehezebben követhető fejezete, mert a szerző számos esetben elhagyja több fontos, a szakmában csak egy szűk szakértői csoport által ismert probléma kifejtését, helyette egyszerűen behivatkozza azokat. Ha az olvasó nem rendelkezik kiterjedt ismeretekkel a skálázható útvonalválasztán terén, akkor igen nehezen tudja követni a szerző érvelését.

A 3. fejezet az egy operátor által üzemeltetett tartományon belüli erőforrás allokációval és adaptív útvonalválasztással foglalkozott. Az Internet viszont számos autonóm rendszerből (tartományból) áll amely felett a 3. fejezetben kidolgozott, centrális elven alapuló ORAR algoritmus nem használható. Az értekezés 4. fejezete a skálázható útvonalválasztás problémáját vizsgálja úgy, hogy a vizsgálatokat kiterjeszti a nagy méretű, több autonóm rendszert magába foglaló, Internet típusú hálózatokra. Az új algebrai alapú modell kidolgozása és analízise során újfent újszerű, interdiszciplináris megközelítést alkalmaz.

Az útvonalválasztás célja, hogy a komplex kiterjedésű hálózatokban az egyes adatcsomagokat valamely kritériumrendszer (routing policy) szerint optimális módon juttassuk el a forrásból a célpontba. Az optimális útvonal biztosításához a hálózat csomópontjai lokálisan ún. routolási információt tárolnak. A csomópontok számának növekedésével ezen lokálisan tárolt információ mennyisége növekszik, és nagyméretű komplex hálózatok esetén igen nagy tárolási kapacitásokra van szükség az egyes routerekben. A skálázható útvonalválasztás két alapkérdést vizsgál: (i) mennyi információt kell az egyes hálózati csomópontokban minimálisan eltárolni ahhoz, hogy biztosítva legyen az adatcsomagok adott szolgáltató által alkalmazott szabályrendszer (routing policy) szerinti célbajuttatása, és hogy a routerekben lokálisan tárolandó információ mennyisége hogyan nő a csomópontszám növekedésének függvényében. Az optimális útvonalválasztásra nincs általános definició, azt a routing policy határozza meg. Választhatjuk a (i) legrövidebb, (ii) legszélesebb, (ii) legmegbízhatóbb vagy a (iv) legbiztonságosabb utat, vagy azok kombinációját.

Tudományterületileg a kompakt útvonalválasztás foglalkozik a skálázható útvonalválasztás kutatásával. Korábban ezek a kutatások a legrövidebb útvonalválasztást

tűzték ki elérendő célként. Azonban bebizonyosodott, hogy ezen feltétel mellett a hálózat csomópontjaiban a hálózat méretével lineárisan növekvő mennyiségű útvonalválasztási információt kell tárolni, és nem lehetséges ezen információmennyiség tömörítése.

Az értekezés 4. fejezete a legrövidebb útvonalakat előíró szabályrendszert kissé lazítja, azaz megengedi a legrövidebb útvonalaknál legfeljebb háromszor hosszabb útvonalak használatát is. A lazítás bevezetésének célja, hogy ki lehessen dolgozni jól skálázható, azaz tömöríthető útvonalválasztási algoritmusokat. Ehhez viszont egy új, interdiszciplináris megközelítést igénylő modell és módszer kidolgozására volt szükség.

A 4. fejezet bevezeti az algebrai kompakt útvonalválasztás modelljét és definiálja az új modellel kapcsolatos fogalmakat. Az új algebrai modell lehetőséget ad a csomópontokban szükséges memóriák méretének meghatározására. A javasolt absztrakt algebrai modellben megtörténik az útvonalválasztási szabályok és az egyes útvonalak meghosszabbítását jellemző nyújtási tényező (stretch) fogalmának algebrai általánosítása. Az értekezés 4. fejezete megmutatja, hogy vannak olyan útvonalválasztási kritériumok, amelyek kizárják a tömöríthetőség lehetőségét még akkor is, ha tetszőleges útvonalnyújtást engedünk meg. A disszertáció rámutat egy, az Internet hosszútávú fenntarthatóságát veszélyeztető jelenségre, nevezetesen arra, hogy az Internetben alkalmazott BGP útvonalválasztási eljárás nem tömöríthető. A fejezetben elért eredmények általában negatívak, mert szinte valamennyi útvonalválasztási szabályra található olyan példa, amelyre nem található tömöríthető kompakt útvonalválasztási algoritmus.

