

Dinamikus spektrumkiosztás: modell és árazás

Kovács László és Vidács Attila

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék
1117 Budapest, Magyar tudósok krt. 2
Tel: +361 463 1925, Fax: +361 463 3107
E-mail: {kovacsl, vidacs}@tmit.bme.hu

Abstract:

The radio spectrum is a scarce, valuable and thus expensive resource. An efficient use of frequencies is primordial, but existing management systems fail to achieve this. On one hand, a substantial amount of spectrum is wasted at a given time and place with today's rigid frequency usage policies. On the other hand, spectrum usage rights are not always given to those who have the greatest need and would benefit from it the best, eventuating in lower overall social welfare. The possibility of on-demand spectrum allocation with Dynamic Spectrum Access (DSA) methods, together with the pressure of a liberalized spectrum market would lead to a much more efficient spectrum usage.

In this paper we propose a centralized spectrum auction method that fits to our proposed DSA framework to distribute spectrum for fixed infrastructure wireless networks according to the needs of providers. Since interference tolerance in a DSA scenario is much rewarded, our pricing scheme charges providers who do not tolerate others and interfere to a larger extent than necessary.

The proposed DSA model makes it possible for the providers to handle the scarce resources more efficiently, resulting in better or more services. The proposed pricing mechanism improves the service quality even further since its objective is to maximize the „common welfare”.

Keywords: dynamic spectrum allocation, wireless networks, auction, pricing, interference-tolerant

Kivonat: A rádiós spektrum véges, és ezért rendkívül drága erőforrás. Az erőforrások hatékony kihasználása fontos lenne, ugyanakkor a jelenlegi menedzsment rendszerek nem támogatják azt. A merev spektrumkiosztás miatt az erőforrások jelentős része „elveszik” az igények térbeli és időbeli váltakozása miatt. Ezenfelül a spektrumhasználati jogokat nem mindig azok birtokolják, akiknek a legnagyobb szükségük van rá, akik a legjobb szolgáltatást tudnák nyújtani rajta. Erre egy lehetséges megoldás a dinamikus spektrumkiosztás (DSA) és ezzel együtt a frekvenciagazdálkodás piaci alapokra helyezése.

A cikkben javaslatot teszünk egy központosított spektrumárverési eljárásra, mely az általunk javasolt DSA keretrendszerbe illeszkedik, és alkalmas a fix infrastruktúrájú vezetékmentes hálózatok hatékony spektrumkiosztásának a menedzselésére. Mivel a dinamikus spektrumkiosztású hálózatok esetében az interferencia tolerancia fontos kérdés, az általunk javasolt megoldás biztosítja, hogy azok a szolgáltatók, amelyek nem tűrik az interferenciát, vagy nagy zavaró hatást fejtenek ki szomszédaikra, többet fizessenek a lefoglalt erőforrásért.

A javasolt DSA modell lehetővé teszi, hogy a rendelkezésre álló szűkös erőforráson a szolgáltatók jobb minőségű vagy többféle szolgáltatást biztosítsanak. A javasolt árazási mechanizmus tovább növeli a szolgáltatások minőségét, mivel célja a „közjólét” maximalizálása.

Kulcsszavak: dinamikus spektrumkiosztás, vezeték nélküli hálózatok, aukció, árazás, interferencia-toleráns

1 Bevezetés

A jelenlegi frekvenciagazdálkodás és -kiosztás következtében a rendelkezésre álló szabad frekvenciák száma egyre kevesebb. Másrésztől viszont amellet, hogy a spektrum nagy része már ki van osztva, annak jelentős része kihasználatlan, és ez a kihasználatlanság térben és időben is nagyon változó. Ez a motivációja egy hatékonyabb kiosztási technikának, a dinamikus spektrumallokációnak (DSA – Dynamic Spectrum Allocation). A spektrum kiosztásának dinamikussá tételével a szolgáltatások minősége tovább javulhat, és a felszabaduló frekvenciák miatt lehetőség nyílik új szolgáltatások bevezetésére is.

A dinamikus spektrumkiosztás maga után vonja a spektrumgazdálkodás piaci alapokra helyezését is. 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-semlegességet. A két tényező együttes megvalósítása vezet a hatékony spektrumhasználathoz [1].

Szükséges továbbá különböző jogok és kötelezettségek definiálása is a biztonságos és hatékony működéshez. A használati jogok négy fontos paraméterhez köthetők. Ezek a földrajzi terület (pl. ország, régió, vagy egy bázisállomás környéke), az időtartam, a spektrum blokk (pl. a biztosított frekvenciatartomány) és a védelem az interferenciától. A kötelezettségek pedig az okozott interferencia mértékére vonatkoznak. Ugyanakkor a használati jogok tulajdonosa szabadon használhatja a frekvenciát bármire (szolgáltatás-semlegesség), és bármilyen technológiával (technológia-semlegesség), ha az interferenciára vállalt kötelezettségeket betartja [1].

