Háztartási eszközök által kibocsátott mikrohullámú sugárzások mérése

Csanád Máté, Lökös Sándor

2014. szeptember 9.

Tartalomjegyzék

1. Az elektromágneses sugárzás **1**

2. Elektromágneses sugárforrás teljesítményének becslése **2**

3. Nemionizáló elektromágneses sugárzások hatásai, egészségügyi határértékek **3**

4. Mérési feladatok **4**

5. Megjegyzések **6**

6. Ellenőrző kérdések **7**

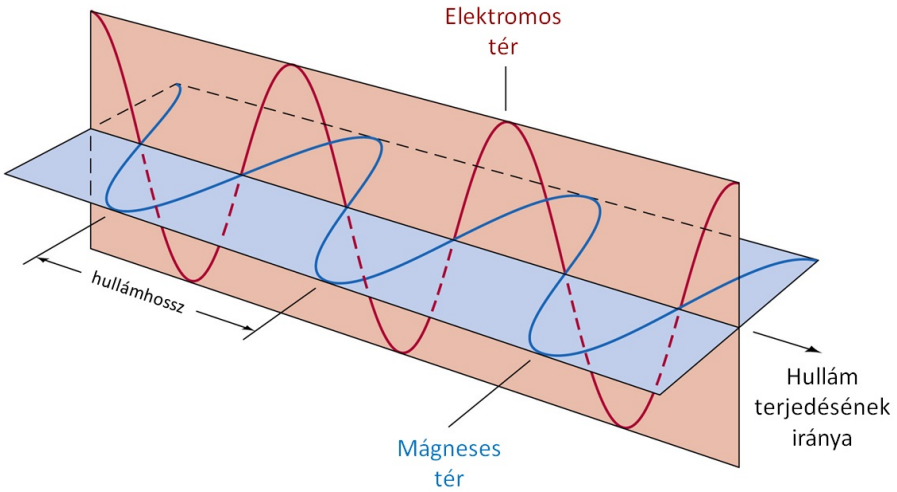
1. Az elektromágneses sugárzás

Maxwell híres egyenletrendszerével elméletileg megjósolta a fénysebességgel terjedő elektromágneses hullámok létét, amit kísérletileg Heinrich Rudolf Hertz igazolt. Legegyszerűbben egy úgynevezett dipólantennával kelthetünk elektromágneses hullámokat, ahol egy függőleges tengelyű vezetőben nagy mennyiségű elektron végez oszcilláló mozgást. Az áram iránya egyszer felfelé, majd lefelé mutat, az áramerősség szinuszosan váltakozik. Ezért az áram által keltett mágneses tér ugyanígy váltakozik az adó körül. Az indukciós törvény szerint ez elektromos teret kelt, ami szintén időben változni fog, ami megint mágneses teret indukál. Ily módon a térerősség leválik az antennáról folyó áramról, és a térben c fénysebességgel tovaterjed. Ez az elektromágneses hullám lényege. (Ennek részleteit lásd a Bevezetés a fizikába tárgyhoz kapcsolódó jegyzetben.) A sugárzási tér az adótól messze is érezhető, intenzitása a távolsággal csökken. Az adótól a hullámhossz sokszorosára eltávolodva az elektromos és a mágneses térnek meghatározott szerkezete van. Az elektromos és a mágneses tér nagysága egyenesen arányos, az $|E| = c|B|$ összefüggés értelmében. Az adó felől a terjedés irányába mutató, úgynevezett hullámszám-vektort többnyire k-val jelöljük, az E és B vektorok erre és egymásra is merőlegesek (a jobbkéz-szabály szerinti sorrendben), ahogy az 1. ábrán is látható.