Az értekezés 5. fejezete rendelkezik a legnagyobb gyakorlati relevanciával, mivel a fejezet az Internetes hálózatban használt forgalomtovábbítási táblák tömörítésére ad újszerű, információelméleten alapuló megoldást. Ugyancsak ez a fejezet a legjobb példa annak illusztrálására, hogy ha szakítunk az irodalomból ismert hagyományos megoldásokkal, azaz egy probléma megoldása során interdiszciplináris megközelítést alkalmazunk, akkor az új szemléletmód számos új, korábban nem használt/ismert megoldási módszer alkalmazását teszi lehetővé.

Az Internet növekedésével a routerekben tárolt forgalmi táblák mérete egyre nő, és vele együtt nő a táblázatok lekérdezési ideje. A probléma olyan súlyos, hogy egyes szakértők szerint ez a probléma hosszú távon veszélyezteti az Internet jövőjét is. Jelenleg még olyan módszerek sem ismertek, amelyekkel meg lehetne jósolni egy-egy forgalmi tábla méretét. A manapság használt, ad hoc módon kidolgozott algoritmusok veszélye, hogy nagy komplexitás esetén előállhatnak olyan forgalmi szituációk, ahol a hálózat viselkedése megjósolhatatlanná válik, és ami még rosszabb, lehetőség nyílik a hálózatok rosszindulatú túlterheléses támadására. Az 5. fejezet az Internetben használt forgalomtovábbítási táblák tömöríthetőségét vizsgálja egy új, információelméleti megközelítésben.

A forgalomtovábbítási táblák elemei karaktersorozatok, amelyekből lekérdezhető, hogy egy, a routerbe beérkezett adatcsomagot melyik kimeneti úton kell tovább küldeni. A cél ezen táblák elméleti tömöríthetőségi határainak meghatározása, és alkalmas tömörítési algoritmusok kidolgozása. Ennek során az alábbi tényezőket kell figyelembe venni:

- a lekérdezési idő minimalizálása végett a preferált úthoz tartozó kimenő él lekérdezése során ne kelljen a tömörített forgalomtovábbítási táblában tárolt, információt kitömöríteni,

- a módszer adjon elméleti korlátot a forgalomtovábbítási táblában tárolt karaktersorozat (string) tömöríthetőségére,
- a módszer legyen alkalmas mind a strukturálatlan (flat), mind a hierarchikus címterek (pl. IP alapú hálózatok címezési modellje) esetére.

A probléma megoldását a szerző információelméleti megközelítésben oldotta meg, ahol a forgalomtovábbítási táblák egyes elemeiben tárolt karaktersorozatok tömöríthetőségét egy entrópia típusú mennyiséggel jellemezte. Az értekezés 5. fejezete a világon először definiálja azt az információelméleti modellt, amely alapján később elvégzi a forgalomtovábbítási táblák tömörítését. Az egyes csomópontok címzési eljárásnak módszere igen erős hatást gyakorol a tömöríthetőségre: strukturálatlan címterek esetén az egyes címek véletlenszerűek, míg az IP protokoll strukturált címterei hordozzák magukban a hálózat stukturáját, azaz hierarchiáját. A címben hordozott plusz információ miatt az utóbbi esetben lényegesen nagyobb tömörítés érhető el. Megfelelő címek kiválasztásával a gyakorlatban akár több nagyságrendi méretcsökkenés is elérhető ezen név-függő kódolással. A nulladrendű és a *k*-adrendű empirikus entrópiák fogalmának definiálásával, továbbá az azok számszerű értékeinek meghatározására adott összefüggésekkel a szerző módszert és korlátot ad a tömörítés elméletileg elérhető, maximális nagyságának meghatározására.

