BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TÁVKÖZLÉSI ÉS MÉDIAINFORMATIKAI TANSZÉK

DINAMIKUS ERŐFORRÁS MENEDZSMENT RÁDIÓS HÁLÓZATOKBAN

Kovács László

Tézisfüzet

Tudományos vezető

Dr. Vidács Attila
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest
2009

1. Bevezetés

A rádiós spektrum értékes és véges erőforrás, a rendelkezésre álló frekvenciák száma egyre kevesebb. Azonban a nagyrészt már kiosztott spektrum jelentős hányada kihasználatlan; ez a kihasználatlanság térben és időben is nagyon változó.

Az igényekben fellépő térbeli és időbeli változékonyság a jelenleg használatos merev spektrumkiosztás miatt azt eredményezi, hogy a rendelkezésre álló frekvenciasáv jelentős részét nem használjuk ki egy adott helyen és időpontban [4, 12, 16]. Ez a motivációja egy hatékonyabb kiosztási technikának, a dinamikus spektrum allokációnak (DSA - Dynamic Spectrum Allocation), ahol a spektrum használati jogok térben és időben is jóval finomabb skálán változhatnak. A spektrum kiosztásának dinamikussá tételével a szolgáltatások minősége tovább javulhat, és a felszabaduló frekvenciák miatt lehetőség lesz új szolgáltatások bevezetésére is.

A dinamikus spektrumkiosztás maga után vonja a spektrumgazdálkodás piaci alapokra helyezését. Két fontos tényezőt kell figyelembe vennünk a piaci alapokon működő spektrumgazdálkodás esetén: a frekvenciák "kereskedelme" lehetővé teszi a spektrumhasználati jogok átruházását rövid időskálákon is, a "liberalizáció" pedig biztosítja a szolgáltatás és technológia semlegességét. A két tényező együttes megvalósítása vezet a hatékony spektrumhasználathoz [3] [2]. Ezt a folyamatot az Európai Bizottság is támogatja. A bizottság közleménye szerint [3]: "A frekvenciagazdálkodás átalakítása az Európai Unióban a frekvenciaelosztás piaci alapra helyezése céljából nagy kihívást jelent. Érdemes azonban belevágni, mert a frekvenciapiacok tényleges bevezetése:

- gazdasági előnnyel járna annak megfelelően, amennyit Európa versenyképességben, innovációs potenciálban, a belső piac megerősödésével, valamint a fogyasztóknak kínált szolgáltatások választékának bővítésével nyerne, nem beszélve a munkahelyteremtésre és a külkereskedelemre gyakorolt pozitív hatásról;

- időszerű és szükséges, mert a frekvenciagazdálkodás eddigi gyakorlata a technológiai haladás, a frekvencia iránti kereslet növekedése és az üzleti élet és a piacok változási sebessége következtében elérte saját korlátait;

- megvalósítható a javasolt ütemezés szerint."

A dinamikus spektrumkiosztás megvalósítható központosított módon vagy elosztott módon. Katonai alkalmazások esetén csak az elosztott mód jöhet számításba [1], míg kereskedelmi alkalmazás esetén a már meglévő infrastruktúra miatt általában a központosított megoldást helyezik előtérbe. A központosított megoldásokról részletesen tájékozódhatunk [6] [7] [4] és hivatkozásaik alapján, továbbá az EU Drive, Overdrive és Winner projektjeinek publikációiból [10] [11] [9].

A központosított megoldásokon belül elkülöníthetünk prioritásos hozzáférési javaslatokat (a spektrumsávnak van egy prioritással rendelkező használója, aki kihasználatlanság esetén kiadhatja másnak a frekvenciasávot, melyet szükség esetén visszavehet), illetve egyenlő jogú hozzáférést biztosító javaslatokat.

Disszertációmban egy olyan központosított, egyenlő jogú hozzáférést biztosító keretrendszer megalkotásával foglalkozom, mely az EU bizottsági ajánlásával [2] [3] összhangban biztosítja a frekvenciák "kereskedelmét", lehetővé téve a spektrumhasználati jogok átruházását rövid időskálákon kisebb területekre is, továbbá megvalósítja a szolgáltató- és technológia-semlegességet is. A keretrendszerben javaslatot teszek egy aukciós és árazási megoldásra is, mely az eddigi javaslatokkal [14] [15] [8] ellentétben a szolgáltatók által fizetendő ár meghatározásánál figyelembe veszi a régiók között fellépő interferenciát is, ezzel is segítve az új, innovatív, kis interferenciát okozó, más technológiákkal jól együttműködő megoldások elterjedését.

2. Kutatási célkitűzések

Az első téziscsoport célja egy olyan dinamikus spektrum allokációs keretrendszer megalkotása, amely lehetővé teszi a jelenleg használatos merev spektrum kiosztás lecserélését egy piaci alapokon működő frekvenciagazdálkodásra. A téziscsoportban először javaslatot teszek egy általános keretrendszerre, amely modellezi a különböző régiókban működő különböző szolgáltatók egymásra hatását, és definiálok egy mérőszámot a spektrum minőségének jellemzésére. Ezt követően megvizsgálom a dinamikus spektrumkiosztás során elérhető nyereségeket, majd javaslatot teszek két allokációs modellre, és meghatározom a modellek esetén az optimális kiosztásokat.

A második téziscsoport az árazás és aukció kérdéskörével foglalkozik. Javaslatot tesz egy egykörös, több licites aukciós modellre, amely figyelembe veszi a dinamikus spektrumkiosztás sajátosságait, és illeszkedik az első téziscsoportban javasolt keretrendszerbe. Ezt követően megvizsgálom a gyors és hatékony kiértékelés lehetőségeit.

3. Módszertan

Az első rész eredményei a matematikai modellezés és analízis eszközein alapulnak. Az optimális allokációk meghatározásához a lineáris programozás és a szimulált lehűtés eszköztárát használtam fel. A keretrendszer helyes működésének ellenőrzéséhez egy MATLAB környezetben kialakított szimulációs eszközt használtam.

A második rész a játékelmélet eszköztárának segítségével ad egy egykörös, több-licites másodáras aukción alapuló aukciós modellt, majd analitikusan megvizsgálja a gyors és hatékony kiértékelés lehetőségeit. A működés ellenőrzéséhez Java és Matlab környezetben kialakított szimulációs eszközt használtam.

4. Új eredmények

Az itt bemutatásra kerülő eredmények két témakör körül csoportosulnak. Az első téziscsoport definiál egy tér- és időbeli dinamikus spektrum allokációs keretrendszert, meghatározza a DSA által elérhető nyereségeket, javaslatot tesz két allokációs modellre, és megadja a modellek esetén az optimális kiosztásokat. A második téziscsoport az árazás és aukció kérdéskörével foglalkozik. Javaslatot tesz egy egykörös, többlicites aukciós modellre, és megvizsgálja a gyors és hatékony kiértékelés lehetőségeit.

4.1. Tér- és időbeli DSA keretrendszer

1. Téziscsoport. *[F1,F2,P4,P5,P6,P7] Tér- és időbeli dinamikus spektrum allokáció menedzsment keretrendszer.*

A keretrendszer alapja, hogy a területet kisebb régiókra osztjuk, és egy régión belül feltételezzük, hogy a spektrum igények térbeli eloszlása egyenletes, az igények csak időben változnak.

A keretrendszeren belül felmerülő kérdések a következők:

- Hogyan modellezzük az egyes területek és a különböző technológiák egymásra hatását, a szolgáltatók által okozott interferenciát?
- Milyen, a dinamikus allokáció jóságát mérő, mérőszámokat definiálhatunk a modellben?
- Milyen elven osszuk ki a spektrumot? Hogyan kezeljük a különböző régiókban lévő különböző szolgáltatók egymásra hatását? Hogy modellezzük a szolgáltatók interferenciához való viszonyát? A szomszédos régiókban fellépő interferenciát kompenzálhatjuk (1.1 tézis) vagy bevezethetünk egy "tűrési" küszöböt minden szolgáltatóra. (1.4 tézis)
- Mi az az optimális kiosztás (a fenti két modellben), amely esetén, fix rendelkezésre álló spektrumsávot feltételezve, a fellépő zavaró hatás minimális? Egyáltalán kiszolgálhatóak-e ezek az igények a rendelkezésre álló spektrumsávon? (1.3 tézis, 1.6 tézis) Az igények ismeretében mekkora a minimálisan szükséges spektrumsáv az összes igény kiszolgálásához? (1.2 tézis, 1.5 tézis)