A 2. fejezetben röviden ismertetjük a dinamikus spektrumallokáció és a spektrumgazdálkodási piaci alapokra helyezéséről szóló fontosabb munkákat. A 3. fejezetben megadunk egy tér és időbeli DSA keretrendszert, ami a 4. fejezetben bemutatott allokációs és árazási módszer alapját képezi. Az 5. fejezet ismerteti a minimális interferenciájú allokáció meghatározásának módját, majd a 6. fejezetben egy példán keresztül bemutatjuk a javasolt módszer működését. Végül a 7. fejezet összegzi az elmondottakat.

2 Kapcsolódó munkák

A felügyelt DSA problémával először az IST-DRiVE és az IST-OverDRiVE projektek foglalkoztak. A cél az volt, hogy kifejlesszenek egy olyan eljárást, amely lehetővé teszi a dinamikus spektrumkiosztást egyazon frekvenciasávban különböző technológiájú hálózatok számára [2][3][4]. DSA régiókat definiáltak, amin belül az igények csak időben változhattak, térben állandóak voltak. Buddhikot már részletes leírást adott egy tervezett rendszer architektúrájáról [5]. A DSA hálózatokkal kapcsolatos kutatásokról további részletes összefoglalók találhatóak [5], [6] és [7]-ben.

Rodriguez és társai egy olyan DSA rendszert javasoltak [8][9], ahol egy spektrum menedzser periódikusan elérvezi a rövid időtartamra szóló használati jogokat. A javasolt aukció másodfás volt, a különböző területeket úgy tekintették, mintha szigetek lennének, így nem foglalkoztak a régiók egymásra hatásával.

Amennyiben egy tetszőleges mértékben osztható erőforrást akarunk kiosztani, az egyik alkalmas módszer a progresszív másodfás aukció. Ennek használatára már többen tettek javaslatot vezetékes hálózatokban történő erőforrás kiosztására [10][11][12].

A fentiekkel összehasonlítva a mi megoldásunkat, a különbségek a következők. A korábbi megoldások az általunk javasolttal ellentétben nem veszik figyelembe a régiók között fellépő interferenciát. A dinamikus spektrumallokáció sajátosságai miatt a vezetékes hálózatok sáv szélesség kiosztására vonatkozó javaslatok nem használhatók a mi esetünkben, de az árak meghatározásának ötletét figyelembe tudtuk venni az általunk kidolgozott megoldás során.

3 Tér- és időbeli DSA modell

Egy előző publikációnkban [13] javasoltunk egy olyan DSA modellt, mely a régiók között fellépő interferenciát képes rugalmasan kezelni. Mivel a javasolt árazási módszer ezen a modellen alapul, ebben a fejezetben röviden összefoglaljuk a modell alapjait.

A teljes területet kisebb régiókra osztjuk, és feltesszük, hogy egy-egy régió belül a spektrumigények térbeli eloszlása állandó, csak az időbeli változás megengedett. A spektrumot egy központi entitás, a spektrum bróker felügyeli és osztja ki a szolgáltatóknak. A

használati jogok rövid időre szólnak, továbbá a szolgáltatók a kapott spektrumszeletet bármire használhatják (technológia semlegesség).

A tér- és időbeli dinamikus spektrumallokációt a következőképpen értelmezhetjük. Minden régióon belül időbeli DSA-t valósítunk meg. Azaz, a régióban működő szolgáltatók periodikus időközönként beküldik a spektrumigényeiket, és a spektrum bróker az igényhez hozzárendel egy folytonos spektrumblokkot, amennyiben ez lehetséges. A blokkok mérete változhat az időben, ezáltal követve az igények változását. A térbeli DSA feladata az egyidőben, de különböző régiókban fellépő igények összehangolása. A cél az, hogy a spektrumblokkokat úgy osszuk ki, hogy a lehető legkisebbre csökkentsük a régiók között fellépő interferenciát.

Fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy nem célunk a dinamikus spektrumallokáció cellás szinten történő megvalósítása. A régiók ennél nagyobb területek (például egy-egy városrész), amelyekben belül több bázisállomás is található. Hasonlóan az időskálát is olyan nagyságrendűnek képzeljük (pl. óránkénti újraellokálás), amely képes követni az igények napi váltakozását, de nem célunk az igények hívásonkénti kezelése.

3.1 Spektrumallokáció

A teljes területet K darab nem átlapolódó régióra (R_k) osztjuk. Az adott régióon belül M szolgáltató versenyez az erőforrásért. A rendelkezésre álló spektrum, más néven a koordinált hozzáférésű sáv [6] (Coordinated Access Band, CAB), az (\check{s}, \hat{s}) frekvenciatartomány.

A spektrum bróker feladata a szolgáltatók igényeinek és a rendelkezésre álló spektrumnak az összerendelése. Az m . szolgáltatónak a k . régióban kiosztott spektrumblokk egy adott t időpontban:

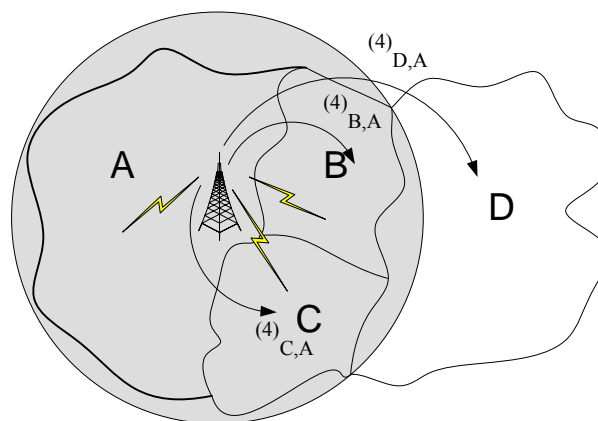
$$S_{m,k}(t) = (\check{s}_{m,k}(t), \hat{s}_{m,k}(t)). \quad (1)$$

A fenti jelölés kifejezi, hogy a spektrumallokáció mind térben, mind időben dinamikus, minden szolgáltató különböző régiókban és különböző időpontokban eltérő igényekkel léphet fel. (A jelölések egyszerűsítésére az időtől való függést a továbbiakban elhagyjuk.)

