

XXXII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Had- és Rendészettudományi Szekció
Gödöllő, 2015. április 15-17.
Szent István Egyetem Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar
Nemzeti Közzolgálati Egyetem

Improvizált antenna megoldások alkalmazása a Magyar Honvédség feladatai során

Jelige: Zalán futása

Pályamunka lezárásának időpontja: 2014.03

2015

Tartalom

Bevezetés.....	2
1. Rádióhullámok	3
1.1 Általános fogalmak a rádióhíradásról és rádiókészülékekről	3
1.1.1 Az adókészülék	4
1.1.2 A vevőkészülék	4
1.2 Hullámok tulajdonságai	6
1.2.1 Hang és a hanghullám.....	6
1.3 Az elektromágneses rezgések kialakulása	8
1.3.1 A kondenzátor és az elektromos mező energiája	8
1.3.2 Az elektromágneses indukció	10
1.3.3 Önindukció	12
1.3.4 Induktív és kapacitív ellenállás	14
1.3.5 Elektromos rezgőkör.....	17
1.3.6 Az elektromos mező hatása a mágneses mezőre	20
1.3.7 Nyílt rezgőkörök.....	22
1.3.8 Moduláció	25
2. Rádióhullámok terjedése	27
2.1 Az elektromágneses hullámok felosztása	27
2.2 Elektromágneses hullámok terjedése tulajdonságai	29
2.3 Ionoszféra	32
2.4 A rövidhullámok terjedési tulajdonságai	35
2.5 Hullámterjedés a rövidhullámú sávokban	37
2.6 Az ultrarövid hullámok terjedése.....	39
3. Antennák és Improvizált antennák	40
3.1 Antenna alapfogalmak	41
3.2 Improvizált antennák méretezése	42
3.2.1 Méréseknél alkalmazott MH. harcászati rádiók	44
3.2.2 Szigetelőanyagok kivitelezése.....	45
3.2.3 Monopol antenna megoldások	46
3.2.4 Dipól antenna megoldások	49
3.2.5 Haladóhullámú antennák megoldásai	51
3.3 Improvizált antennák megvalósítására vonatkozó javaslatok	53
Összegzés	55

Bevezetés

„híradás a katonai vezetés idegrendszere”

Katonai szállóige

Korunk fegyveres konfliktusait alapjaiban határozza meg az aszimmetrikus hadviselés. Jellemzői többek között, hogy az erőalkalmazás során a dandár-zászlóalj szintű alegységekről áttevődött a hangsúly a kis alegységekre (szakasz, század szint). Mint ahogy Charles S. Krulak az Egyesült Államok tábornoka írta a „Stratégiai tizedes” című művében, akár egy rajparancsok is hozhat a harctéren olyan döntéseket, amelyeknek stratégiai hordereje is lehet. Ilyen műveleti körülmények között kiemelt szerepe van a hírközlésnek, mivel egy-egy fontos döntés meghozatalához gyakran felsőbb jóváhagyás szükséges. A kommunikáció megszakadása az antennák megrongálódása miatt komoly következményekkel járhat, a kijavításuk műveleti körülmények között felértékelődhet.

Elemzésemben összegezni, rendszerezni kívánom a Magyar Honvédség katonai híradásával kapcsolatos - elméleti és gyakorlati- összefüggések tudományos fizikai alapjait, illetve ezek tudatában egy átfogó, alapszintű leírást biztosítani azoknak a híradó katonáknak, akik nem, vagy még nem teljesen sajátították el ezt az ismeretanyagot, amely az itthoni és nemzetközi viszonylatban alapkövetelmény. Lényegesnek és fontosnak tartom azt, hogy ezeket az ismereteket az alapjaitól felépítve lépésről-lépésre áttekinthetően megismertessem. Úgy, hogy akár egy a híradó szakmában újonc katona is (esetlegesen a fizika megfelelő ismeretének hiányában) szintén megértse, értelmezze, és az itt leírtakat alkalmazni is tudja. A fizikát nem elég csak megtanulni, egy rádiós katonának a kiképzési tapasztalataim alapján érdemes érteni is azt, ezzel jelentősen lecsökkenthető a későbbi kiképzésekre fordított idő. Ezért néhány fontosabb részt az alapjaitól tárgyalok a témához kapcsolódó kísérletek bemutatásával. Céлом, hogy ne csak egy „megszokott mozdulat” legyen egy antenna kiépítése vagy elkészítése. A hozzáértést és a tudást tükrözze, a témát érintő tudományos szakirodalom, rádióamatőr kézikönyvek, tudományos ismeretterjesztő munkák, és fizika tankönyvek feldolgozása, annak érdekében, hogy az improvizált antennák elméletét egy szélesebb kör számára érthetővé tegyem. Úgy gondolom, végzős fizika szakos hallgatóként fontos továbbhaladnunk az Öveges József professzor úr által kijelölt úton, és a fizikát mindenki fizikájává tegyük, természetesen tudományos igényességgel. Tudományos célkitűzésem továbbá, hogy az ismert szükségantennák közül kísérletek útján kiválasszuk a gyakorlati alkalmazás számára legmegfelelőbbeket, és ezeket integráljuk a kiképzési rendszerbe.

Korunk 4. generációs műveleteiben sorsdöntő szerepe van az információnak, illetve a

vezetési fölény kivívása érdekében a döntési ciklushoz szükséges időnek [1]. Fontos feladatnak tartom, hogy az improvizált antenna ismeretek a jövőben beépüljenek a kiképzési rendszerünkbe, melyek közül a szükségantenna készítést emeltem ki és dolgoztam fel.

1. Rádióhullámok [2] [3]

A rádióhullámok származhatnak égitestekből (csillagokból) is, de a mesterségesen előállított rádióhullámokat antennák sugározzák ki. A rádióhullámok terjedése a modern technikában nagy szerepet játszik, elengedhetetlen civil és katonai felhasználásban egyaránt. A haditechnikában szinte minden területen megtalálható mind vezetés-irányítás vagy akár fegyverzet technikai területen. Legfontosabb alkalmazási területei a hadseregben, a vezetékek nélküli híradás, a helymeghatározás (GPS¹), a navigáció, a távvezérlés stb. Ezen témakörök közül a rádióhíradást vizsgáljuk, és ezen belül pedig az improvizált antennákat. A szükségantennák megértéséhez, elkészítéséhez elengedhetetlenek az elektromágnesesség és különböző antennák alapvető tulajdonságainak ismerete.

1.1 Általános fogalmak a rádióhíradásról és rádiókészülékekről [2] [3] [4]

A rádiótechnika az elektromágneses rezgések és hullámok és azok gyakorlati alkalmazásának tudománya. A rádióhíradás kisugárzás útján létrejött kommunikációt jelent, ez a folyamat vezetékes vonalak alkalmazása nélküli történik. Az adókészülék az elektromos energiát elektromágneses hullámok formájában sugározza ki a térbe, melyek a föld felszíne fölött továbbterjedve működésbe hozzák az ellenállomást, azaz a vevőkészülékeket. Az adóval gerjesztett nagyfrekvenciás elektromágneses rezgések vezetett hullámok formájában a vezetékek közvetlen környezetében koncentrálva terjednek a tápvezetékek mentén, majd az antennába érve gömbhullámokká alakulnak át, és a szabad térben folytatják útjukat. A rádióhíradás egy kétoldalú összeköttetés, ebből adódik, hogy a rádióknak rendelkezniük kell egy adó- és egy vevő résszel. Az adásoknál az elektromágneses energiát kisugárzó és a vétel részen az energiát felfogó eszközt antennának nevezzük. Az antennák legtöbbször vezető anyagokból, huzalból (egy vagy több szálból, esetleg merev fémhuzalokból) készítik, amelyeket antennaárboc segítségével a föld felett, magaslati pontokon, vagy épületek tetején telepítenek. Az antenna táplálási pontját a rádió rádiófrekvenciás kimenetére csatlakoztatják.

¹Global Positioning System (GPS, Globális Helymeghatározó Rendszer)

1.1.1 Az adókészülék [2] [3] [4]

Az adó rendeltetése nagyfrekvenciájú elektromágneses hullámok létrehozása az antenna táplálására. Csak nagyfrekvenciájú elektromágneses hullámok (amik lehetnek másodpercenként néhány ezertől milliárdos periódusszámig) sugározódnak ki nagy távolságokra a térbe az antennán keresztül. Az elektromágneses energiának a térbe történő kisugárzásánál az adókészülékekben a nagyfrekvenciájú rezgéseknek olyan vezérlését kell biztosítani, ami lehetővé teszi a híradókatonák részére a rádió-adásnak a vételét. A kezdeti, az első információközlés a rádiótávírozásnál kezdődött, a rezgések vezérlését az adóban a Morse billentyű segítségével alkalmazták. A váltakozó áram az antennába jut, és a Morse-jeleknek megfelelően a jelsorozatokat kisugárzásra kerülnek a térbe. A rádió-távbeszélő adásnál az antenna az elektromágneses rezgéseket folyamatosan sugározza, de azok erőssége vagy azoknak frekvenciája az adókészülékkel összekötött mikrofonra történő rábeszélés függvényében megváltozik. A rezgések vezérlését Morse-billentyű alkalmazásánál billentyűzésnek, mikrofon alkalmazásánál pedig modulációnak nevezik. A modern katonai rádiók túlnyomó részben mikrofonnal (távbeszélőüzemben) működtethetőek. Az adó csak abban az esetben tud a rendeltetésének (nagyfrekvenciájú elektromágneses hullámok keltésére) megfelelően működni, ha megfelelő áramforrással van ellátva, ami az energiát szolgáltatja, mert az energia önmagától nem keletkezik. Az adóknál áramforrásként rendszerint szárazelemeket (az Amerikai hadseregnek a Harris rádióknál alkalmaznak elemeket), akkumulátorokat, rádióállomások esetében generátorral megtáplált padakkumulátorokat használnak. Mivel az előbbieken felsorolt megtáplálások egyenáramúak, ezért az egyenáramú energiának nagyfrekvenciájú váltóáramú energiává való átalakítása az adókészülékekben megy végbe, a készülékek legfontosabb alkotóelemei révén, amelyek lényegében az adó vázát alkotják. Kezdetekben ezek elektroncsövek voltak, majd a későbbiekben felváltották a tranzisztorok és a rezgőkörök. Ezekből összeállított erősítők meghatározzák az adó teljesítményét, míg a rezgőkörök a bennük keletkező rezgések frekvenciáját adják meg. A rezgőkör kondenzátorból és önindukciós tekercsből áll. A kondenzátor kapacitásának megváltoztatásával az adókészüléket valamely frekvenciára lehangoljuk, és így az adó beszédváltójának lenyomásával antennarendszerünket nagyfrekvenciájú árammal táplálhatjuk meg.

1.1.2 A vevőkészülék [2] [3] [4]

Az elektromos energiát az antenna a tér minden irányába egyenletesen sugározza ki. Az elektromágneses hullámok terjedésük közben a vételre kapcsolt ellenállomáson is

áthaladnak. A vevőállomás antennáját metszik az adóantennából kisugárzott elektromágneses tér erővonalai, és ennek következtében gerjesztéssel létrehozott váltakozó nagyfrekvenciájú elektromos-erő képződik, amely a vevőben áramot létesít. Ily módon a rádióvevő az elektromágneses tér energiájából egy bizonyos hányadot kivon. Ha megvizsgáljuk, a vevőkészülék tulajdonképpen három fő működést végez.

Az első abból áll, hogy a vevő az egyidejűleg dolgozó több adóállomás közül a saját állomását elkülöníti (kiválasztja). Minden más adóállomás, ami nem azon a frekvencián dolgozik, a saját vételt csak zavarja. A vevőkészülék eme kiválasztási képességét, amely a többi állomás által keltett „zavarok” kiküszöbölésének, vagy csökkentésének lehetőségét biztosítja, mind az adóban, mind a vevőben lévő rezgőkörök segítségével valósul meg. A rezgőkörök kapacitásának, illetve önindukciójának megváltoztatásával lehet őket éppen arra a frekvenciára hangolni, amelyikben az adóantenna az elektromágneses hullámokat kisugározza. Ebben az esetben a vevő és azon adó között, amelynek az adását veszi, rezonancia keletkezik, mikor is az illető adóállomás hallhatósága (hangerőssége) ezáltal megnövekszik, míg a többi adóállomás zavaró hatása lecsökken.

A vevőkészülékek második funkciója a beérkező jelek felerősítése. Ez azért szükséges, mert az adóállomástól kisebb-nagyobb távolságra telepített vevőállomás antennája a kisugárzott energiának csak egy igen kis részét fogja fel. Ez az energia nem elegendő a fejhallgató (hangszóró) normál hangerejének képzéséhez. A beérkező jeleket előerősítőkkel lehet felerősíteni, amelyeket megfelelő kapcsolási vázlat szerint kapcsolnak össze és akkumulátorról, vagy egyenirányított áramfejlesztő berendezésről táplálnak. A vevőkészülékekben a jelek erősítése fokozatosan történik. Minél több fokozat van, annál inkább érzékenyebbé válik a vevőkészülék a gyenge jelekre. A legtöbb vevőkészülék érzékenységét szabályozni lehet, ami a fejhallgatóban a hangerő megváltozását jelenti. Ilyen alkalmazás például a zajzár, ami a jel egy részét (zajt) levágja és a hasznos jellel dolgozik tovább, azaz csak azt erősíti fel, viszont ennek következménye az érzékenység csökkenése lehet.

A vevőkészülék harmadik funkciója a beérkező jelek egyenirányítása. Az erősítés következtében a jelek feszültségének amplitúdója már jelentős nagyságot érhet el, de a nagyfrekvenciával rendelkező rezgések még a nagy amplitúdó mellett sem képesek hangot előidézni. Azonban, ha a fejhallgató vagy a kézi beszélő hangszóró membránja képes is volna a másodpercenkénti milliós rezgéseket végrehajtani, az emberi fül akkor sem észlelné őket, mivel a legtöbb ember nem hallja a 15 kHz/sec rezgésszámon felüli hangokat. Viszont az egyenirányító (detektor) jelentősége abban áll, hogy a nagyfrekvenciájú rezgéseket egyenirányítja, ezáltal kisfrekvenciájú rezgések keletkeznek. Ez után az átalakítás után a

hangfrekvenciájú áramot a vevő hangszórójának a működtetéséhez használjuk. Az antenna és a detektor közé beépített erősítőfokozatok a nagyfrekvenciájú (rádiófrekvenciájú) rezgéseket erősítik, míg a detektor után keletkező kisfrekvenciájú (hangfrekvenciájú) rezgéseket erősítőfokozatokkal erősítik fel.