Az általam javasolt keretrendszerben a dinamikus spektrum allokációt az alábbiak szerint értelmezem. A rendelkezésre álló terület kissebb régiókra van osztva, egy-egy ilyen régió lehet például egy kerület, vagy egy városrész. A rendszer célja a régiókban fellépő igények időbeli változásának kezelése. Az idő allokációs periódusokra van osztva, egy allokációs periódus tipikusan egy-két óra hosszúságú, a keretrendszernek nem célja az igények hívásszintű kezelése. A szolgáltatók minden régióban és minden allokációs periódusban eltérő nagyságú spektrum blokkokra licitálhatnak a felhasználói igényeknek megfelelelően. A keretrendszer célja a különböző régiók között fellépő zavaró hatások (interferencia) modellezése, és annak biztosítása, hogy csak olyan kiosztások kerüljenek engedélyezésre, amely mellett a felhasználóknak nyújtott szolgáltatásokat nem teszi tönkre az interferencia. Formálisan a rendelkezésre álló spektrum blokk (Coordinated Access Band) legyen $S_{CAB} = (\check{s}, \hat{s})$. A rendelkezésre álló területet K régióra osztjuk. Egy régión belül M szolgáltató versenyez a rendelkezésre álló erőforrásért. Az m. szolgáltatónak a k. régióban kiosztott spektrumblokk a t. időpillanatban:

$$S_{m,k}(t) = \left(\check{s}_{m,k}(t), \hat{s}_{m,k}(t)\right). \tag{1}$$

Jelölje továbbá $|S_{m,k}(t)|$ a kiosztott spektrum blokk hosszát, azaz

$$|S_{m,k}(t)| = \hat{s}_{m,k}(t) - \check{s}_{m,k}(t). \tag{2}$$

Jellemezzük a k. régióban rendelkezésre álló B spektrum sáv minőségét az m. szolgáltató számára az alábbi módon:

$$\Xi_{m,k}(B, \varepsilon, \eta) = \frac{1}{|B|} \int_B \xi_{m,k}(\lambda, \varepsilon, \eta)\, d\lambda, \tag{3}$$

ahol

$$\xi_{m,k}(\lambda, \varepsilon, \eta) = \sum_{\forall i,j:(i,j)\neq(m,k)} \varepsilon_{k\leftarrow j}^{(i)} \cdot \eta_{m,i} \cdot I_{\{\lambda \in S_{i,j}\}}, \tag{4}$$

illetve az integrálást elvégezve

$$\Xi_{m,k}(B, \varepsilon, \eta) = |B|^{-1} \sum_{\forall i,j:(i,j)\neq(m,k)} \varepsilon_{k\leftarrow j}^{(i)} \cdot \eta_{m,i} \cdot |B \cap S_{i,j}|; \tag{5}$$

A fenti kifejezésekben szereplő ε és η pedig két általam javasolt általános paraméter a tér- és időbeli DSA esetén a különböző régiókban működő különböző szolgáltatók által okozott zavaró hatás leírására. Az $\varepsilon_{l\leftarrow k}^{(m)}$ földrajzi csatolási tényező a k. régióban működő m. operátor által az l. régióra kifejtett zavaró hatást irja le, míg az $\eta_{m,n}$ technológiai csatolási tényező az m. és az n. szolgáltató által használt technológiák közötti csatolást jellemzi. A modellben az interferencia a spektrum minőségének romlását okozza. Az interferencia mértéke függ a földrajzi helytől és a régió méretétől, továbbá a használt rádiós technológia jellemzőitől. Az interferencia által okozott zavaró hatást kettéválaszthatjuk két független komponensre. A földrajzi csatolási tényező azt írja le, hogy mekkora zavaró hatást okoz egy szomszédos (vagy távolabbi) régióban ugyanazon a frekvenciasávon üzemelő másik szolgáltató, míg a technológiai csatolási tényező azt irja le, hogy ezen zavaró hatás mekkora részét tudjuk "kiszűrni" a technológiából adódóan.

Fizikailag például az $\varepsilon^{(m)}_{l\leftarrow k}$ földrajzi csatolási paraméter értéke kifejezhető az $s^{max}_{k,m}$ engedélyezett maximális teljesítménysűrűség és az R_l régió és az R_k régió között fellépő $\varepsilon_{k\leftarrow l}$ jelerősség csillapodás szorzataként:

$$\varepsilon^{(m)}_{l\leftarrow k} = s^{max}_{k,m} \cdot \varepsilon_{k\leftarrow l}. \tag{6}$$

Például az Okumura-Hata terjedési modell alapján közepes városra [13] $\varepsilon_{k\leftarrow l}$ az alábbi módon számítható:

$$\varepsilon^{[dB]}_{k\leftarrow l} = -A^{[dB]}\left(d^{[km]}_{k,l}\right) = -130.52 - 10 \cdot \lg\left(d^{[km]}_{k,l}\right), \tag{7}$$

ahol A a két régió közötti távolság ($d^{[km]}_{k,l}$) függvénye. Szomszédos régiókra $\varepsilon_{k\leftarrow l}$ értéke közelítőleg 1.

Az $0 \leq \eta \leq 1$ technologiai csatolási tényező értéke részletes szimulációkkal határozható meg különböző rádiós technológia párokra. Ez a paraméter azt fejezi ki, hogy mennyire tud két technológia egymás mellett élni, értéke számos, technológiára jellemző paramétertől függ (például: jelfeldolgozási technológia, szinkronizáció, kódolás, stb.). Minél kisebb ezen paraméter értéke, annál jobban képes az adott technológia kiszűrni az interferenciát okozó más technológiákat.

Az együttes zavaró hatás a földrajzi és technológiai csatolási tényező szorzata. Az egy szolgáltatónak felajánlott B spektrum blokkot érő zavaró hatás meghatározásához jelöljük $\Xi_{m,k}(B, \varepsilon, \eta)$-val a B spektrum blokkot érő átlagos zavarást a k. régióban működő m. szolgáltató szemszögéből nézve. Az ennek kiszamitásához szükséges (3)-as egyenletben szereplő $\xi_{m,k}(\lambda, \varepsilon, \eta)$ a λ frekvenciát érő zavaró hatás az m. szolgáltató szemszögéből a k. régióban, azaz (4) alapján összegeznünk kell a B sávot érő zavaró hatásokat, mivel (4)-ban $I_{\{\lambda \in S_{i,j}\}}$ azt jelzi, hogy a λ frekvencia hozzá van-e rendelve az i. szolgáltatóhoz a j. régióban.

Elérhető nyereségek. A jelenleg használatos statikus spektrumkiosztás esetén a frekvenciahaszálati jogok nagy területekre (gyakran az ország egész területére) és hosszú időre (több évre) kerülnek kiosztásra. Ez azt jelenti, hogy egy szolgáltatónak a jelenlegi fix kiosztású rendszerben az általam javasolt keretrendszer jelöléseit használva

$$S^f_m = \max_{\tau,\kappa} |S_{m,\kappa}(\tau)| \tag{8}$$

nagyságú spektrum blokkot kell igényelnie, hogy minden időpontban, minden területen ki tudja szolgálni az igényeket. Továbbá az összes szolgáltató igényeinek kiszolgálásához

$$S^f = \sum_{m=1}^{M} S_m^f \tag{9}$$

méretű spektrumsáv szükséges.

Érdemes megvizsgálni, hogy mekkora nyereségeket érhetünk el a dinamikus spektrumkiosztás bevezetésével mind a szolgáltató, mind a szabályozó hatóság szemszögéből nézve. A szolgáltatót érintő nyereség abből adódik, hogy képes lesz követni a felhasználók igényeinek térbeli és időbeli változását, és elégséges lesz mindig csak az adott helyen fellépő igényeknek megfelelő spektrumot igényelnie. A szabályozó hatóság nyereségét pedig a dinamikus kiosztás miatt "felszabaduló" spektrum blokkok adják.

Javaslatot tettem az alábbi mérőszámok használatára a DSA és fix kiosztású rendszerek összehasonlítása során:

- Időbeli DSA-ból származó pillanatnyi szolgáltatói nyereség:

$$PG_m^t(t) = 1 - \frac{|S_m(t)|}{S_m^f}; \tag{10}$$

- Térbeli DSA-ból származó szolgáltatói nyereség:

$$PG_{m,k}^s = 1 - \frac{S_{m,k}}{S_m^f}; \tag{11}$$

- Tér- és időbeli DSA-ból származó pillanatnyi szolgáltatói nyereség:

$$PG_{m,k}^{st}(t) = 1 - \frac{|S_{m,k}(t)|}{S_m^f}; \tag{12}$$

- Átlagos szolgáltatói nyereség:

$$PG_m^{avg} = \int_T PG_m^t(t)dt; \tag{13}$$

- Garantált pillanatnyi szabályozó hatósági nyereség:

$$RG(t) = 1 - \frac{\max_{m,k}(\hat{s}_{m,k}(t)) - \min_{m,k}(\check{s}_{m,k}(t))}{S^f}; \tag{14}$$

- Átlagos szabályozó nyereség:

$$RG^{avg} = \int_T RG(t)dt. \tag{15}$$

Első lépésként vizsgáljuk meg mekkora nyereséget érne el egy szolgáltató (az m. szolgáltató), ha csak az időbeli dinamikus spektrumkiosztást vezetnénk be. Ez esetben a szolgáltatónak minden időpillanatban a teljes szolgáltatási területen fellépő legmagasabb igényt ($|S_m(t)|$) kell kérnie a spektrum brókertől. Így a fix kiosztáshoz képest elérhető nyereség (10) alapján számolható.

Amennyiben csak területi dinamikus spektrumkiosztást vezetnénk be (azaz kisebb régiókra de csak hosszú időtartamra igényelhetnének spektrumot a szolgáltatók), akkor a k. régióban működő m. szolgáltatónak a teljes időtartam alatt az adott régióban fellépő legmagasabb igényt ($S_{m,k}$) kell kérnie a spektrum brókertől. Ekkor a szolgáltató területi dinamikus spektrumkiosztásból származó nyeresége (11) alapján határozható meg.

Amennyiben tér- és időbeli dinamikus spektrumkiosztást valósítunk meg, a szolgáltatónak csak az adott időpontban az adott régióban fellépő igényt ($|S_{m,k}(t)|$) kell kérnie a spektrum brókertől. Ez esetben lesz az elérhető nyereség a legnagyobb, mely értékét egy adott időpillanatban (12) alapján számolhatjuk.