Jelölje továbbá $|S_{m,k}|$ a kiosztott spektrumblokk méretét, azaz $|S_{m,k}| = \hat{s}_{m,k} - \check{s}_{m,k}$.

3.2 Interferencia

Az általunk javasolt modellben az interferencia a spektrum kihasználtságának a csökkenését okozza.



1. ábra: Geometriai csatolási tényező

A kihasználtság csökken, ha különböző szolgáltatók ugyanazt a frekvenciasávot használják a szomszédos régiókban, és a határterületeken interferencia lép fel. Az interferencia szintje függ a földrajzi helyzettől, a régiók méretétől, és a használt rádiós technológiától is. Ez a fajta interferencia jellemezhető egy földrajzi csatolási tényezővel (ε).

Jelölje $0 \leq \varepsilon_{l,k}^{(m)} \leq 1$ a „zajt” amit az R_k régióban működő m . operátor okoz az R_l régióban. A fenti paraméter értéke nulla, ha egyáltalán nincs áthallás a két régió között, és egy, ha teljes mértékben áthallatszik a másik régióba is. Azaz minél kisebb a földrajzi csatolási tényező értéke, az annál jobb az interferencia szempontjából.

A különböző szolgáltatók által használt rádiós technológiák egymást zavaró hatását a rádiótechnológiai csatolási tényező írja le (η). Jelölje $0 \leq \eta_{m,n} \leq 1$ a csatolást az m . és az n . szolgáltató által használt rádiós technológia között. Ismét a két szélsőséget nézve, ha két szolgáltató ugyanazt a spektrumszeletet használja ugyanabban a régióban és $\eta_{m,n}$ értéke nulla, akkor a két szolgáltató gyakorlatilag nem zavarja egymást, míg ha $\eta_{m,n}$ értéke egy, egyik szolgáltató sem tudja használni a spektrumszeletet. A két csatolási tényező együttes hatása a két paraméter szorzata. Azaz, az R_k régióban működő m . szolgáltatónak az R_l régióban működő, vele azonos spektrumszeletet használó n . szolgáltató által okozott zavaró hatás $\varepsilon_{l,k}^{(n)} \cdot \eta_{m,n}$.

3.3 Spektrum kihasználhatóság

Miután megvannak az interferenciát leíró modellünk paraméterei, jelölje $\xi(S_{m,k})$ az $S_{m,k}$ spektrumblokk kihasználhatóságát, melyet a következőképpen számolhatunk:

$$\xi(S_{m,k}) = \frac{1}{|S_{m,k}|} \int_{S_{m,k}} \xi_{m,k}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

ahol $\xi_{m,k}(\lambda)$ a λ frekvencia kihasználhatósága az R_k régióban működő m . szolgáltató számára, azaz

$$\xi_{m,k}(\lambda) = \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^K \left(1 - \varepsilon_{j,k}^{(i)} \cdot \eta_{m,i} \cdot I_{\{\lambda \in S_{i,j}\}} \right). \quad (3)$$

Ahol $I_{\{\lambda \in S_{i,j}\}}$ azt jelöli, hogy λ ki van-e osztva az R_j régióban az i . szolgáltatónak. A kihasználhatóság értéke egy, ha egyáltalán nem lép fel interferencia, és kisebb mint egy, ha a szomszédos régiókban működő szolgáltatók interferenciát okoznak.

3.4 Megvalósítható spektrumallokáció

Az $S = \{S_{1,1}, \dots, S_{M,K}\}$ spektrumallokációt megvalósíthatónak nevezzük, ha a szolgáltatóknak kiosztott spektrumblokkok teljesítik a következő feltételeket:

$$\xi(S_{m,k}) \geq \beta_m, \quad \forall m, k, \quad (4)$$

$$\min_{\lambda \in S_{m,k}} \xi_{m,k}(\lambda) \geq \alpha_m, \quad \forall m, k. \quad (5)$$

A fő kérdés a megvalósíthatóság mögött az, hogy a szolgáltatás mennyire érzékeny a zavaró hatásokra, milyen mértékben romlik az adott szolgáltatás minősége a kihasználhatóság csökkenésével. Ezért a fenti két feltétel célja annak biztosítása, hogy a kiosztott spektrumblokk „elég jó” minőségű legyen az adott szolgáltatás számára.

