

Horváth Gábor: „Efficient Matrix-analytic solution of multi-type queuing systems with correlated traffic”

című MTA doktori értekezéséről

1. ÁLTALÁNOS MEGJEGYZÉSEK

Az angol nyelven írott 167 számozott oldal terjedelmű disszertáció tartalmaz: Bevezetést, három részre tagolva 7 érdemi fejezetet, melyeket kiegészít egy rövid tartalmi értékelés és a tézisek tömör ismertetése az eredmények publikálási helyének megjelölésével. A szerző az Appendixben foglalja össze a mátrixok Kronecker szorzataira vonatkozó legfontosabb összefüggéseket, valamint a disszertáció érdemi részeiből elhagyott bizonyításokat. A disszertáció magában foglal még egy 97 tételből álló irodalomjegyzéket.

A bíráló munkáját megkönnyítette volna egy, a tézisekhez szorosabban kapcsolódó szerkesztés. A szerző saját eredményeinek megfelelő kontextusban való leírása megtörténik a Tézisfüzetben, azonban számomra nem teljesen világos, hogy a saját eredményekkel kapcsolatban miért csak a [45], [47-50] és [81] munkáira hivatkozik a dolgozat érdemi részében és a [91-97] cikkekre pedig csak a dolgozat végén utal a tézisek rövid ismertetésénél. Megjegyzendő az is, hogy bár a 8. fejezetben az egyes módszerekkel, illetve szimulációval nyert eredmények összehasonlítása is megtörténik, ugyanakkor a szerző nem részletezi a szimulációs vizsgálatokkal összefüggő eredményeit és az ezzel kapcsolatos publikációira sem hivatkozik.

Az értekezésben szereplő 13 saját publikáció közül 4 egyszemélyes és a társszerzőkkel megjelentetett további 9 munka eredményeinek elérésében Jelölt részvétele érdemi volt.

Az értekezés szép kivitelű, jól strukturált, a táblázatok és diagramok gondosan szerkesztettek, a bemutatott példákkal és számításokkal együtt jelentős segítséget nyújtanak a sok összetevőből álló anyag követéséhez, illetve értékeléséhez. Az értekezés formai szempontból megfelel az általános követelményeknek.

2. TÉMAVÁLASZTÁS

A disszertáció a sorbanállás-elmélet napjaink egyik legfontosabb területével, a számítógépes és telekommunikációs hálózati folyamatok modellezési kérdéseivel és teljesítményanalízisével foglalkozik. A kitűzött célok között nem csak a rendszer forgalmi adatainak minél komplexebb leírása és modellezése szerepel, hanem hatékony számításokat lehetővé tevő algoritmusok létrehozása is a megfelelő elméleti háttér kidolgozásával, amelyek lehetőséget nyújtanak a modellek alapján a teljesítményjellemzők gyors és kellő pontosságú meghatározására.

A klasszikus emlékezet nélküli tömegkiszolgálási rendszerek viselkedése leírható Markov-láncok segítségével, vagy vizsgálhatók megfelelően választott véletlen időpontokban a beágyazott Markov-láncok módszerével. Azok a megszorítások, amelyek érvényesek ezekre a klasszikus rendszerekre már messze nem teljesülnek a hálózati folyamatok esetén részben amiatt, mert (a) a beérkezések között eltelt idők eloszlása már a gyakran használt Erlang-, illetve hiper-Erlang eloszlások esetén sem emlékezetnélküli, b) külön problémát jelent az, hogy a valós csomagkapcsolt hálózatokban a követési idők összefüggőek lehetnek, (c) a hálózati forgalom a különböző minőségi elvárások miatt nem feltétlenül homogén, és így a különböző osztályokba sorolt csomagok lehetőségét figyelembe kell venni a vizsgálatok

során, (d) a numerikus számítási módszerek általában lényegesen bonyolultabbak, mint a klasszikus esetekben és így a vizsgálatok során megfelelő tulajdonságokkal rendelkező numerikus algoritmusokat is létre kell hozni. A disszertáció, támaszkodva a különböző összetett Markov modellezési megközelítésekre, analitikus eszközökre és numerikus eljárásokra, a kitűzött feladatokkal kapcsolatban fontos elméleti és gyakorlati eredményekkel járul hozzá a számítógépes és telekommunikációs rendszerek vizsgálatához.