A nyereségeket időben átlagolhatjuk is, így meghatározhatjuk az időbeli dinamikus spektrumkiosztás esetén fellépő átlagos szolgáltatói nyereséget egy adott időtartamra (13) illetve a (13)-as képlet kiterjesztésével, az időbeli pillanatnyi nyereség helyett a tér- és időbeli DSA-ból származó pillanatnyi nyereség integrálásával egy adott régióra is meghatározhatjuk az átlagos szolgáltatói nyereséget.

A térbeli átlagolásra is lehetőség van, ez esetben azonban szükséges további paraméterek bevezetése, melyek a régiók egymáshoz való viszonyát írják le (például területi arányok, vagy a régiókon belüli átlagos spektrumár arányai, stb.).

A szabályozó hatóság szemszögéből a nyereség abból adódik, hogy az összes régióban fellépő összes igényt mekkora spektrumsávon tudjuk kiszolgálni, azaz mekkora spektrumsáv szabadul fel a fix kiosztáshoz képest. Ennek legfontosabb mérőszáma az, hogy egy adott pillanatban mekkora sávon tudjuk az összes igényt kielégíteni, azaz az adott kiosztás kezdőpontjainak legkisebb értéke és végpontjainak legnagyobb értéke között mekkora a távolság, illetve ez hogy viszonyul a fix spektrumkiosztáshoz. Ez a garantált pillanatnyi szabályozó hatósági nyereség, amelynek értékét (14) alapján számolhatjuk. Ezen mérőszám időbeli alakulásából meghatározhatjuk (például valószínűségi módszerekkel, vagy csak egyszerűen hosszabb idő alatti minimumot figyelembe véve) hogy a dinamikus spektrum allokáció bevezetésével az eddig szükséges sávból mekkora rész szabadítható fel más célokra. Az átlagos nyereséget is meghatározhatjuk (15) alapján.

Kompenzációs modell. A szolgáltatókat érő interferencia meghatározása után a következő kérdés az, hogy milyen elven osszuk ki a spektrumot, hogyan modellezük a szolgáltatók interferenciához való viszonyát. Az 1.1 - 1.3 tézisek egy úgynevezett kompenzációs modellre vonatkoznak. A modell alapgondolata, hogy a felhasználók nem direkt spektrumot igényelnek a szolgáltatóktól, hanem adott kapacitású digitális átviteli csatornát. A spektrum-becslők feladata, hogy az igényelt kapacitásokhoz meghatározzák a szükséges spektrumblokkok nagyságát. Ennek meghatározása azonban nem egyszerű feladat, mivel függ a környezettől (a blokkot ért interferenciától). Az egy szolgáltató által igényelt digitális átviteli csatornához az adott technológia mellett, interferencia mentes esetben szükséges sávszélességet jelöljük $b_{m,k}$-val. A modell alapötlete az, hogy zajos környezetben a fellépő interferenciát “extra” spektrum blokkokkal kompenzáljuk. Az 1.1 tézis a kompenzációs modellben meghatározza egy adott allokáció megvalósíthatósági feltételeit. Az 1.2-es tézisben javasolt eljárás meghatározza, hogy mi az a legkisebb spektrum sáv, amin az adott igényhalmaz kiszolgálható (azaz maximális a garantált hatósági nyereség), továbbá megadja az ehhez az elrendezéshez tartozó spekrumallokáció kezdő és végpontjait. A 1.3-ös tézisben javasolt eljárás pedig fix rendelkezésre álló spektrumsáv mellett meghatározza, hogy az adott igényhalmaz kiszolgálható-e, továbbá megadja a minimális interferenciájú elrendezést.

1.1. Tézis. *[P4] Kompenzációs modell esetén egy* $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \ldots, \mathbf{S}_M)$ *allokáció (ahol* $\mathbf{S}_m = (S_{m,1}, \ldots, S_{m,K})$*) megvalósítható, ha a szolgáltatók által használt spektrum blokkok (*$\{S_{m,k}\}$*) teljesítik az alábbi feltételeket:*

$$\begin{aligned} S_{m,k} \cap S_{n,k} &= \emptyset, \quad \forall m, n, k, && (16)\\ |S_{m,k}|(1 - \delta \Xi_{m,k}(S_{m,k}, \varepsilon, \eta)) &\geq b_{m,k}, \quad \forall m, k\,, && (17) \end{aligned}$$

ahol δ *a kompenzációs állandó,* $\Xi_{m,k}(B, \varepsilon, \eta)$ *pedig az* $S_{m,k}$ *spektrum blokkot jellemzi az interferencia szempontjából, értéke 3 alapján határozható meg.*

A (16)-os feltétel kizárja hogy egy régión belül két szolgáltató ugyanazt a spektrum blokkot kapja. A (17) feltétel pedig azt mondja, hogy annyival nagyobb spektrum blokk allokálása szükséges egy szolgáltató számára, ami kompenzálja a zavaró hatásokból eredő kapacitás csökkenést. A feltételben szereplő δ paraméter egy úgynevezett “kompenzációs konstans” amely azt adja meg, hogy egységnyi zavaró hatás kompenzálásához mekkora spektrumblokk szükséges.

1.2. Tézis. *[P4] Megadtam azt a feltételrendszert, amelyet teljesítő allokáció megadja a legkisebb spektrumsáv méretét, melyen az igények még kiszolgálhatóak. Legyen*

$$c_{(\{m,k\},\{n,l\})} = \begin{cases} 1, & \textit{ha } k = l \\ \delta \eta_{m,n} \varepsilon_{k,l}, & \textit{egyébként} \end{cases} \tag{18}$$

továbbá,

$$z_{(i,j)} = |S_i \cap S_j| = \max\{0, \min\{\hat{s}_i, \hat{s}_j\} - \max\{\check{s}_i, \check{s}_j\}\} \tag{19}$$

Ekkor a $\check{y}_{(i,j)} = I_{\{\check{s}_i \leq \check{s}_j\}}$ *és az* $\hat{y}_{(i,j)} = I_{\{\hat{s}_i \leq \hat{s}_j\}}$ *segédváltozók bevezetésével az*

$$\check{s} \leq \check{s}_i \leq \hat{s}_i \leq \hat{s} \quad \forall i \in V \tag{20}$$

$$\hat{s}_i - \check{s}_i - \sum_{\forall (i,j) \in E} z_{(i,j)} \cdot c_{(i,j)} \geq b_i s_0 \quad \forall i \in V \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
z_{(i,j)} &\geq \hat{s}_j - \check{s}_j - S \cdot (\hat{y}_{(i,j)} + (1 - \check{y}_{(i,j)})) \\
z_{(i,j)} &\geq \hat{s}_i - \check{s}_j - S \cdot [(1 - \hat{y}_{(i,j)}) + (1 - \check{y}_{(i,j)})] \\
z_{(i,j)} &\geq \hat{s}_j - \check{s}_i - S \cdot [\hat{y}_{(i,j)} + \check{y}_{(i,j)}] \\
z_{(i,j)} &\geq \hat{s}_i - \check{s}_i - S \cdot [(1 - \hat{y}_{(i,j)}) + \check{y}_{(i,j)}]
\end{aligned} \tag{22}$$

$$\hat{s}_i \leq s' \quad \forall i \in V \tag{23}$$

egyenletekkel megfogalmazott lineáris programozási feladat megoldása s' *minimalizálása esetén megadja, hogy mi az a legkisebb spektrum sáv, amin az adott igényhalmaz kiszolgálható (azaz maximális a garantált hatósági nyereség), továbbá megadja az ehhez az elrendezéshez tartozó spekrumblokkok kezdő- és végpontjait.*

A problémát egy olyan irányítatlan gráffal modelleztem, ahol a pontok egy-egy régió egy-egy szolgáltatóját reprezentálják, a pontokat összekötő élek költsége pedig a spektrum minőségének romlását (a két pont közti interferenciát) reprezentálja ((18)-as egyenlet).

A feladat minden ponthoz megtalálni a hozzá tartozó $S_i = (\check{s}_i, \hat{s}_i)$ optimális spektrum blokkot. Definiáljunk továbbá minden élre egy $z(i,j)$ változót, mely az átlapolódás mértékét fejezi ki ((19)-es egyenlet).

Ekkor az $\check{y}_{(i,j)} = I_{\{\check{s}_i \leq \check{s}_j\}}$ és az $\hat{y}_{(i,j)} = I_{\{\hat{s}_i \leq \hat{s}_j\}}$ segédváltozók bevezetésével a feladat a fenti módon fogalmazható meg, a cél pedig s' minimalizálása. A feladat megoldása megadja azt a legkisebb spektrum sáv méretet (s'), amely szükséges az adott igényhalmaz (b_i-k) kiszolgálásához, az $S_i = (\check{s}_i, \hat{s}_i)$ változók pedig az optimumhoz tartozó elrendezést, az egyes szolgáltatók számára kiosztott spektrum blokkok kezdő és végpontjait tartalmazzák.

1.3. Tézis. *[P4] Megadtam azt a feltételrendszert, amelyet teljesítő allokáció a legkisebb összinterferenciájú elrendezést adja meg. Az 1.2-es tézis jelöléseit alkalmazva,* *továbbá bevezetve az f' változót az összinterferenciára, az előző tézis (21)-es, (22)-es egyenletei, valamint a*

$$0 \leq \check{s}_i \leq \hat{s}_i \leq S_{CAB}, \quad \forall i \in V, \tag{24}$$

$$\sum_{\forall (i,j) \in E} z_{(i,j)} \cdot c_{(i,j)} \leq f', \quad \forall (i,j) \tag{25}$$

egyenletekkel megfogalmazott lineáris programozási feladat megoldása f' minimalizálása esetén megadja, hogy a rendelkezésre álló spektrumsávon az adott igényhalmaz kiszolgálható-e, továbbá megadja a minimális interferenciájú elrendezést is.