Az így hullámzó elektromos és mágneses tér vektorai transzverzális elektromágneses (EM) hullámot alakítanak ki. A terjedési sebesség az adott közegben érvényes fénysebesség, és mint minden hullámnál, itt is igaz a c=λf összefüggés. Egy 50 Hz frekvenciájú sugárzás hullámhossza vákuumban (és közelítőleg levegőben is) $\lambda = \frac{3\cdot 10^8 \mathrm{m/s}}{50\mathrm{Hz}} = 6 \cdot 10^6 \mathrm{m} = 6000\mathrm{km}$, a Föld sugarának nagyságrendjébe esik. A hálózati frekvenciájú eszközök a sugárzás hullámhosszánál mindig sokkal kisebb távolságra vannak tőlünk. A mobiltelefonok ugyanakkor 0,9 vagy 1,8 GHz frekvenciát használnak. Az ilyen frekvenciához tartozó hullámhossz $\lambda = \frac{3\cdot 10^8 \mathrm{m/s}}{0.9\cdot 10^9 \mathrm{Hz}} = 0.33\mathrm{m} = 33\mathrm{cm}$ illetve $16,6$ cm. Ilyenkor már könnyen alkalmazhatjuk a sugárzási tér elképzelést. A rádióadók frekvenciája a köztes 500 kHz-200 MHz tartományba esik.

Az elektromágneses sugárzás energiát is hordoz, az intenzitása (azaz a felületegységre eső teljesítmény) arányos az elektromos illetve a mágneses tér négyzetével:

$$I = \frac{P}{A} = \epsilon_0 c E^2/2 = \mu_0 B^2/2 \tag{1}$$



1. ábra. Az elektromágneses hullámok szerkezete.

Sugárzás típusa	Frekvencia-tartomány	Hullámhossz	Foton-energia
Alacsony frekvencia	< 300 kHz	> 1 km	< 1 neV
Rádióhullámok	$0,3 - 300$ MHz	1 m $-$ 1 km	$1 - 1000$ neV
Mikrohullámok	$0,3 - 300$ GHz	1 mm $-$ 1 m	$1 - 1000$ μeV
Infravörös	$0,3 - 300$ THz	1 mm $-$ 800 nm	$1 - 1000$ meV
Látható fény	$350 - 750$ THz	$400 - 800$ nm	$1 - 3$ eV
Ultraibolya	$0,75 - 30$ PHz	$10 - 400$ nm	$3 - 100$ eV
Röntgen	$0,03 - 30$ EHz	10 nm $-$ 10 pm	$0.1 - 100$ keV
Gamma	> 30 EHz	< 10 pm	> 100 keV

1. táblázat. Elektromágneses sugárzások hullámhossztartományai

ahol ϵ_0 és μ_0 a vákuumra vonatkozó állandók, a nevük elektromos permittivitás és mágneses permeabilitás. Kiderült az is, hogy az energiát kvantumok hordozzák, a fotonok. Egy kvantum energiája $E = hf$, ahol $h = 6,6 \times 10^{-34}$ m^{2}kg/s, és a fény az összenergiájának megfelelő számú kvantumból áll, az intenzitás változása esetén a kvantumok száma változik egyedül. Bizonyos hullámhossz alatt, azaz frekvencia felett a fotonok energiája olyan nagy, hogy az atomból leszakíthatnak egy elektront – ekkor ionizáló elektromágneses sugárzásról beszélünk.

Nem-ionizáló elektromágneses sugárzásokról 100 nm hullámhossz fölött beszélhetünk. Ezeknek a tereknek a kvantumai (a fotonok) kb. 10 eV[1] energiánál kisebb energiájúak, így nem képesek az atomokból elektronok leszakítására. A termikus infravörös sugárzás (szobahőmérsékleten) 1000-10000 GHz frekvenciának felel meg. A 3. táblázat tartalmazza a különböző frekvencia- illetve hullámhossztartományok elnevezéseit.

2. Elektromágneses sugárforrás teljesítményének becslése

Tegyük fel, hogy a sugárzás energiája nem nyelődik el a közegben (nem alakul hővé), és képzeletben rajzoljunk különböző sugarú gömböket a forrás köré. Ezeken a gömbökön összesen ugyanannyi energia áramlik át időegység alatt, hiszen nem veszett el semennyi útközben – ezt feltettük. Tehát ezeken a gömbfelületeken ugyanannyi energia kell, hogy átáramoljon, mint amennyi a forrásból jön. Elemi geometria segítségével belátható, hogy ilyen esetben az átáramló energia felületegységet tekintve négyzetesen csökken a forrástól távolodva.[2] Szemléletesen gondolhatunk egy locsolóra, amely minden irányban szórja szét a vizet. Ha egy másodperc alatt egy litert locsol ki, akkor a locsolótól, mint középponttól 10 cm-re vagy 1 m-re lévő képzeletbeli gömbön is 1-1 liter víz áramlik át másodpercenként, hiszen a víz útközben nem veszett el. Tehát a sugárforrástól különböző távolságra