Az entrópia alapú mérőszámok pontosan megadják a tömöríthetőség elvi korlátjait, azonban nem adnak útmutatást a tömörítési algoritmus kidolgozására. Az 5. fejezet domináns része a forgalomtovábbítási táblák lehetséges tömörítési algoritmusaira ad a hierarchikus strukturált címterek esetén használható megoldásokat. Korábban az irodalomban már publikált reprezentációs eljárások kombinálásával a szerző kidolgoz egy újszerű, az adatok tömörített tárolására alkalmas xbwb(T) transzformációt, és megadja a forgalomtovábbítási táblák generálásához szükséges algoritmust. A következő lépésben a tömörítés úgy megy végbe, hogy az útvonalak lekérdezése végbe tudjon menni közvetlenül a tömörített forgalomtovábbítási táblázatokból. Az értekezés megadja a lekérdezéseket végrehajtó algoritmust is.

Korábban a hierarchikus útvonalválasztás esetére azt javasolták, hogy: „Addressing can follow topology or topology can follow addressing. Choose one.” Az értekezés utolsó fontos üzenete, hogy a két módszer és a hozzájuk tartozó entrópia korlátok nem függetlenek egymástól.

Az értekezéssel kapcsolatban két általános megjegyzésem van:

- 7. oldal, felsorolás első eleme: „bandwidth is fully utilized”
  A sávszélesség fogalmának FDM rendszerekben van értelme, ahol általában a sávszélesség előzetesen kiosztásra kerül. Értéke erősen függ az alkalmazott modulációs rendszertől és a használt szimbólumok számától. Általános esetben a csatorna kapacitást vagy áteresztőképességet (troughput) kell vizsgálni. Az értekezés vegyesen használja a „bandwidth” és „rate allocation” kifejezéseket, az egyértelműség végett én javaslom a második használatát, különösen azért, mert hálózati szinten az egyes útvonalakhoz tartozó fizikai rétegben folyó adatátvitel típusa irreleváns.
- Az értekezés bírálhatóságát jelentősen megkönnyítette volna, ha a hivatkozásokban a saját publikációk meg lettek volna különböztetve.

Az értekezés új tudományos eredményei 4 téziscsoportban és összesen 22 altézisben lettek összefoglalva. Az értekezésben leírtak, az Interneten elérhető publikációk és a tézisfüzetben megfogalmazott állítások alapján én az alább felsorolt eredményeket tartom a jelölt saját, a hálózati kutatások témaköréhez jelentős hozzájárulást adó tudományos eredményeknek. Véleményem szerint az altézisek túl nagy száma inkább megnehezíti semmint támogatja az új eredmények fontosságának megértését, ezért az alábbiakban javaslatot teszek egyes altézisek összevonására, illetve egyes kisebb jelentőségű altézis elhagyására.

1. Téziscsoport

- Az 1. téziscsoport a max-min fair allokáció geometriai modellezésen alapuló modellezésével és meghatározásával kapcsolatos új eredményeket foglalja össze. Ezért javaslom a 1.2, 1.3 és 1.4 altézisek egy altézisbe való összevonását.
- Kisebb jelentőségénél fogva javaslom az 1.5 altézis elhagyását.
- A többi altézist változatlan formában javaslom megtartani.

2. Téziscsoport

- Az új adaptív útvonalválasztó algoritmus kidolgozásához a 2. téziscsoport bevezeti a lineáris célfüggvényt tartalmazó ORAR modellt. Az egyes szabályozási időrések felett az ORAR szabályzó egy affin transzformáción alapul.
  Az ORAR modell kidolgozását új tudományos eredménynek tartom, azonban a 2.1-2.5 altézisek által kimondott eredmények altézisekbe foglalására nincs szükség. Ezért javaslom, hogy a 2.1-2.5 altézisek helyett egy, az új ORAR modellt definiáló altézis kerüljön felállításra.
- A többi altézist változatlan formában javaslom megtartani.

