

# Az interferencia elnyomása mobil rádióhálózatokban

PAP LÁSZLÓ, IMRE SÁNDOR

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Híradástechnikai Tanszék  
{pap, imre}@hit.bme.hu

**Kulcsszavak:** interferencia, spektrális hatékonyság, szektorizálás, adaptív antennák

*Napjaink és a közeljövő közcélú mobil távközlő rendszereinek hatékonyságát alapvetően befolyásolja a felhasználók jeleinek keveredése, amit interferenciának nevez a szakirodalom. Cikkünkben áttekintjük azokat a megoldásokat, amelyek segítségével jelentősen csökkenthető az interferencia hatása, s ezáltal olcsóbb és jobb minőségű szolgáltatásokat kínáló rendszereket építhetünk.*

## 1. Bevezetés, alapfogalmak

Ahhoz, hogy megértsük az interferenciacsökkentő módszerek lényegét, ismernünk kell a rádiós vétel alapelvét, illetve a rendszerek minősítésére szolgáló mennyiséget, a spektrális hatékonyságot.

### A rádiós vétel alapelve

A vevőantennára a rádiócsatorna által módosított adójel kerül, mely számos hatás eredményeképpen jön létre. A vevő az antenna jeléből megpróbálja helyreállítani az adójelben lévő eredeti modulációs tartalmat. Ez azonban csak akkor sikerülhet, ha az eredő vett jelben elegendően nagy a hasznos adójel szintje. Az „elegendő” itt azt jelenti, hogy minden vevőre definiálhatjuk: mekkora szintű jelre van szüksége a sikeres detektáláshoz, illetve, hogy mekkora lehet a vett jelben található hasznos adójel és egyéb zavaró jelek teljesítményaránya.

### Spektrális hatékonyság

Korántsem közömbös, hogy egy felhasználó információjának továbbításához a szolgáltatónak mekkora sáv szélességre van szüksége, a frekvenciasáv használatáért ugyanis fizetni kell. Annak mérésére, hogy egy adott rendszer mennyire „takarékoskodik” a sáv szélességgel egy alkalmas mennyiséget vezettek be, ez az úgynevezett spektrális hatékonyság.

Definíció szerint ez vezeték nélküli rendszerekben az egy cellában egységnyi frekvencián átvihető hasznos információ mennyisége. Mértéke a bit/s/Hz/cella. Egy adott rendszer spektrális hatékonyságát számos tényező együttesen határozza meg, például a választott modulációs technika (azaz, hogy miként alakítjuk át a digitális információt az antennán kisugárzandó elektromágneses jellé), az alkalmazott többszörös hozzáférés módja, illetve rádiócsatornába érkező, más felhasználóktól származó interferáló jelek szintje.

Jelen cikkben először megvizsgáljuk az interferenciák típusait (2. szakasz), majd az interferencia- elnyomás klasszikus módszereivel foglalkozunk (3. szakasz), végül egyes újabb interferencia- elnyomási módszert mutatunk be a 4. szakaszban.

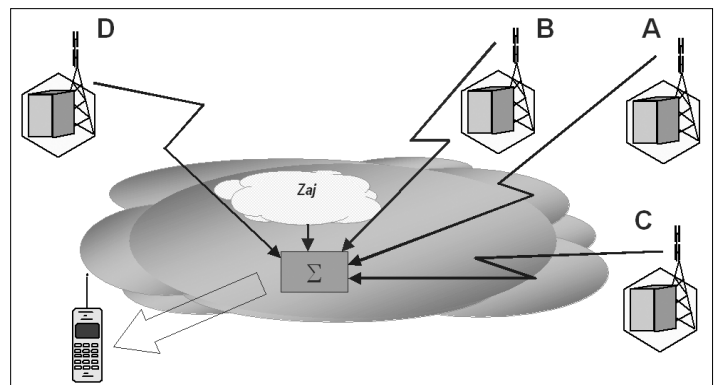
## 2. Az interferenciák típusai

A többszörös hozzáférési eljárások célja az, hogy az egyidőben működő különböző felhasználók jeleit elválassza egymástól a rádiócsatornában. Amennyiben ez nem sikerül tökéletesen, akkor a felhasználók jelei zavarani fogják egymást. A gyakorlatban alapvetően kétféle interferenciát különböztetünk meg.

