



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Híradástechnikai Tanszék

Néhány alkalmazott módszer a távközlő hálózatok
tervezéséhez és elemzéséhez

Tran Tuan Hung

Tézisfüzet

Témavezető

Dr. Do Van Tien

Budapest, 2002

1. Bevezetés

Manapság a nagysebességű hálózatok és minőség-biztosított szolgáltatások szellemében a távközlési fejlődések imponáló gyorsasággal jelennek meg. Időről időre újabb és újabb technikai megoldásokat dolgoznak ki, vezetnek be és implementálnak. A számos példa közül talán a legkézenfekvőbb az ATM technológia és különböző QoS hálózati architektúrák (DiffServ, IntServ, MPLS) kialakulását megemlíteni.

A gyors fejlődés nyilvánvalóan egyben azt is jelenti, hogy sok megoldatlan vagy csak részben megoldott probléma és feladat további kutatási erőfeszítést igényel. A potenciális kutatási témák közül a jelen disszertáció a következő kettőt érinti:

- Hálózattervezés: célunk itt a praktikus tervezési módszer fejlesztése, amely alkalmas reális hálózatok tervezésére
- Analitikus teljesítőképességi vizsgálatok: a célkitűzés az, hogy hatékony numerikus módszereket fejlesszünk a teljesítőképességi vizsgálatokban alkalmazott sorbanállási modellekre.

A telekommunikációs hálózatok és rendszerek megfelelő tervezése és méretezése vitathatatlanul nagyon fontos feladat. Egyfelől, minél több erőforrást ajánlatos felhasználni egy hálózat telepítésekor, hogy a technikai követelmények és specifikációk (mint például a szolgáltatásra vonatkozó minőségi előírások) maradéktalanul teljesüljenek. Másfelől, a gazdasági korlátok azt követelik, hogy minél takarékosabb legyen az erőforrások felhasználása. Ennek tudatában a hálózattervezés során nyilvánvalóan szükség van olyan algoritmusokra és módszerekre, melyek a fent említett tényezőket egyensúlyban tudják tartani. E témába kapcsolódva, a disszertáció első része egy praktikus tervezési megközelítést ajánl fel, amely képes az SDH infrastruktúrára alapozó optimális ATM hálózat meghatározására.

Az is nyilvánvaló, hogy a gazdaságos implementálás érdekében a működtetendő rendszer viselkedését és teljesítőképességét vizsgálni és értékelni kell. Ez az, ahol a teljesítőképességi vizsgálatok teret kapnak. Egy alapos és széleskörű vizsgálat lehetővé teszi, hogy a legjobb egyensúlyt meg lehessen találni a rendszer teljesítménye és az implementálás költségei között.

A teljesítőképességi vizsgálatokhoz először általában releváns minőségi jellemzőket kell definiálni. Majd szimulációval, vagy analitikusan, vagy a két módszer kombinációjával e jellemzők viselkedését kell vizsgálni a rendszer működésének megértéséhez és elemzéséhez.

Az irodalom áttekintése egyértelműen jelzi azt, hogy két dimenziós markov folyamatoknak, modellezési eszközökként, széles alkalmazási körük van a teljesítőképességi feladatokban. A leggyakoribb ilyen folyamatok a kvázi születési halálzási folyamatok (angol rövidítésük QBD) és ezek általánosított változata, amelyre QBD-M néven hivatkozunk. QBD és QBD-M folyamatok igénybevétele megfigyelhető számos feladatban, amelyek különböző területekkel kapcsolatosak, mint például ATM technológiával, DiffServ architektúrával, celluláris mobil hálózatokkal, számítógép rendszerekkel.

A tény, hogy QBD és QBD-M folyamatok gyakran hasznos modellezési eszköznek bizonyulnak, motiválja a disszertációban második részében bemutatott kutatási irányt, amely az említett folyamatok numerikus módszereinek vizsgálatára és fejlesztésére helyezi a hangsúlyt.