3. EREDMÉNYEK

Az értekezés első része (2. és 3. fejezet) a vizsgálatok számára meghatározó alapokkal foglalkozik. A forgalmi adatok modellezése a MAP (Markov arrival process), illetve a többosztályos MMAP (marked Markovian arrival process) Markovi modellekkel történik, kihasználva a PH (Phase-type) eloszlások két alapvető tulajdonságát: a $[0, \infty)$ intervallumra koncentrált eloszlások tetszőlegesen jól approximálhatók PH eloszlásokkal, melyek eleget tesznek bizonyos zártsági sajátosságoknak, valamint a PH eloszlások modellezhetők egy folytonos idejű diszkrét állapotterű háttér Markov-lánc segítségével. A PH eloszlások alkalmazásával kapcsolatban azonban szükség van néhány fontos tulajdonság vizsgálatára, illetve feladat megoldására is.

A 2. fejezet egyik alapfeladata az, hogy hogyan lehet a PH eloszlást egyértelműen és a numerikus számítások számára alkalmas módon paraméterezni. Fontos eredménye a fejezetnek a PH(3) és PH(4) eloszlásokra adott kanonikus reprezentációk és jellemzésük. A kanonikus reprezentációk felhasználásával vizsgálja a jelölt a PH eloszlás illesztésének feladatát momentumok együttesén, illetve a sűrűségfüggvényen keresztül. A fejezet további része a PH eloszlás illesztésével foglalkozik rugalmas struktúra mellett. A szerző bevezeti az K -ad rendű általánosított hiper-Erlang eloszlások osztályát, amely elegendően bő részhalmaza a PH eloszlásoknak. A paraméterekkel egyszerűen kifejezhetők a momentumok és numerikusan megoldható a momentumillesztés feladata, amelyre számítógépes algoritmust ad. A fejezet végén sor kerül az irodalomban szereplő eredményekkel történő összehasonlításra is.

A 3. fejezet a hálózati forgalom Markov-folyamatok segítségével leírható modellezésével foglalkozik. Az elvégzett vizsgálatokban az egy- és többosztályos MAP, illetve MMAP folyamatok alkalmas eszközháttérrel jelentenek az összefüggő (korrelált) forgalmi adatok modellezésére. A szerző az általánosabb RAP (rational arrival processes), illetve MRAM (marked rational arrival process) folyamatok tulajdonságait analizálja, választ ad a minimális paraméterezés kérdésére a momentumok és együttes momentumok segítségével, levezeti a MAP, illetve MMAP speciális Markov részosztályokra vonatkozó lényeges összefüggéseket, jellemzi a folyamatokat meghatározó mátrixokat. Algoritmust ad nem-Markov MRAM esetén a folyamat Markov reprezentációjának meghatározására (Algorithm 3., 47. o.) az együttes momentumok illesztésével, ha létezik a Markov reprezentáció. Az algoritmus egyben eredményként megadja azt is, ha Markov reprezentáció nem létezik. Utóbbi esetben a 3. fejezet algoritmust ad a feladat MAP, illetve többosztályos modell esetén MMAP modellel történő közelítő reprezentációra a momentumok és együttes momentumok felhasználásával.

Az értekezés második részének a tárgyát (4–7. fejezetek) az összefüggő (korrelált) forgalommal rendelkező sorbanállási hálózatok problémái jelentik.

A 4. fejezet foglalkozik a kvázi születési-halálozási folyamatok (QBD – quasi birth-death process) és a Markov folyadék-modellek (MFM – Markovian fluid model) alapvető tulajdonságaival, stacionárius megoldásával, továbbá a foglaltsági periódus analízisével. Ez a háttér fontos szerepet játszik a további fejezetek eredményeinek elérésében.