[1] 1 eV az az energia, amelyet egy elektron 1 V gyorsítófeszültség hatására szerez: $1.6 \cdot 10^{-19}$ J

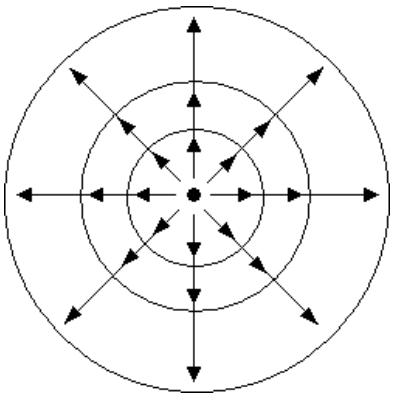
[2] Mivel a gömb felülete $4\pi r^2$, azaz r^2-tel arányos, egy egységgel nagyobb sugárhoz 4-szer, két egységszer nagyobb sugárhoz 9-szer, s.í.t felület tartozik. Mivel az energia ugyanannyi, a felület pedig négyzetesen nő, a felület egy egységén átáramló energia négyzetesen csökken.

levő gömbökön összesen ugyanannyi energia áramlik át időegységenként. Azonban a sugárzás intenzitásának definíciója éppen az egységnyi felületen időegység alatt átáramló energia mennyisége, azaz

$$I = \frac{E}{At} = \frac{P}{A} \tag{2}$$

ahol P a sugárforrás teljesítménye. Ezzel a sugárzás intenzitásának távolságfüggésére egy egyszerű becslést adhatunk. Figyelembe véve az R távolságra lévő gömbök $A = 4R^2\pi$ felületét (ld. a 2. ábrát):

$$I(R) = \frac{E}{At} = \frac{P}{4R^2\pi} \tag{3}$$



2. ábra. Az elektromágneses sugárzás terjedése, intenzitásának változása.

Minderre úgy is eljuthatunk, ha tudjuk, hogy a Maxwell-egyenletekből adódó három dimenziós hullámegyenlet megoldása alapján az elektromos és a mágneses tér amplitúdója a távolsággal fordítottan arányosan csökken, $E, B \propto 1/r$. Miután az intenzitás pedig ezekkel négyzetesen arányos, így $I \propto 1/r^2$.

3. Nemionizáló elektromágneses sugárzások hatásai, egészségügyi határértékek

Jelentős mennyiségű kutatási eredmény áll rendelkezésünkre ebben a témakörben, elsősorban a nagyfrekvenciás sugárzások hőhatásáról és emberi szervezetben való elnyelődéséről mikrohullámú és nagyfrekvenciás tartományban. Fontos vizsgálni a radar- és rádiótechnika, háztartási eszközök és orvosi alkalmazások (pl. mag-mágneses rezonancia, MRI) esetleges biológiai hatásait.

3.1. Élettani hatások

A sugárzás elnyelődését az emberi szövetekben a test elektromos permittivitása, illetve mágneses permeabilitása határozza meg. Ha a külső elektromos tér periódusideje és az elnyelő anyagban található kis dipólusok (pl. vízmolekulák) mozgásának (vibráció, rotáció, stb.) tipikus periódusideje megegyezik, maximális elnyelődést, abszorbciót tapasztalhatunk. Ilyen módon nyelődik el a mikrohullámú sütő sugárzási energiája a vízben. A biológiailag fontos anyagok elektromos permittivitása frekvenciafüggő, és a levegő permittivitásától jelentősen eltér. A biológiai anyagban elnyelt sugárzás mennyisége (így valószínűleg biológiai hatása is) erősen frekvenciafüggő. 100 kHz frekvencia alatt például a sejtmembrán leárnyékolja külső elektromos teret, a sejt belsejébe csak a nagyobb frekvenciájú hullámok hatolnak be. A sejtmembrán, makromolekulák, fehérjék, aminosavak, peptidek, vízmolekulák más-más frekvenciatartományban képesek sugárzásokat elnyelni (a felsorolás sorrendjében ez a frekvencia nő). Ennek az elnyelésnek orvosi diagnosztikai jelentősége is lehet.A tényleges biológiai hatást okozó elnyelt elektromágneses energia meghatározásához ismerni kell a sejtek és szövetek elektromos tulajdonságait, ugyanis az elnyelt energia mértékét az objektum elektromos permittivitása, ill. mágneses permeabilitása határozza meg.