A probléma modellezése megegyezik az 1.2-es tézisben felállított modellel. Az átlapolódásra és a kompenzálásra vonatkozó egyenletek megegyeznek az 1.2-es tézis (21)-es és (22)-es egyenleteivel. A (24)-es egyenlet a sávkorlátra vonatkozó feltételt fogalmazza meg, a (25)-ös egyenlet pedig az összinterferenciát számolja, igy f' minimalizálása a legkisebb összinterferenciájú elrendezéshez vezet.

Ha a feladat megoldható, akkor az igényhalmaz kiszolgálható a rendelkezésre álló spektrumsávon (S_{CAB}), az $S_i = (\check{s}_i, \hat{s}_i)$ változók a minimális interferenciájú allokációt tartalmazzák.

Interferencia toleráns modell. A spektrum kiosztás egy másik lehetséges megközelítésére definiáltam az "interferencia toleráns" modellt. Az 1.4-1.6 tézisek az ezen modellel kapcsolatos állításokat tartalmazzák. A kiosztás alapötlete az, hogy különböző technológiák különböző mértékben toleránsak a zavaró hatásokra. Ezért javaslatot tettem két paraméter bevezetésére (α és β), amelyek a szolgáltató interferencia tolerancia szintjét jellemzik. A β_m paraméter megadja azt a maximális átlagos interferenciát melyet a szolgáltató még elvisel, míg az α_m paraméter azt a maximális interferenciát adja meg, amelyet semelyik frekvencián nem szabad átlépnie a kiosztásnak. Az 1.4 tézis az interferencia toleráns modellben meghatározza egy adott allokáció megvalósíthatósági feltételeit. A 1.5-es tézisben javasolt eljárás meghatározza, hogy mi az a legkisebb spektrum sáv, amin az adott igényhalmaz kiszolgálható (azaz maximális a garantált hatósági nyereség), továbbá megadja az ehhez az elrendezéshez tartozó spekrumallokáció kezdő és végpontjait. A 1.6-as tézisben javasolt eljárás pedig fix rendelkezésre álló spektrumsáv mellett meghatározza, hogy az adott igényhalmaz kiszolgálható-e, továbbá megadja a minimális interferenciájú elrendezést.

1.4. Tézis. *[F1, P2, P5] Feltételezve, hogy a szolgáltatók vállalják, hogy a régióhatárokon nem lépik át a maximálisan engedélyezett s^{max} teljesítménysűrűséget, az interferencia toleráns modell esetén egy $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \ldots, \mathbf{S}_M)$ allokáció (ahol $\mathbf{S}_m = (S_{m,1}, \ldots, S_{m,K})$) megvalósítható, ha a szolgáltatók által használt spektrum blokkok*

($\{S_{m,k}\}$) teljesítik az alábbi feltételeket:

$$\begin{aligned} \Xi_{m,k}(S_{m,k},\varepsilon,\eta) &\leq \beta_m, \quad \forall m,k, && (26)\\ \max_{\lambda\in S_{m,k}} \xi_{m,k}(\lambda,\varepsilon,\eta) &\leq \alpha_m, \quad \forall m,k. && (27)\end{aligned}$$

Ahol az $\varepsilon^{(i)}_{k\leftarrow j} = s^{max}_{i,j}\cdot\varepsilon_{k\leftarrow j}$ kifejezést (4)-be és (5)-be behelyettesítve:

$$\Xi_{m,k}(S_{m,k},\varepsilon,\eta) = |B|^{-1} \sum_{\forall i,j:(i,j)\neq(m,k)} \varepsilon_{k\leftarrow j}\cdot\eta_{m,i}\cdot s^{max}_{i,j}\cdot|B\cap S_{i,j}|; \tag{28}$$

továbbá:

$$\xi_{m,k}(\lambda,\varepsilon,\eta) = \sum_{\forall i,j:(i,j)\neq(m,k)} \varepsilon_{k\leftarrow j}\cdot\eta_{m,i}\cdot s^{max}_{i,j}\cdot I_{\{\lambda\in S_{i,j}\}}. \tag{29}$$

A javasolt modellben a szolgáltatók vállalják, hogy egy megadott teljesítménysűrűséget ($s^{max}_{i,j}$) nem lépnek át a régióhatárokon. Ez a határérték ellenőrizhető, értéke pedig más lehet mind régiónként, mind szolgáltatónként. Ezen paraméter bevezetésével a keretrendszer $\varepsilon^{(i)}_{k\leftarrow j}$ paramétere felbontható a szolgáltató által vállalt teljesítménysűrűség határérték ($s^{max}_{i,j}$) és a két régió közötti jelerősség csillapodás ($\varepsilon_{k\leftarrow j}$) szorzatára:

$$\varepsilon^{(i)}_{k\leftarrow j} = s^{max}_{i,j}\cdot\varepsilon_{k\leftarrow j}. \tag{30}$$

Ezt a kifejezést behelyettesítve a (4)-es egyenletbe, a (29)-es kifejezést kapjuk, ami az adott frekvencián fellépő interferenciát méri. (29)-et a (3)-es egyenletbe visszahelyettesítve és az integrálást elvégezve pedig eljutunk a tézisben szereplő (28)-as kifejezéshez, ami a spektrumminőség mérőszáma, jelen esetben a kiosztott sávban található átlagos interferencia.

Ezek alapján (26) garantálja, hogy az átlagos interferencia a β_m érték alatt maradjon, (27) pedig, hogy a maximális interferencia sehol ne haladja meg az α_m értéket.

1.5. Tézis. *[F1, P5] Az alábbi módon definiált célfüggvény mininmuma megadja az interferencia-toleráns modellre azt a kiosztást, amely esetén az adott allokációs vektor (**a**) a legkisebb sávszélességen szolgálható ki (a garantált hatósági nyereség maximális): Legyen*

$$\mathbf{s} = (\check{s}_{1,1},\ldots,\check{s}_{1,K},\ldots,\check{s}_{M,1},\ldots,\check{s}_{M,K}), \tag{31}$$

és

$$|S| = \max(\hat{s}_{m,k}) - \min(\check{s}_{m,k}). \tag{32}$$

*Definiáljunk továbbá az **a** allokációs vektort az alábbi módon:*

$$\mathbf{a}((m-1)K+k) = \hat{s}_{m,k} - \check{s}_{m,k}. \tag{33}$$

Ekkor az

$$E(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = -\frac{S_{CAB} - |S|}{S_{CAB}} + P_f, \tag{34}$$

ahol

$$P_f = \sum_{m=1}^{M} \sum_{k=1}^{K} \left(I_{\{\Xi(S_{m,k}) < \beta_m\}} + I_{\{\min\limits_{\lambda \in S_{m,k}} \xi_{S_{m,k}}(\lambda) < \alpha_m\}} \right) \tag{35}$$

módon definiált célfüggvény minimuma megadja az interferencia-toleráns modellre azt a kiosztást, amely esetén az adott igényhalmaz ($\mathbf{a}$*) a legkisebb sávszélességen szolgálható ki (a garantált hatósági nyereség maximális). A (32)-es egyenlet segítségével pedig megkapjuk a sáv méretét is.*

Komplex optimalizációs feladatok esetén gyakran alkalmazott eljárás egy, a rendszert leíró állapotvektor (állapottér) valamint egy olyan – ezen a téren értelmezett – úgynevezett célfüggvény definiálása, mely minimumát az optimumpontban veszi fel. A fenti problémára az állapotvektort (31) szerint definiáltam. Így az S spektrum allokáció egyértelműen leírható az $\mathbf{s}$ állapotvektorral és az $\mathbf{a}$ allokációs vektorral.

A (34)-ben megadott célfüggvény első része azt méri, hogy a maximálisan rendelkezésre álló sáv (S_{CAB}) mekkora részét nem használjuk fel, míg a P_f büntető függvény értéke csak abban az esetben nulla, ha az (26) és (27) megvalósíthatósági feltételek teljesülnek minden spektrum blokkra, egyébként a büntető függvény értéke legalább egy.

1. Következmény. *A fentiekből adódóan az E célfüggvény a következő tulajdonságokkal rendelkezik:*

- *ha a függvény értéke pozitív, az állapotvektor által reprezentált elrendezésben sérülnek a megvalósíthatósági feltételek;*
- *ha a függvény minimuma is pozitív, akkor az adott igényhalmaz egyáltalán nem szolgálható ki a maximálisan rendelkezésre álló S_{CAB} sávon;*
- *ha az energiafüggvény értéke negatív, az elrendezés egy lehetséges megvalósítható elrendezése az allokációnak;*
- *az energiafüggvény egyre kisebb értékei az optimális megoldást egyre jobban megközelítő megoldásokat jelentenek.*

Az optimalizálás megvalósítható például szimulált lehűtéssel, ahol a rendszer energiája a (34) és (35) függvények által definiált.

Minden lépésben a szimulált lehűtés algoritmus megvizsgálja az aktuállis állapot ($\mathbf{s}$) néhány szomszédját ($\mathbf{s}'$) és véletlenszerűen eldönti hogy a rendszer továbbra is az

$e = E(\mathbf{s})$ energiával rendelkező $\mathbf{s}$ állapotban maradjon-e, vagy pedig elmozduljon az $e' = E(\mathbf{s}')$ energiával rendelkező $\mathbf{s}'$ állapotba.