### 2.1. Szomszédcsatornás interferencia

Az 1. ábrán látható rendszerben a jobb oldali **A** adóantennáról szeretnénk eljuttatni hasznos a jelünket a mobilkészülékbe. A hasznos jelhez a rádiócsatornában zaj és interferáló jel adódik, azaz példánkban a zaj mellett számolnunk kell három további felhasználó jelével is, akik közül a **B** és **C** jelű a saját adóban használttól eltérő frekvenciájú jeleket küld a rádiócsatornába. Feltételezzük tehát, hogy most a jeleket a frekvenciatartományban választjuk el egymástól, azaz frekvenciaosztásos többszörös hozzáférést alkalmazunk (FDMA, a mobilrendszerek egyik leggyakoribb megoldása). A felhasználók elvileg így nem zavarják egymást, a valóságban azonban a felhasználók jeleit a frekvenciatartományban sosem lehet tökéletesen elválasztani még úgynevezett védősávok beiktatásával sem, ezért a **B** és **C** jelű adóból származó jelek teljesítményének egy kis hányada

1. ábra Az interferencia típusai



bejut az **A** adó jelének a frekvenciasávjába. Ezt a jelenséget hívjuk *szomszédcsatornás interferenciának*, mivel a zavart a szomszédos frekvenciasávokból érkező jelek okozzák.

A szomszédcsatornás interferencia elleni védekezés egyik lehetséges módja az, hogy minden adó az antenán való kisugárzás előtt a saját jeléből a szomszédjai sávjába átnyúló komponenseket kiszűri. Mobilkörnyezetben ez sem ad tökéletes megoldást, mivel a Dopplerhatás miatt még ebben az esetben is létrejöhet frekvenciaeltolódás.

## 2.2. Azonos csatornás interferencia

Az 1. ábrán a vizsgált területen egy negyedik (**D** jelű) felhasználó is működik, de az ugyanazt a frekvenciasávot használja, mint az **A** jelű adó. Ennek eredményeképpen a vevőbe jelentős zavaró interferencia érkezik, hisz ez a jel közvetlenül összeütközik a hasznos jellel. Ezért is hívják ezt az interferencia típust *azonos csatornás interferenciának*. Mivel az azonos frekvenciasávban érkező jel lényegesen nagyobb zavaró hatást gyakorol a hasznos jelre, mint a szomszédcsatornás interferencia, és jóval nehezebb is csökkenteni a hatását, ezért a következőkben az azonos csatornás interferencia elnyomásával fogunk foglalkozni.

## 3. Az interferencia elnyomásának klasszikus módszerei

Mint azt az előző szakaszban láthattuk, az interferencia fő forrása az azonos csatornás interferencia. A következőkben áttekintjük, miként lehet ennek hatását olyan szintre csökkenteni, amely mellett már működő rendszereket tudunk építeni.

Az azonos csatornás interferencia csökkentésére kétféle lehetőség kínálkozik: a vevőbe jutó interferáló jelek szintjének a csökkentése és az interferáló adók által kisugárzott jel teljesítményének csökkentése. A következő két pontban mi is ezt a felosztást használjuk.

### 3.1. A vevőbe jutó interferáló jelek szintcsökkentése

#### Cellás struktúra

A mobil távközlő rendszerekben a szükséges terület rádiós ellátása általában az úgynevezett cellás elvré épül, függetlenül attól, hogy földi vagy műholdas rendszerről beszélünk. Ez azt jelenti, hogy az ellátandó területen bázisállomások hálózatát építjük ki. A bázisállomás egy adott környezetet lát el rádiófrekvenciás jelekkel – ezt a területet *cellának* nevezzük. Minden bázisállomás csak néhány részsávot használ a teljes *B* sáv szélességből. A bázisállomásokat vezetékes vagy mikrohullámú kapcsolat köti össze a kapcsoló központokkal.