Az α és β paraméterekre egyfajta tolerancia küszöbként tekinthetünk, amelyek azt fejezik ki, hogy az adott szolgáltatás mennyire érzékeny az interferenciára. Azt feltételeztük, hogy ha a kihasználhatóság az adott küszöb felett van, a szolgáltatás zavar nélkül biztosítható. A β_m paraméter azt a minimális spektrum-kihasználhatóságot adja meg, amit átlagos szinten el kell érünk (lásd (4)), míg az α_m paraméter egy olyan minimális kihasználhatóságot ír elő, amit minden frekvencián biztosítani kell a kiosztott spektrumblokkban (lásd (5)).

A megvalósíthatóság vizsgálata alapkövetelmény. Ugyanakkor a megvalósíthatóság nem mond semmit az optimális allokációról. A spektrumot kioszthatjuk jól és rosszul is. Az, hogy mit nevezünk jónak attól függ, hogyan definiáljuk a kiosztás nyereségét. [14]-ben definiáltunk különböző nyereségeket mind a szolgáltató, mind pedig a hatóság szemszögéből, amelyek egyaránt maximalizálандó célok lehetnek.

A szolgáltatók valós toleranciaszintjének ismerete nagy segítség a dinamikus spektrumallokáció számára. Ugyanakkor a szolgáltatók szemszögéből sokkal egyszerűbb azt mondani, hogy nem toleráljuk az interferenciát, „tisztá” spektrumblokk szükséges a megfelelő minőségű szolgáltatáshoz. Ez viszont nagymértékben lecsökkenti a dinamikus spektrumallokáció hatékonyságát. Ezért szükséges olyan mechanizmusok megvalósítása, amelyek „rákényszerítik” a szolgáltatókat, hogy tolerálják az interferenciát olyan mértékben, ahogy az lehetséges. Így nagy fontosságú egy olyan árazási modell, amely magas árat kér az intoleráns szolgáltatóktól, és azoktól, akik nagy zavaró hatást fejtenek ki a környezetükben lévő többi szolgáltatóra.

4 Aukció és árazás

Ebben a fejezetben egy olyan allokációs és árazási modellt javasolunk, mely figyelembe veszi a dinamikus spektrumkiosztás sajátosságait. A progresszív másodáras aukció [10] jó megoldás tetszőlegesen osztható erőforrás kiosztására, esetünkben azonban a szétsztható spektrum mérete nem határozható meg az interferencia miatt. Előfordulhat ugyanis, hogy egy régióon belül lehetnek olyan frekvenciasávok, melyet senkinek nem tudunk kiosztani a szomszédos területek zavaró hatása miatt. Ugyanakkor bizonyos frekvenciákat akár több szolgáltatónak is odaadhatunk, amennyiben azok nem zavarják egymást. Ezenfelül az árazási modellnek teljesítenie kell azt a követelményt is, hogy azon szolgáltatók, akik nem tolerálják az interferenciát, vagy nagy interferenciát okoznak a szomszédjaiknak, többet fizessenek a lefoglalt erőforrásért, mint a toleráns, másokat nem zavaró szolgáltatók.

4.1 Licitek, allokáció és árazás

A spektrumot adott időintervallumonként osztjuk újra. Az intervallum kezdete előtt a szolgáltatók beküldik a lehetséges licitjeiket egy központi egységnek, az ún. spektrum brókernek. Ezt követően a spektrum bróker meghatározza azt az optimális kiosztást, mely a „közjót” maximalizálja, továbbá meghatározza az egyes szolgáltatók által fizetendő összegeket is.

4.1.1 Egylépéses, több licites aukció

Az iteratív aukciós algoritmusok konvergencia ideje bizonyos esetekben nagyon hosszú lehet, és jelentős jelzéstöbblettel járhat. Továbbá spektrumkiosztás esetén az „értelmes” licitek száma véges, így ezeket könnyen megadhatjuk egyetlen licithalmazzal. Ezért a javasolt aukciós modell egylépéses, továbbá a szolgáltatók az összes lehetséges licitjüket beküldik a spektrum brókernek. (A továbbiakban a játékelmélet fogalmait használjuk az aukciós eljárás intuitívabb leírásához, amelyben a frekvenciasávokért „versengő” szolgáltatókat mint „játékosokat” vesszük figyelembe. A „játészma” nem-kooperatív, a játékosok „önzők”, azaz a résztvevők nem működnek együtt, minden játékos a saját érdekeit tartja csak szem előtt. A játékosokat racionális stratégiaalkotóknak tekintjük.)

Jelölje $I = \{1, \dots, i, \dots, I\}$ a játékosok halmazát. Mivel különböző régiókban ugyanazon szolgáltató igényei eltérőek lehetnek, ezért a szolgáltatókat régióként külön kezeljük, azaz $I = M \cdot K$.

Az i . játékos $N^{(i)}$ darab kétdimenziós licittel rendelkezik:

$$B_i = \{b_{i,1}, \dots, b_{i,N^{(i)}}\}, \quad (6)$$

ahol

$$b_{i,n} = (q_{i,n}, p_i(q_{i,n})), \quad n = 1, \dots, N^{(i)}, \quad (7)$$

q jelöli az igényelt erőforrás mennyiségét, $p(q)$ pedig az érte ajánlott árat.