2. Kutatási célkitűzések

Kutatási munkám során a következő célokat tűztem ki:

- Gazdasági okokból egy újabb hálózatot ajánlatos egy másik meglévő infrastruktúrára felépíteni. Alkalmazkodva ehhez a tervezési tendenciához, pontos matematikai leírást és formalizálást adtam a meglévő SDH infrastruktúra feletti létesítendő ATM hálózat tervezési feladatához.
- A tervezési feladat megoldásához egy praktikus megközelítést kell kidolgozni. Ennek a megközelítésnek hatékonyan kell tudnia meghatározni az optimális topológiával rendelkező ATM hálózatot.
- Annak ellenére, hogy több numerikus módszer is létezik a QBD folyamatok stacionárius megoldására, a módszerekre vonatkozóan egy teljeskörű összehasonlítás jellegű teljesítőképességi értékelés még nem található az irodalomban. Az összehasonlítási értékelésnek több fontos szempontot kell lefednie, mint például a futtatási időt, a tárolási igényt, a numerikus stabilitást és a numerikus pontosságot. Egyik célkitűzésem tehát ilyen vizsgálatok elvégzése, ezúton teszek ajánlást arra vonatkozóan, hogy mikor melyik módszert tanácsos használni.
- Másik célkitűzésem a QBD-M folyamatok stacionárius megoldására való hatékony numerikus módszerek fejlesztése. A hatékonyság több numerikus szempontot is magában foglal: az idő- és tárolási igényt, a numerikus stabilitást és a numerikus pontosságot.
- A harmadik kitűzött cél analitikus modellek alkotására és a numerikus módszerek demonstrálására összpontosul. Ez tulajdonképpen kettősséggel bír. Egyrészt, megmutatom és demonstrálok a QBD és QBD-M modellek széles alkalmazási körét különböző teljesítőképességi vizsgálatokban. Másrészt, ezeken a kiszemelt példákon keresztül analitikusan is értékelem és tesztelem a numerikus módszereket, ezáltal mindegyik módszernek kimutatom az erős és gyenge oldalait.

3. Kutatási módszertan

3.1. Hálózattervezés

A tervezési folyamat általában a következő lépésekből áll:

- Tervezési szempontok meghatározása: például a tervezendő hálózat épülhet-e a meglévő infrastruktúrára; mi a legfontosabb tervezési szempont: hálózati költség, teljesítmény vagy menedzselhetőség; mi a kiemelt probléma: csomópontok elhelyezése, linkek méretezése vagy topológia optimalizálása stb.
- Bemeneti adatok összegyűjtése: forgalmi igények, QoS követelmények, eszközök paramétereit stb.
- A tervezési feladat formalizálása: ez a lépés az előző lépésekben nyert információkat írja le matematikailag.
- Tervezési módszer kiválasztása: ez a lépés a megfogalmazott feladat tulajdonságaitól függően, alkalmas tervezési módszer kidolgozását jelenti.
- Tervezési eredmények előállítás és az alkalmazott tervezési módszer értékelése.

Kutatási munkám szorosan követi a fenti koncepció lépéseit. Az SDH infrastruktúra feletti ATM hálózat tervezése, topológiai optimalizálása valós felhasználói igények és átviteli követelmények alapján megadja az első és második lépés specifikációit. A harmadik lépésben - a rétegzett tervezési modellt [7] követve - a feladatot lineáris programozási problémaként formalizáljuk, amely nem megoldható polinomiális időben. Ezért heurisztikus algoritmusokat veszünk igénybe a negyedik lépésben.

3.2. Analitikus teljesítőképességi vizsgálatok

Egy adott rendszer analitikus teljesítőképességi vizsgálata általában két fázisból tevődik össze:

- **Modellezési fázis:** a vizsgált rendszerről sorbanállási modellt kell alkotni a későbbi elemzésre. A kiválasztott modelltől elvárjuk, hogy minél jobban és részletesebben tudja leírni a rendszer karakterisztikáit, ugyanakkor a praktikus megoldhatóság érdekében analitikusan kezelhető kell lennie.
- **Analízis fázis:** miután sikerül a legjobbnak ítélt sorbanállási modellt megtalálni, numerikusan értékelni kell a modellt. Ez igaz akár stacionárius, akár tranziens analízisről van szó. Az értékeléshez teljesítőképességi jellemzőket definiálunk, számításukat elvégezzük és a számított értékeket elemezzük.