Az emberi testben, biológiai objektumban elnyelt dózis fogalmára egységesen a fajlagosan elnyelt teljesítmény az ún. SAR (SAR: Specific Absorption Rate) használatos, amely megadja az egységnyi tömegben elnyelt

frekvencia (MHz)	Hullámhossz a levegőben (cm)	Hullámhossz az anyagban (cm)	Behatolási mélység (cm) magas víztartalmú szövetek	Behatolási mélység (cm) alacsony víztartalmú szövetek
300	100	11,9	3,89	32,1
1500	20	2,81	2,42	13,9
3000	10	1,45	1,61	9,74
5000	6	0,89	0,788	6,67

2. táblázat. Behatolási mélység magas víztartalmú szövetek (izom, bor, agyszövet, belső szervek) és alacsony víztartalmú szövetek (zsír, csont) elektromos paraméterei néhány frekvencián. A sugárzás behatolási mélysége az a távolság a testfelszíntől (befelé) ahol az elektromágneses térerősség az e-ed részére (36,8%-ára) csökken.

	frekvenciatartomány	átlagos SAR egész testre (W/kg)	lokális SAR fej, törzs (W/kg)	lokális SAR végtagok (W/kg)
lakossági	10 MHz-10 GHz	0,08	2	4
foglalkozási	10 MHz-10 GHz	0,4	10	20

3. táblázat. Az ICNIRP ajánlásának SAR-re vonatkozó alapkorlátai. Forrás `http://www.incirp.de/`

teljesítmény nagyságát W/kg-ban, ill. mW/g-ban. Az SA (SA: Specific Absorption) az SAR időbeli integrálja az elnyelt energiát adja meg J/kg-ban, ill. mJ/g-ban. A víztartalomtól függően az objektumban elnyelt elektromágneses sugárzás hullámhossza és behatolási mélysége csökken (ld. 2. táblázat). A mérések során általában a sugárzási intenzitást tudjuk meghatározni, azaz a felületegységre eső teljesítményt. Ebből úgy kaphatjuk meg a fajlagos elnyelt teljesítményt, hogy megbecsüljük az elnyelő felület nagyságát (egész test: kb. negyed négyzetméter; fej: nagyságrendileg 100 cm^2), és az intenzitást ezzel szorozva megkapjuk az elnyelt teljesítményt. Ezt az elnyelő szövet tömegével (egész test: tipikusan 75 kg, fej: 5 kg) osztva már az SAR értéket kapjuk.

Az EM terek biológiai hatásaira vonatkozó kísérletes adatok alapján a sejtmembránon zajló szabályozási folyamatok kerültek előtérbe. A biológiai hatásokkal kapcsolatos első tapasztalatok és kísérletek a mikrohullámú (MH) és rádiófrekvenciás (RF) sugárzások hőhatására voltak visszavezethetők. Ezek közé tartozott az például a nemzőképesség ideiglenes csökkenése, szürkehályog képződése. A sugárzás hőhatását a gyógyításban hamar használni kezdték. Napjainkban a fizikoterápiás kezelések mellett a daganatterápiában is alkalmazzák.