1.2 Hullámok tulajdonságai

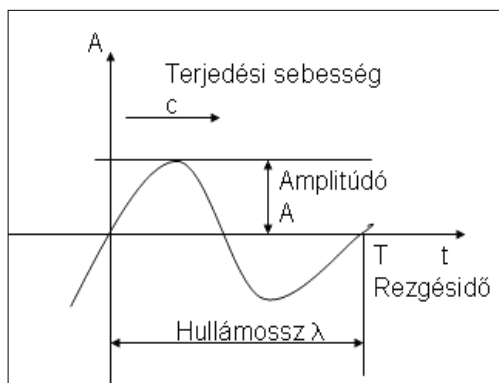
A hanghullámok és az elektromágneses hullámok között lényeges különbségek vannak, viszont az érthetőség érdekében mégis érdemes összehasonlítani, összevetni ezeket a hullámokat. Az elektromágneses hullámok megértéséhez először vizsgáljuk meg a hang rezgésének és terjedésének tulajdonságait.

1.2.1 Hang és a hanghullám [4][5][6]

A hang a levegő részecskéinek mozgása, rezgése. A hang hullámszerűen terjed. Vegyünk példának egy megpendített, erősen kifeszített húrt. A rezgésbe hozott húr által keltett rezgéseket érzékeljük, láthatjuk, illetve hallhatjuk.

A húron keletkező hullámok a haladási irányukra merőlegesen mozognak, az ilyen hullámokat transzverzális hullámoknak nevezzük. A rezgésbe hozott húr körül a levegő hullámai a következőképpen jönnek létre. Amikor a húr kitér a jobboldali szélső helyzetébe, a tőle jobbra lévő levegőréteget azonos irányba tolja, ezáltal egy bizonyos térségben növeli a nyomást és a levegőt összesűríti, összenyomja. Ez a nyomás lökésszerűen áterjed a következő szomszédos levegőrétegre is. Ezáltal kialakult a környező térben egy „sűrített” levegőréteg. Egy pillanattal később a húr balra tér ki és ez által az előbbi helyen légritkulást idéz elő. A keletkezett légritkított tér hasonlóan szétterjed a levegőben, követve a sűrített levegőt. A légritkított teret újra „sűrített” váltja, mert a húr ismét jobbra lendül. A húr mindegyik rezgésétől a levegőben egy nagyobb nyomású és egy kisebb nyomású tér váltja egymást, amelyek a tértől egyre csak távolodnak. Ezt a jelenséget hívják a levegő hullámainak, vagy más néven hanghullámoknak. A levegő hullámai energiát szállítanak, amelyet a rezgő húrtól kapnak és a levegőben hangsebességgel terjednek. Fontos megjegyezni, hogy a húr rezgésétől eltérően, a levegőrészecskék a hullám terjedési irányában változtatják a helyüket, vagyis a terjedés irányába mozognak. Ezen rezgések által kialakult hullámokat longitudinális hullámnak nevezzük. A hang intenzitása annál nagyobb, minél jobban rezeg a húr, idővel csökkenni fog a rezgés és vele együtt a hang intenzitása is. A húr rezgése az elején olyan gyors, hogy a szemünk nem tudja követni és halványan megvastagodva látjuk. Viszont amikor a rezgésszám csökken, azaz csökken a frekvenciája,

már jobban kivehetőek a rezgések és a hang is mélyebben hallatszik. Majd amikor már megáll a húr, a hang is eltűnik. Megvizsgálva a jelenséget azt tapasztaljuk, hogy a húr átlendül és áthalad a nyugalmi helyzetén a másik oldalra, és ugyanezen az úton vissza a kiindulási szélső helyzetébe, majd ezt ismétli. A mozgást idő függvényében ábrázolva szinuszos hullámot kapunk.



1. ábra. A hullámot jellemző mennyiségek

Az így keletkezett hullámokat amplitúdóval, frekvenciával és hullámhosszal tudjuk jellemezni.

Az amplitúdó, a [m] a hullám maximális kitérési pontja, ami az egyensúlyi helyzetétől mért távolság.

A frekvencia, f [Hz, $\frac{1}{s}$] az egységnyi idő alatt, azaz egy másodperc alatt bekövetkezett teljes rezgések száma.

A hullámhossz, λ [m] megmutatja, hogy adott időpillanatban a közeg két azonos fázisban levő, szomszédos pontja milyen távol van egymástól. Azonos fázisban azon két pontja van a hullámnak, amelynek mind a kitérése, mind a sebessége irány és nagyság szerint is megegyezik. Tehát a hullámhossz a hullámtérbeli ismétlődésének jellemzője.

A húron kialakuló váltakozó mozgás periodikus (ismétlődő), ami akár másodpercenként több tízszer, százszor, ezerszer lejátszódhat. A periódust idővel szoktuk jellemezni, amit periódusidőnek nevezünk.

A periódusidő (rezgésidő), T (s) az az időtartam, ami egy teljes periódus megtételéhez szükséges. A periódusidő a frekvencia reciproka, tehát felírhatjuk:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

A keltett rezgések, hullámok is bizonyos sebességgel terjednek, a rezgés fázisának terjedési sebességét nevezzük a hullám terjedési sebességnek v [m/s] nevezzük. A hanghullám terjedési

sebessége, például levegőben (20 C°) $v = 340 \text{ m/s}$, a fény terjedési sebessége pedig $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. A felsorolt mennyiségek közötti kapcsolatot a hullámegyenlet írja le.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

Az egyenletből láthatjuk, hogy állandó sebességnél a hullámhossz és a frekvencia aránya fordítottan arányos, tehát minél magasabb a frekvencia, annál kisebb a hullámhossz, illetve minél alacsonyabb a frekvencia, annál nagyobb lesz a hullámhossz.

1.3 Az elektromágneses rezgések kialakulása

Az előbbieken tárgyalt hullámtulajdonságok hasonlóképpen jelennek meg majd a rádióhullámok terjedésénél is. De előtte nézzük meg az elektromágneses rezgések, hullámok keletkezésének lépcsőfokait. A híradástechnikában a rádiókészülékek működésének megértéséhez elengedhetetlen a hírközlés alapfogalmainak, rádióadás- és vételtechnika alapjainak áttekintése.

1.3.1 A kondenzátor és az elektromos mező energiája [7][8][9]

A kondenzátorok megjelenése nagyon fontos szerepet játszott az elektrotechnika fejlődésében. A kondenzátor elektromos töltések felhalmozására, sűrítésére szolgáló eszköz. Legegyszerűbb és legelterjedtebb formája a síkkondenzátor, amely két egymástól dielektrikummal elszigetelt párhuzamos fegyverzetből álló fémlemez. A feltöltött síkkondenzátort megvizsgálva kiderül, hogy lemezein azonos nagyságú és ellentétes előjelű töltés található. A kondenzátor fegyverzetei között homogén elektromos mező alakul ki, a kondenzátor külső részén pedig zérus a télerősség. A feszültség arányosan emelkedik a kondenzátor lemezei között a kondenzátorra vitt töltések nagyságával. Az egyik lemezen felhalmozott töltés mennyisége (Q) és a két fegyverzet közötti feszültségnek (U) a hányadosa megadja a kondenzátor kapacitását, ami a kondenzátorra jellemző állandó C ($1 \text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}}$).

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1.3)$$

A kondenzátor töltésbefogadó képessége a kapacitásától függ. Minél nagyobb a kondenzátor kapacitása, annál több töltés tárolására képes ugyanazon feszültség mellett. Számítások

alapján bizonyított, hogy a síkkondenzátor kapacitása egyenes arányban van a lemezek területével (A), fordított arányban van a két fegyverzet közötti távolsággal (d) és nagyban függ a szigetelőanyag minőségétől (ϵ_r). A ϵ_r a szigetelőanyag relatív dielektromos állandója.

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1.4)$$

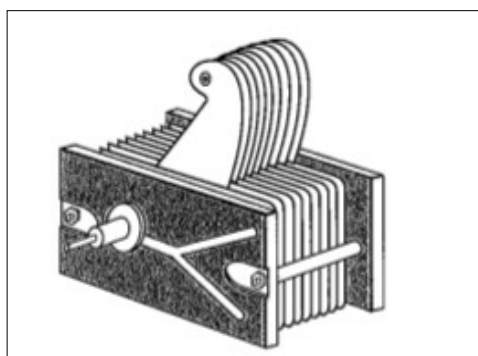
Ahol ϵ_0 a légüres tér dielektromos állandója:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \quad (1.5)$$

Az elektromos mező elmozdítja a benne lévő töltéseket, tehát munkavégzésre képes. Ebből következik, hogy az elektromos mezőnek energiája (W_c) van.

$$W_c = \frac{1}{2} C^2 U \quad (1.6)$$

Több típusú kondenzátort különböztetünk meg az elektrotechnikában. Megkülönböztethetjük őket a szigetelő anyaga, a formája, a kialakítása szerint. Ilyenek például a szigetelő anyagok, „dielektrikumok” pl.: levegő, csillám, papír, olaj stb.

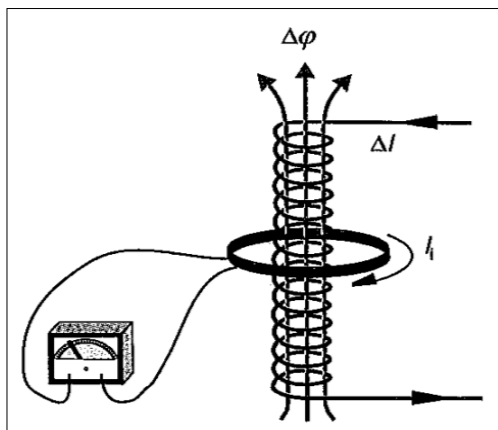


2. ábra. Forgó kondenzátor

Nagyon elterjedt a 2. ábrán illusztrált változtatható kapacitású forgókondenzátor (régiesen típusú rádiókban jobban megfigyelhetők, pl. R-111), amelynek az állórészén lévő párhuzamos fémlemezei közé fokozatosan beforgathatók a tőlük jól elszigetelt forgórész fémlemezei. A szemben elhelyezkedő lemezfelületek területének változása hozza létre a kapacitásváltozást. Általában a forgókondenzátor tengelyének végén elhelyezkedő tekerő gombot csavarjuk, amikor a rádiókészüléken más adóállomást keresünk.

1.3.2 Az elektromágneses indukció [7][8][10]

Vizsgáljuk meg 3. ábrán látható tekercsek között fellépő jelenséget úgy, hogy a belső tekercset feszültség alá helyezzük. Nézzük meg, mi történik ennek a kísérletnek a végrehajtása közben.



3. ábra. Indukció anélkül, hogy a vezeték mágneses mezőben lenne

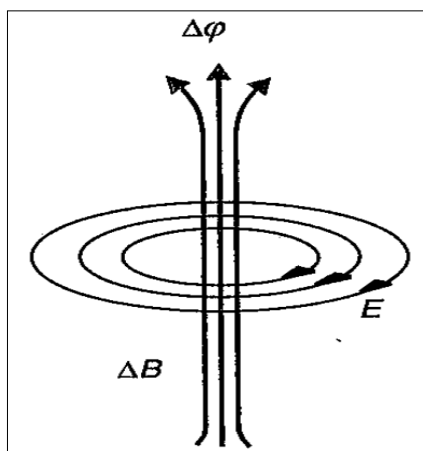
Ha elkezdjük ki-be kapcsolgatni a belső tekercs elektromos áramát, a köré helyezett másik tekercsre kötött ampermérő mindannyiszor kilendül, jelezve, hogy amikor a belső tekercsben az áram erőssége változik, a külső tekercsben indukált elektromos áram keletkezik. Mivel a nyugalomban lévő töltés csak elektromos mező hatására jöhet mozgásba, azt kell feltételeznünk, hogy a belső tekercs körül keletkezett változó mágneses mező maga körül elektromos mezőt hozott létre. Ez az elektromos mező hatással van a külső tekercsre úgy, hogy abban a töltéseket „megragadva” áramot kelt. Azt a jelenséget, ami a mágneses mező időbeli változásának hatására elektromos mezőt indukál „nyugalmi” elektromágneses indukciónak nevezzük.

Gondoljuk át, milyen szerkezetű lehet ez az elektromos mező, amelyet nem töltések, hanem változó mágneses mezők keltenek!

Abból, hogy zárt vezetőhurokban áram folyik, nem más következik, hogy az elektromos mező nem konzervatív, és ezért csak örvényes mező lehet. Továbbá abból, hogy ha zárt vezeték, szolenoid² nem fog körül változó mágneses fluxust, ebben az esetben nem indul benne áram.

² Tekercs

Ebből következik, hogy az indukált elektromos mező erővonalai (ΔE) olyan zárt görbék, amelyek változó mágneses fluxust kerülnek meg ($\Delta \Phi$).



4. ábra. Indukált elektromos mező

Kísérletekből láthatjuk, hogy a nyugvó töltések által létrehozott forrásos elektromos mezőkön kívül létezniük kell örvényes elektromos mezőknek is, amelyek örvényeit a változó mágneses mezők hozzák létre. Ebből láthatjuk, hogy az indukált áram erőssége egyenesen arányos a vezeték által határolt mágneses fluxus változásának gyorsaságával, és fordítottan arányos a teljes vezetőkör ellenállásával (R). Viszont független a vezető alakjától és a körbehatárolt területtől.

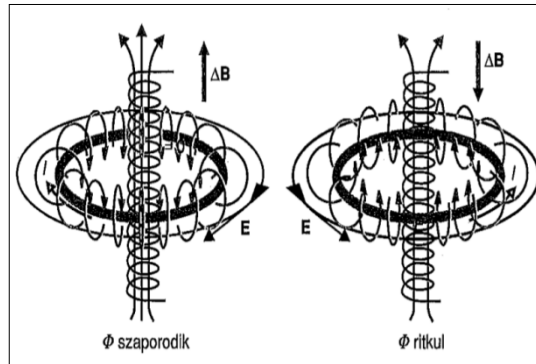
$$I = \frac{1}{R} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (1.7)$$

A képletet átalakítva, megkaphatjuk a bal oldalt az RI mennyiséget, amelyet elektromotoros erőnek neveztek. Az egyenlőség miatt akkor járunk el következetesen, ha a $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ mennyiséget indukált elektromotoros erőnek mondjuk. Hiszen a fluxusváltozást körülfogó kör alakú elektromos vezetőben pontosan olyan áram folyik, mintha egy $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ elektromotoros erejű telepet kötöttünk volna bele. Ha az elektromos vezető N -szer fogja körül a fluxusváltozást, akkor ennek eredményeként N -szerese lesz az elektromotoros erő. Tehát láthatjuk, hogy egy zárt kör mentén indukált elektromotoros erő arányos a kör által körülölelt mágneses fluxus változás sebességével, ez független a vezeték méretétől, és annak alakjától. A létrejövő indukált elektromotoros erő nagysága (ϵ_i) egyenlő nagyságú a végpontok között mérhető indukált feszültséggel (U_i).

$$\epsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} N \quad (1.8)$$

$$U_i = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} N \quad (1.9)$$

Az indukált elektromos mező erővonalainak iránya ellentétes, mint ami a „jobbkezes szabálynak” megfelelne, eszerint E irányát a balkéz-szabály határozza meg.