Az analízis fázisban komoly igény merül fel hatékony numerikus módszerekre. Ez az észrevétel tulajdonképpen a motivációja a disszertáció másik fő témájának. Sorbanállási, mátrix és numerikus számítási elméletekre alapozva a kutatási munkám arra összpontosul, hogy elmélyült betekintést adjon a numerikus módszerek működésébe, emellett új numerikus módszereket fejlesszen ki, amelyek hatékony eszközként szolgálnak a távközlés különböző területein található teljesítőképességi problémák numerikus megoldására.

4. Új kutatási eredmények

A híradástechnikai tanszék és a MATÁV szoros együttműködést folytat az ATM technológia bevezetésében Magyarországon. A zökkenőmentes bevezetés érdekében jól meghatározott fejlesztési fázisok lettek definiálva. 1999-ben elindult a nyilvános ATM hálózat felépítésének a fázisa. E fázisban való részvétel tudományos eredményeket hozott arra vonatkozóan, hogy az ATM hálózatot hogyan lehet optimálisan felépíteni a meglévő SDH infrastruktúrában. Az eredményeket a következő tézisban foglalom össze.

Tézis 1: Praktikus tervezési módszer ajánlása az SDH infrastruktúrában telepítendő ATM hálózat topológiai optimalizálására [C1, C2, C3, J1]

- Pontos matematikai leírást és formalizálást adtam a tervezési feladatra (2.4 fejezet).
- Praktikus megközelítést adtam a feladat elvégzéséhez (2.3 fejezet). A feladatot több, egymást követő alfeladatra bontottam. Az alfeladatok elvégzéséhez ADD és MENTOR heurisztikus algoritmusok (illetve azok kissé módosított változatai) kombinációját javasoltam felhasználni
- Demonstráltam az ajánlott megközelítés alkalmazhatóságát konkrét budapesti és magyarországi ATM hálózatok tervezésében (2.5 fejezet).

A disszertáció további eredményei a QBD és QBD-M folyamatokra vonatkoznak. A sorbanállási elméletben azokat a két dimenziós Markov folyamatokat, melyekben az átmenetek csak szomszédos szintek között lehetségesek, QBD (Quasi Birth Death) folyamatoknak hívják. A QBD koncepció, mint az egy dimenziós születési halálozási folyamatok általánosítása először [5, 14]-ban látott napvilágot a 60-as években. QBD folyamatok széleskörűen alkalmazhatóak a távközlési rendszerek teljesítőképességi elemzésében.

A távközlési problémák analízise azonban gyakran a QBD folyamatok általánosított változatát is igénybe veszi modellezési eszközként. Az általánosítás alatt azt értjük, hogy olyan kétdimenziós Markov folyamattal van dolgunk, ahol az átmenetek nem korlátozódnak a szomszédos szintek között, hanem tetszőleges, de egymástól véges távolságban levő szintek között is lehetnek. Mászóval az egyik dimenzióban csoportos érkezések és kiszorgálások lehetségesek. Az ilyen tulajdonságú folyamatokra QBD-M néven hivatkozunk.

A QBD-M folyamatok stacionárius megoldására léteznek numerikus módszerek [4, 6, 15, 16]. Azonban mindegyik megoldási módszer bizonyos hátrányokkal is rendelkezik. Ez a tény motiválta további kutatási tevékenységemet, amely a következő tudományos téziseket eredményezte.

Tézis 2: Iteratív módszer kidolgozása a QBD-M folyamatok stacionárius megoldására [C5, C6, T2]

Kifejlesztettem egy új iteratív numerikus módszert QBD-M folyamatok stacionárius megoldására (6.1 fejezet). A módszer lényege

1. a valószínűségi szint vektorok közötti speciális kapcsolatok felismerése;
2. egy iteratív számítási eljárás kidolgozása a fent említett kapcsolatokban szereplő mátrixok meghatározására

Ennek az iteratív módszernek az alkalmazhatóságát az szabja meg, hogy az érkezési csoportok maximális méretének nagyobbak kell lennie a kiszolgálási csoportok maximális méreténél. Elvben bebizonyítottam, hogy e módszer kisebb számítási komplexitással és tárolási követelménnyel rendelkezik, mint néhány más, mátrix geometriai jellegű módszer.