Az általam javasolt algoritmusban az új szomszédokat úgy generáltam a régi állapotvektorból, hogy a kiindulási állapotvektor minden eleméhez egy Gauss eloszlású véletlen értéket adtam hozzá, azaz:

$$\mathbf{s}' = \mathbf{s} + X\mathbf{e}_Y, \quad X \sim \mathcal{N}(0,\sigma), \quad Y \sim \mathcal{U}_{MK}, \tag{36}$$

ahol $\mathbf{e}_i$ az i. egységvektor (az i. elem egy, a többi nulla), Y pedig egy egyenletes eloszlású diszkrét értékű változó $[1, MK]$-n. Az X állapot eltolási változó várható értéke nulla, szórását pedig $S_{CAB}/4$-re állítottam.

Az aktuális s állapotból egy lehetséges s' állapotba történő állapotátmenet valószínűsége nemcsak az energiák (e és e') függvénye, hanem egy globális időfüggő paraméteré is (T).

Az állapotátmenet valószínűségének meghatározására a következő függvényt használtam:

$$P(e, e', T) = e^{\frac{e-e'}{T}}. \tag{37}$$

A T paraméter csökkentésére használt függvény pedig: $T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$, ahol $T_0 = 1$ és $\alpha = 0.98$.

1.6. Tézis. *[F1, P5] Az alábbi módon definiált célfüggvény mininmuma megadja az interferencia-toleráns modellre azt a kiosztást, amely esetén a fellépő interferencia minimális:*

A 1.5 tézis definícióit és feltételezéseit használva, az

$$E(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = -\frac{\Xi_{max} - \Xi(S_{CAB})}{\Xi_{max}} + P_f, \tag{38}$$

ahol

$$\Xi(S_{CAB}) = \sum_{\forall m,k} \Xi_{m,k}(S_{m,k}), \tag{39}$$

továbbá

$$\Xi_{max} = \sum_{\forall m,k} |S_{m,k}|^{-1} \cdot \sum_{\forall i,j:(i,j)\neq(m,k)} \varepsilon_{k\leftarrow j} \cdot \eta_{m,i} \cdot s_{i,j}^{max} \cdot |S_{CAB}| \tag{40}$$

módon definiált célfüggvény minimuma megadja az interferencia-toleráns modellre azt a kiosztást, amely esetén a fellépő interferencia minimális. Ezenfelül a függvény negatív értéke jelzi, hogy az adott allokáció megvalósítható.

A rendszert leíró állapotvektor megegyezik az 1.5 tézisben definiált állapotvektorral. A (38)-ban megadott célfüggvény itt is két részből áll. Az első tag azt méri, hogy mennyivel kisebb az interferencia az elvi maximumnál, mivel $\Xi(S_{CAB})$ az adott allokációhoz tartozó összinterferencia, Ξ_{max} pedig az elvileg maximálisan felléphető interferencia a rendszerben, amennyiben minden szolgáltató maximális igénnyel jelentkezik. A célfüggvény második része megegyezik az 1.5 tézisben definiált büntetőfüggvénnyel.

2. Következmény. *Ezek alapján a (38)-as egyenlettel definiált E célfüggvény tulajdonságai megegyeznek a 1.5 tézisben megfogalmazott tulajdonságokkal.*

4.2. Valós idejű aukció és árazás

2. Téziscsoport. *Valós idejű aukció és árazás a tér- és időbeli DSA menedzsment keretrendszerben. [K1, F1, P1, P3]*

A keretrendszer meghatározása, a régiók egymásra hatásának modellezése és az optimális elrendezés megadása mellett a másik fontos témakör a dinamikus spektrum allokáció "piaci alapokra helyezése"; megfelelő, valós időben működőképes aukciós- és árazási DSA menedzsment keretrendszer megvalósítása.

A 2.1-es tézisben javaslatot teszek egy aukciós modellre, amely figyelembe veszi a DSA rendszerek sajátosságait, azaz képes alkalmazkodni a felmerülő spektrumigények tér- és időbeli változásához. A javasolt modell célja a napon belüli ingadozások követése; az újra allokálási időtartam tipikusan 1-2 óra. A model centralizált, a szolgáltatók igényei és licitjei egy központi spektrum brókerhez érkeznek be, amely meghatározza az optimális elrendezést, a szolgáltatók által fizetendő árakat, és a következő licitálási periódusra kizárólagos licenszeket ad az elnyert spektrum részekre.

Az optimális allokáció megtalálásához számos megvalósíthatóság-ellenőrzést kell elvégeznünk egyetlen licitálási periódus alatt. A gyors megvalósíthatóság-ellenőrzés nélkülözhetetlen a valós idejű működéshez. Erre a problémára ad választ a 2.2, 2.3, 2.4 tézis. A másik feladat a legnagyobb hatékonyságú allokáció megkeresése, erre a 2.5-ös tézisben adtam egy gyors, szabály alapú algoritmust.

Aukciós modell. A rendelkezésre álló spektrum meghatározott időnként kerül újra allokálásra. Minden periódus előtt a szolgáltatók elküldik licitjeiket egy központosított spektrum bróker entitásnak. A spektrum bróker meghatározza a szolgáltatók által fizetendő árakat és azt az optimális allokációt ami maximalizálja a "közjót" (social welfare).

Mivel az iteratív aukciók konvergencia ideje hosszú lehet és jelentős jelzésforgalom növekedést okozhat, továbbá tipikusan a szolgáltatók keresleti függvénye nem folytonos, és mindössze néhány licitből áll, ezért árazási megoldásként egy egykörös, többlicites aukciós eljárást javasoltam.

Jelölje $\mathcal{I} = \{1, \ldots, i, \ldots, I\}$ a játékosok halmazát. Mivel egyazon szolgáltató igényei különböző régiókban eltérőek lehetnek, ezért a szolgáltatókat minden régióban külön kezelem, azaz $I = M \cdot K$.

Az i. játékos $N^{(i)}$ darab két paraméteres licitet küld be a spektrum brókernek:

$$B_i = \{b_{i,1}, \ldots, b_{i,N^{(i)}}\}, \tag{41}$$

ahol

$$b_{i,n} = (q_{i,n}, p_i(q_{i,n})), \quad n = 1, \ldots, N^{(i)}, \tag{42}$$

és q jelöli az igényelt erőforrás nagyságát, $p(q)$ pedig az erőforrásért felajánlott árat.

A spektrum bróker az összegyűjtött licitekből létrehozza az árazási algoritmus bementi paraméterét, a "többes licit profil"-t.

$$B = (B_1, \ldots, B_I). \tag{43}$$

Ez alapján az A allokációs szabály és a hozzá tartozó C árazási séma felhasználásával a spektrum bróker meghatározza minden $i \in \mathcal{I}$ játékosra az optimális a_i allokációt és a hozzá tartozó c_i árat.

Az A allokációs szabály egy allokációs vektort ad vissza,

$$A(B) = \mathbf{a} = (a_1, \ldots, a_I), \tag{44}$$

ahol

$$a_i \in \{0, b_{i,1}, \ldots, b_{i,N^{(i)}}\}, \quad i = 1, \ldots, I, \tag{45}$$

azaz a i. játékos által igényelt erőforrások közül az egyiknek a nagysága, vagy nulla, amennyiben egyik licitet sem lehet teljesíteni.

A C árazási séma egy adott allokációra:

$$C(A(B)) = C(\mathbf{a}) = (c_1, \ldots, c_I), \quad i = 1, \ldots, I, \tag{46}$$

ahol $c_i \leq p_i(a_i)$ az az ár amit az i. játékosnak fizetnie kell az a_i nagyságú spektrum használatáért. Ez az érték nem lehet nagyobb, mint a játékos által ajánlott maximális ár.

2.1. Tézis. *[K1, F1, P1, P3] Dinamikus spektrumkiosztású rendszerek spektrumaukcióinak lebonyolítására javasoltam egy egykörös, többlicites aukciós modellt, valamint az alábbi allokációs szabály és árazási séma használatát:*

$$A(B) = \tilde{\mathbf{a}} = (\tilde{a}_1, \ldots, \tilde{a}_I) = \arg\max_{\mathbf{a} \in Q^f} \Theta(\mathbf{a}), \tag{47}$$

továbbá

$$\begin{aligned} c_i(A(B)) &= \theta_i(\tilde{a}_i) - \left[\Theta(\tilde{\mathbf{a}}) - \Theta\left(\tilde{\mathbf{a}}^{(-i)}\right)\right] = \\ &= \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{I} \left[\theta_j\left(\tilde{a}_j^{(-i)}\right) - \theta_j(\tilde{a}_j)\right], \end{aligned} \tag{48}$$

ahol

$$\Theta(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^{I} \theta_i(a_i) \tag{49}$$

az allokáció jósága, $\theta_i(a_i)$ pedig az az érték, amit az allokáció az i. játékosnak ér. A javasolt megoldás a "közjót" (social welfare) maximalizálja.

Az A allokációs szabályt egy adott B licithalmazra a következő módon definiálhatjuk:

$$A(B) = \arg\max_{\mathbf{a}\in Q^f} \sum_{i=1}^{I} p_i(a_i), \tag{50}$$

ahol Q^f a megvalósítható allokációk halmaza, azaz minden $\mathbf{a} \in Q^f$-re létezik egy *spektrum allokáció* $S(\mathbf{a}) = \{S_{1,1}, \ldots, S_{M,K}\}$ ahol $|S_{m,k}| = a_{(m-1)K+k}$, amely teljesíti a megvalósíthatósági feltételeket (26)(27).