5. ábra. A ki-be kapcsoláskor keletkező indukált áram mágneses mezeje a fluxusváltozás ellen „dolgozik”

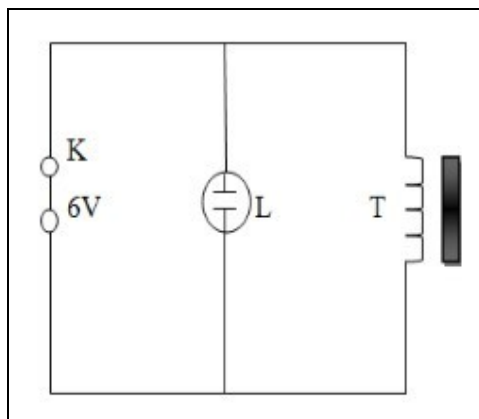
Az irányszabályból az fog következni, hogy az indukált elektromos mező a mágneses fluxusváltozást körülvevő zárt elektromos vezetőkörben szigorúan mindig olyan irányú áramot kelt, amelynek mágneses fluxusa ellenkező irányú az indukáló fluxussal, azaz mindig akadályozza az őt keltő hatást, tehát a fluxusváltozást! E a jelenség Lenz nyugalmi indukció törvénye.

Tételezzük fel, hogy a keletkező indukált elektromos mező iránya ellenkező lenne. Az ezáltal létrejövő töltésmozgás mágneses tere tehát erősítené, növelné az eredeti fluxusváltozást, és ez még nagyobb áramot keltene és még jobban növelné a fluxust, így végtelen nagyra növelnék egymást. Ezzel az energiamegmaradás törvényének mondanánk ellent.

1.3.3 Önindukció [8][9][10]

Az önindukció megértéséhez egy egyszerű kísérletet veszünk alapul. Vizsgáljuk meg a 6. ábrán látható áramkört, ami egy zárt vasmagos tekercsből (T), egy vele párhuzamosan kötött 100 V gyújtófeszültségű glimmlámpából (L), szintén párhuzamosan egy néhány volt feszültségű áramforrás és az áramforrással sorba kötött kapcsolóból (K) áll. Az összerakott áramkör zárásakor nem veszünk észre semmi különösét. Persze az áramforrás feszültsége kevés a glimmlámpa begyújtásához. Viszont amikor nyitjuk az áramkört, abban a pillanatban

felvillan a glimmlámpa. A tapasztalat, hogy a feszültség megszűnése után villan a glimmlámpa. Ennek magyarázata, hogy az áramkör megszakításakor a tekercs belsejében fluxusváltozás lépett fel. Tehát a tekercs belsejében történő mágneses fluxusváltozás feszültséget indukál.



6. ábra. Az önindukció jelensége bemutatása glimmlámpán

Tovább folytatva a kísérletet, bekötünk, a tekercsel sorosan egy kisfeszültségű izzót. A kapcsoló zárásakor azt tapasztaljuk, hogy a kisfeszültségű sorosan bekötött izzó egy pillanattal később kezd világítani. A kapcsoló be- és kikapcsolásánál megfigyelhettük, hogy az önindukciónál is teljesül Lenz törvénye. Az indukált feszültség akadályozta az indukált folyamatot, ezáltal a bekapcsolás pillanatában késleltette az áram létrejöttét, kikapcsoláskor pedig ezzel ellenkezőleg az áram megszűnését. Láthatjuk, hogy az önindukció a nyugalmi indukció egy speciális esete. Mivel az önindukciós feszültség mindig a tekercs áramváltozásának (ΔI) a következménye, ezért a következő képlet igaz az önindukciós feszültség nagyságára, ahol az L ($1 \text{ henry} = \frac{Vs}{A}$, jele: H) a tekercs önindukciós együtthatója.

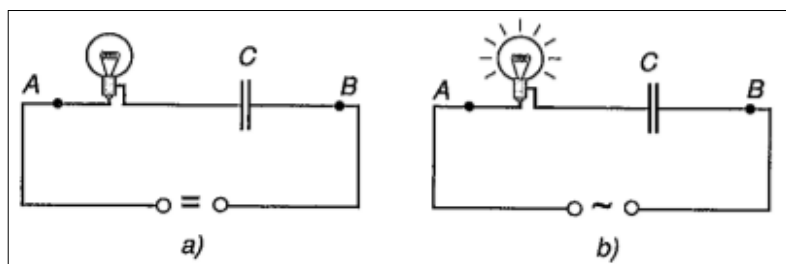
$$U_{oi} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (1.10)$$

A kísérletből arra következtetünk, hogy az áramforrás nyitásakor indukált feszültség, azaz elektromotoros erő jött létre, vagyis a mágneses mező megszűnése alatt energia szabadult fel, ezt az energiát a mágneses mező energiájának nevezzük. Egy tekercs mágneses mezőjének teljes energiája egyenes arányosságban van a tekercs önindukciós együtthatójával (L) és azon átfolyó áram erősségének (I) a négyzetével.

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1.11)$$

1.3.4 Induktív és kapacitív ellenállás [7][8][11]

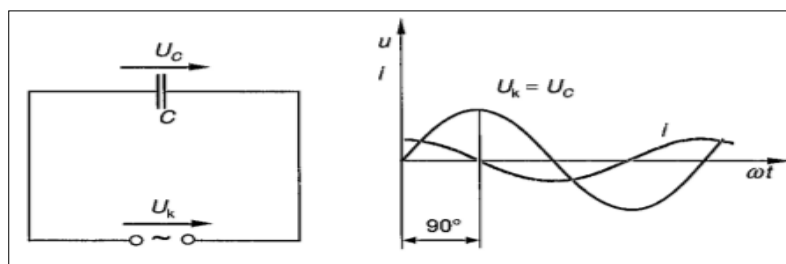
Kísérletet hajtottunk végre 7. ábrán látható áramkörön, amiben egy kondenzátor és egy vele sorosan bekötött izzót találunk. A kísérlet tapasztalata, hogy a kondenzátorral sorba kötött izzó nem világít. A magyarázat az, hogy egyenárammal szemben a kondenzátor dielektrikuma szakadást jelent és végtelen nagy ellenállást mutat. Viszont ugyanezt a kísérletet váltóárammal is elvégezve más eredményt kapunk.



7. ábra. A kondenzátor egyen és váltakozó áramú körben

Váltóáram esetében a lámpa világít, és ha újabb kondenzátort kapcsolunk vele párhuzamosan, akkor az áramerősség megnő és a lámpa erősebben világít. Ebből az következik, hogy a kapacitás növelésével egyre nő a vezetőképesség. A jelenség magyarázata egyszerű, a váltóáram minden negyed periódusában a kondenzátort hol feltölti, hol kisüti. Ez a kisülés tartós váltakozó töltésáramlást hoz létre a kondenzátor vezetékében. Tehát míg a kondenzátor egyenárammal szemben végtelen ellenállást képvisel, a váltakozó árammal szemben véges ellenállást mutat, amit a kondenzátor kapacitív ellenállásnak nevezünk. Jele: X_c , mértékegysége: Ω (ohm). A kapacitásnak további érdekes következménye, hogy a létrejövő áram erőssége fázisban 90° -os szöggel siet a kapocsfeszültséghez képest.

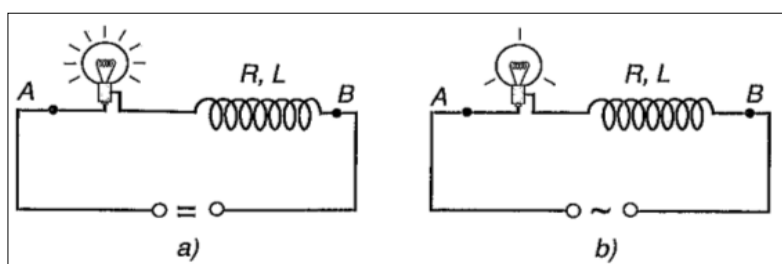
$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad \omega = 2 \pi f \quad (1.12)$$



8. ábra. Az áram 90° -kal siet a kapocsfeszültséghez képest

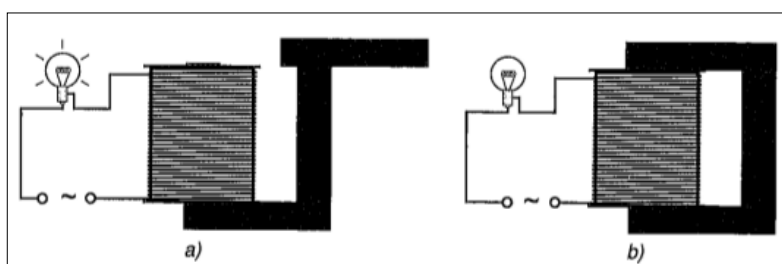
A 9. és 10. ábrán látható kísérletünk hasonló az előzőekben végrehajtottakhoz, viszont itt a kondenzátorok helyett tekercsek vannak, vasmag nélküli, illetve nyitott és egy zárt vasmagos tekercsek. Ezeknek a tekercseknek a viselkedését vizsgáljuk szintén egyenáram és váltakozó áram megtáplálása közben.

A kísérletben a 9. ábrán látható áramkör egy kis ellenállású vezetékből, egy nagy önindukciós tekercsből és azzal sorba kötött kisméretű izzóból áll. Kapcsoljuk az összeállított kapcsolást egyszer egyenáramra, majd váltakozó áramra. Azt tapasztaltuk, hogy a váltakozó áramnál az izzó halványabban világított, pedig a tekercs ohmikus ellenállása nem változott.



9. ábra. Tekercs egyen- és váltakozó áramú körben

Ugyanazt a kísérletet a 10. ábrán látható vasmagos tekercsel végeztük el, hasonló eredményt kapunk. Egyenfeszültségnél semmi különbség nem jelentkezik, annál inkább váltakozó feszültségnél. A nyitott vasmagos tekercsnél még halványabb az izzó fénye és a zárt vasmagnál pedig már nem is világít az izzó.

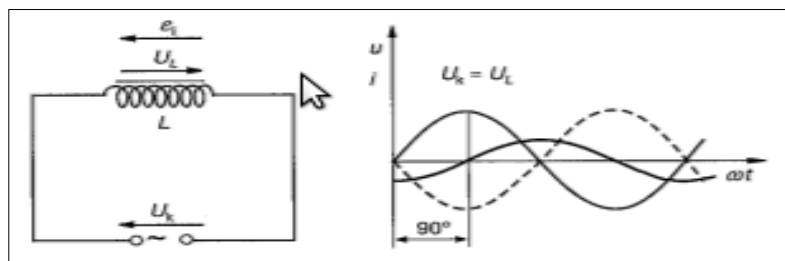


10. ábra. A vasmagot zárva a kör ellenállása megnő

A tapasztalat azt mutatja, hogy a nagy önindukciójú tekercs ellenállása a kétféle feszültséggel szemben nagyon is különböző. A váltakozó árammal szemben a tekercs ellenállása függ a környezetében lévő mágneses anyagtól, vagyis az induktivitástól, aminek nagyobb részét esetünkben a vasmag biztosította. A tekercsnek a váltakozó árammal szemben mutatott többletellenállása a tekercs önindukciós ellenállása. Ezt az ellenállást induktív

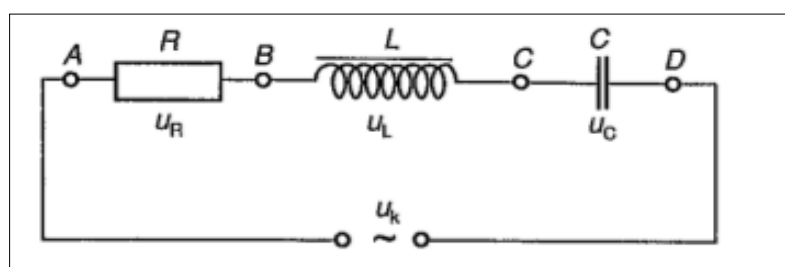
ellenállásnak nevezzük (induktív reaktancia). Jele: X_L , mértékegysége: Ω (ohm). Itt is hasonló megállapításra jutunk, mint a kondenzátornál, viszont itt a kialakult áram erőssége fázisban 90° -os szöggel késik a kapocsfeszültséghez viszonyítva.

$$X_L = \omega L \quad (1.13)$$



11. ábra. Az áram 90° -kal késik a kapocsfeszültséghez képest

Nézzük meg azt a helyzetet, amikor egyszerre háromfajta ellenállással rendelkező alkatrész szerepel egy áramkörben: sorba kötünk egy nagy ellenállású vezeték, nagy induktivitású tekercset és nagy kapacitású kondenzátort (ezt nevezik soros RLC körnek).

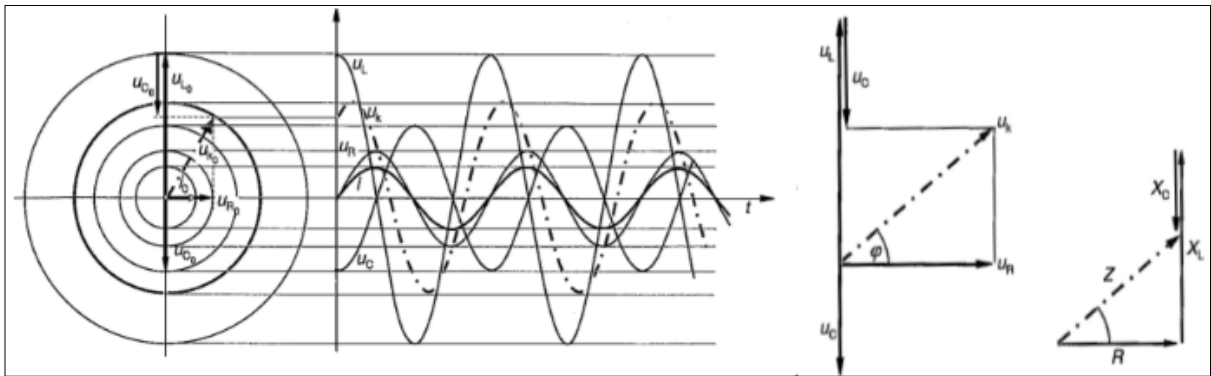


12. ábra. Soros RLC kör

Ekkor láthatjuk, hogy a tekercs és a kondenzátor ellentétes fáziseltoló hatása jelenik meg. Az áram mindegyik sorba kapcsolt kapcsolási elemnél adott pillanatban azonos nagyságú. Az előzőek alapján látható, hogy ez az áramerősség az ellenálláson eső U_R feszültséggel fázisban van, tehát a kondenzátoron eső U_C feszültség csúcsértéke az U_R csúcsértékéhez képest 90° -ot siet. A teljes kapocsfeszültség nem egyenlő a részfeszültségek összegével. Ehelyett a következő összefüggés fogja megadni a kapocsfeszültséget.

$$U_k^2 = U_R^2 + (U_C - U_L)^2 \quad (1.14)$$

$$U_k = \sqrt{U_R^2 + (U_C - U_L)^2} \quad (1.15)$$



13. ábra. A feszültségek forgóvektoros ábrázolása

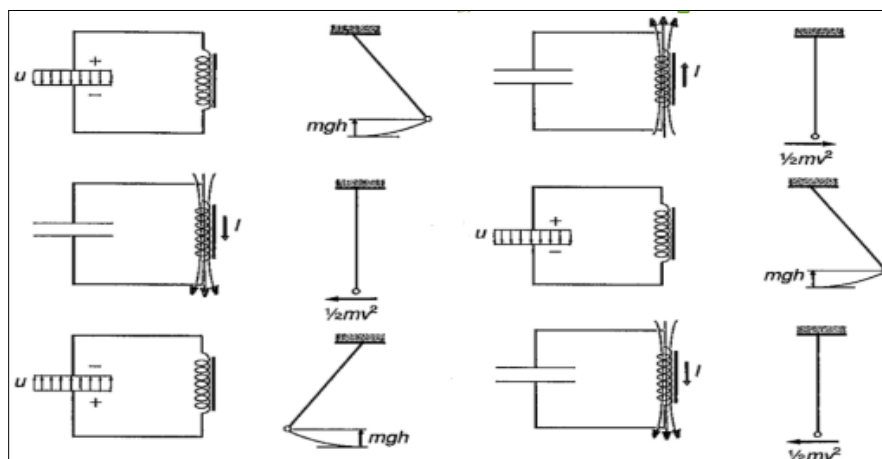
A képletben a csúcsfeszültségeket $\sqrt{2}$ -vel és a kialakuló áram effektív erősségével elosztjuk, megkaphatjuk az egyes elemek ellenállásainak értékeit, illetve eredő ellenállást, amit impedanciának nevezünk. Jele: Z , mértékegysége: Ω (ohm).