A bróker összegyűjti a licitek halmazát, és létrehozza a licithalmaz-leírót, az árazási modell bemenetét:

$$B = (B_1, \dots, B_I). \quad (8)$$

4.1.2 Allokációs szabály és árazás

A fenti leíró alapján a bróker meghatározza minden $i \in I$ játékos számára a kiosztott erőforrás mennyiségét (a_i) és a hozzá tartozó árat (c_i) az A allokációs szabály és a C árazási szabály alapján.

Az A allokációs szabály egy allokációs vektort határoz meg:

$$A(B) = (a_1, \dots, a_I), \quad (9)$$

ahol

$$a_i \in \{0, b_{i,1}, \dots, b_{i,N^{(i)}}\}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (10)$$

ahol az i . játékos számára kiosztott spektrumblokk mérete.

A C árazási szabály:

$$C(A(B)) = C(\mathbf{a}) = (c_1, \dots, c_I), \quad i = 1, \dots, I, \quad (11)$$

ahol $c_i \leq p_i(a_i)$ az i . játékos által az a_i mennyiségű erőforrásért fizetendő összeg.

4.2 Hatékony és megvalósítható allokáció

Az allokációs és árazási szabályokat úgy kell megalkotnunk, hogy a kialakult helyzet elfogadható (megvalósítható) legyen minden játékos számára, és valamilyen szempontból optimális is. Célunk egy olyan allokációs szabály megvalósítása, amely a teljes spektrumkihasználtságot maximalizálja. (Megjegyezzük, hogy ez a mérték megfelel a széles körben használt „közjólét” mértékének (lásd [10])).

4.2.1 Megvalósítható allokáció

Definiáljuk az A allokációs szabályt egy adott B licithalmaz-leíróra az alábbiak szerint:

$$A(B) = \arg \max_{\mathbf{a} \in Q^f} \sum_{i=1}^I p_i(a_i), \quad (12)$$

ahol Q^f a megvalósítható allokációk halmaza, azaz minden $\mathbf{a} \in Q^f$ vektorra létezik egy olyan $S(\mathbf{a}) = \{S_{1,1}, \dots, S_{M,K}\}$ allokáció, ahol $|S_{m,k}| = a_{(m-1)K+k}$, és az allokáció teljesíti a megvalósíthatósági feltételeket (lásd (4) és (5)).

4.2.2 Hatékony allokáció

Egy allokáció $\Theta(\mathbf{a})$ hatékonyságát definiáljuk a következő módon:

$$\Theta(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^I \Theta_i(a_i), \quad (13)$$

ahol $\Theta_i(a_i)$ az adott allokáció (piaci) értéke az i . játékos számára.

Az $\tilde{\mathbf{a}}$ allokáció optimális, ha ez a leghatékonyabb megvalósítható allokáció, azaz:

$$\tilde{\mathbf{a}} = (\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_I) = \arg \max_{\mathbf{a} \in Q^f} \Theta(\mathbf{a}). \quad (14)$$

(12) és (14) alapján a javasolt allokáció akkor optimális, ha a játékosok licitjei $p_i(q) = \theta_i(q)$ alakúak. Ezt egy olyan árazási szabállyal érhetjük el, amely arra „készteti” a játékosokat, hogy megmondják a licitjükben a kívánt spektrumblokk tényleges értékét. Ezt a másodáras aukciók elvét használva érhetjük el.

4.3 Másodáras árazási szabály

A másodáras aukciók hátterében az a gondolat áll, hogy a játékosal azt fizettetjük meg, ami veszteséget a piacra lépésével a többieknek okoz. Belátható, hogy ezt az elvet követve a játékosok számára az az optimális, ha az igazat mondják, azaz a licitjükben az árat akkorára állítják, amennyit az igényelt spektrum blokk ér számukra [10]. Ezért a továbbiakban azt feltételezzük, hogy az egyes játékosok licitjei $(q_i, \theta_i(q_i))$ alakúak.

Az eredeti licithalmaz-leíróban az i . játékos licitjeit törölve az „ellenfél-leíró” kapjuk:

$$B^{(-i)} = (B_1, \dots, B_{i-1}, 0, B_{i+1}, \dots, B_I). \quad (15)$$

Hasonlóan (14)-hez, a $B^{(-i)}$ leíróra is meghatározhatjuk az optimális allokációt:

$$\tilde{\mathbf{a}}^{(-i)} = (\tilde{a}_1^{(-i)}, \dots, \tilde{a}_I^{(-i)}) = \arg \max_{\mathbf{a}^{(-i)} \in Q^I} \Theta(\mathbf{a}^{(-i)}) \quad (16)$$

ahol

$$\mathbf{a}^{(-i)} = A(B^{(-i)}). \quad (17)$$

Ahogy már említettük, az i . játékos költsége:

$$c_i(A(B)) = \Theta_i(\tilde{a}_i) - [\Theta(\tilde{\mathbf{a}}) - \Theta(\tilde{\mathbf{a}}^{(-i)})] \quad (18)$$

$$= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^I [\Theta_j(\tilde{a}_j^{(-i)}) - \Theta_j(\tilde{a}_j)]. \quad (19)$$

Azaz az i . játékosnak pontosan annyit kell fizetni, amennyit azoknak a játékosoknak ért volna az adott spektrumszelet, akiket kizárt a jelenlétével.