3. Téziscsoport

- A 3.1-3.2 altézisek mindegyike a tömöríthetőségre mond ki feltételeket. Ezek a tételek egymást kiegészítik, ezért javaslom a 3.1-3.2 altézisek egy tézisbe való összevonását.
- A többi altézist változatlan formában javaslom megtartani.

4. Téziscsoport

- A 4.1-4.3 altézisek a forgalomtovábbítási táblák tömöríthetőségének entrópia alapú korlátjait adják meg. Az eredményt önmagában és újszerű megközelítése miatt is igen fontosnak tartom, de javaslom a 4.1-4.3 altézisek egy 4.1 altézisbe való összevonását.
- A hierarchikus címterek felett elvégzett tömörítésre az irodalomban először a 4.4 altézis ad analitikus korlátot. Ezért fontosságánál fogva javaslom a 4.4 altézis önálló 4.2 altézisként való megtartását.
- Végezetül javaslom a többi tézishez képest kisebb jelentőségű 4.5 altézis elhagyását.

Az értekezéssel kapcsolatos kérdéseim:

Az értekezés számos eredménye során abból indul ki, hogy a hálózati konfiguráció reguláris. Mi van, ha ez a feltétel egyes időtartányokban időnként nem teljesül? Hogyan veszi észre a modell és a szabályzás azt, hogy egy adott idősáv felett a hálózat nem reguláris?

2. fejezetre („Max-min fair hálózati erőforrás-allokáció geometriai megközelítésben”) vonatkozó kérdéseim:

- A disszertációban javasolt módszerek komplexitása hogyan viszonyul a hálózatok allokációja során jelenleg használt módszerek komplexitásához? Összehasonlította-e, hogy a javasolt új módszer mennyivel hatékonyabb a jelenleg használt megoldásoknál (i) ha csak az aggregált átviteli kapacitást ill. (ii) a teljes hálózat teljesítményét (overhead, számítási késleltetés, stb) vizsgáljuk? Milyen mértékek alapján lehet egy hálózati probléma megoldására javasolt módszer hatékonyságát jellemezni? Azokat hogyan lehet a használat szempontjából releváns paraméterekre lefordítani?
- A hálózat idővariáns tulajdonsága és a fellépő kapacitásigények változása miatt a hálózatot újra és újra optimalizálni kell, és a forgalomtovábbítási táblákat aktualizálni kell. Ezek a számítások jelentős informatikai többletterheléssel, azaz overhead-del járnak. Hogyan viszonyul egymáshoz a jelenleg használt és a disszertációban javasolt megoldások overhead-je?
- A hálózat önmaga idővariáns és idővariáns az egyes átviteli kapacitások iránti igény is. Ezt a problémát hogyan kezeli a javasolt megoldás? A hálózat idővariáns volta nem hoz be konvergencia problémákat?
- Mindig garantált a megvalósíthatóság?
  A hálózat reguláris (Definition 2.1) ha a szükséges valamennyi út létezik és azok kapacitása véges és nagyobb nullánál. Ekkor a max-min fair allokációs problémának van megoldása és az unikális (Collary 2.11). Mi van ha a hálózat idővariáns volta miatt a hálózat időnként nem reguláris? A regularitást hogyan tudjuk garantálni? Ha a hálózat időközben elvesztette reguláris mivoltát, akkor mi történik az algoritmus konvergenciájával?