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_c - X_L)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (1.16)$$

A kapocsfeszültséget elosztva az áramerősséggel, megkapjuk az eredő ellenállást, azaz az impedanciát.

1.3.5 Elektromos rezgőkör [2][8][11]

A 14. ábra szerint párhuzamosan kapcsolt veszteségmenetes induktivitás és kapacitás úgynevezett párhuzamos rezgőkört képez. Az induktivitásból és kapacitásból álló áramkörben gerjesztés hatására elektromágneses rezgések jönnek létre. Ez a jelenség fizikailag a következőképpen írható le.



14. ábra. Az energia „hintázása” az elektromos és mágneses mező között

A kondenzátort pl. (telepről) U_C feszültségre töltjük, akkor benne energia halmozódik fel. Ezt követően a rezgőkört zárva, a tekercsen keresztül először gyorsabban, majd lassabban növekvő kisütő áram indul meg. A kondenzátor energiája (és feszültsége) csökken, a tekercsben pedig változó mágneses tér jön létre, ezáltal önindukciós feszültség keletkezik, és mágneses energia halmozódik fel. Amikor a villamos erőter nullára csökken, az induktivitáson áthaladó áram és a benne fellépő energia maximális mértékű, ami nem más, mint a mágneses mező energiája (W_m). Tudjuk, hogy az önindukciós feszültség az áramot fenntartani igyekszik, tehát az induktivitás, mint áramforrás saját energiájából a kondenzátort ismét feltölti, az előző töltéshez képest ellentétes polaritással. A mágneses energia ismét villamos energiává alakul át, és ez az úgynevezett lengési folyamat ellenkező irányban ismétlődik. Mivel azt feltételezzük, hogy a rezgőkör ideális, vagyis veszteségmentes, a rezgés állandó amplitúdójú (csillapítatlan), s az áram és a feszültség között mindig 90° -os ($\pi/2$) a fáziskülönbség.

A feszültségre a következő összefüggés írható fel:

$$U = U_0 \cos \omega t \quad (1.17)$$

ahol U a feszültség pillanatnyi értéke; U_0 a feszültség csúcsértéke; ω pedig a körfrekvencia ($\omega = 2\pi f$). Hasonlóképpen az áram pillanatnyi értéke:

$$I = I_0 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_0 \sin \omega t, \quad (1.18)$$

ahol I_0 az áram csúcsértéke és:

$$\omega t = \varphi \quad (1.19)$$

a pillanatnyi fázisszög. A rezgések frekvenciájának megállapításához vegyük figyelembe, hogy ugyanazon energiamennyiség alakul át villamos energiából mágneses energiává és viszont, tehát

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.20)$$

Ezekből az összefüggésekből megkaphatjuk a periódusidőt, ami:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (1.21)$$

A kapott összefüggést Thomson-formulának nevezzük. Ha L értéket Henriben, C értékét faradban helyettesítjük, a frekvencia értékét hertzben kapjuk.

Szám példa:

Az átláthatóság érdekében nézzünk meg egy példát.

Mekkora a $C = 10 \text{ nF}$ kapacitású kondenzátor és $L = 400 \text{ } \mu\text{H}$ önindukciós tekercsből összeállított rezgőkör rezonanciája és rezgésének hullámhossza?

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{6,28\sqrt{4 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-8}}} = \frac{1}{6,28 \cdot 2\sqrt{10^{-12}}} = \frac{1}{12,56 \cdot 10^{-6}} = 7,96 \cdot 10^4 = 79,6 \text{ kHz}$$

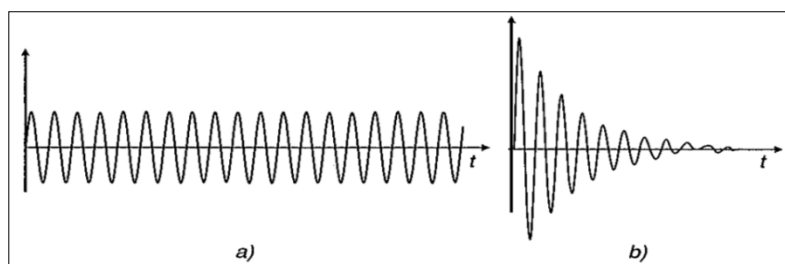
A hullámhossz pedig:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.22)$$

ahol a fény (elektromágneses hullám) terjedési sebessége: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{7,96 \cdot 10^4} = 3,75 \cdot 10^3 \text{ m}$$

A valóságban természetesen nem létezik ideális kapacitás és induktivitás, ebből következik, hogy veszteségmentes rezgőkör sem. A veszteséges rezgőkörben folyó áram amplitúdója (csúcsértéke) az idő függvényében exponenciálisan csökken, lásd a 15. ábrát. A rezgőkör saját rezgéseit az ohmikus csillapítás ellenére is valahogyan fent kell tartani. Ehhez nyilván energiaforrásra van szükség, amelynek energiáját valahogyan szabályozva veszi fel a működő rezgőkör. Tehát meg kell oldani, hogy a megfelelő pillanatokban az energiaforrás kapcsolódjon a rezgőkörre.



15. ábra. Csillapítatlan és csillapodó rezgések áramerősségét mutatja

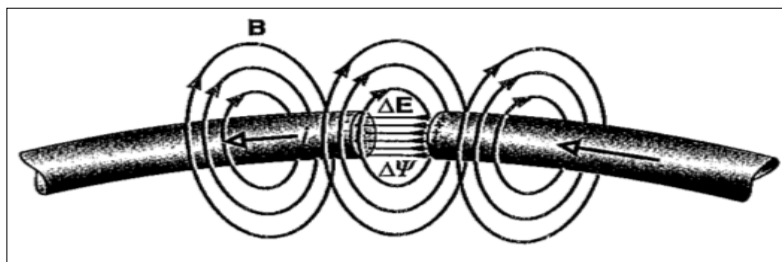
A rezgőkör megfelelő energia-utánpótlását az úgynevezett visszacsatolással tudjuk elérni. Ennek lényege a következő: a rezgőkör energiáját „megcsapoljuk”. Ez a lecsatolt energia szintén az eredeti rezgések ütemében áramlik ki a rendszerből. Ezzel az energiával viszont egy megfelelően nagy energiaforrás „csapját” vezéreljük, vagyis arról gondoskodunk, hogy a megfelelő pillanatban pótolni tudja a rezgőkör energiavesztését. Így tehát a rezgőkör

sajátfrekvenciájának felhasználásával megoldjuk az energia-utánpótlás „időzítését”. Ezt a folyamatot úgynevezett önvezérlésnek, az energia visszajuttatását pedig pozitív visszacsatolásnak nevezzük.

1.3.6 Az elektromos mező hatása a mágneses mezőre [7][8]

Faraday indukciótörvénye megfogalmazza azt, hogy a mágneses mező képes hatni az elektromos mezőre: változásával elektromos mezőt kelt. Viszont egy ilyen egyoldalú hatás nincs szinkronban a fizika kölcsönhatás szemléletével, az akció-reakció elvével. Maxwell úgy gondolta, hogy az elektromos mező időbeli változása örvényes mágneses mezőt kelt.

Már korábban is megfogalmazódott a kérdés, hogy vajon hogyan lehet kiszámítani egy kondenzátorral megszakított áramkör mágneses hatását. Biot-Savart törvényét alkalmazva vajon figyelembe kell-e venni azt a Δl hosszúságú szakaszt (dielektrikumot), amely a kondenzátorlemezek között a vákuumban mérhető, vagy csak elég a lemezekig tartó vezetékben folyó árammal számolni? Erre Maxwell adta meg a megfelelő választ, amely úgy szól, hogy a kondenzátor lemezek közötti, időben változó elektromos mező mágneses mezőt hoz létre, tehát igen is figyelembe kell venni ezt a szakaszt az indukció számításakor. Maxwell azt feltételezte, hogy a lemezek közötti elektromos térváltozás pontosan akkora áramnak felel meg, mint a lemezekhez vezető drótban folyó áram.



16. ábra. Eltolási áram

Tehát a kondenzátorlemezreig töltésmozgás adja meg a „befele folyó”, a lemezek között az elektromos mező változása a „kifolyó” áramot, amit a másik lemez után ismételtelen töltések árama folytat, ezáltal zárul a kör. Eszerint a természetben csak zárt áramkörök fordulhatnak elő! Átgondolva, tehát adott pillanatban I erősségű áram folyjon a vezetékben. Ez az áram Δt idő alatt $\Delta Q = I \cdot \Delta t$ töltést szállít a kondenzátorra.

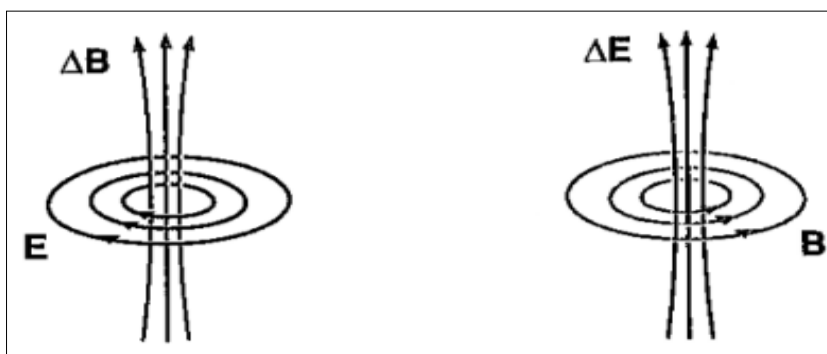
Gauss-tétele szerint a töltésnövekedés következtében a lemezek közötti elektromos erővonal fluxus

$$\Delta N = \Delta \Psi = \frac{1}{\varepsilon_0} \Delta Q = \frac{1}{\varepsilon_0} I \Delta t \quad (1.23)$$

értékkel megnőtt. A vezetékekben folyó I erősségű áramnak a kondenzátor lemezei között a

$$I = \frac{1}{\varepsilon_0} I \Delta t \quad (1.24)$$

elektromos erővonal fluxus változási gyorsaság felel meg.



17. ábra. Változó mágneses mező, változó elektromos mező mezőket keltő hatása

Ha megvizsgáljuk az elektromos és mágneses fluxusváltozás keltette mezőket, láthatjuk, hogy egymás tükörképei. A keltetett mezők ellentétes sodrást alkotnak, tükörszimmetrikusak. Ennek tudatában felírhatjuk a következőket.

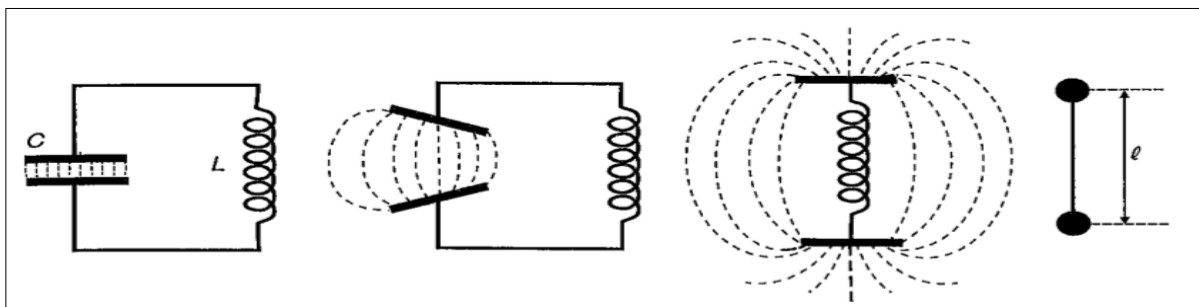
$$E = \frac{-1}{2\pi r} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (1.25)$$

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi r} \frac{\varepsilon_0 \Delta \Psi}{\Delta t} \quad (1.26)$$

Ezek alapján elmondhatjuk, hogy az elektromos mezőt töltések és változó mágneses mezők, a mágneses mezőt áramok és változó elektromos mezők hozzák létre. A nyugvó töltések által keltett elektromos mező pedig forrásos, az összes többi pedig örvényes.

1.3.7 Nyílt rezgőkörök [2][5][7][8]

Az elektromágneses hullámok térben való kisugárzásának megvalósítására legmegfelelőbb az úgynevezett nyílt rezgőkör. Ehhez egy zárt rezgőkörnek a 18. ábra szerinti fokozatos „nyitásával” juthatunk el.

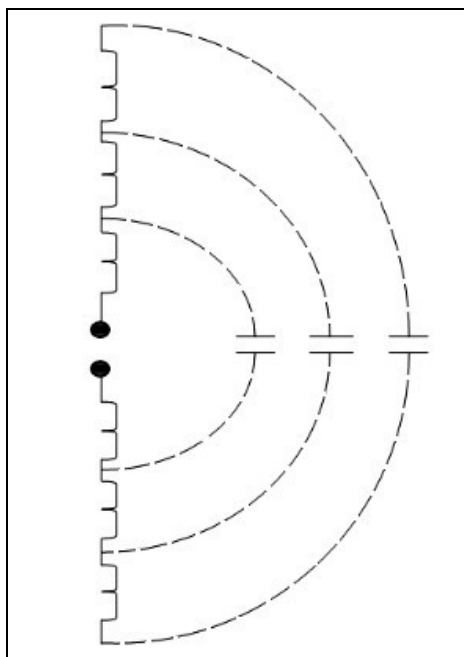


18. ábra. Egyre nyitottabb rezgőkör antennává válik

A rezgőkörök felépítésüket tekintve kapacitív és induktív elemekből állnak, így mind a villamos, mind a mágneses erőter geometriailag korlátozott térben jön létre. A villamos erőter teljes egészében csak a kondenzátor lemezei között, a mágneses erőter egy kis része a közvetlen környezetében, nagyobb része pedig a tekercs belsejében keletkezik. A rezgőkör által gerjesztett periodikus villamos és mágneses térerősség változás (a villamos rezgés) meghatározó mértékében magán a rezgőkörön belül alakul ki. Az elektromágneses hullámok térbe való kisugárzását a legjobban az úgynevezett nyílt rezgőkör teljesíti. Az ideálisnak vett rezgőkör – hasonlóan az ideális zárt rezgőkörhöz – szintén veszteséges L és C elemeket tartalmaz. A következőkben a legegyszerűbb felépítésű ideálisnak vett nyitott rezgőkört vizsgáljuk.