A szerző az 5. fejezetben az egyosztályos MAP/MAP/1 sorbanállási rendszert vizsgálja a FCFS kiszolgálási elv és a stabilitást biztosító $\rho < 1$ forgalmi terhelés mellett. A rendszer

sorhosszúság folyamata leírható egy homogén QBD folyamattal, melynek generátora megadható egy blokk-tridiagonális struktúrával rendelkező mátrixszal. A tartózkodási idő vizsgálata mind az életkor folyamat, mind pedig a munkahátralék folyamat alapján történik, amelyek a 6. és 7. fejezetben elért eredmények alapjául szolgálnak.

A MAP/MAP/1 rendszer távozási folyamata megszámlálhatóan végtelen állapotú MAP, ennek közelítésére többféle módszert vezettek be a szakirodalomban állapotter adott szint feletti levágásával. Jelölt e módszerek közül részletesebben tárgyalja az ETAQA módszert, amely ugyan rendelkezik bizonyos jó tulajdonságokkal, azonban az eredményként adódó távozási folyamat nem feltétlenül Markov és a feladat megoldása numerikus sem egyszerű. A távozási folyamatok modellezésére a disszertációban az állapotter adott szint feletti levágásán alapuló módszerektől lényegesen különböző, az együttes momentumokon alapuló eljárás kerül bemutatásra. Az együttes momentumokra támaszkodva a stacionárius távozási folyamat jellemzését adja a 21. tétel és annak következménye (78–79. o.). A 22. tétel a modellparaméterekkel kifejezhető explicit formulát ad az 1 eltolású és i, j -rendű együttes momentumokra, amelyek biztosíthatják az eredmények alkalmazhatóságát a távozási folyamat MAP konstrukciójához.

A 6. és 7. fejezetekben a többosztályos MMAP[K]/PH[K]/1 kiszolgálási rendszerek teljesítménymértékeinek vizsgálatára kerül sor, amely a különböző FCFS, illetve prioritásos kiszolgálási elvek mellett lényegesen különböző feladatokhoz vezetnek. A prioritásos esetben még a preemptív és nem-preemptív eseteket is szét kell választani és külön-külön analizálni. Ezekben a rendszerekben a beérkezési MMAP[K] folyamat, valamint a kiszolgálási idők PH[K] eloszlásai függhetnek az egyes igények osztályaitól.

A 6. fejezetben a szerző Markov folyadék-modelleket használ a MMAP[K]/PH[K]/1-FCFS rendszer teljesítménymértékeinek vizsgálatára. Ez a megközelítés teszi lehetővé azt, hogy a sorhosszúság folyamat helyett az életkor folyamatra támaszkodjon a levezetések során. A fejezet fontos eredménye a 23. és 24. tétel, amely különböző osztályokba tartozó igények távozási időközének jellemzésére explicit formulát ad az időközök együttes Laplace-Stieltjes transzformáltjával (így ennek a felhasználásával a távozási időközök momentumai kiszámíthatók).

A 7. fejezet a MMAP[K]/PH[K]/1 többosztályos rendszer teljesítménymértékeivel (munkahátralék, tartózkodási idő) és a távozási folyamat jellemzésével foglalkozik, amelybe a K különböző típusú igény érkezik az MMAP[K] modell szerint, a kiszolgálás pedig PH[K] eloszlással történik prioritásos kiszolgálási elv mellett. A preemptív, illetve nem-preemptív kiszolgálási elvek mellett a vizsgálatok más-más megközelítést igényelnek. Az eredmények ismertetésére két különböző ($K=2$) alacsony, illetve magas prioritású osztály mellett kerül sor, az általános ($K \geq 2$) esetet a G. Horváth, Efficient analysis of the MMAP[K]/PH[K]/1 priority queue, Eur. J. Oper. Res. (2015) cikk tartalmazza. A vizsgálatokban a rendszer forgalmi terhelésére fennáll a stabilitást biztosító $\rho = \lambda_H / \mu_H + \lambda_L / \mu_L < 1$ egyenlőtlenség, ahol λ_H és μ_H , illetve λ_L és μ_L jelöli a magas, illetve alacsony prioritású osztályba sorolt igények beérkezési időközének, valamint kiszolgálási idejeinek várható értékét. A távozási folyamat vizsgálatában alapvető szerepet játszik a speciális átmenetek valószínűségeiből alkotott G_{H_0} mátrix, amely a vizsgált többosztályos rendszer esetén a (300) mátrix polinom egyenlet nemnegatív megoldása, valamint a (315) egyenlettel definiált Z mátrix. Fontos eredménye a fejezetnek a 33. és 34. tétel, amely azt eredményezi, hogy a G_{H_0} és a (315) egyenletnek eleget tevő Z mátrixok felcserélhetők és fennáll rájuk a (326) mátrix kvadratikus egyenlet, ami hatékony, az állapotter levágása nélküli numerikus algoritmust biztosít a mátrixok kiszámítására.