5 Minimális interferenciájú allokáció

A 3. fejezetben ismertetett szabályok alapján meghatározhatóak a kiosztott spektrumszeletek (\tilde{a}_i) és a hozzájuk tartozó árak (c_i) minden egyes szolgáltatóra, minden régióban, úgy, hogy a hozzájuk tartozó $S = \{S_{1,1}, \dots, S_{M,K}\}$ allokáció megvalósítható. Azonban számos különböző megvalósítható allokáció létezik, amelyek teljesítik a megvalósíthatósági feltételeket ((4) és (5)), és ugyanaz a maximális hatékonyság tartozik hozzájuk. Az elrendezésekben fellépő összes interferencia azonban nagyon különböző lehet.

Célunk az optimális allokációs vektor

$$\tilde{\mathbf{a}} \equiv (|S_{1,1}|, \dots, |S_{1,K}|, \dots, |S_{M,1}|, \dots, |S_{M,K}|) \quad (21)$$

ismeretében a minimális interferenciájú spektrumallokáció megtalálása, azaz azt az $\tilde{S}(\tilde{\mathbf{a}})$ spektrumallokációt keressük, amelyik maximalizálja a $\xi(S)$ kihasználhatóságot, ahol

$$\xi(S) = \left(\sum_{m,k} |S_{m,k}| \right)^{-1} \sum_{m,k} \xi(S_{m,k}) |S_{m,k}|, \quad (22)$$

így,

$$\tilde{S} = \arg \max_{\{S_{1,1}, \dots, S_{M,K}\}} \left\{ \sum_{m,k} |S_{m,k}| \xi(S_{m,k}) \right\}. \quad (23)$$

Ennek a meghatározásához egy szimulált lehűtésen alapuló heurisztikát használtunk.

5.1 Szimulált lehűtés

A szimulált lehűtés széles körben alkalmazott heurisztikus megközelítés globális optimalizációs problémák megoldásához [15]. A szimulált lehűtés esetében a keresési tér minden \mathbf{s} pontját egy rendszer állapotaként értelmezzük, és az adott pontokhoz tartozó $E(\mathbf{s})$ energiaértékek által meghatározott függvény minimalizálása az algoritmus célja.

Esetünkben az állapotvektort az alábbi formában definiálhatjuk:

$$\mathbf{s} = (\check{s}_{1,1}, \dots, \check{s}_{1,K}, \dots, \check{s}_{M,1}, \dots, \check{s}_{M,K}). \quad (24)$$

Észrevehetjük, hogy egy S spektrumallokáció egyértelműen megadható az \mathbf{s} állapotvektorral és az $\tilde{\mathbf{a}}$ allokációs vektorral, mivel $S = \{(\check{s}_{m,k}, \hat{s}_{m,k})\}$ ahol $\hat{s}_{m,k} = \check{s}_{m,k} + \tilde{a}_{(m-1)K+k}$.

A rendszer energiája az \mathbf{s} állapotban:

$$E(\mathbf{s}) = -\xi(S) + P_f, \quad (25)$$

ahol a P_f büntető függvény értéke

$$P_f = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \left(I_{\{\xi(S_{m,k}) < \beta_m\}} + I_{\{\min_{\lambda \in S_{m,k}} \xi_{S_{m,k}}(\lambda) < \alpha_m\}} \right). \quad (26)$$

A büntetőfüggvény alakja olyan, hogy értéke nulla, ha a megvalósíthatósági feltételek teljesülnek minden spektrumblokkra, egyébként pedig legalább egy. Ez azt eredményezi, hogy az E energiafüggvény mindig pozitív, ha az allokáció nem megvalósítható, és negatív, ha megvalósítható. Az energiafüggvényt minimalizálva pedig a legnagyobb kihasználtságú allokációt kapjuk meg.

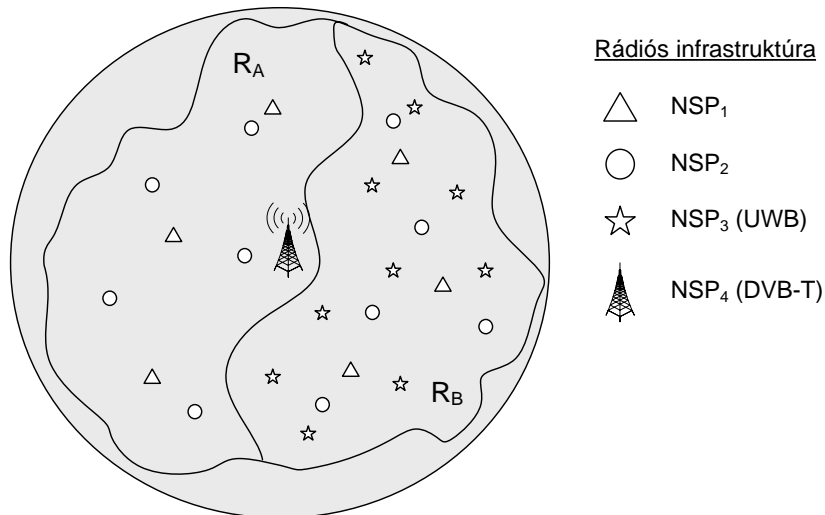
Az optimalizálás során minden lépésben megnézzük az aktuális \mathbf{s} állapot néhány \mathbf{s}' szomszédját, és véletlenszerűen döntünk arról, hogy az aktuális $e = E(\mathbf{s})$ energiájú állapotban maradunk-e, vagy átmegyünk az $e' = E(\mathbf{s}')$ energiájú állapotba.