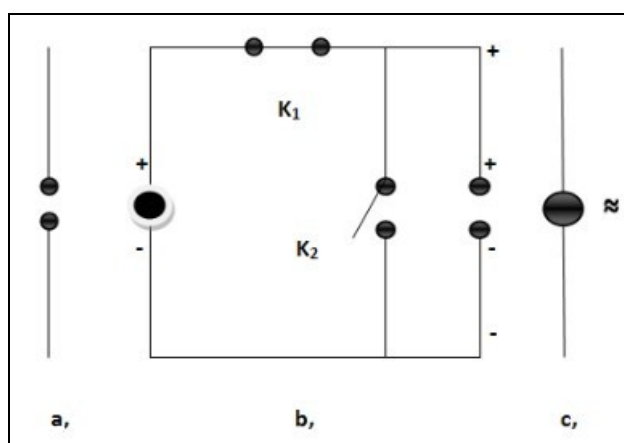
Általában vezetéknek nevezünk azt a két tetszőleges alakú és egymáshoz képest tetszőlegesen – de állandó jelleggel – elhelyezett elektromos vezetőt. Minden vezető azzal a tulajdonsággal bír, hogy van induktivitása és van kapacitása. Ezek viszont nem pótolhatóak egyetlen kondenzátorral vagy tekercsel, hiszen bármilyen rövid vezetékdarabot is vizsgálunk, az is rendelkezik valamennyi induktivitással és kapacitással. Ennek függvényében tetszőleges hosszúságú vezeték helyettesíthető úgy, hogy a vezetőket kis (elemi) szakaszokra osztjuk és külön-külön – megfelelően összeillesztett – kondenzátorokkal és tekercsekkel helyettesítjük.

Láthatjuk a 19. ábrán, hogy a vezeték induktivitását és kapacitását tekinthetjük megosztottnak is. A gyakorlati szempontból is nagyon fontos sugárzó rendszer neve: dipólantenna.



19. ábra. Rezgővezeték

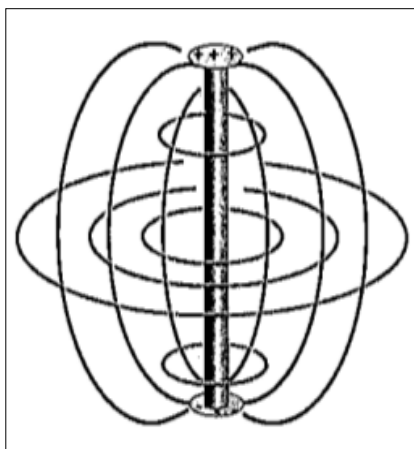
A 20. ábra bal oldalán (a) látható rezgővezeték két azonos hosszúságú huzaldarabból áll. A két vezeték egymásra szimmetrikusan helyezkedik el, és pontjaik egymástól különböző távolságra elhelyezkedő vezetőfelületek, így egy – a vezeték mentén – változó kapacitású kondenzátort alkotnak. Vizsgáljuk meg a kapcsolást. Ez a kondenzátor a 20. ábra (b) szerint a K_1 -es kapcsoló zárásával egyenfeszültségű generátorról feltölthető. Ezáltal a rezgővezeték két része között villamos erőter keletkezik.



20. ábra. Rezgővezeték kialakítása

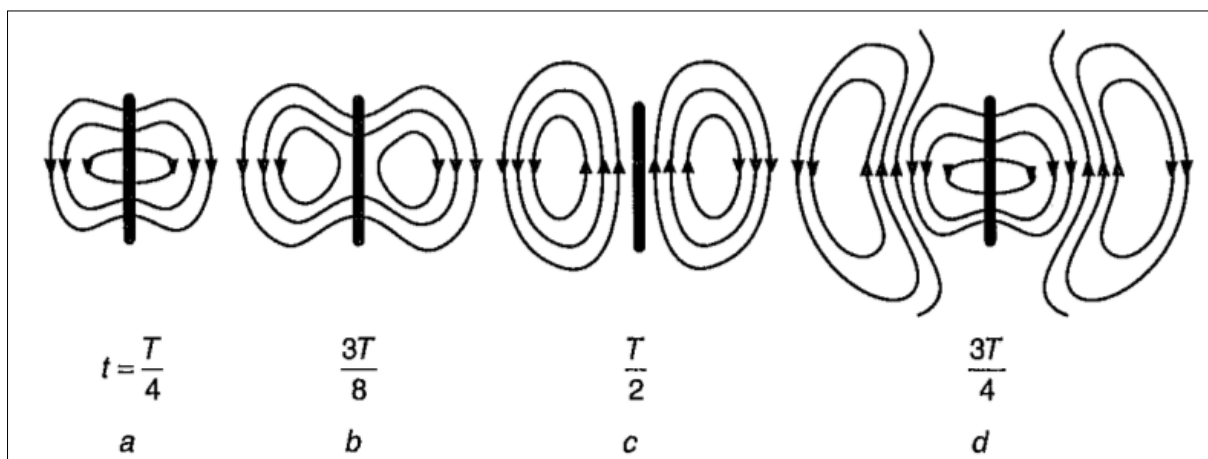
Ha a töltés befejezése után a – K_1 -es kapcsolót nyitjuk – K_2 -es kapcsoló zárásával, egymással összekötjük a rezgővezeték alsó és felső részeit, ekkor a különböző potenciálú töltések hatására áram indul meg. Ez az áram az egyenes vezető körül koncentrikusan mágneses erőteret gerjeszt.

Ez a gerjesztett mágneses erőter – az önindukció törvénye szerint – olyan irányú, hogy az őt létrehozó folyamatot, vagyis az áramot igyekszik meggátolni. Ez a folyamat addig tart, amíg a töltések kiegyenlítődnek. A kiegyenlítődés pillanatában az áramerősség maximális. Az ekkor létrejövő mágneses erőter igyekszik a megszűnő áramot fenntartani, és ezzel a kezdeti állapothoz képest fordított polaritással feltölteni a vezetékreszeket. Ezután az egész folyamat előről kezdődik. A rezgővezetékek elektromos és mágneses erőterét leegyszerűsített formában az 21. ábrán láthatjuk, ahol a vízszintes vonalak a mágneses, a függőleges vonalak pedig az elektromos erővonalak elhelyezkedését mutatja.



21. ábra. Rezgővezeték elektromos tere

Térjünk át az elektromágneses energia kisugárzására. Vizsgáljuk meg a képen látható rezgővezeték „antenna” síkjában kialakuló elektromos erőter változásait. Tudjuk, hogy ha a mágneses mező változása elektromos mezőt kelt, és az elektromos mező változása pedig mágneses mezőt, akkor együttesen képesek önállósulni is, azaz forrásaikból leszakadva önmagukat fenntartani. Az elektromágneses mezőnek a sugárzóról leszakadó, és arról függetlenül tovaterjedő részét elektromágneses sugárzásnak nevezzük. A legtöbb esetben a forrásul szolgáló áram egy vezetékszakaszbán, jelen esetben antennában folyik, természetesen egy irányban csak nagyon rövid ideig. Gyakorlatban az áram szinuszosan fog változni, a frekvencia függvényében. Az elektromos és mágneses mezők összjátékának eredményeképpen láthatjuk az ábrán egy időpillanatban az erővonalak kialakulását. Ahogy az idő telik, az egész erővonalkép mintegy kifelé vonul. Az antenna közvetlen közelében utánpótlásként újabb meg újabb zárt hurkok lépnek ki a térbe.



22. ábra. Az antennáról leszakadó, egymást keltő mezők

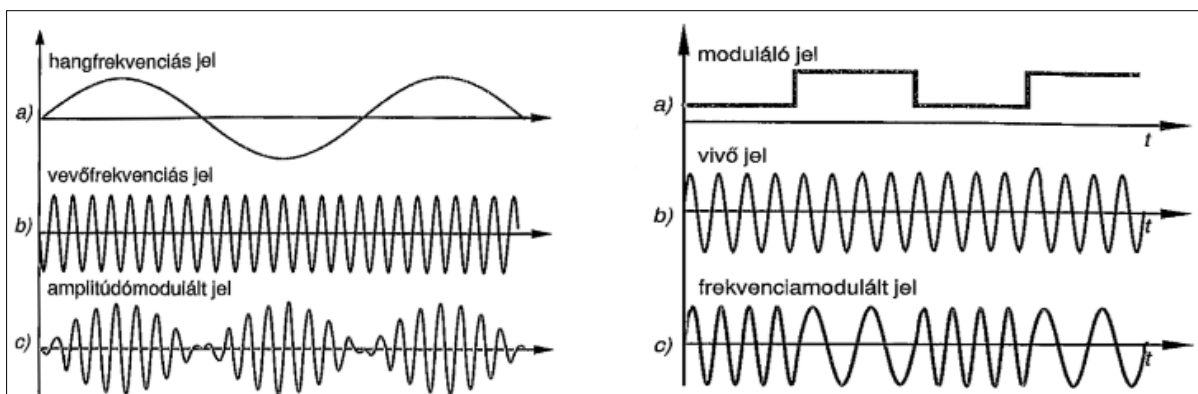
1.3.8 Moduláció [2][8][11]

Az előzőekben megállapítottuk, hogy az elektromágneses rezgéseket az antennák segítségével tudjuk kisugározni a térbe. Ily módon egyértelművé válik, hogy ezekkel a rezgésekkel vezeték nélküli energiatovábbítást eszközölhetünk. Az adóantenna tulajdonképpen a kisugározni kívánt elektromos jeleket alakítja át elektromágneses rezgésekké, hullámokká. A sugárzási elv kimondja, hogy a hangfrekvenciás jelek közvetlenül nem sugározhatóak ki, ugyanis az antennának a hullámhosszal összemérhető hosszúságúnak kell lennie, ez általában a hullámhossz fele vagy negyede ($\frac{\lambda}{2}$ $\frac{\lambda}{4}$). Tudjuk, hogy az emberi hang néhány kHz-es tartományba esik, ami elég nagy hullámhosszt jelent. A közepes hangfrekvenciát (1 kHz) tekintve az antenna hosszúsága $\frac{\lambda}{4}$ esetén is

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^3} = 75 \text{ km} \quad (1.27)$$

lenne. Ez az antenna hosszúság nem kivitelezhető. További nehézséget okoz, hogy a hangfrekvenciás tartomány kb. 20 Hz-től 20 kHz-ig tart (az emberi fül számára hallható tartomány 0,3-3,2kHz). Tehát ha kiszámoljuk, a hangfrekvenciás tartomány alsó határához tartozó antenna nagysága már 1500 km lenne. Következésképpen az antennánk csökkenése érdekében növelni kell a frekvenciát, mivel fordított arányban állnak. Tehát szükségünk van egy nagyfrekvenciás jelre, amit átalakítva a hanghullámainkat elszállítja. Ezt a nagyfrekvenciás hullámot vivőfrekvenciának nevezzük. A vivőfrekvencia már olyan frekvencia tartományba esik, aminek hullámhosszát tekintve már kivitelezhetővé válik az antenna.

A hangfrekvenciás sávot valamilyen módon kisugárzásra alkalmasabb frekvenciatartományba kell „áttenni”, majd onnan az eredeti állapotba „visszahelyezni”. Ezt a műveletet modulációnak, illetve de-modulációnak nevezzük. A moduláció szó latin eredetű és jelentése módosítás. A moduláció azt jelenti, hogy a vivőfrekvenciás jel valamilyen jellemzőjét változtatjuk meg. Ezáltal a hullám két legjelentősebb tulajdonságát modulálhatjuk, ez a frekvenciája és az amplitúdója. A vivőhullámra a hangfrekvenciás jelünket az adó részen „ráültetjük”, moduláljuk, majd a vevő részen „leválasztjuk”, de-moduláljuk. A leválasztott rezgéseket felerősítjük, majd hangszóróra kapcsolva ismét hangfrekvenciás hullámokká alakítjuk.



23. ábra. Amplitúdó és frekvencia moduláció

A moduláció többféle elv alapján valósulhat meg (23. ábra). Az egyik ilyen lehetőség az úgynevezett amplitúdómoduláció. Vizsgáljuk meg ezt a folyamatot. A hangforrásból származó jelek először a mikrofonra esnek, és a mikrofon áramköreiben olyan váltakozó áramok jönnek létre, amelyekben az áramerősség pillanatnyi értéke pontosan követi a hanghullámokat. Ennek a váltakozó erősségű áramnak a segítségével a nagyfrekvenciás vivőhullám amplitúdóját a hangfrekvencia ütemében, a hangerősséggel megfelelő arányban változtatjuk.

A moduláció egy másik megoldása a frekvenciamoduláció. Itt magának a vivőfrekvenciának a rezgésszámát változtatjuk meg a hangfrekvencia ütemében. Ezzel a módszerrel igen jó minőségű, zavarmentes vétel alakítható ki. A kisugárzott információt az elektromágneses mezőből a rádió-vevőkészülék szűri ki. A vevőkészülékhez kapcsolt antenna töltéseit a sugárzással beérkező elektromágneses hullámok elektromos komponense rezgésbe hozza. Ha az antennához a venni kívánt vivőfrekvenciára hangolt rezgőkört csatlakoztatunk, akkor ebben az esetben ugyanolyan rezgésszámú elektromágneses rezgések gerjesztődnek, amit rezonanciának is nevezünk. A rezgések amplitúdója követi a vivőhullám amplitúdóját,

ezért a rezgőkör rezgéseit tartalmazzák a vivőhullámra ültetett hangfrekvenciás jeleket. Ezután már csak a technikai feladat marad, hogy ebből a modulált nagyfrekvenciás rezgésből a „hanghullámokat” kiválasszuk.

A demoduláció, ennek a kiválasztásnak a folyamata. Például az amplitúdó modulált hullámnál úgy történik, hogy a nagyfrekvenciás körbe olyan alkatrészt, eszközt kapcsolunk, amely az áramot csak egy irányba engedi át (egyenirányító). Az egyenirányítással tehát megvalósul az, hogy a rezgések felét „levágjuk”. A nagyfrekvenciás jelnek csak minden pozitív fél periódusa jut át az egyenirányítón, vagyis ez már a hangfrekvenciás jelnek megfelelő periódusú egyenáram. Ez még igen nagy hangfrekvenciás egyenáramnak fog megfelelni, amelyből a hangszóró kizárólag csak a moduláló hangfrekvenciás rezgéseket képes követni. Ezek a jelek elég kis amplitúdóval bírnak, így a rádió-vevőkészüléknek ezeket a különválasztott jeleket erősítenie kell.