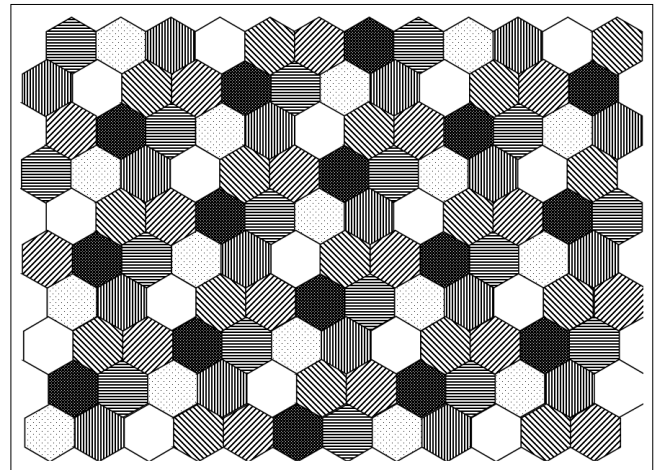
A mobil a hívás kezdeményezésekor a legkedvezőbb összeköttetést biztosító bázisállomással lép kapcsolatba, mely a rendszer többi elemét is felhasználva biztosítja a hívott féllel való összekapcsolást. A mobil mozgása során természetesen előbb vagy utóbb annyira

eltávolodik a bázisállomásától, hogy egy másik bázisállomással már kedvezőbb összeköttetést tud létesíteni. Ekkor a rendszer a mobilát átkapcsolja az új bázisállomásra. Ezt az átkapcsolási folyamatot hívja a szakirodalom hívásátadásnak, angolul *handover*nek.

A cellák alakja természetesen nagyon eltérhet egymástól a különböző domborzati és beépítettségi viszonyok miatt. Mivel ideális esetben egy bázisállomás kör alakú területet fed le (melynek épp a közepében áll), célszerűbb lenne köröket használni a szemléltetéshez. A körökkel azonban nem lehet hézagmentesen lefedni a síkot, ezért a szakirodalomban bevett szokás a cellás mobilrendszerek méhsejt-alakú cellákkal történő szemléltetése.

Miután cellákra osztottuk a lefedési területet, kijelölünk egy szomszédos cellákból álló csoportot és ezen a csoporton belül minden cellához más részsávokat rendelünk. Ezt a cellacsoportot a szaknyelv *klaszternek* nevezi. Ha ilyen klaszterekkel fedjük le a síkot, akkor garantálható, hogy az azonos részsávokat használó cellák fix távolságra lesznek egymástól, ezáltal az azonos csatornás interferencia is adott szint alatt marad bármelyik cellában.

2. ábra A klaszterek szemléltetése



A 2. ábrán hételemű klaszterekkel fedtük le a területet. A klaszterben minden cellának más az árnyékolása a használt frekvenciasávnak megfelelően. Láthatjuk, hogy egy klaszterben belül minden cella más-más árnyékolású, ami arra utal, hogy a klaszter minden cellájában más részsáv-csoportot használunk, és egyébként tipikus, hogy az egy klaszterhez tartozó cellák együttesen a teljes rendelkezésre álló frekvenciasávot felhasználják. A teljes síkot hételemű klaszterekkel lefedve látható, hogy bármely két azonos árnyékolású cella több mint négy cellasugárnyi távolságra van egymástól.

A klaszterek alkalmazása határozott előnyökkel jár. Mivel minden klaszterben a teljes *B* frekvenciasávot felhasználhatjuk, ezért annyszorosára nő a lehetséges egyidejű hívások száma, ahány klasztert alakítottunk ki. Vegyük észre, hogy mindehhez nincs szükség a használt frekvenciasáv növelésére.

Ahhoz, hogy a síkot hézagmentesen lefedhessük klaszterekkel, nem lehet tetszőleges számú cellából alkotott klasztereket használni. A klaszterek  $K$  cellaszámára az alábbi igen egyszerű összefüggés érvényes, ahol  $i$  és  $j$  nulla vagy pozitív egész szám lehet:

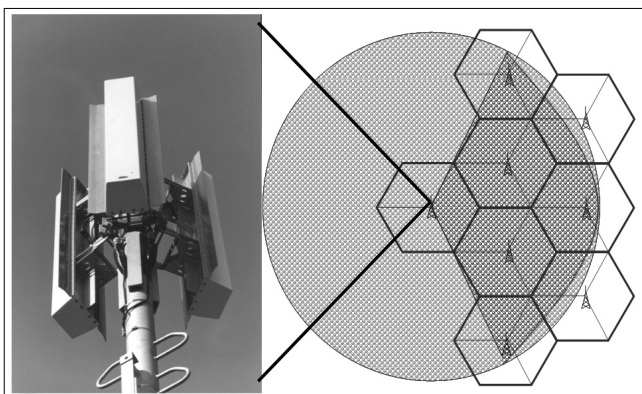
$$K = i^2 + ij + j^2.$$

Ebből  $K$  néhány lehetséges értéke: 1, 3, 4, 7, 9, 12, 13, 16, 19, 21,....

#### Szektorizálás, mikro- és pikocellák

Minden cella a számára kiosztott frekvencia részsávok számától függő felhasználót tud kiszolgálni, de ezek száma mindenképpen korlátos. Ezért ha nagy felhasználó-sűrűségű területet szeretnénk lefedni, akkor növelni kell az adott területen a cellák számát.

Ebből a célból fejlesztették ki a bázisállomások számára a *szektorizált antennákat*. Ezek lényege, hogy ezek nem körsugárzók, azaz a jeleket csak egy térszeletből veszik és nem minden lehetséges irányból. Ezáltal csökken az antennára jutó interferencia, a cellák közelebb hozhatók egymáshoz. A 3. ábrán egy körsugárzó és egy három szektorra bontott szektorizált antennát látunk az általuk vett interferencia illusztrálásával. Összefoglalva: a szektorizálás csökkenti a bázisállomás antennájába jutó interferáló jelteljesítményt.



3. ábra A szektorizálás hatása az adásra és a vételre

### 3.2. Az interferencia forrásának korlátozása

Az interferencia forrásának korlátozása egyszerűen azt jelenti, hogy a rendszerben működő rádióadók a lehetőségekhez mérten csökkentett teljesítménnyel adnak. Ez tipikusan három módon lehetséges.

#### Teljesítményszabályozás

Korábban láttuk, hogy a sikeres rádiós vételhez arra van szükség, hogy (a zajhoz és az interferenciához viszonyítva) elegendő hasznos jelteljesítmény jusson a vevőbe. Ezért például a mobilterminál adóteljesítményét úgy kell megválasztani, hogy a bázisállomástól legtávolabb eső pontról (cellahatár) is elég jelteljesítmény jusson a bázisállomás vevőjébe. Ha ezt állandó értéken tartanánk, akkor a bázisállomáshoz közeledve feleslegesen nagy adóteljesítményt használunk, ami többletinterferenciát okoz. Ezért célszerű a mobil teljesítményét a távolság függvényében szabályozni, mivel így folyamatosan biz-

tosítani tudjuk, hogy elegendő hasznos jel jusson a vevőbe, miközben nem okozunk feleslegesen interferenciát a többi mobilkészülék számára. Ezt a megoldást teljesítményszabályozásnak nevezzük.

#### Szakaszos adás

Ennél a megoldásnál azt használjuk ki, hogy a mobilterminálnak főlegesen jelet kisugároznia, ha a telefonbeszélgetés során átmenetileg szünetet tartunk. Jól ismert, hogy egy telefonbeszélgetés során az egyik fél átlagosan csupán az idő egyharmadában beszél, az idő kétharmadában a másik fél aktív, vagy éppen mindketten szünetet tartanak. A beszéd/nembeszéd intervallumok pontos arányát *beszédaktivitási faktornak* nevezzük és azzal, hogy a szünetek alatt az adást megszakítjuk, hozzávetőlegesen egyharmadára csökkenthető a mobilterminál interferencia hatása.

#### Teljesítménykímélő üzemmód

Ezt a megoldást tipikusan vezeték nélküli lokális hálózatoknál alkalmazzák. Ha a mobilfelhasználó tudja, hogy adott ideig nem akar információt továbbítani, akkor a bázisállomással megegyezve erre az időre energiatakarékos üzemmódba vált, vagy kikapcsol. A bázisállomás tudja, hogy a mobil mikor van üzemkés, illetve kikapcsolt állapotban, ezért ha a kikapcsolt állapotú mobilkészüléknek továbbítandó információ érkezik hozzá, akkor kivárja, míg a mobil üzemkés állapotba kerül és akkor küldi el neki az üzenetet.