Egy $\tilde{\mathbf{a}}$ allokációt *optimálisnak* nevezünk, ha a leghatékonyabb megvalósítható allokáció, azaz:

$$\tilde{\mathbf{a}} = (\tilde{a}_1, \ldots, \tilde{a}_I) = \arg\max_{\mathbf{a}\in Q^f} \Theta(\mathbf{a}). \tag{51}$$

Összehasonlítva (50)-et és (51)-et, belátható, hogy a javasolt allokációs szabály csak akkor eredményezi az optimális allokációt, ha a játékosok $p_i(q) = \theta_i(q)$ -nek megfelelően licitálnak. Ezt egy olyan árazási sémával érhetjük el, amely arra "kényszeríti" a játékosokat, hogy elmondják a spektrum brókernek mennyit is ér ténylegesen a spektrum számukra. A másodáras aukció egy megfelelő választás erre a célra. Ez esetben ugyanis megmutatható, hogy az "igazság elmondása" a domináns stratégia.

Ezek alapján, a továbbiakban feltételezve, hogy a szolgáltatók licitjei $(q_i, \theta_i(q_i))$ párok, az árak meghatározása a következőképpen történik:

Jelölje $B^{(-i)}$ a licithalmazból az i. szolgáltató licitjét kitörölve kapott halmazt, azaz:

$$B^{(-i)} = (B_1, \ldots, B_{i-1}, 0, B_{i+1}, \ldots, B_I). \tag{52}$$

(51) alapján meghatározhatjuk az optimális allokációt a $B^{(-i)}$ halmazra is:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{a}}^{(-i)} &= \left(\tilde{a}_1^{(-i)}, \ldots, \tilde{a}_{i-1}^{(-i)}, 0, \tilde{a}_{i+1}^{(-i)}, \ldots, \tilde{a}_I^{(-i)}\right) = \\ &= \arg\max_{\mathbf{a}^{(-i)}\in Q^f} \Theta\left(\mathbf{a}^{(-i)}\right), \end{aligned} \tag{53}$$

ahol

$$\mathbf{a}^{(-i)} = A\left(B^{(-i)}\right). \tag{54}$$

A másodáras aukció szabályai alapján pedig az i. szolgáltató által fizetett ár:

$$\begin{aligned} c_i(A(B)) &= \theta_i(\tilde{a}_i) - \left[\Theta(\tilde{\mathbf{a}}) - \Theta\left(\tilde{\mathbf{a}}^{(-i)}\right)\right] = \\ &= \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{I} \left[\theta_j\left(\tilde{a}_j^{(-i)}\right) - \theta_j(\tilde{a}_j)\right]. \end{aligned} \tag{55}$$

A (49)-es jóságdefiníció, valamint a másodáras aukcióból következő, az "igazság elmondásán" alapuló domináns stratégia azt eredményezi, hogy a fenti allokációs szabályt és árazási sémát használva a kialakuló optimális allokáció a maximális közjólétet eredményező allokáció lesz.

Gyors megvalósíthatóság-ellenőrzés. Az optimalis allokáció megtalálásához számos megvalósíthatóság-ellenőrzést kell elvégeznünk egyetlen licitálási periódus alatt. A megvalósíthatóság-ellenőrzés ugyanakkor egy komplex feladat, első közelítésben egy kimerítő keresés egy $M \cdot K$ dimenziós, S_{CAB} élhosszúságú hiperkockában.

A javasolt modellben azonban a paramétereket két csoportra oszthatjuk. A gyorsan változó paraméterek (szolgáltatók igényei) minden allokációs periódusban változhatnak, míg a lassan változó paraméterek (technológiai és földrajzi csatolási tényezők, a dinamikus spektrumkiosztáshoz rendelkezésre álló sáv nagysága) csak ritkán. Feltételezve, hogy $\beta = \alpha$, a lassan változó paraméterek rögzítésével $(\alpha, \epsilon, \eta, S_{CAB})$ adható egy közel valós idejű megvalósíthatóság-becslés, kihasználva azt a tulajdonságot, hogy a lassan változó paraméterek rögzítésével definiálható egy olyan hipertér, melyben a megvalósítható és a nem megvalósítható allokációk egy hiperfelülettel elválaszthatóak egymástól.

2.2. Tézis. *[P1] Megmutattam, hogy a lassan változó paraméterek rögzítésével definiálható egy olyan hipertér, melyben a megvalósítható és nem megvalósítható allokációk két különálló térrészre esnek szét, melyeket egy hiperfelület választ el egymástól. Ezen tulajdonság felhasználásával adható egy gyors algoritmus a megvalósíthatóság-ellenőrzésre. Az eljárás egy nem valós idejű egyszeri előszámítási részből, majd ezt követően egy gyors lineáris megvalósíthatóság-ellenőrzésből áll.*

1. Tétel. *A lassan változó paraméterek rögzítésével a megvalósíthatóság-ellenőrzés egy halmaz szeparációs problémára vezethető vissza az igények által generált térben, azaz létezik egy olyan hiperfelület, mely a megoldható és nem megoldható allokációkat elválasztja egymástól.*

Bizonyítás

- Az összes megvalósítható allokáció egy S_{CAB} méretű hiperkockán belül helyezkedik el, mivel ha az igény meghaladja a rendelkezésre álló sáv méretét (S_{CAB}) az allokáció biztosan nem megvalósítható.
- Ha egy $S = \{S_{1,1}, \ldots, S_{M,K}\}$ spektrum allokáció megvalósítható (azaz a spektrum blokkok kielégítik a (27)-ben foglaltakat) akkor $S^f = \{S^f_{1,1}, \ldots, S^f_{M,K}\}$ is megvalósítható $\forall(S^f_{1,1} \leq S_{1,1}, \ldots, S^f_{M,K} \leq S_{M,K})$. Például a kezdőpontok megegyeznek az eredeti allokáció kezdőpontjaival.
- Ha egy $S = \{S_{1,1}, \ldots, S_{M,K}\}$ spektrum allokáció nem megvalósítható (azaz a spektrum blokkok nem elégítik ki a (27)-ben foglaltakat), akkor $S^{nf} = \{S^{nf}_{1,1}, \ldots, S^{nf}_{M,K}\}$ sem megvalósítható $\forall(S^{nf}_{1,1} \leq S_{1,1}, \ldots, S^{nf}_{M,K} \leq S_{M,K})$.
- A fenti állításokból következik, hogy az igények terében a megvalósítható és a nem megvalósítható allokációk két különálló halmazt alkotnak, melyek egy hiperfelülettel elválaszthatóak.

□

A megvalósíthatóság-ellenőrzés valójában egy összetett nemlineáris függvény:

$$Y(\mathbf{a}, \alpha, \epsilon, \eta, S_{CAB}) = y, \tag{56}$$

ahol $y = 1$, ha $\mathbf{a}$ megvalósítható és $y = -1$, ha $\mathbf{a}$ nem megvalósítható. Amennyiben a lassan változó paramétereket $(\alpha, \epsilon, \eta, S_{CAB})$ rögzítjük, egy gyors megvalósíthatóság-becslést hozhatunk létre, azaz:

$$\hat{Y}(\mathbf{a}) = \hat{y}. \tag{57}$$

Szeparálás konvex féltérrel. A becslés alapötlete, hogy az elválasztó felületet egy tört hipersíkokból álló felülettel közelítjük, majd ez alapján becsüljük meg egy adott allokáció megvalósíthatóságát. Megjegyzem, hogy a fenti tulajdonságok nem biztosítják, hogy a megvalsítható allokációk konvex félteret alkotnak, így figyelembe kell vennünk, hogy az becslés hibája magas lehet. A következő részben bemutatandó neurális hálózaton alapuló megvalósíthatóság ellenőrzés viszont már nem igényel konvex féltérrel történő elválaszthatóságot.

A becslés két részből áll:

- Egy előszámítási részből, mely csak akkor kerül újra kiértékelésre, ha a lassan változó paraméterek megváltoznak. Ez a fázis a szeparáló hiperfelület tört hipersíkokkal való közelítésének az együtthatóit határozza meg.

Egy hipersík egyenletét az alábbi formában keressük:

$$\sum_{i=1}^{M\cdot K} a_i w_i = w_0, \tag{58}$$

ahol a_i-k a spektrum igények és w_i-k a hipersík együtthatói.

- Az együtthatók meghatározása után a megvalósíthatóság-ellenőrzés egy lineáris kifejezésbe való egyszerű behelyettesítés:

$$\hat{Y}(\mathbf{a}) = \operatorname{sgn}\left\{\sum_{l=1}^{L} \operatorname{sgn}\left(\sum_{i=1}^{MK} a_i w_i^{(l)} - w_0^{(l)}\right) - L + 0.5\right\}, \tag{59}$$

ahol a_i-k a spektrum igények, $w_i^{(l)}$-k pedig a szeparáló hipersíkok együtthatói.

Számos módszer található az irodalomban a halmaz szeparációs problémák elválasztó felületének meghatározására. Például egy hibavisszaterjesztéses tanuláson alapuló megoldásnál egy $\tau^{(q)} = \{(\mathbf{a}_q, y_q); q = 1 \ldots Q\}$ tanulóhalmazból indulunk ki, ahol $\mathbf{a}_q$ az allokációs vektor, és $y_q = 1$, ha $\mathbf{a}_q$ megvalósítható; $y_q = -1$, ha $\mathbf{a}_q$ nem megvalósítható.