2. Rádióhullámok terjedése [7][8]

Az elektromágneses hullámok keletkezése az elektronok mozgására vezethető vissza. Régebben úgy gondolták, hogy az elektromágneses hullámok terjedésükhöz valamilyen közeget, úgynevezett „étert” vesznek igénybe. A kisugárzott elektromágneses hullámok viselkedéséről, terjedéséről, stb. ma már többet tudunk. Vegyük végig az alapvetően fontosabb összefüggéseket, tulajdonságokat, momentumokat.

2.1 Az elektromágneses hullámok felosztása [4][12]

A rádiótechnikában az összes rádióhullámot hullámsávokra, frekvenciatartományokra osztják fel. Ezek a tartományok az elektromágneses hullámok növekvő frekvencia függvényében az alábbiak: rádióhullámok (hosszú-, közép-, rövid- és ultrarövidhullámok), mikrohullámok, infravörös sugárzás, látható fény, ultraibolya sugarak, röntgensugarak, γ -sugarak, és kozmikus sugarak. A rádióhullámok ugyanazon törvények alapján verődnek vissza, törnek meg, mint maga a fény. Például a radarok, rádiólokátorok ugyanezen elvek alapján határozzák meg különböző tárgyak, járművek pillanatnyi helyzetét. A frekvenciatartományt 30 kHz-3000 MHz-ig 5 részre osztották fel:

1. táblázat. Frekvenciatartomány 30 kHz-3000 MHz-ig.

Megnevezés	Jelölés	Frekvencia	Hullámhossz
Hosszúhullámok	LF	30...300 kHz	10...1 km
Középhullámok	MF	300 kHz... 3 MHz	1000...100m
Rövidhullámok	HF	3...30 MHz	100...10m
Ultrarövidhullámok	VHF	30...300 MHz	10...1m
Deciméteres hullámok	UHF	300...3000 MHz	1...0,1m

LF: Low Frequency, alacsony frekvenciák, hosszú hullámok. Mivel a frekvencia kicsi, ezért az arányosság alapján elég nagy hullámhossz tartozik ehhez a tartományhoz. A hosszúhullámú vételt az évszakok és a napszakok változása kevésbé befolyásolja. Búvárkommunikációban, tengeralattjárók híradásában alkalmazzák.

MF: Medium Frequency, középhullámok. Kimagasló szerepük van több területen is, a rádiós műsorszórásban és a navigációban, ebben a tartományban működnek a hajók vészjelző berendezései, illetve a világítótornyok vevőkészülékei. A középhullámon működő rádióállomások éjszaka jobb minőségben hallhatóak, mint nappal, és nyáron rosszabbul, mint a téli időszakban.

HF: High Frequency, rövidhullámok (RH). A rövidhullámú frekvenciatartományban a felületi hullámok terjedése már igen rossz és ezért némi kivételtől eltekintve a rövidhullámokat kis távolságra nem alkalmazzák. A rövidhullámok felhasználási területei inkább nagy hatótávolságú rádióforgalmazásra koncentrálódnak. Ezek a rádióhullámok több száz és ezer (400 km-en túl) kilométerek áthidalására alkalmasak a térhullámok segítségével (pl. Afganisztán-Magyarország rádióforgalmazás RH tartományban). Széles sáv szélességéből adódóan az ultrarövid hullámot a televízió és frekvenciamodulált műsorszórás, illetve a távbeszélő üzemből alkalmazzák a legtöbbet.

VHF: Very High Frequency, ultrarövid hullámok (URH). Ebben a tartományban a rövidhullámmal szemben kis távolságokra, legfeljebb csak maximum néhány tíz kilométerre történő forgalmazásra alkalmazzák. Kis hullámhossza miatt már jellegzetesen optikai, az adótól a vevőig szinte közvetlenül rálátás (LOS line of sight) szükséges, illetve a talajról tükrözött hullámok együtt a refrakció jelenségével adják az összeköttetés útját.

UHF: Ultra High Frequency, ultra magas frekvenciák és **SHF:** Super High Frequency, szuper magas frekvenciák, mikrohullámok. A terjedés ebből a szempontból már független az ionoszférától. Az egészen kis hullámhosszak olyan antennák alkalmazását teszik lehetővé, amelyek a repülőgépeken, hajókon is könnyűszerrel elhelyezhetők. A kisugárzott energia nagymértékű pontossága lehetővé teszi azt, hogy két pont között igen kis energiával biztos összeköttetést létesítsünk. A mikrohullámok sok lehetőséget nyújthatnak a rádiónavigáció alkalmazása szempontjából, elsősorban radar készülékek terén.

2.2 Elektromágneses hullámok terjedése tulajdonságai [3][4][12][13][14]

Ebben a fejezetben rádióhullámok terjedési tulajdonságait elemezzük különböző frekvencia tartományokban. Tanulmányozzuk, hogy különböző távolságokra, különböző időkben milyen frekvenciatartományban érdemes forgalmazni. Megvizsgáljuk, hogy milyen terepviszonyokat érdemes figyelembe venni egy rádió adó-vevő antenna telepítésénél, építésénél, és hogyan juthat el a kisugárzott energia elektromágneses hullám formájában az adóállomástól az ellen-állomásig.

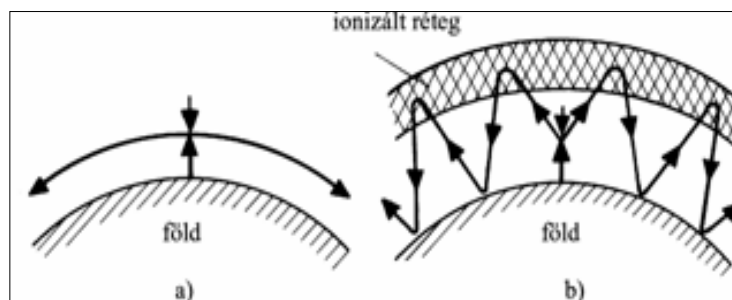
Frekvencia és hullámhossz

Minden elektromágneses hullámnak a kialakulását rezgőkörhöz lehet kötni, amelynek az adatai határozzák meg, hogy másodpercenként mennyi rezgés, azaz milyen frekvenciájú hullámok jöhetnek létre. Ha összevetjük az elektromágneses hullámot a húron keletkezett hullámmal, mutatnak hasonlóságot. Az elektromágneses hullám is rendelkezik ugyanazokkal a jellemző hullámtani értékekkel (frekvencia, hullámhossz, periódusidő, terjedési sebesség stb.), viszont a húron keletkező hullámot meg lehet mérni, az elektromágneses hullám hosszát pedig ki kell számolni. A rádióhullám éppen olyan elektromágneses hullám, mint a fény, és sebességük szintén megegyezik ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Az elektromágneses hullámokat igen széles spektrumon ismerjük, viszont mint tudjuk, frekvenciájukban, terjedelmükben, hatásaikban lényegesen különböznek egymástól. Ha megvizsgáljuk a hullámokat frekvenciájuk szerint, azt látjuk, hogy a rádióhullámok óriási sávot foglalnak le belőle. Ezeken belül a rádióhullámokat, mint előbbieken láthattuk több kisebb-nagyobb sávra oszthatjuk még fel. A katonai egységek is ezekhez hasonlóan kapnak különböző nagyságrendű frekvenciatartományokat, frekvenciákat a saját forgalmuk lebonyolítására.

Felületi és térhullámok

Az előző fejezetben szereplő frekvencia táblázatban szereplő valamennyi rádióhullám lehet felületi hullám, vagy térhullám. Akkor nevezhetjük őket felületi hullámnak, ha a földfelületről indulnak, és annak mentén haladnak. Térhullámokról abban az esetben beszélünk, ha Föld felületéről kiindulva a légkör valamely rétegéről, vagy meteorról, műholdról stb. visszaverődve jutnak vissza a Föld felszínére.



24. ábra. Felületi és térhullámok

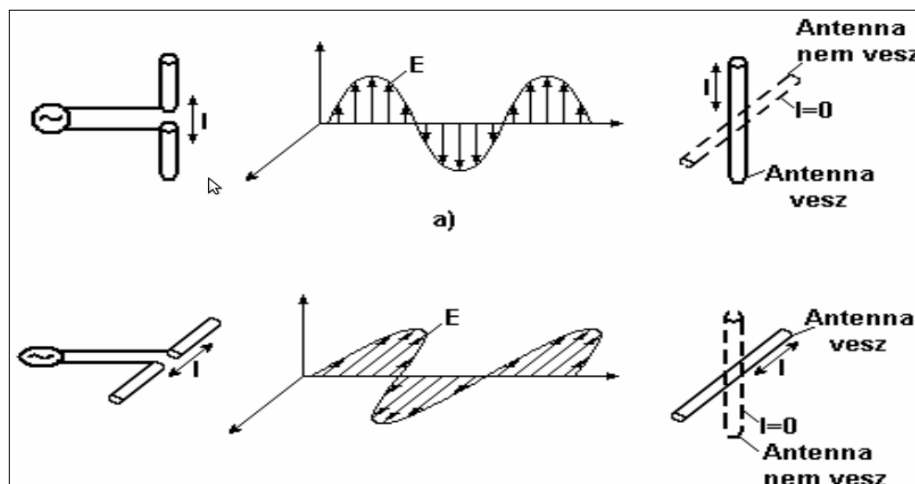
Visszaverődés, törés

Tapasztalatom, hogy sok esetben hallom azt a megfogalmazást, hogy az elektromágneses hullámok egy részét az ionoszféra „visszahajlítja” a földre, az ultrarövid hullámok pedig a földfelszín felé „hajlanak”. Ha helyesen akarunk eljárni, akkor nem alkalmazhatjuk ezt a megfogalmazást, hogy „hajlítás”.

A fényhez hasonlóan a rádióhullám is, ha egy új közeg határához ékezik, akkor az új közeg határfelületén rendszerint irányt változtat. Ezt a változást nevezzük törésnek vagy visszaverődésnek. A rádióhullámok visszaverődésének a jelenségét kísérletileg csak egészen rövid, a cm-es, vagy mm-es hullámok esetében lehet bemutatni. Ezek a kísérletek azt a tapasztalatot mutatják, hogy a rádióhullám minden fajtája a fényre érvényes visszaverődési szabályok szerint viselkedik. Visszaverődés a talajon, a tengervízen, a mesterséges és természetes akadályokon, de mindenkor ezek határfelületén lehetséges. A rádióhullám ezekbe az anyagokba bele is hatol, és azon része már nem vesz részt a továbbhaladásban. Ezért a felületről visszaverődő hullám energiája már gyengébb lesz. A visszavert és az eredeti hullám energiájának arányát jelzi a „visszaverődési tényező”. Mivel a fény hullámhossza nagyságrendekkel rövidebb, mint azoknak a rádióhullámoknak a hullámhossza, amiket híradásra használunk, ezért megfelelő nagyságú felület szükséges azok visszaverődéséhez. Ezzel a jelenséggel azért nem foglalkoztunk a fénytanban, mert a környezetünkben található tárgyak nagysága mind nagyobb a fény hullámhosszánál. Tehát megállapíthatjuk, hogy visszaverődés csak akkor jöhet létre bizonyos tereptárgyakról, ha a felület nagyobb, mint a rádióhullámunk hullámhossza.

Polarizáció

Az elektromágneses hullámok két fontos energiahordozó komponensből állnak össze. Az elektromos (E) és mágneses (H) erőtérből. Ezek síkjá, valamint a terjedési irány a 90° szöget zárnak be egymással.



25. ábra. Függőleges és vízszintes polarizáció

Beszélhetünk vízszintes, illetve függőleges polarizációról, mégpedig attól függően, hogy az elektromos erőter helyzete vízszintes vagy függőleges helyzetben van. A polarizációs síkot alapvetően az adóantenna határozza meg, de ennek ellenére az ionoszféra megváltoztathatja a polarizáció síkját egyik pillanatról a másikra, akár egy teljes fordulattal, azaz 180° -kal is. A polarizációs sík ionoszféra okozta változása, megváltozása különösen jellemző napkeltekor és napnyugtakor.

A hullámok polarizációja a terjedés és a vétel szempontjából is fontos. A hullámok terjedésük közben is állandóan visszaverődéseket szenvednek, ezért nem szabad figyelmen kívül hagyni azt, hogy a visszaverő felületre milyen szög alatt, milyen polarizációs síkban érkeznek. A polarizációs sík nem megfelelő volta esetén visszaverődés esetleg nem is történik meg. Ugyanígy lényeges a polarizációs sík a vétel biztosítása érdekében is. Ha a vevőantenna polarizációja nem egyezik a vett hullám polarizációs síkjával, akkor az antenna a hullámot kisebb energiával továbbítja a vevőkészülékbe.

Tapasztalatom ezzel kapcsolatban az, hogy néha a katonák elfelejtik az antenna síkját megfelelően beállítani (pl. menet közben lóg a szalag antenna, elfektetett háti rádióval, antennával próbálnak forgalmazni).

A térerősség

Az elektromágneses hullámok térerősségét többféleképpen lehet meghatározni. A rádióhullámoknál viszont majdnem kizárólag a következő kísérleti módszert használják: elhelyeznek a vizsgálni kívánt helyre egy 1 m-es vezető huzalt és méréseket végeznek annak függvényében, hogy a kérdéses adóállomás hullámai mekkora feszültséget indukálnak a

huzalban. Természetesen a gyakorlatban nem így végzik ezt a mérést, ez csak elvi megoldás. De végeredményben a kapott eredményt, a feszültséget mindig az 1 m hosszú huzalra vonatkoztatják és V/m fejezik ki. Ekkora feszültséget elég ritkán lehet mérni, ezért a könnyedség miatt használatosabb mértékegység a $\mu\text{V/m}$. Szabad térben vizsgálva arra a megállapításra juthatunk, hogy a térerősség a távolság arányával lineárisan csökken, míg az energia a növekvő távolsággal arányosan mind nagyobb felületen oszlik el. A térerősség jelölésére a korábban már látott E betű használatos. A térerősséget a fentebbi megállapítás alapján így írhatjuk fel:

$$E = \frac{2,2h_1h_2\sqrt{P}}{r^2\lambda} \quad (2.2)$$

Ahol h_1 és h_2 az adó és vevőantenna magassága a földfelület felett méterben, P a kisugárzott teljesítmény kW-ban, r az adó és vevő közötti távolság km-ben, λ pedig a hullámhossz méterben.