#### Szektorizált antennák

A szektorizált antennák alkalmasak a kisugárzott interferencia csökkentésére is. Ezek lényege, hogy mivel jelkibocsátásuk csak egy térszeletre terjed ki és nem minden lehetséges irányra, ezért interferencia-forrásként is csak bizonyos irányban fejtenek ki hatást. Ezáltal csökken az interferencia, a cellák közelebb hozhatók egymáshoz. A szektorizálás tehát csökkenti a bázisállomás antennája által kisugárzott interferáló jelteljesítményt is.

## 4. Korszerű interferencia-elynomási módszerek

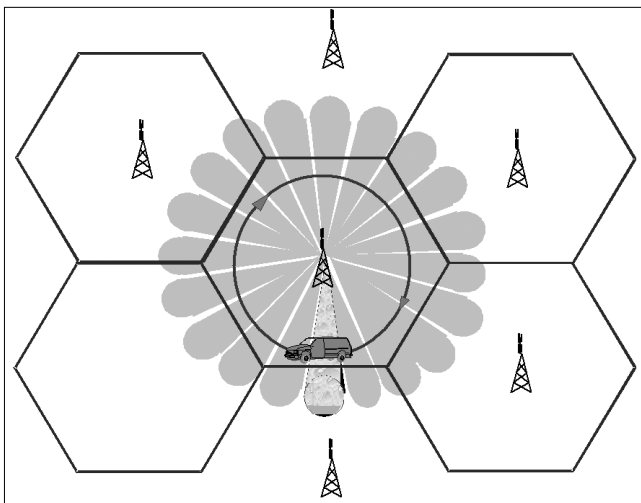
A technikai fejlődés során az interferencia elnyomásának újabb módszereit dolgozták ki. Ezek a módszerek lehetővé teszik azt, hogy hatékonyabb mobilkommunikációs-rendszereket alakítsunk ki. Az új lehetőségek közül kettőt villantunk fel a továbbiakban.

### 4.1. Adaptív antennák

Mint azt a korábbi fejezetekben már tárgyaltuk, a szektorizált antennák alkalmazása csökkenti az azonos csatornás interferenciát (a bázisállomásba érkezőt és a bázisállomás által kisugárzottat egyaránt) és ez által csökkenteni lehet az azonos frekvenciát használó cellák közötti távolságot. A szektorizálás előnyeit tovább lehet növelni az úgynevezett *adaptív antennák* alkalmazásával. Ennek a módszernek két típusát mutatjuk be.

**Kapcsolt nyalábú adaptív antennák**

Általánosítsuk a szektorizálás módszerét úgy, hogy nem 3-4-6 szektort alakítunk ki, hanem sok keskeny szektort, úgynevezett nyalábot hozunk létre a 4. ábrának megfelelően és mindig arra a nyalábra kapcsolunk, amelyekben a mobilterminál tartózkodik. Ezzel a módszerrel nyilvánvalóan tovább csökkenthető az interferencia. Ezt a megoldást *kapcsolt nyalábú adaptív antennáknak* hívják (lásd az ábrát). Az elképzelés egyetlen, de annál komolyabb hátránya, hogy az antennák működését össze kell hangolni, megfelelően gyors kapcsolást biztosítva a nyalábok között. Szerencsére ma már elegendően gyors számítástechnikai eszközök (jelfeldolgozó processzorok) állnak rendelkezésre, melyek képesek megbirkózni a feladattal.



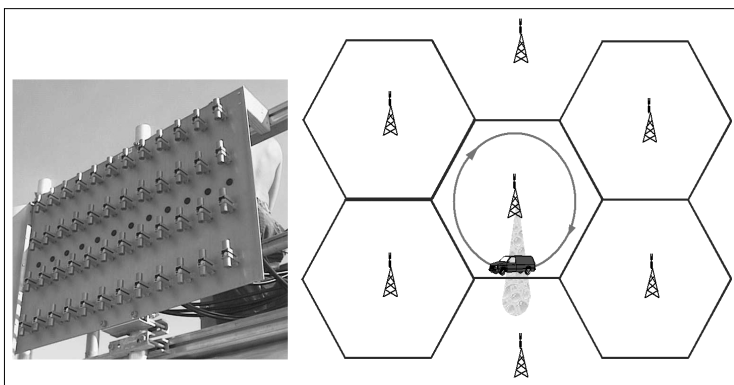
4. ábra Adaptív antennák – kapcsolt nyaláb