Tézis 3: Általánosított invariáns altér elméleten alapuló módszer kidolgozása QBD-M folyamatok stacionárius megoldására [C7, J3]

A 6.2 fejezetben megmutattam, hogy az általánosított invariáns altér elmélet alkalmazható a QBD-M folyamatok stacionárius megoldására. Ez a megközelítés a valószínűségi szint vektorok geometriai kifejezéséhez vezet. Megadtam továbbá a módszer részletes számítási lépéseit.

Megjegyzendő, hogy e módszer alkalmazható tetszőleges méretű érkezési és kiszolgálási csoportok esetében is.

Tézis 4: Analitikus modellek alkotása néhány távközlési rendszer elemzésére és a numerikus módszerek kiértékelése

Ez a tézis három altézisre tagolódik.

1. A QBD folyamatok numerikus módszereinek összehasonlítása és a használatukra vonatkozó ajánlások [C4, J2]

A QBD folyamatok széles alkalmazási köre megindokolja azt a törekvést, hogy teljesítőképességi összehasonlítást végezzünk a kifejlesztett numerikus módszerekre vonatkozóan. Ez ugyanis nagymértékben hozzájárul az adott feltételek mellett a legoptimálisabb módszer kiválasztásához. Ez a kutatási tendencia nemrégiben jól is tükröződik különböző publikációkban [1, 2, 6, 9, 10, 13]. A publikált munkákban az a közös vonás, hogy mindegyikük egy saját példán keresztül és többségük (kivéve [1]-t) csak végtelen pufferű QBD folyamatra végzi el az összehasonlítást.

Ebben az altézisben a QBD folyamatokra kifejlesztett numerikus módszerek teljesítőképességi összehasonlítását végzem el (3. és 4. fejezetek). Az összehasonlítás kiterjed a mostanában legismertebb módszerekre (mind a véges és végtelen pufferű esetekben történő alkalmazásokra). A numerikus eredmények alapján ajánlást teszek arra vonatkozóan, hogy adott körülmények között melyik módszert célszerűbb használni.

A kiválasztott módszerek a következők:

- MG: Klasszikus mátrix geometriai módszer [12],
- LA: Latouche és Ramaswami, logaritmikusan redukciós módszere [8],
- NA: Naoumov és társai által publikált, a logaritmikusan redukciós módszer továbbfejlesztett változata [11],
- SE: Spektrál felbontás módszer [4],
- IS: Invariáns alteres módszer [3].

Bevezettem két összehasonlítási szkenáriót attól függően, hogy az egyes módszerekben az iteratív eljárást hogyan állítjuk meg. Az egyik szkenárióban az SE módszer által kiszámított egyik teljesítőképességi paramétert használtam fel megállítási kritériumként, a másikban pedig az iteratív eljárások eredeti kritériuma került felhasználásra.

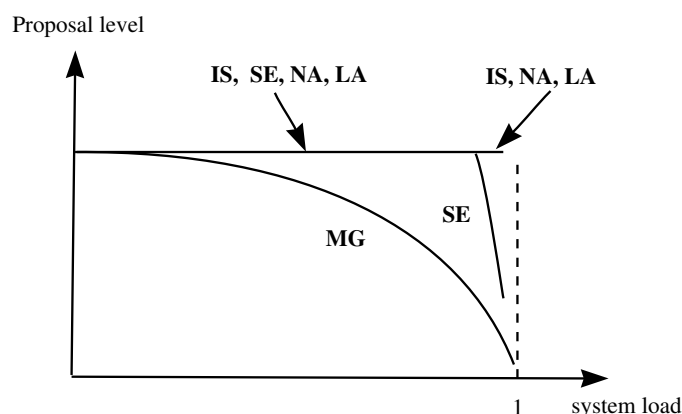
A használati ajánlások fő eredményei összefoglalhatók a következő pontokban:

- Megmutattam, hogy a módszerek majdnem azonos hatékonysággal működnek a rendszer mérsékelt terhelései mellett. A terhelés fokozatos növelése az MG idő-romlásához vezet, miközben a többi módszer még mindig megőrzi a hatékonyságát. Ez az állítás mind a végtelen, mind a véges pufferű rendszerekre igaz.
- Illusztráltam, hogy a végtelen pufferű esetben, a stabilitás határán az SE módszer instabillá válhat és olyan numerikus eredményt produkálhat, amely számottevően eltér a többi módszer eredményétől. Ugyanakkor az MG módszer használata nem célravezető a lassúsága miatt. Ilyenkor ezért az LA, NA vagy IS módszereket ajánlatos igénybe venni.
- Megmutattam, hogy véges pufferű esetben az IS módszer kissé jobbnak bizonyul a többi módszerhez képest. Továbbá, az IS módszer általában nagyon pontos numerikus eredményeket generál, melyek megegyeznek az SE által adott eredményekkel.

Az egyes módszerekre vonatkozó formális ajánlási szintet az 1. ábrában illusztrálom.

2. Analitikus modellek alkotása néhány távközlési rendszer teljesítőképességi elemzésére [C6, C8, C9, C10]

- Felépítettem egy analitikus modellt, amely alkalmas MPLS hálózatokban alkalmazott kiegyenlített többutas forgalomirányítás elemzésére (7.1 alfejezet).
- Megmutattam, hogy az ATM koncentrátor működése és teljesítőképességi elemzése egy diszkrét QBD-M folyamattal végrehajtható megfelelő megfontolásokkal (7.2 alfejezet).
- Alkottam egy véges pufferű, két prioritásos kiszolgálású, terhelésvezérelt sorbanállási modellt, amely felhasználható a DiffServ hálózatokban alkalmazott csomag ütemezési mechanizmusok elemzésére (8. fejezet).



1. ábra. A QBD folyamatok numerikus módszerei ajánlási szintje

Megmutattam továbbá, hogy a stacionárius numerikus elemzés az általánosított invariáns altér elméleten alapuló módszer (lásd. a 3. tézist) kissé bővített változatával végrehajtható. Levezettem a rendszer fontos teljesítőképességi jellemzőit, melyek a következők:

- Az igények átlagos száma a rendszerben
- Csoportos igényvesztési valószínűség
- Igényvesztési valószínűség
- Átlagos várakozási idő és átlagos rendszerben töltött idő
- A rendszerben töltött idő eloszlása

3. A QBD-M folyamatok numerikus módszereinek összehasonlítási értékelése [C6, C7, C9, J3]

Alapos összehasonlítást végeztem az újonnan kifejlesztett és néhány más jól ismert módszer teljesítőképességére. A figyelembe vett módszerek a következők:

- ITE: az új iteratív módszer
- GIS: az általánosított invariáns altér alapú módszer
- SE without BL: a direkt spektrál felbontás módszer
- SE after BL: az indirekt spektrál felbontás módszer (azaz a spektrál felbontás módszer kerül felhasználásra a QBD-M folyamat QBD folyamattá való transzformálása után)
- NA after BL: az NA módszer alkalmazása a QBD-M folyamat QBD folyamattá való transzformálása után

A numerikus eredmények különböző fontos praktikus következtetésekre vezetnek, amelyek tömören a következőképpen foglalhatók össze:

- Ha az érkezési csoportok felső határa elég nagy a kiszolgálási csoportok felső határához képest (relatív arányuk 2-nél nagyobb) és a rendszer terhelése nincs közel a stabilitási határhoz, akkor az ITE módszer a legjobb a futási idő szempontjából.
- A számítási pontosság szempontjából a GIS módszer bizonyul a legjobbnak. A GIS módszer futási ideje terhelés-független, gyorsabb az SE módszereknél és nagy terhelések esetén az ITE módszernél is.
- A direkt SE módszer láthatóan több időt igényel mint az indirekt SE módszer, viszont nagyobb működési stabilitással bír.
- Az NA módszer alkalmazása elég megbízhatónak bizonyul, mert nem időigényes, stabil és nagy pontossággal működik. A hatékonyságát csak az ITE tudja felülmúlni a rendszer kis és közepes terhelései mellett.