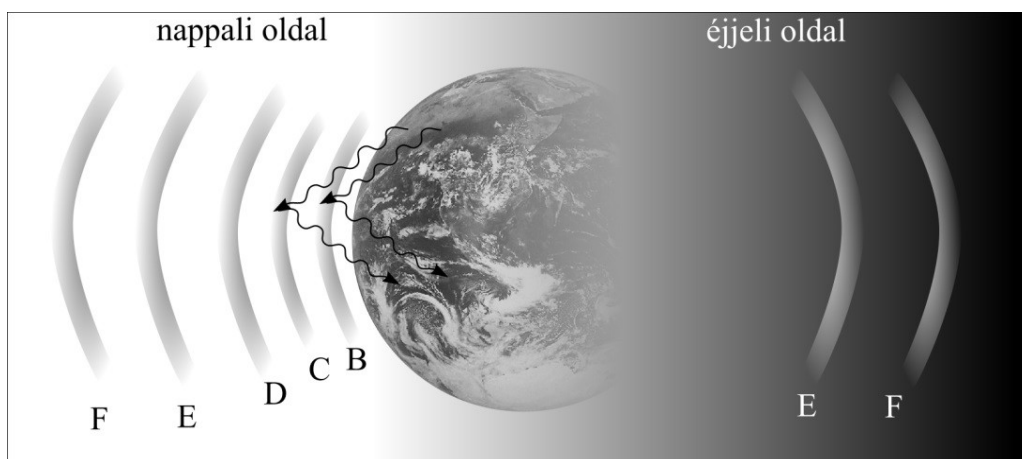
Abszorpció

A rádióhullámok a valóságban, a levegőben (a levegő különböző rétegeiben) és részben a földben terjednek. Ha annak a közegnek, amelyben az elektromágneses hullámok terjednek, dielektrikus tulajdonságai vannak – vagyis különbözik a légüres tértől –, vagy a közeg vezetőképességgel rendelkezik, a rádióhullám terjedési sebessége más lesz. A jelek továbbítása minden esetben olyan rövid ideig tart, hogy a különbség a terjedési sebességben semmilyen jelentőséggel sem bír. A rádióhullámok terjedési sebessége mindig olyan, hogy a földi viszonylatokban az adóállomás adása az ellen-állomásra a másodperc töredéke alatt jut el. Azonban a különböző elektromos tulajdonságokkal rendelkező rétegekben a hullámok törést szenvednek, minek folytán terjedési irányuk megváltozik, és ha a közeg vezető, annak felmelegítésére energiaveszteség, energiaelnyelődés áll elő, amit abszorpciónak nevezünk. Ez a veszteség a rádió hatótávolságát csökkenti. A kisugárzott energia csökkenése, elnyelése igen nagymértékben függ a hullám hosszától.

2.3 Ionoszféra [3][13][14]

Kívülről nézve földünket, a második és egyben a híradás szempontjából legfontosabb rétege az ionoszféra. Hozzávetőleg 70-3000 km magasságig tart ez a réteg. Ennek a rétegnek a kialakulását a Nap korpuszkuláris és ultraibolya sugárzása okozza. Ez a réteg egy ionizált réteg, amelyben az ionizáció alkalmával mindig elektronok és ionok keletkeznek, tehát az ott

jelenlévő részecskék valamilyen töltöttségűvé válnak. A Nap sugárzásának hatása felülről az egyre sűrűbb levegőrétegekben mind több és több gázzal találkozik, ezáltal bizonyos rétegek ionizációs sűrűsége nagyobb lesz, míg az alsóbb rétegek kevésbé fognak ionizálódni.



26. Az ionoszféra rétegei napszak szerint

Ezt a folyamatosan lejátszódó folyamatot, amely a szabad elektronok és ionok újraegyesülése, nevezzük rekombinációnak. Ennek sebessége annál gyorsabb, minél sűrűbb a levegő. Ezért az alsó rétegek tűnnek el a leghamarabb, míg a feljebb elhelyezkedő rétegek hosszabb ideig maradnak stabilak. Az ion- és elektronsűrűség bizonyos rétegenként változik, ennek alapján betűjelzéssel látták el őket. Lényeges megjegyezni, hogy naptevékenységeken túl az ionoszféra napszak és évszak függő is.

D-réteg

A D-réteg az ionoszféra legalsó részén helyezkedik el. A Földtől nézve normál körülmények között kb. 80 km-re tehető, viszont napszaktól függően ez a távolság változhat 40-95 km-re is. Erős ionizáció hatására két rétegre bomlik, a D_1 - és D_2 - réteg. A D-réteg elnyelő hatása a rövidhullámú tartományban elég számottevő. Viszont az igen alacsony frekvenciák viszonylatában jó visszaverő képességgel rendelkezik, ilyenek a hosszú és igen hosszú hullámok. A napkitörések hatása közvetlenül a D-rétegre abban nyilvánul meg, hogy aránytalanul megnő az abszorpciós hatása. Ilyenkor eléggé meggyengülve jut fel a rádióhullám a következő rétegekbe. Sőt előállhat olyan is, hogy több percre „teljes fading³” bénítja meg a rádióforgalmazást. Ilyenkor a D-réteg teljesen elnyeli a rövidhullámú rádiójeleket.

³Fading: „elhalkulás”.

Este a D-réteg ritkulása hatására ez az elnyelő hatás csökken, ez már nem csak a rövidhullámú tartományban, hanem a középhullám terjedése szempontjából is pozitív.

E-réteg

Az E-réteget nevezhetjük az ionoszféra „legsabályosabb” rétegének. Közvetlenül a napfelkelte előtt jön létre, és kb. egy óra múlva már megközelítőleg 110 km-es magasságban foglal helyet a legsűrűbb része. Az éjszakai órákra nem tűnik el teljesen, csak részben, és ekkor a rádióhullámokra gyakorolt hatása elég csekély. A 7 MHz-es sáv munkája főleg az E-réteg segítségével megy végbe. Ez a réteg is napközben két rétegre tagolódik: E_1 - és E_2 - rétegre.

E_s -réteg (szporadikus E-réteg)

Az E_s -réteg 100-120 km-es magasságban található, és ebben 50-200 km/h sebességgel száguldó réteg darabokat, réteg foslányokat találhatunk. Lehetséges, hogy a sarkokon keletkeznek, és onnan áramlanak az Egyenlítő irányába. A sebességük a mérsékelt öv felett jelentősen lecsökken. Ezek a rétegdarabok elég sűrűk lehetnek. Ennek a rétegnek a segítségével akár több száz, illetve több ezer km is átbeszélhető. Az E_s - réteg mesterséges behatásokra is keletkezhet, mint pl. magas légköri robbantások.

Az F réteg

A reflexiós hullámterjedés szempontjából vizsgálva a legfontosabb az F-réteg. Ennek a rétegnek a segítségével a rövidhullámú sáv tartományok elég nagy távolságokat fednek le. Nappal a mi szélességi övezetünkben szintén két rétegre tagolódik: az F_1 - és F_2 - réteg. Éjszaka a teljes alsó réteg rekombinálódik, ezért este csak az F réteggel kell számolnunk. Ennek a rétegnek az elhelyezkedése kb. 300 km-es magasságban lehet. Nappal az alsó F_1 - réteg kiterjed, aminek magassága kb. 150-200 km lehet. A fölötté lévő F_2 - réteg pedig ilyenkor feljebb húzódik kb. 400 km-es magasságba. A Naptevékenység hatása főleg az F-rétegben jelenik meg. Napnyugta után az F-réteg elektron sűrűsége csökken, viszont a rekombináció lassúbb a többi réteghez képest. Ezáltal megfelelően használható éjszakai rádióforgalmazásra is.

G-réteg

G-réteg magassága eléri a 700 km-t is. Napközben ez a magasság csökken, míg éjszaka ez a távolság megnövekszik. Sűrűsége hasonló a F_1 - rétegéhez. A rádióhíradás szempontjából nem lényeges a G-réteg, mivel az alatta található F_2 - réteg sűrűsége nagyobb. Viszont a kívülről érkező rádióhullámok szempontjából nagy jelentősége van a G-rétegnek.

2.4 A rövidhullámok terjedési tulajdonságai [3][12][15]

Az ionoszférának a rövidhullámok terjedésében való fontos szerepe több jellegzetes sajátossággal bír. Ezek ismerete mind rádióhíradás megszervezéséhez, mind a rádióállomások telepítéséhez elengedhetetlenül szükséges. Ezek az alábbiak: a holtterek megléte, a hullámok éjszakai és nappali terjedés közötti különbsége, a jelek elhalkulása (fading), a rádióvisszhang (rádió-echo), a légköri zavarok növekedése az éjszakai órákban, ezek mind a rádióállomások katonai kihasználásához elengedhetetlenül szükségesek.

A holtter (csendöv)

A felületi és térsugárzás között található egy olyan terület (sáv), amelybe a rádióhullámok egyáltalán nem hatolnak be. Ezt a területet holttérnek (árnyékolt térnek, vagy csendövnék) nevezzük. Ha a holtteret felülről nézzük, akkor gyűrű alakúnak látszik, ami kettéválasztja a térsugárzási és felületsugárzási zónákat. Természetesen, a holtterek szélessége nem marad állandó nagyságú. Ennek a nagyságát nagyban befolyásolják a napszakok, az alkalmazott teljesítmény nagysága, és persze a hullámhossztól is függ. A rövidebb hullámok holttere szélesebb, mivel a térhullámaik távolabb fognak vissza érkezni a Földre, ellentétben a felületi hullám energiája gyorsabban elhasználódik. Egy egyszerű példa: egy közepes teljesítményű adónál nappal, egy 20m-es hullámnál a holtter 2000 km is lehet, míg egy 40 m-es hullámnál csak 200 km.

A hullámok nappali és éjjeli terjedése közötti különbség

A felületi hullámok hatótávolsága egy átlagos adóállomásnál éjszaka és nappal körülbelül egyformák. A holtter növekedése viszont éjjel nagyobb, mint nappal. Nappal a térhullám a Föld felszínéhez közelebb eső E-rétegben megtörik és az adóállomástól kisebb távolságra verődik vissza. Ellentétben éjszaka, amikor visszaverődés a magasban lévő F-rétegről jön létre. Gyakorlati végrehajtás során ezzel mindig számolni kell, különösen kisebb

teljesítmény alkalmazása során, amikor 150-200 km-t kell áthidalni. Az ionizált rétegek magasságának változása napszaktól függően megköveteli, és ezáltal megkönnyíti a forgalmazást a külön éjszakai és nappali frekvenciák megválasztásával.

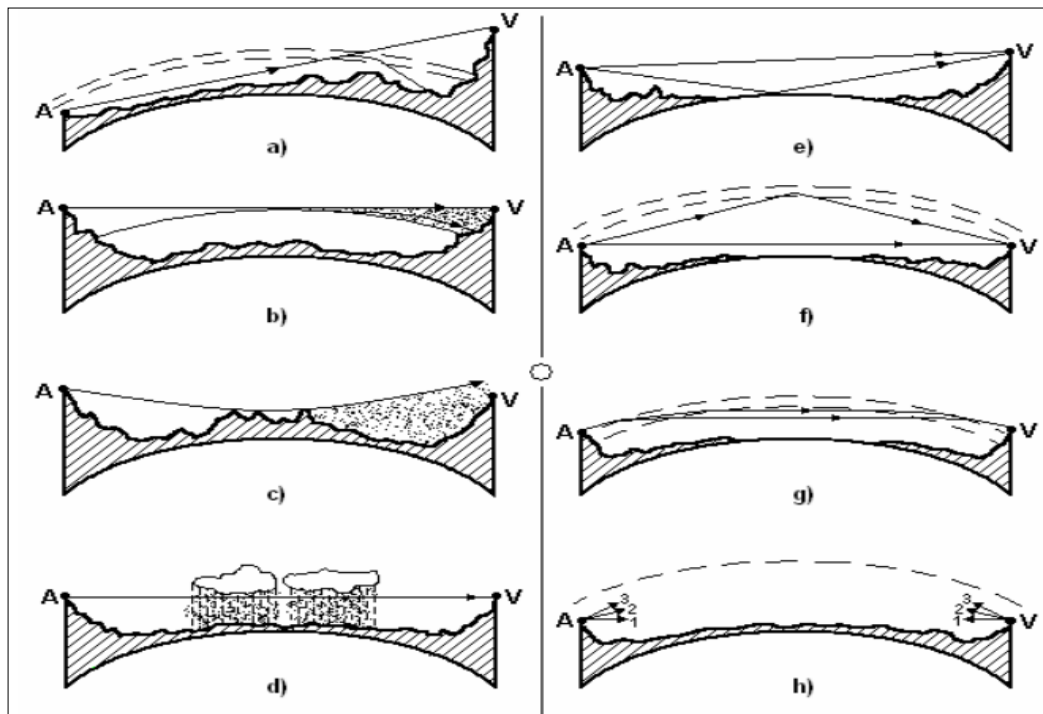
A jelek elhalkulása (fading)

Ez a jelenség a térhullámok sávjában figyelhető meg, valamint azokon a helyeken, ahova a felületi hullám és visszavert térhullámok együttesen érkeznek. Ez a jelenség különösen a napszakok váltakozásakor vehető észre, ez együtt járhat a jel néhány másodperces eltűnésével is. A vétel vagy teljesen eltűnik vagy elhalkul, majd ezután ismét teljesen visszatér. A fading jelenség kialakulása úgy jöhet létre, hogy az adóállomás az energiát nemcsak (a Föld felszínéhez mérten) egy szög alatt, hanem különböző szögek alatt sugározza ki. Következően a rádióhullámok ugyanaddig a vételi pontig egyidejűleg különböző utakon jutnak el a vevőig, vagyis a vevőantennában összeadóó feszültségek különböző fázisúak lesznek. Ha például a két feszültség fázisa megegyezik, úgy azok pillanatnyi értéke összeadódik, és az amplitúdó erősödik, ezáltal a hangerő erősödését tapasztalhatjuk. Viszont ha a fázisok különbözőek, akkor elhalkulás, vagy teljes némulás következhet be. A fading jelenséget több jelenség is befolyásolhatja a felsoroltakon kívül.

Ezek a következők lehetnek:

- a) Többszöri terjedési utaktól eltérően többszörös terjedési módosuk is lehetségesek, ha esetlegesen a légkörben hullámvezető réteg alakul ki. A kialakuló módosuk számát pluszban növelheti a határhullámhosszhoz közeli hullám is. Ezek általában más és más kisugárzási szögnek felelnek meg, ezzel magyarázható a fáziseltolódás.
- b) A magas inverziós rétegen kialakuló időleges visszaverődés.
- c) A felületi réteg hatására létrejövő légköri hullámvezetők (ezek kialakulhatnak hidegfront által történő hirtelen lehelésnél, nagyobb kiterjedésű hideg vízfelület fölött elhaladó melegebb légtömeg, esetlegesen szárazabb légtömeg, légréteg esetén.)
- d) A csapadék miatt bekövetkezett csillapítás.
- e) A földfelszínről való visszaverődés.
- f) Az ionosféra különböző rétegeinek hirtelen megszűnése, vagy keletkezése miatt bekövetkezett fáziseltolódás által létrejövő elhalkulás.
- g) A hullám iránya megváltozik hőmérsékleti viszonyok (sűrűbből a ritkább levegőbe) különbsége miatt.
- h) A rádió-echo (rádióvisszhang) jelenség úgy magyarázható, hogy a rádióhullámok a

Föld felszínéről és az ionizált-rétegről többszörösen visszaverődnek. A vevőhöz nemcsak az a sugárzás jut el, amelyik az ionoszférától közvetlenül verődik vissza, hanem az is, amelyik már egyszeri vagy többszöri visszaverődés közben érte a földet.