A helyi minimumok elkerülése érdekében a P átlépési valószínűséget úgy kell megválasztani, hogy értéke ne legyen nulla $e' > e$ esetén sem, azaz a rendszer képes legyen „felmászni” az új állapotba akkor is, ha az rosszabb, mint a jelenlegi. Ugyanakkor az átlépési valószínűséget úgy kell meghatározni, hogy a futás során egyre inkább előnyben részesítsük az alacsonyabb energiájú állapotokba való átmenetet. Ezért az átlépési valószínűség függvénye nemcsak az aktuális és a következő állapothoz tartozó energiaértékektől függ, hanem egy időben változó T paramétertől (hőmérséklet) is. Az átlépési valószínűség függvény széles körben használt alakja:

$$P(e, e', T) = e^{\frac{e-e'}{T}}. \quad (27)$$

A T paraméter időbeli változása határozza meg azt, hogy milyen mértékű „felfelé” mozgás engedélyezett az adott időpontban. A szimulációk során a gyakorlatban széles körben használt $T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$ hőmérséklet csökkenő függvényt használtuk, $T_0 = 1$ és $\alpha = 0.98$ kezdőértékekkel.

6 Példa



2. ábra: Szimulációs példa

Nézzünk egy egyszerű példát mindössze két régióval, ahogyan az a 2. ábrán látható. Két szolgáltató mindkét régióban jelen van, és versenyez a rendelkezésre álló erőforrásért. Az *A* régióban jelen van egy DVB-T szolgáltató is, amely mindkét régiót lefedi. Továbbá a *B* régióban működik egy UWB jellegű szolgáltató, amely gyakorlatilag nem okoz interferenciát a többieknek, és tolerálja az őt ért interferenciát.

η	NSP-1	NSP-2	DVB-T	UWB
NSP-1	0	0.5	0.6	0.05
NSP-2	0.4	0	0.7	0.1
DVB-T	0.5	0.6	0	0.05
UWB	0.05	0.05	0.05	0

1. táblázat: rádiótechnológiai csatolási tényezők

	NSP-1	NSP-2	DVB-T	UWB
$\varepsilon_{AB}^{(i)}$	0.2	0.3	1	0

2. táblázat: földrajzi csatolási tényezők

	NSP-1	NSP-2	DVB-T	UWB
α	0.5	0.7	0.95	0.5
β	0.9	0.95	0.975	0.8

3. táblázat: interferencia tolerancia paraméterek

A DSA modell jellemezhető az η (1. táblázat) és ε (2. táblázat) mátrixokkal, továbbá az α és β (3. táblázat) vektorokkal. Az η mátrix a rádiótechnológiai csatolási tényezők értékét tartalmazza, ahol az m . és az n . szolgáltató által használt rádiós technológiák egymásra gyakorolt zavaró hatását $\eta_{m,n}$ írja le. Minél kisebb ez az érték, annál kedvezőbb a helyzet az interferencia szempontjából. Az η mátrix elemeit megnézve láthatjuk, hogy az UWB szolgáltató által használt technológia gyakorlatilag nem zavarja a többi szolgáltatót, és őt sem zavarják más szolgáltatók ($\eta \ll 1$).

A 2. táblázat a földrajzi csatolási tényezőket tartalmazza. Itt $\varepsilon_{l,k}^{(m)}$ azt a „zajt” jellemzi, amit az R_k régióban működő m . operátor okoz az R_l régióban. Ha megnézzük $\varepsilon^{(3)}$ értékét (DVB-T), egy erős csatolást ($\varepsilon=1$) láthatunk a két régió között, ezzel biztosítva, hogy a DVB-T szolgáltató lefedje mindkét régiót. Ezzel ellentétben az UWB szolgáltató egyáltalán nem zavarja a szomszéd régiót ($\varepsilon^{(4)}=0$).

A 3. táblázatban az átlagos (β) és a minimális (α) kihasználhatóságra vonatkozó paramétereket láthatjuk. Minél kisebbek ezek az értékek, a szolgáltató annál toleránsabb az interferenciával szemben. Láthatjuk, hogy a DVB-T szolgáltató tolerancia szintje alacsony ($\alpha \approx 1$ és $\beta \approx 1$), ami azt jelenti, hogy a spektrumblokkot kizárólagos használatra igényli.

A szolgáltatók licitjeit a 4. táblázatban láthatjuk, az 5. táblázat pedig az optimális allokációt és a szolgáltatók költségeit tartalmazza.