Annak ellenére, hogy a sugárvédelmi értékek alapját az idegrendszerre gyakorolt hatások küszöbértékei adták, az MH és RF sugárzásokkal kapcsolatos egyik központi kérdés az esetleges rákkeltő hatás maradt. Különösen a rádiótelefonok elterjedése kapcsán merült fel a kérdés: vajon tartós használatuk okozhat-e rákot vagy sem? A kísérletes modellekben elsősorban a daganatos szövetek növekedési ütemét figyelték. Az eddig reprodukálható kísérletes eredmények azt mutatják, nem valószínű, hogy daganatnövelő hatásokkal kell számolnunk a MH, ill. RF (így a rádiótelefonok által kibocsátott) sugárzásokkal kapcsolatban.

3.2. Egészségügyi határértékek

A környezet természetes rádiófrekvenciás háttérintenzitása kevesebb, mint $0,0014\ \mu\mathrm{W/m^2}$. Az embert érő RF és MH expozíció meghatározásánál ismerni kell az adóberendezés frekvenciáját, teljesítményét, a sugárzó antenna tulajdonságait és a terepviszonyokat (beépítettséget). Egy rádióadótól távol, r távolságra a teljesítménysűrűség $0.13P/r^2$, ahol P az adó effektív kisugárzott teljesítménye. Tipikus lakosságot érő (mesterséges forrású) sugárzás-intenzitás értékek az FM, VHF és UHF tartományban: 50 $\mu\mathrm{W/m^2}$ (70-es évek, USA), 20 $\mu\mathrm{W/m^2}$ (Svédország, nagyvárosi irodaház), $< 1000\ \mu\mathrm{W/m^2}$ (Magyarország, tipikus emberi tartózkodási helyek). Egy 100 W-os antennától 30-40 méterre 10000 $\mu\mathrm{W/m^2}$ körüli a teljesítménysűrűség. A mikrohullámú sütők esetén a hazai és nemzetközi szabványok szerint a felülettől 5 cm-re legfeljebb $5 \cdot 10^7\ \mu\mathrm{W/m^2}$ engedélyezett.

Az International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ajánlásai tartalmazzák a nem-ionizáló elektromágneses sugárzásokra vonatkozó egészségügyi határértékeket. Megkülönböztetnek lakossági illetve foglalkozási határértékeket. Ezeket foglalja össze a 3. táblázat.

4. Mérési feladatok

A méréseket (négyfős csoportokban) a Gigahertz Solutions HF 32D nevű nagyfrekvenciás analizátorral végezzük, amely 800 MHz és 2,5 GHz közötti frekvenciájú elektromágneses sugárzások fluxussűrűségét vagy más néven intenzitását észleli. Ahogy az alábbi ábrán látható, háromszög alakú logaritmikus antennája segítségével határozza meg a mért intenzitást, és $\mu W/m^2$ vagy mW/m^2 mértékegységben írja ki azt. Maximálisan 2 mW/m^2

intenzitás mérésére képes, efeletti értékek esetén hibát jelez. A legkisebb mérhető intenzitás 1 $\mu W/m^2$, de a környezeti elektromágneses zaj többnyire nagyobb ennél, ezért ilyen kis intenzitást pontosan nem mérhetünk.

3. ábra. A mérőberendezés.

A mérések során két hétköznapi eszközt, mobiltelefont és mikrohullámú sütőt vizsgálhatunk, ezek intenzitásának távolságfüggését. Ugyanakkor problémát jelent, hogy egyik sem állandó teljesítménnyel sugároz: a telefon eleve tömörített adatcsomagokat fogad és küld, ezek időbeli eloszlása határozza meg az aktuális teljesítményt. Ha nagyon változatos hangot kell továbbítania, vagy aktívan használjuk a mobilinternetet, akkor nagy teljesítménnyel sugároz, máskor pedig alig. A mikrohullámú sütő teljesítménye is ingadozhat, továbbá a sugárzás kijutását az ajtó gátolja. Ezért sokszor meg kell ismételnünk a méréseket, méghozzá azonos körülmények között, hogy megbízható eredményt kapjunk.

1. Vizsgáljuk meg mérőműszerünket! Milyen fizikai mennyiséget jelez ki? Milyen méréshatárokkal rendelkezik? Próbáljuk ki, egy mobiltelefon használata esetén attól különböző távolságokban mit mutat?