Definiáljuk $MSE(\mathbf{W})$-t a becslő négyzetes középhibájaként, azaz,

$$MSE(\mathbf{W}) = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}(y_q - \hat{y}_q)^2. \tag{60}$$

A célunk az optimális $\mathbf{W}_{opt}$ mátrix megtalálása, amely minimalizálja a négyzetes középhibát:

$$\mathbf{W}_{opt} = \min_{\mathbf{W}} MSE(\mathbf{W}). \tag{61}$$

Mivel hibavisszaterjesztéses tanulás esetén szükséges, hogy az aktivációs függvény (φ) deriválható legyen,

$$\mathbf{W}_{opt} = \min_{\mathbf{W}} \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}\left(y_q - Net(\mathbf{a}_q, \mathbf{W})\right)^2, \tag{62}$$

ahol

$$Net(\mathbf{a}, \mathbf{W}) = \varphi\left\{\sum_{l=1}^{L} \varphi\left(\sum_{i=1}^{MK} a_i w_i^{(l)} - w_0^{(l)}\right) - L + 0.5\right\} \tag{63}$$

a becslő, melyet (59) sgn függvényének egy φ deriválható sigmoid függvényre való cserélésével kapunk.

Ezzel a helyettesítéssel W_{opt} az alábbi iterációs módszerrel határozható meg:

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) - \delta\mathbf{grad}(MSE(\mathbf{W}(k))), \tag{64}$$

ahol δ egy hibavisszaterjesztési konstans, a négyzetes középhibát pedig a (63)-as becslő (60)-ba helyettesítésével kapjuk, azaz:

$$MSE(\mathbf{W}) = \frac{1}{Q}\sum_{q=1}^{Q}(y_q - Net(\mathbf{a}_q, \mathbf{W}))^2. \tag{65}$$

Szeparálás többrétegű előrecsatolt neurális hálózattal. Bizonyított hogy többrétegű előrecsatolt neurális hálózatok már egy rejtett réteggel is képesek tetszőleges pontosságú függvényt közelíteni, azaz ilyen értelemben univerzális aproximátorok.

Módositva a Net függvényt a 62 egyenletben definiálhatunk egy univerzális approximátort a fenti halmazszeparációs problémára a következő módon:

$$Net(\mathbf{a}, \mathbf{W}) = \varphi\left\{\sum_{l=1}^{L} w_{2,l}\varphi\left(\sum_{i=1}^{MK} a_i w_{1,i}^{(l)} - w_{1,0}^{(l)}\right) - w_{2,0}\right\} \tag{66}$$

Előszámítás gyorsítása. Az előszámítási fázisban a tanulóhalmaz megalkotásánál számos esetben ki kell értékelnünk egy-egy allokációt, hogy az megvalósítható-e. Ez történhet kimerítő kereséssel az első megvalósítható elrendezésig, vagy az első tézicsoportban említett módszerek egyikével. Amennyiben egy allokáció nem megvalósítható, ennek eldöntése több időt vesz igénybe, mint ha megvalósítható, hiszen akkor könnyen találhatunk a számos elrendezés közül egyet. Ezért javaslatot tettem egy kizárási mátrix használatára, mely segítségével ez a kérdés számos esetben gyorsan megválaszolható.

2.3. Tézis. *[P1] Javasoltam egy kizárási mátrixot az interferencia toleráns modell esetén ($\beta = \alpha$ küszöbértékek mellett), mely segítségével egy allokációról számos esetben gyorsan eldönthető, ha nem megvalósítható. A javasolt mátrix sorai egy olyan irányítatlan gráf klikkjeinek feleltethetőek meg, ahol a csúcsok egy-egy régió egy-egy szolgáltatóját reprezentálják, továbbá:*

$$\begin{aligned} & e_{\{m,k\}\{n,l\}} \in E \Leftrightarrow \\ & \left(\left(i_{\{m,k\}\leftarrow\{n,l\}} > \alpha_m\right) \vee \left(i_{\{n,l\}\leftarrow\{m,k\}} > \alpha_n\right)\right), \end{aligned} \tag{67}$$

ahol

$$i_{\{m,k\}\leftarrow\{n,l\}} = \varepsilon_{k\leftarrow l} \cdot \eta_{m,n} \cdot s_{n,l}^{max}. \tag{68}$$

Vegyünk egy olyan irányítatlan gráfot ahol a pontok egy-egy régió egy-egy szolgáltatóját reprezentálják, a k. régióban lévő m. szolgáltató és az l. régióban lévő n. szolgáltató között pedig akkor van él, ha a két szolgáltató nem kaphatja ugyanazt a spektrum szeletet a megvalósíthatósági feltételek miatt (lásd (67)-os és (68)-es egyenlet).

Definiáljunk egy kizárási vektort ($\mathbf{x}$) úgy, hogy a vektor elemeinek száma legyen NK, minden elem egy-egy szolgáltató-régió párnak (játékosnak) felejen meg, és a vektorban azon játékosoknál legyenek 1-es értékek, amely játékosok igényeikkel kölcsönösen kizárják egymást, azaz nem kaphatják ugyanazt a spektrum darabot.

Ez a vektor a fent definiált gráfban egy klikket reprezentál. Bron és Kerbosch [5] megadtak egy algoritmust, amely meghatározza a gráfban található összes klikket lineáris időben (a klikkek számához mérten). Megjegyzem, hogy nem szükséges az összes klikk meghatározása. Ez a tézis a nem valósidejű előfeldolgozás sebességét javíthatja, továbbá a klikkek tipikusan kis méretűek, általában egy régióra és a szomszédaira korlátozódnak.

Minden megtalált klikkhez rendeljük hozzá a megfelelő kizárási vektort, majd ezekből hozzunk létre egy kizárási mátrixot úgy, hogy a mátrix sorai az egyes kizárási vektorok:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x_1}; \ldots \mathbf{x_s}). \tag{69}$$

Amennyiben

$$\max(\mathbf{Xa}) > S_{CAB}, \tag{70}$$

az $\mathbf{a}$ allokáció nem megvalósítható.

Optimális allokáció keresése. (51) alapján meg kell keresnünk azt a megvalósítható allokációs vektort, amely maximalizálja az allokáció jóságát. Elméletben ez megoldható a lehetséges allokációs vektorok jóság szerinti sorbarendezésével, majd az első megvalósítható allokáció kiválasztásával a rendezett listából. A lehetséges allokációs vektorok speciális struktúrája azonban lehetővé teszi, hogy adjunk egy olyan algoritmust, amely rendezés nélkül, iteratívan megadja az optimális allokációhoz egyre közelebb eső allokációkat.

2.4. Tézis. *[P1] Feltételezve, hogy a licitek úgy rendezettek, hogy $q_{i,n} \leq q_{i,n+1}$ minden $1 \leq n \leq N^{(i)} - 1$-re, továbbá $p(q)$ monoton növekvő, megmutattam, hogy a*

$r(i) = i_n$—ahol i_n az i. játékos n. licitjének sorszáma—alapján definiált $\mathbf{r}$ igényvektor a következő tulajdonságokkal rendelkezik:

- *Ha egy $\mathbf{r_f}$ igény megvalósítható, akkor minden olyan $\tilde{\mathbf{r}}_\mathbf{f}$ igény is megvalósítható, amelyre igaz, hogy $\tilde{r_f}(i) \le r_f(i)$ $\forall i = 1 \ldots I$-re; továbbá $p(q)$ monotonitása és a másodáras aukció miatt $\tilde{r_f}$ a legnagyobb hasznosságú megvalósítható allokáció a fentiek közül.*

- *Hasonlóan ha $\mathbf{r_{nf}}$ nem megvalósítható, akkor minden olyan $\tilde{\mathbf{r}}_\mathbf{nf}$ igény sem megvalósítható, amelyekre fennáll, hogy $\tilde{r_{nf}}(i) \ge r_{nf}(i)$ $\forall i = 1 \ldots I$.*

A fenti tulajdonságokból következik, hogy egy-egy allokáció kiértékelésével egy szabályt is kapunk, mely számos további allokációról is megmondja, hogy az megvalósítható-e. A szabályok által le nem fedett térrészből választva az új allokációs vektorokat, a megvalósítható vektorok hatékonysága a legnagyobb hatékonyságú megvalósítható allokációhoz tart.

Az i. játékos által beküldött licitvektor (41) és (42) alapján:

$$B_i = \{b_{i,1}, \ldots, b_{i,N^{(i)}}\}, \tag{71}$$

ahol

$$b_{i,n} = (q_{i,n}, p_i(q_{i,n})), \quad n = 1, \ldots, N^{(i)}. \tag{72}$$

A licitek

$$q_{i,n} \le q_{i,n+1} \forall n \in \{1, \ldots, N^{(i)} - 1\} \tag{73}$$

módon definiált rendezése miatt ha egy $\mathbf{r_f}$ igényt reprezentáló allokáció megvalósítható, akkor minden a fenti szabály alapján definiált $\tilde{\mathbf{r}}_\mathbf{f}$ is megvalósítható, például úgy, hogy a két allokáció kezdőpontjai megegyeznek egymással (lásd 1. tétel bizonyítása). Továbbá a felajánlott ár monotonitása miatt $\mathbf{r_f}$ hasznossága nagyobb vagy egyenlő az összes $\tilde{\mathbf{r}}_\mathbf{f}$ hasznosságánál. Hasonló módon belátható az $\mathbf{r_{nf}}$ és $\tilde{\mathbf{r}}_\mathbf{nf}$ vektorokra megfogalmazott állítás.