	R_A	R_B
NSP-1	$B_1 = \{(25, 75), (30, 85)\}$	$B_2 = \{(20, 40), (30, 50)\}$
NSP-2	$B_3 = \{(10, 30), (25, 45)\}$	$B_4 = \{(15, 45), (20, 55)\}$
DVB-T	$B_5 = \{(5, 25), (10, 35)\}$	$B_6 = \emptyset$
UWB	$B_7 = \emptyset$	$B_8 = \{(20, 20)\}$

4. táblázat: licitek

	R_A		R_B	
	(q, c)	c/q	(q, c)	c/q
NSP-1	(25, 15)	0.6	(20, 10)	0.5
NSP-2	(10, 10)	1	(15, 10)	0.6
DVB-T	(5, 20)	4	-	-
UWB	-	-	(20, 0)	0

5. táblázat: optimális allokáció és költségek

Az 5. táblázat c/q oszlopa az egyes szolgáltatók által fizetendő egységárat tartalmazza. Az eredmények azt mutatják, hogy a DVB-T szolgáltató fizeti a legtöbbet, mivel a toleranciaszintje alacsony, és mindkét régiót lefedi. Ezzel ellentétben az UWB szolgáltató nem fizet semmit (ezt értelmezhetjük úgy, hogy csak a spektrum alapárát kell megfizetnie), mivel gyakorlatilag nem fejt ki zavaró hatást a többi szolgáltatóra. Láthatjuk továbbá, hogy az 1. szolgáltató földrajzi csatolási tényezője kisebb, toleranciája pedig jobb, mint a 2. szolgáltatóé, ennek megfelelően az általa fizetett egységár is kevesebb lesz.

7 Összegzés

Javaslatot tettünk egy árazási algoritmusra, amely segítségével hatékonyan szétoszthatók a spektrumhasználati jogok az egymással versengő szolgáltatók között. A javasolt megoldás egy egylépcsős többlicites aukció, amely az általunk javasolt [13] DSA keretrendszer használja alapként. Ez a DSA keretrendszer alkalmas az interferencia és a különböző szolgáltatók interferencia tűrésének rugalmas modellezésére. A javasolt árazási mechanizmus pedig biztosítja, hogy azon szolgáltatók, amelyek nem tolerálják az interferenciát, vagy nagy zavaró hatást fejtenek ki a szomszédaikra, többet fizessenek az erőforrásért.

8 Irodalomjegyzék

- [1] "Study on conditions and options in introducing secondary trading of radio spectrum in the European Community," tanulmány az Európai Bizottság számára, készítők: Analysys, DotEcon és Hogan and Hartson, LLP, 2004 május, (a jelentés kivonata)
- [2] "IST-DRiVE project," <http://www.ist-drive.org>.
- [3] "IST OverDRiVE project," <http://www.ist-overdrive.org>.
- [4] P. Leaves, J. Huschke, R. Tafazolli, "A summary of dynamic spectrum allocation results from DRiVE", Proc., IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, Thessaloniki, Görögország 2002. június 16-19., 245–250. o.
- [5] M. Buddhikot, P. Kolodzy, S. Miller, K. Ryan, J. Evans, "DIMSUMnet: New directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access," Position Paper in IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (IEEE WoWMoM 2005), Taromina/Giardini Naxos, Olaszország, 2005. június
- [6] M. Buddhikot, K. Ryan, "Spectrum management in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks," Proc., First IEEE International Symposium on New Directions in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, MD, 2005. november 8-11.
- [7] Kovács L., Tapolcai J., Vidács A., "Spatio-temporal dynamic spectrum allocation with interference handling," Proc, IEEE International Conference on Communications (ICC 2007), Glasgow, Skócia, UK, 2007. június 24-28., (elfogadva)
- [8] V. Rodriguez, K. Moessner, R. Tafazolli, "Market-driven dynamic spectrum allocation: Optimal end-user pricing and admission control for CDMA," Proc., 14th European Information Society Technologies (IST) Mobile and Wireless Communications Summit, Drezda, Németország, 2005. június
- [9] V. Rodriguez, K. Moessner, R. Tafazolli, "Auction driven dynamic spectrum allocation over space and time: DVB-T and multi-rate, multi-class CDMA over a two-island geography," Proc., 15th European Information Society Technologies (IST) Mobile and Wireless Communications Summit, Myconos, Görögország, 2006. június 4-8.
- [10] A. Lazar, N. Semret, "Design and analysis of the progressive second price auction for network bandwidth sharing," Telecommunication Systems - Special issue on Network Economics, 1999.
- [11] Tuffin, "Revisited progressive second price auction for charging telecommunication networks," Telecommunication Systems, 20(3):255–263, 2002.
- [12] P. Maille, B. Tuffin, "Multi-bid auctions for bandwidth allocation in communication networks," Proc., The 23rd Conference of the IEEE Communications Society (INFOCOM 2004), Hong Kong, 2004. március 7-11.
- [13] Kovács L., Vidács A., "Interference-tolerant spatio-temporal dynamic spectrum allocation," Proc., Second IEEE International Symposium on New Directions in Dynamic Spectrum Access Networks, Dublin, Írország, 2007, április, (elfogadva)
- [14] Kovács L., Vidács A., „Spatio-temporal spectrum management model for dynamic spectrum access networks,” Proc., First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS), Boston, USA, 2006.
- [15] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi, „Optimization by simulated annealing,” Science, Number 4598, 13 May 1983 220, 4598 (1983) 671-680. o.