2. Mérjük meg a mobiltelefon (vagy a mikrohullámú sütő) intenzitását különböző távolságokon! Látni fogjuk, hogy a méréshatár miatt néhány méter távolságnál közelebb nem mehetünk. Figyeljünk a konzisztens mérésre. Fejenként legyen négy (azonos körülmények között mért) mérési adatsorunk, 4-5 különböző távolságon mérve!

3. Készítsünk a mért eredmények átlagáról táblázatot (a mérési bizonytalanságot is feltüntetve, amelyet a szórásból kapunk meg), melyben feltüntetjük a mért r távolságot méterben, az I intenzitást W/m^2-ben.

4. Ábrázoljuk I értékét és hibáját a távolság függvényében!

5. A várt $I = P/4\pi r^2$ összefüggésnek megfelelően módosítsuk a grafikont úgy, hogy az I intenzitást $1/4\pi r^2$ függvényében ábrázoljuk. Illesszünk ezekre az adatokra $y = ax$ egyenletű (nulla metszéspontú) egyenest.

6. Az egyenes meredeksége éppen P lesz, ez alapján határozzuk meg a sugárforrás teljesítményét.

7. Végezzünk χ^2 próbát, azaz vizsgáljuk meg, hogy a mért adataink valójában mennyire kompatibilisek a feltevéseinkkel.

8. Végezzünk hibaszámítást a mért adatok szórása alapján: P hibája legyen a mért értékek hibájának átlaga.

9. Ekkora teljesítmény mellett, a telefontól 5 cm-re mekkora a fej szövetei által elnyelt fajlagos teljesítmény?

5. Megjegyzések

Készítsünk jól áttekinthető táblázatot a mért értékekről és az abból számolt mennyiségekről! A táblázatban használjuk a kényelmes m, mW/m^2 mértékegységeket! Ne adjunk meg értelmetlenül sok tizedesjegyre semmilyen mért vagy számolt értéket, figyeljünk a mérési hibának megfelelő kerekítésre! Ügyeljünk arra, hogy az ábrák tengelyeinek skáláit úgy állítsuk be, hogy minden mérési pont az ábrán legyen, de ne maradjon túlzottan sok üres hely sem! Ha Excelt használunk, az ábráknál válasszuk az XY (Scatter) diagramtípust! Gondoljuk meg, hogy a kiszámolt értékek reálisak-e, mert ez megmutathatja hogy hibáztunk. Gyanakodjunk, ha irreális eredményt kapunk (P = 100 W teljesítmény, stb.)! Dolgozzunk önállóan, ne vegyük át mérőtársunk esetleg hibás eredményeit (kivéve a közösen lemért nyers adatokat)!

6. Ellenőrző kérdések

1. Be tud hatolni az emberi testbe az eletromágneses tér és elektromágneses sugárzás? Hogyan függ a behatolási mélység a frekvenciától?
2. Kb. mekkora a látható fény és mekkora a rádióhullámok hullámhossza? Mekkora a kedvenc rádióadónk hullámhossza?
3. Nagyjából mekkora a mobiltelefonok és a mikrohullámú sütők sugárzásának hullámhossza?
4. Mi az elnyelt dózis mértékegysége? Mik a rá vonatkozó egészségügyi határértékek?
5. Hogyan számítjuk ki egy hullám periódusidejéből a frekvenciáját?
6. Hogyan számítjuk ki egy hullám sebességéből és frekvenciájából a hullámhosszát?
7. Állandó teljesítményű sugárforrás esetén hogyan változik az intenzitás a távolság függvényében?
8. Egy rádióadó frekvenciája 100 Mhz. Mekkora a sugárzás hullámhossza?
9. Mekkora intenzitást mérünk egy 10mW teljesítményű sugárforrástól 10 m távolságra?
10. Egy pontszerű forrás (pl mobiltelefon) sugárzásának intenzitását ábrázoljuk a távolság függvényében. Rajzold le, hogy milyen görbére számítunk az ábrázolt $I - r$ grafikonon!
11. Hogyan kell módosítanunk a fenti görbét (mit kell ábrázolnunk minek a függvényében), hogy egyenest kapjunk?
12. Mit fejez ki az erre a módosított adatsorra illesztett egyenes meredeksége?