A dolgozat harmadik érdemi részében (8. fejezet) a szerző összefoglalja az első két rész eredményeit és módszertant javasol az összefüggő forgalommal rendelkező nyílt hálózatok

modellezésére. A szerző a különböző algoritmusokkal és módszerekkel nyert eredmények összehasonlító elemzését konkrét numerikus példákon keresztül mutatja be. Itt hiányolom az összehasonlításokban szereplő szimulációs vizsgálatok háttérének rövid bemutatását – kitérve a szimuláció során megoldott feladatokra is.

4. KÉRDÉSEK

1. Az együttes momentumon alapuló eljárás esetén a többosztályos MMAP[K]/PH[K]/1 telekommunikációs hálózatok FCFS és prioritásos kiszolgálási elv mellett történő modellezésénél az eddigi tapasztalatok alapján van-e valamilyen reális határ az igények különböző osztályainak számára, amely mellett a feladat még numerikusan kezelhető és kielégítő pontosságú eredményhez vezet?
2. A disszertációban több helyen hivatkozott forgalmi mérési adatok (LBL-TCP-3 és BC-pAug89) milyen nagyságú megfigyelési adategyüttest jelentenek, ezek alapján milyen hibával lehet becsülni a momentumokat és együttes momentumokat?
3. A telekommunikációs hálózatok vizsgálatában lehetséges, hogy a forgalmi adatok paraméterei (pl. terhelés) változnak az időben. Lát-e lehetőséget időfüggő modellek vizsgálatára? Lehet-e a hivatkozott valós forgalmi adatokból az időtől való függésre következtetni?

5. ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS

Az értekezés kerek egészet alkotva egységes rendszerben, megfelelő formában és jól követhetően mutatja be Jelöltnek azon tudományos eredményeit, amelyek számítógépes és telekommunikációs hálózatok egy- és többosztályos, illetve összefüggő forgalmi adatainak modellezési kérdéseivel és teljesítményanalízisével foglalkozó területen születtek. Az értekezésben felhasznált eszközökkel és módszerekkel tárgyalt kutatási problémák elméleti és gyakorlati szempontból is egyaránt fontosak, az elért elméleti eredményekkel együtt a kidolgozott numerikus algoritmusok is jelentősek a gyakorlati alkalmazások számára. A disszertáció logikusan szerkesztett, a tézisekben megfogalmazott tudományos eredmények a szakterület rangos folyóirataiban is publikálásra kerültek. A kritikai észrevételeim nem vonnak le semmit a disszertáció értékeiből, a felsorolt tézisek (1.1.–1.3., 2.1., 2.2. és 3.1.) mindegyikét elfogadom.

Összefoglalóan megállapítható, hogy Horváth Gábor értekezése mind formai, mind tartalmi vonatkozásban kielégíti az MTA doktori szabályzatában előírt követelményeket. Jelölt a PhD fokozat megszerzése óta kiemelkedő új tudományos eredményekkel gyarapította a kutatási területét. Mindezek alapján javaslom a nyilvános vita kitűzését és Horváth Gábor részére az MTA doktora cím odaitélését.

Budapest, 2018. március 12.



Dr. Szeidl László

a matematikai tudomány doktora