5. Az eredmények alkalmazhatósága

Az első téziscsoportban ismertetett általános keretrendszer és a javasolt mérőszámok alapul szolgálhatnak későbbi dinamikus spketrum allokációt használó rendszerek összehasonlítására, az elérhető nyereségek számszerűsítésére. Az interferencia toleráns és az interferencia kompenzáló modell két eltérő megközelítésmódot mutat be, a technológia jelenlegi fejlettsége mellett az interferencia toleráns modell már hamarosan alkalmas lehet dinamikus spektrumallokációjú rendszerek megvalósítására, míg a kompenzáló modell inkább a jövőbe mutat, az alkalmazásához szükséges néhány technológiai kérdés még megoldatlan napjainkban.

A második téziscsoport egy olyan aukciós és árazási megoldásra tesz javaslatot, mely alkalmas a jövőbeli dinamikus spektrumkiosztási rendszerek periódikus spektrum árveréseinek lebonyolítására. A javasolt eljárás figyelembe veszi a dinamikus spektrumkiosztás sajátosságait, a ténylegesen fizetendő ár függ a szolgáltatók által okozott interferenciától és a szolgáltató zavartűrő képességétől is. Ezen tulajdonságok elősegítik olyan új, innovatív technológiák piacra lépését, melyek képesek tolerálni az őket érő zavaró hatásokat, illetve a környezetükben működő más technológiákra a lehető legkisebb zavaró hatást fejtik ki.

Hivatkozások

[1] DARPA XG program. http://www.darpa.mil/ato/programs/xg/.

[2] Study on conditions and options in introducing secondary trading of radio spectrum in the european community. Study for the European Commission by consultants Analysys, DotEcon and Hogan and Hartson LLP, May 2004. Summary of the report.

[3] A market-based approach to spectrum management in the european union. Communication from the Commission to the Council, COM(2005) 400, September 2005.

[4] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, and Shantidev Mohanty. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Comput. Networks*, 50(13):2127–2159, 2006.

[5] Coen Bron and Joep Kerbosch. Algorithm 457: finding all cliques of an undirected graph. *Commun. ACM*, 16(9):575–577, 1973.

[6] M. Buddhikot, P. Kolodzy, S. Miller, K. Ryan, and J. Evans. DIMSUMnet: New directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access. In *Position Paper in IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (IEEE WoWMoM 2005)*, Taromina/Giardini Naxos, Italy, Jun 2005.

[7] M. Buddhikot and K. Ryan. Spectrum management in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks. In *IEEE DySPAN*, pages 299–327, Baltimore, MD, 8-11 Nov 2005.

[8] Anh Tuan Hoang and Ying-Chang Liang. Dynamic spectrum allocation with second-price auctions: When time is money. In *Proc., 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Singapore, 15-17 May 2008.

[9] J-P Kermoal, S. Pfletschinger, K. Hooli, S. Thilakawardana, J. Lara, and Y. Zhu. Spectrum sharing for winner radio access networks. In *Proc., First International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM 2006)*, Myconos, Greece, 8-10 Jun 2006.

[10] P. Leaves, J. Huschke, and R. Tafazolli. A summary of dynamic spectrum allocation results from DRiVE. In *Proc., IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit*, pages 245–250, Thessaloniki, Greece, 16-19 June 2002.

[11] P. Leaves and R. Tafazolli. A time-adaptive dynamic spectrum allocation scheme for a converged cellular and broadcast system. In *Proc., IEEE Getting the Most Out of the Radio Spectrum Conference*, pages 18/1–18/5, United Kingdom, 24-25 October 2002.

[12] Mark A. McHenry, Peter A. Tenhula, Dan McCloskey, Dennis Roberson, and Cynthia Wood. Chicago spectrum occupancy measurements and analysis and a long-term studies proposal. In *Proc., First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS 2006)*, Boston, USA, 1-5 Aug 2006.

[13] J. D. Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Pentech Press, London, 1994.

[14] V. Rodriguez, K. Moessner, and R. Tafazolli. Auction driven dynamic spectrum allocation: Optimal bidding, pricing and service priorities for multi-rate, multi-class CDMA. In *Proc., IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Berlin, Germany, Sept 2005.

[15] V. Rodriguez, K. Moessner, and R. Tafazolli. Auction driven dynamic spectrum allocation over space and time: DVB-T and multi-rate, multi-class CDMA over a two-island geography. In *Proc., 15th European Information Society Technologies (IST) Mobile and Wireless Communications Summit*, Myconos, Greece, 4-8 June 2006.

[16] Nilay Shah, Theodoros Kamakaris, Ufuk Tureli, and Milind M. Buddhikot. Wide-band spectrum probe for distributed measurements in cellular band. In *Proc., First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS 2006)*, Boston, USA, 1-5 Aug 2006.

Publikációk

Könyvfejezet

[K1] **L. Kovács**, and A. Vidács. One-Shot Multi-Bid Auction and Pricing in Dynamic Spectrum Allocation Networks. Lecture Notes Electrical Engineering, Advances in Mobile and Wireless Communications, Springer Berlin Heidelberg, Volume 16, May, 2008, ISBN 978-3-540-79040-2, pp. 99-113

Folyóirat publikációk

[F1] **L. Kovács**, A. Vidács, and B. Héder. Spectrum Auction and Pricing in Dynamic Spectrum Allocation Networks. The Mediterranean Journal of Computers and Networks: A SPECIAL ISSUE on Recent Advances In Heterogeneous Cognitive Wireless Networks, Volume 4, No. 3, July, 2008, ISSN: 1744-2397, pp. 125-138

[F2] **L. Kovács**, and A. Vidács. Dinamikus spektrumkiosztás: modellezés és árazás. Híradástechnika, 2007 május, pp. 49-55

[F3] **L. Kovács**, D. Vass and A. Vidács. Szolgáltatásminőségi paraméterek előrejelzésének javítása outlierek detektálásával és eltávolításával. Híradástechnika, 2004 október, pp. 13-18

Konferencia publikációk

[P1] **L. Kovács**, and A. Vidács. Checking Feasibility in Dynamic Spectrum Allocation Networks. In *Proc., 32nd International Conference Telecommunication and Signal Processing*, Dunakiliti, Hungary, 26 - 27 August, 2009.

[P2] A. Pásti, **L. Kovács**, and A. Vidács. Dynamic Spectrum Allocation in Non-Continuous Blocks for Future Wireless Networks. In *Proc., 14th Eunice Open European Summer School 2008*, Brest, France, 8-10 September, 2008.

[P3] **L. Kovács**, and A. Vidács. One-Shot Multi-Bid Auction Method in Dynamic Spectrum Allocation Networks. In *Proc., 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, Budapest, Hungary, 1-5 July, 2007.

[P4] **L. Kovács**,J. Tapolcai and A. Vidács. Spatio-Temporal Dynamic Spectrum Allocation with Interference Handling. In *Proc., IEEE International Conference on Communications (ICC 2007)*, Glasgow, Scotland, UK, 24-28 June, 2007.

[P5] **L. Kovács**, and A. Vidács. Interference-Tolerant Spatio-Temporal Dynamic Spectrum Allocation. In *Proc., IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Dublin, Ireland, 18-20 April, 2007.

[P6] **L. Kovács**, and A. Vidács. Dynamic Spectrum Allocation using Regional Spectrum Brokers. In *Proc., IST-062 Symposium on Dynamic Communications Management*, Budapest, 9-10 October, 2006.

[P7] **L. Kovács**, and A. Vidács. Spatio-Temporal Spectrum Management Model for Dynamic Spectrum Access Networks. In *Proc., First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS 2006)*, Boston, Aug 1-5, 2006.

[P8] **L. Kovács**, Zs. Oláh and A. Vidács. Absolute QoS Guarantees in a Relative Differentiated Services Architecture. In *Proc., 4th International Workshop on Internet Performance, Simulation, Monitoring and Measurement*, Salzburg, Februar 27-28, 2006.

[P9] **L. Kovács**, and A. Vidács. Scheduling in a DiffServ Node Using Fuzzy Logic Controllers. In *Proc., 11th Open European Summer School (EUNICE 2005)*, Colmenarejo, Madrid (Spain), July 6-8, 2005.

[P10] **L. Kovács**, and D. Vass. Impoving quality of service parameter prediction with preliminary outlier detection and elimination. In *Proc., 2nd International Workshop on Inter-Domain Performance and Simulation*, Budapest, March, 2004.

Egyéb publikációk

[E1] **L. Kovács**, and A. Vidács. Spectrum Management Model for Dynamic Spectrum Access Networks. *High Speed Networking Workshop*, Budapest, 2006 Spring

[E2] **L. Kovács**, and D. Vass. Szolgálatminőségi paraméterek előrejelzésének javítása outlier-ek eltávolításával. *Országos Tudományos Diákköri Konferencia (1. helyezés)*, Budapest, 2005

[E3] **L. Kovács**, and D. Vass. Impoving quality of service parameter prediction with preliminary outlier detection and elimination. *High Speed Networking Workshop*, Budapest, 2004 Spring

[E4] **L. Kovács**, and D. Vass. Szolgálatminőségi paraméterek előrejelzésének javítása outlier-ek eltávolításával. *Tudományos Diákköri Konferencia (1. helyezés)*, Budapest, 2003