5. Az eredmények alkalmazása

Az első tézis eredménye ígéretes alternatívát jelent a budapesti és magyarországi ATM hálózattervezés számára. A tervezési algoritmusok az XPLANET szoftver csomaggal integrálva, alkalmazásra is kerültek.

A numerikus módszerekkel foglalkozó tézisek hatékony, gyors és pontos elemzési folyamatokat tesznek lehetővé, amelyek nagyon hasznosak a realiztikus teljesítőképesség elemzési feladatokban.

Megemlítendő, hogy a 4.2 tézis eredménye, illetve az ott bevezetett sorbanállási modell felhasználható a DiffServ koncepcióban alkalmazott csomag ütemezési mechanizmusok vizsgálatára és értékelésére.

Hivatkozások

- [1] N. Akar, N. C. Oguz, and K. Sohraby. A Novel Computational Method for Solving Finite QBD processes. *Communications in Statistics-Stochastic Models*, 16:273–312, 2000.
- [2] N. Akar and K. Sohraby. On Computational Aspects of the Invariant Subspace Approach to Teletraffic Problems and Comparisons. Technical report, Univ. Missouri-Kansas City, 1995.
- [3] N. Akar and K. Sohraby. Finite and Infinite QBD Chains: A Simple and Unifying Algorithmic Approach. In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pages 1105–1113, 1997.
- [4] R. Chakka. *Performance and Reliability Modelling of Computing System Using Spectral Expansion*. PhD thesis, University of Newcastle upon Tyne, 1995.
- [5] R. V. Evans. Geometric Distribution in some Two-dimensional Queueing Systems . *Operations Research*, 15:830–846, 1967.
- [6] B. Haverkort and A. Ost. Steady State Analysis of Infinite Stochastic Petri Nets: A Comparing between the Spectral Expansion and the Matrix Geometric Method. In *Proceedings of the 7th International Workshop on Petri Nets and Performance Models*, pages 335–346, 1997.
- [7] L. Jereb, T. V. Do, and G. I. Rózsa. Flexible planning of telecommunications networks based on layered network model. In *Proceedings of the 6th International Conference on Telecommunication Systems, Modelling and Analysis, Nashville USA*, 1998.
- [8] G. Latouche and V. Ramaswami. A logarithmic reduction algorithm for quasi-birth-death processes. *Journal of Applied Probability*, 30:650–674, 1993.
- [9] B. Meini. Solving QBD problems: the cyclic reduction algorithm versus the invariant subspace method. *Advances in Performance Analysis*, 1:215–225, 1998.
- [10] I. Mitrani and R. Chakka. Spectral Expansion solution of a class of markov models: Application and comparison with the matrix-geometric method. *Performance Evaluation*, 23:241–260, 1995.
- [11] V. Naoumov, U. R. Krieger, and D. Warner. Analysis of a Multi-Server Delay-Loss System With a General Markovian Arrival Process. In S. R. Chakravarthy and A. S. Alfa, editors, *Matrix-analytic methods in stochastic models*, volume 183 of *Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics*. Marcel Dekker, September 1996.
- [12] M. F. Neuts. *Matrix Geometric Solutions in Stochastic Model*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1981.

- [13] A. Ost and B. R. Haverkort. Evaluating Computer-Communication Systems using Infinite-State Stochastic Petri Nets. In *Proceedings of 3rd International Conference on Matrix Analytic Method*, pages 295–314, 2000.
- [14] V. L. Wallace. *The Solution of Quasi Birth and Death Processes Arising from multiple Access Computer Systems*. PhD thesis, University of Michigan, 1969.
- [15] G. Wolfner and M. Telek. Numerical analysis of queues with batch arrivals. *Performance Evaluation*, 41:179–194, 2000.
- [16] K. Wuyts, B. Van Houdt, R. K. Boel, and C. Blondia. Matrix Geometric Analysis of Discrete Time Queues with Batch Arrivals and Batch Departures with Applications to B-ISDN. In *Proceedings of the 16th International Teletraffic Congress ITC-16*, 1999.