3. fejezetre („Adaptív útvonalválasztás szabályozáselméleti megközelítésben”) vonatkozó kérdéseim:

- Az Internet használata során az a tapasztalható, hogy a különböző szolgáltatások (MS Teams, Skype, BrowserCall, stb) eltérő átviteli sebességeket és csomagvesztést biztosítanak. Amennyiben a szolgáltató nem egyezik meg a hálózati szolgáltatóval, akkor hogyan történik meg hálózati szolgáltatói szinten az eltérő sebességek biztosítása, illetve mondjon példákat a különböző átviteli sebességeket biztosító szolgáltatásokra.
- A 28. oldalon (3.1.2 fejezet első bekezdés) olvasható: „… our routing controllers are viable in small- and middle-size networks.” Hogyan definiálhatók a kis és közepes méretű hálózatok? Milyen tényezőket kell figyelembe venni, pl. a felhasználók száma, hálózatok komplexitása, stb?
  A kutatás során kapott eredmények milyen komplexitású hálózatokra alkalmazhatók (felhasználók, routerek és útvonalak száma)?
- Egy időrésben az ORAR szabályozó aszimptotikusan stabilis. Mi történik egy nagy komplexitású hálózatban a teljes útvonalválasztási folyamatra nézve? Különösen mivel a hálózat idővariáns, és esetlegesen egyes szabályozási időrésekben nem reguláris? Hogyan lehet kizárni az instabilitást, a periodikus vagy akár kaotikus viselkedést?
- Az Internet igen nagyszámú automóm rendszer (AS) összessége. Hogyan lehet itt egy centralizált hálózatvezérlést megvalósítani? Ha nem, akkor hogyan kezelhető a probléma?

4. fejezetre („Skálázható Internet útvonalválasztás algebrai megközelítésben”) vonatkozó kérdéseim:

- A 48. oldalon bevezetett útvonalválasztási modell a csomagok fejlécét routolási adatokkal kiegészíti. Ez az overhead mily mértékben csökkenti egy tipikus hálózat kapacitását, és az új routolási információ beillesztése mennyivel növeli meg a hálózat késleltetését?
- Az Internetben használt BGP (Border Gateway Protocol) nem tömöríthető, ezért az értekezés 58. oldalán megkérdőjelezi az Internet hosszútávú fenntarthatóságát. Hogyan jelentkezik ez a probléma a felhasználók oldaláról, és milyen megoldást lát a probléma megoldására?
- Jelenleg hogyan megy végbe egy új hálózati protokoll Internet szintű, nemzetközi elfogadása?

Az 5. fejezetre („Forgalomtovábbítási táblák tömörítése információelméleti megközelítésben”) vonatkozó kérdéseim:

- A 76. oldalon olvasható: „… we present our compressed IP forwarding table … This data structure combines several existing scheme into a single … IP forwarding table.” A felhasznált korábban publikált megoldások hogyan lettek kidolgozva (ad-hoc vagy elméletileg megalapozott eljárások), és azok mennyire optimálisak?
- Van esély arra, hogy a közvetlenül lekérdezhető tömörítési algoritmus ne ad-hoc hanem egy szisztematikus eljárással kerüljön kidolgozásra?
- A jelenleg ismert tömörítési eljárások, beleértve a disszertációban ismertetetteket is, mennyire közelítik meg a forgalmitáblákban foglalt információ entrópia korlátjait?

A fentiekben elmondottak alapján megállapítom, hogy Rétvári Gábor szcientrometriai adatai kiemelkedőek, publikációi és benyújtott értekezése magas színvonalú, továbbá munkássága számos új, fontos tudományos eredményekkel járult hozzá hálózati kutatások elméletéhez. Kifejezetten nagyra értékelem és fontosnak tartom az interdiszciplináris megközelítéseken alapuló új vizsgálati módszerek bevezetését. A csatolt tézisfüzet kellőképpen foglalja össze az értekezés tudományos eredményeit. **A tézisfüzetben publikált eredményeket a fentiekben javasolt változtatásokkal új tudományos eredményeknek fogadom el, javaslom az MTA doktori értekezés nyilvános vitára való bocsájtását, és sikeres védés esetén javaslom a jelöltnek az MTA doktora cím megítélését.**

Budapest, 2021. május 24.

Kolumbán Géza

az MTA doktora
Fellow of IEEE