**Forgatott nyalábú adaptív antennák**

A kapcsolt nyalábú antennák egy továbbfejlesztett változata a *forgatott nyalábú adaptív antennarendszer*. Itt a sok nyaláb létrehozása helyett elegendő egyetlen nyalábot kialakítani és ezt úgy forgatni, hogy mindig kövesse a mobilterminál mozgását. A 5. ábra ezt a módszert illusztrálja.

A nyaláb forgatásához nem szükséges annak tényleges mechanikai forgatása. Elegendő csupán az ábra bal oldalán látható antenntömböt kialakítani, majd az

5. ábra Adaptív antennák – forgatott nyaláb



egy-egy antennaelemről különböző késleltetésekkel levenni a jeleket, és összegezni azokat. A késleltetési értékek és az összegzés súlyozásának dinamikus változtatásával elérhető az antenna nyalábjának (szaknyelven karakterisztikájának) nagyon precíz forgatása. Ennek nyomán hívják ezt a megoldást forgatott nyalábú antennáknak.

Nyilvánvaló, hogy ha az antennanyalábot jelfeldolgozási módszerekkel forgatni lehet, akkor a nyaláb alakját is lehet formálni adaptívan úgy, hogy abból az irányból, ahonnan interferáló jelek érkeznek, elnyomja a vételt, a mobil irányában viszont nagy érzékenységet mutasson. Ezen tökéletesített változatot nevezzük általában *adaptív antennának*.

**A szerzőkről**

**PAP LÁSZLÓ** tanszékvezető egyetemi tanár a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karán szerzett diplomát 1967-ben. 1992-ben a műszaki tudomány doktora lett, 2001-ben az MTA levelező, 2007-ben pedig rendes tagjává választotta, 2008-tól az Academia Europaea tagja. 1994-től 2001-ig a Kar dékánja, 2001-től 2004-ig az Egyetem stratégiai rektorhelyettese volt. Főbb kutatási témái a hírközlés elmélete és a mobil kommunikáció. 1997-ben Eötvös-, 1999-ben Széchenyi-, 2004-ben Simonyi Károly-, 2005-ben Gábor Dénes-díjat vehetett át. 2005-ben megkapta a Magyar Köztársasági Érdemrend Tiszti keresztjére kitéüntetést is.

**IMRE SÁNDOR** Budapesten született 1969-ben. 1993-ban szerzett diplomát a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karán. 1996-ban dr. univ., 1999-ben PhD, 2007-ben MTA Doktora fokozatot szerzett. Jelenleg a BME Híradástechnikai Tanszékén docensi posztásban vezeti a Mobil Távközlési és Informatikai Laboratóriumot, valamint a BME Mobil Innovációs Központjának tudományos kutatási igazgatója. Főbb kutatási területei a korszerű mobil infokommunikációs rendszerek rádiós és hálózati kérdései, valamint a kvantum alapú informatika.

**Irodalom**

[1] Engelhart, A., Teich, W., Lindner, J., Jeney G., Imre S., Pap L.: A Survey of Multiuser/Multisubchannel Detection Schemes Based on Recurrent Neural Networks. Wireless Communications and Mobile Computing, Vol. 2, Issue 3, May 2002, Wiley Publ., pp.269–284.  
 [2] <http://www.etsi.org>  
 [3] <http://www.3gpp.org>  
 [4] Liu, Hui: Signal Processing Applications in CDMA Communications. Artech House Publishers, 2001.  
 [5] Ponnekanti, Seshaiyah: An Overview of Smart Antenna Technology for Heterogeneous Networks. IEEE Communications Surveys, 4thQ 1999, 2, 4.  
 [6] Prasad, R., Mohr, W., Konhauser, W.: Third Generation Mobil Communication Systems. Artech House Publishers, 2001.  
 [7] Verdú, Sergio: Multiuser Detection. Cambridge University Press, New York, 2001.