Saját publikációk

Folyóirati cikkek

- [J1] T. V. Do, T. T. Nguyen, **H. T. Tran**, G. Kalvach and B. Varga. Topology Optimization of an Overlay ATM Network in an SDH Infrastructure. *Computer Networks*, 34:199-210, 2000.
- [J2] **Hung T. Tran** and Tien V. Do. Computational Aspects for Steady State Analysis of QBD Processes. *Periodica Polytechnica, Ser. El. Eng.*, 44:179-200, 2000.
- [J3] **Hung T. Tran** and Tien V. Do. Generalised Invariant Subspace based Method for Steady State Analysis of QBD-M Processes. *Periodica Polytechnica, Ser. El. Eng.*, 44:159-178, 2000.

Konferenciai cikkek

- [C1] T. V. Do, G. Kalvach, G. I. Rózsa, **H. T. Tran** and B. Varga. Topology Optimization of ATM Networks for LAN/MAN Interworking in the Top of an SDH Infrastructure. In *Proceedings of the 8th International Network Planning Symposium, Networks'98*. Sorrento, Italy, 1998, pp. 141-146.
- [C2] T. V. Do, T. T. Nguyen, **H. T. Tran**, G. Kalvach and B. Varga. Topology Optimization of an Overlay ATM Network in an SDH Infrastructure. In *Proceedings of the Sixth Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks*. Ilkley, UK, 1998, pp. 89/1-89/15.
- [C3] T. V. Do, T. T. Nguyen, **H. T. Tran**, G. I. Rózsa, G. Kalvach and B. Varga. Practical Approach for the Topology Optimization of an Overlay ATM Network. In *Proceedings of the 4th European Summer School EUNICE'98*. Munic, Germany, 1998.
- [C4] **H. T. Tran** and T. V. Do. Comparison of computational methods for QBD processes. In *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Informatics*. Eger-Noszváj, Hungary, 1999, pp. 299-311.
- [C5] **H. T. Tran** and T. V. Do. A new iterative method for systems with batch arrivals and batch departures. In *Proceedings of Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation (CNDS'00)* conference. San Diego, USA. January, 2000, pp. 131-137.
- [C6] **H. T. Tran** and T. V. Do. An iterative Method for Queueing Systems with Batch Arrivals and Batch Departures. In *Proceedings of the 8th IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM&IP Networks*. Ilkley, UK, 2000, pp. 80/1-80/13.

- [C7] **H. T. Tran** and T. V. Do. Generalised Invariant Subspace based Method for Steady State Analysis of QBD-M Processes. In *Proceedings of the second Conference of Ph.D students in Computer Science*. Szeged, Hungary, 2000.
- [C8] **H. T. Tran** and T. V. Do. Application of Finite QBD-M Process to Analysis of a Multi-server queue with two Priority Classes. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Queueing Networks with Finite Capacity, QNETs '00*. Ilkley, UK, 2000, pp. 39/1-39/12.
- [C9] **H. T. Tran** and T. V. Do. Comparison of some Numerical Methods for QBD-M Processes via Analysis of an ATM Concentrator. In *Proceedings of the 20th IEEE International Performance, Computing and Communications Conference, IPCCC*. Phoenix, USA, 2001, pp. 253-254.
- [C10] **Hung T. Tran** and Tien V. Do. An Analytical Model for Multipath Routing Schemes. In *Proceedings of the International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunications Systems, SPECTS'02*. San Diego, USA, 2002, pp. 170-178.

Technikai report

- [T1] **H. T. Tran**, T. V. Do, Zs. Mihaly and T. T. Nguyen. Some simulation results on the EF PHB in DiffServ clouds overlaid in ATM. Technical Report. ELISA AC310-WP1.2-TUB-98030-TC-CC/a . November, 1998.
- [T2] **H. T. Tran** and T. V. Do. A new iterative method for systems with batch arrivals and batch departures. COST257 Technical Report, 257TD(99)42. Larnaca, Cyprus. September, 1999.