27. ábra. Fading jelenségek

Az éjszakai órákban a zavaró rádióállomások számának megnövekedése

A rövidhullám vételére és különösen az átmeneti hullámsávú (50-200m) forgalomra jellemző ez a jelenség. Ez kapcsolatban van az ionoszféra rétegeinek hullám elnyelésével. Ez abban nyilvánul meg, hogy napközben az ionoszféra alsó rétegei aktívak (D_1 - és D_2 - réteg), és ezek a rétegek a folyamatosan üzemelő nagy hatótávolságú adók jeleit elnyelik. Viszont éjszaka ezeknek a rétegek az energia elnyelése megszűnik (az ionok és elektronok újra egyesülnek), és a magasabb rétegekről (F) már visszaverődnek és eljutnak a saját vevőállomásunkhoz is.

2.5 Hullámterjedés a rövidhullámú sávokban [3][13][14]

160 méteres sáv (1800-2000 kHz)

Az igen erős légköri tevékenységek következtében ez a hullámsáv általában télen használható távolabbi összeköttetés felvételére. Ha a terjedési körülmények megfelelőek

akkor szinte bármelyik kontinens hallhatóvá válik. Ezekhez a hullámsávokhoz a hullámhossz miatt meglehetősen nagy antennára van szükség.

80 méteres sáv (3500-3800 kHz)

A 80 méteres sávban viszonylag kisebb, 3-400 km távolságok érhetőek, ezt a sávot főleg nyáron tudjuk alkalmazni megfelelően. A kisebb távolságokért a D-réteg elnyelő hatása érvényesül. Az éjszakai órákban viszont a D-réteg már nem aktív és az F réteg veszi át a szerepét. Ezáltal a hatótávolság már 1-2000 km, azaz négyszeresére is megnőhet, vagy szerencsésebb esetben akár 5-10000 km, ami többszöröse. Ez a sáv viszont nem mentes a légköri zavaroktól.

40 méteres sáv (7000-7100 kHz)

A D-réteg hatása következtében ennek a sávnak az áthidalhatósága 800-1000 km lehet. Az éjszakai órákban a D-réteg minimalizálásával ez az áthidalhatóság már 6000-12000 km távolságra is megnőhet. A 40 méteres sáv már érzékeny a napfoltmaximumok alakulására. A légköri viszonyok itt már alacsonyabb szinten vesznek részt. Viszont nyáron már belezavarhat az összeköttetésbe. Holtzónája: nappal 100 km, éjjel 1000 km.

20 méteres sáv (14000-14350 kHz)

Ez a sáv még a napfoltminimum-időszakban is szinte valamennyi kontinenst elérhető. Viszont ez megint napszak, illetve teljesítményfüggő is. A föld megvilágított felén elég nagy abszorbeáló tevékenységgel bír, így ezt a sávot hatékonyan a hajnali és reggeli órákban használhatjuk megfelelően. A Föld „sötét oldalán keresztül” sugározni elég kis szögben a „világos oldal” vevői felé. Ezt az összeköttetési módot „hosszú utas” (long patch) összeköttetésnek nevezzük. A hosszú utas összeköttetés használatával már akár 20 000 km, vagy afelett is átbeszélhető ez a sáv. Ez a 20 méteres sáv elég érzékeny az F₂ réteg bármely változására. A holtzóna ezen a sávon: nappal 1000 km, éjszaka 3-4000 km is lehet.

15 méteres sáv (21000-21450 kHz)

A sáv terjedési tulajdonságai a naptevékenységek intenzitásának a függvénye. Az F₂ rétegnek egy bizonyos sűrűségi határt el kell érnie, hogy visszaverje (reflektálja) ezt a

frekvenciasávot. Napfoltmaximumok időszakában megélnék ez a sáv, és már minimális teljesítménnyel akár 600-2000 km is átbeszélhetők. A naptevékenységek minimuma alatt az éjszakai órákban már nem nagy sikerrel alkalmazható ez a sáv. A légköri zavarok ritkán jelentkeznek ezen a frekvencia sávon, ha jelentkezik, akkor is csak általában helyi zivatarhatások.

10 méteres sáv (28000-29700 kHz)

Ez a sávartomány a rövidhullámok legszélén foglal helyet. Mivel közvetlen szomszédja az URH tartománynak, ezért néha a terjedési sajátosságai átmenetet képeznek. A naptevékenység maximuma ideje alatt nappal minimális teljesítménnyel (néhány W) (interkontinentális) földrészek közötti kapcsolat hozható létre. Az E_s rétegről szórványos visszaverődés érhető el, ez általában kis idejű és nem bír nagy távolsággal. A sáv holtzóna tartománya igen nagy, legalább 4000 km-es. A D-réteg hatása itt már elhanyagolható teljes mértékben.

2.6 Az ultrarövid hullámok terjedése [2][3][14]

Az ultrarövid hullámok (URH) hullámhossza 10 és 1 m között van. Ez frekvenciában kifejezve 30-300 MHz közé esik. Az ultrarövid hullámok terjedése merőben más, mint a rövidhullámoké. A 30 MHz fölötti hullámhosszú hullámokat az ionoszféra csak a legritkább esetben veri vissza. Még erős naptevékenység ideje alatt sem szokott előfordulni, hogy az F_2 réteg olyan sűrű legyen, hogy akár az 50-60 MHz-es hullámokat visszaverje. Egyedül az E_s réteg nagy sűrűségű részei, a sarkok felé előforduló ionizált-felhők képesek arra, hogy egy éppen rájuk eső ultrarövid hullámot visszaverje, vagy szétszórja.

Az URH hullámok a Föld görbületét nem követik, csak egyenes vonalban a fényhez hasonlóan terjednek. A földfelszíni adók és vevők között 80-180 km-nél nagyobb távolság nem lehet. Ezek a távolságok is frekvencia és teljesítményfüggők, ennél nagyobb távolságokat csak átjátszódók sorával lehet áthidalni, ennek függvényében igyekeznek minél magasabbra elhelyezni azokat. Egyenes vonalú terjedés esetén (az optika látóhatáron belül vizsgálva) már kis teljesítménnyel elég stabil összeköttetést lehet létrehozni. A rövidhullámú terjedéssel ellentétben az ultrarövid hullám, mint felületi hullám terjed, és terjedését nem befolyásolja az ionoszféra változás és az időjárásfrontok okozta befolyásoló tényezők sem. Ezek tudatában a kisugárzott energia vételi hatósugara megközelítőleg kiszámolható:

$$d = 4,1 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (2.3)$$

ahol a d a távolság km-ben, h_1 és h_2 az antennák magassága m-ben. A képlet alapján kapott távolságon belül megfelelő összeköttetést tudunk létesíteni.

Az ultrarövid hullámok nagytávolságú terjedése

Az ultrarövid hullámú tartományban találhatóak olyan frekvenciatartományok, amelyekkel nagyobb távolságok áthidalását megoldhatjuk. A 144-146 MHz ilyen tartomány, amihez a 2 m-es hullámhossz tartozik. Ennek az áthidalásnak a létrejöttére több magyarázat is van, de többnyire a troposzféra különleges állapotaira tudjuk visszavezetni. A troposzféra a Földünk légkörének a felszíntől számított 11 km-es magasságig terjedő szakasza (időjárási réteg). A troposzféra hőmérséklete fölfelé haladva fokozatosan csökken, a felső szinten eléri a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ -t. Megtörténhet az, hogy egy gyorsan mozgó melegebb levegőréteg „felsiklik” egy hidegebb levegőréteg „hátára”. Ennek a két rétegnek az érintkezési felülete egy nagyon jó reflexiós felületet kínál fel az ultrarövid hullámnak. A hőmérsékletugrást, hőmérsékletfordulást nevezték el inverzióknak. A talaj menti inverzió csekély hatótávolság növekedést okoz. Az URH másik nagyobb távolságra történő terjedési módja a szóródásos (scatter) terjedés. Vizsgálatok alapján megállapították, hogy a felfelé szálló meleg levegő nem keveredik azonnal környezetével. Ezáltal kialakulnak olyan rétegek, amelyek más páratartalmúak, nyomásúak és hőmérsékletűek. Ezáltal a két különböző törésmutatójú rétegen kell áthatolni a hullámnak, ahol ez által szétszóródva visszaverődnek, és a visszaverődés folytán az energia egy része visszaverődik a Föld felszínére.

3. Antennák és Improvizált antennák [2][6][15]

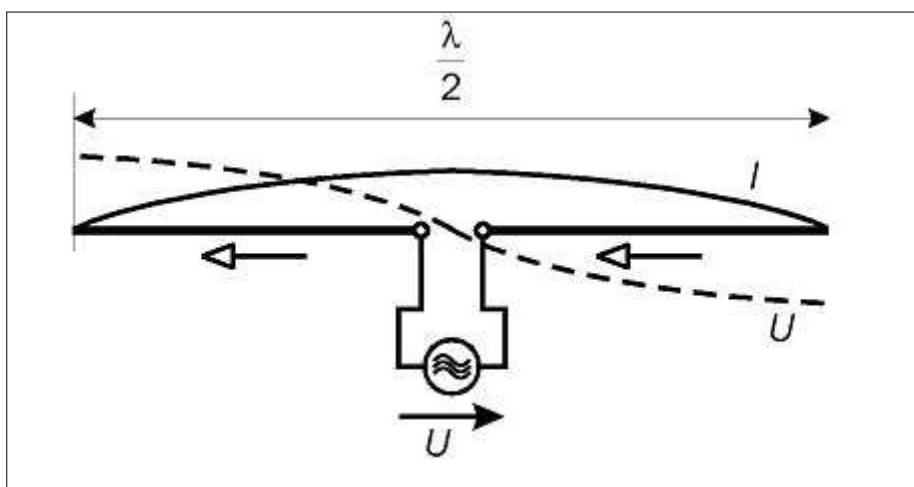
Hadműveleti területeken, de akár tábori viszonyok között is adódhatnak olyan nem betervezett mozzanatok, helyzetek, amikor a kommunikáció megléte elsődleges szemponttá válik. Azonban szembesülhetünk olyan nem várt problémákkal, amik a híradás tekintetében orvosolhatók a megfelelő ismeretek tudatában. Ezek közül a legsérülékenyebb ebből a szempontból az antenna. Fizikális behatások érhetik és ennek következtében az antenna meghibásodhat (törés, szakadás, deformáció). Ebben az esetben, valamilyen rögtönzött, ún. szükségantennával is kielégítő adás illetve vételi eredményt érhető el. Ezen ismeretek alapján különböző körülmények között a legkedvezőbb paramétereket figyelembe véve, és a helyszínen szerzett anyagokból megépíthetővé válhat az improvizált antennánk. A

következőekben leírt antennák megépítésénél azonban teljes mértékben tisztában kell lennünk azzal, hogy a legtöbb esetben ez csak rögtönzött szükségmegoldás, és az ilyen alkalmazások során meglehetősen engedményeket kell tennünk az illető antennák műszaki paramétereivel és tulajdonságaival szemben. Ezek az engedmények persze az adó és vételi minőségben is éreztetik hatásukat.

Általam elvégzett kísérletek során néhány megépített improvizált antennát vizsgálok, amelyeket több típusú rádióval kipróbálva, mindemellett különböző teljesítménnyel és frekvenciával tesztelem.

3.1 Antenna alapfogalmak [6][15][16]

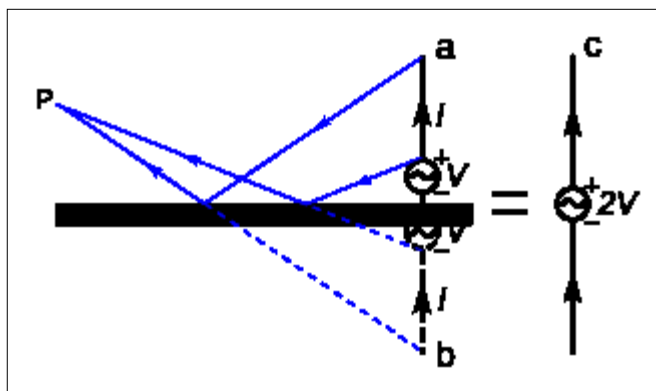
A Magyar Honvédségben rendszeresített harcászati rádiókészülékek esetében általában dipólus vagy monopólus antennákat használunk. Ezek közül a legtöbbet alkalmazott lineáris antenna az úgynevezett félhullámú dipól. Ez az antenna típus könnyen megépíthető, ezek mellett üzembiztos, kevés zavart okozó egysávos „szimpla” félhullámú dipól. Egyebeken kívül ezt az antennát, mint összehasonlítási alapot is alkalmazhatjuk. A félhullámú dipól geometriai hossza hozzávetőleg az elektromágneses hullám hosszának felével egyenlő nagyságú ($\lambda/2$).



28. ábra. Félhullámú dipól

A dipól, azaz a félhullámú sugárzóinak megvizsgálva az áram és feszültség viszonyait, láthatjuk, hogy rezonancia esetén a sugárzó közepén az áram a maximumon van, míg a feszültség a minimumon. Ezért, ha a félhullámú dipól hossza eltér a hullámhossz felétől, ennek függvényében ezek az értékek felborulnak. Azaz az áram és a feszültség eloszlása a fentiekől eltérő lesz, vagyis megváltozik. A rezonáns félhullámú dipólról ezek alapján elmondhatjuk azt a tapasztalati tényezőt, hogy feszültségeloszlása előnyös konstrukciós

megoldásokat tesz lehetővé, mivel a nulla feszültségű pont leföldelhető. A geometriai méreteket tekintve az előbbi megállapítás alapján az antenna a földfelületre merőlegesen szerelt, közel negyed hullámhosszú vezetékként is kiépíthető. Így tehát, ha a dipólus egyik ágát függőlegesen egy nagyméretű, jól vezető felület (pl. nedves föld) fölé állítjuk, akkor a félhullámú dipólantenna másik fele, mint tükörkép alakul ki a földben. Ez a kialakult tükörkép adja a dipólus másik felét. Ez az „egyvezetékes” dipólus megoldást nevezzük monopol antennának.



29. ábra. Monopol antenna a földfelületre merőlegesen tükrözve

Fontos megjegyezni, hogy a monopol antenna azonos mértékben terheli a generátort, és ezáltal azonos teljesítményt sugároz ki.

3.2 Improvizált antennák méretezése [2][13][15]

A katonának szükségantenna építése során több szempontot is figyelembe kell vennie. Az általa kivitelezett antenna paraméterei a lehető legjobban az adott helyzethez és anyagokhoz mérten igazodjon az eredeti antennához (polarizáció, megfelelő méret). Fontos megemlítenem az antenna szempontjából az álcázást, mégpedig két figyelemreméltó dologgal kapcsolatban.

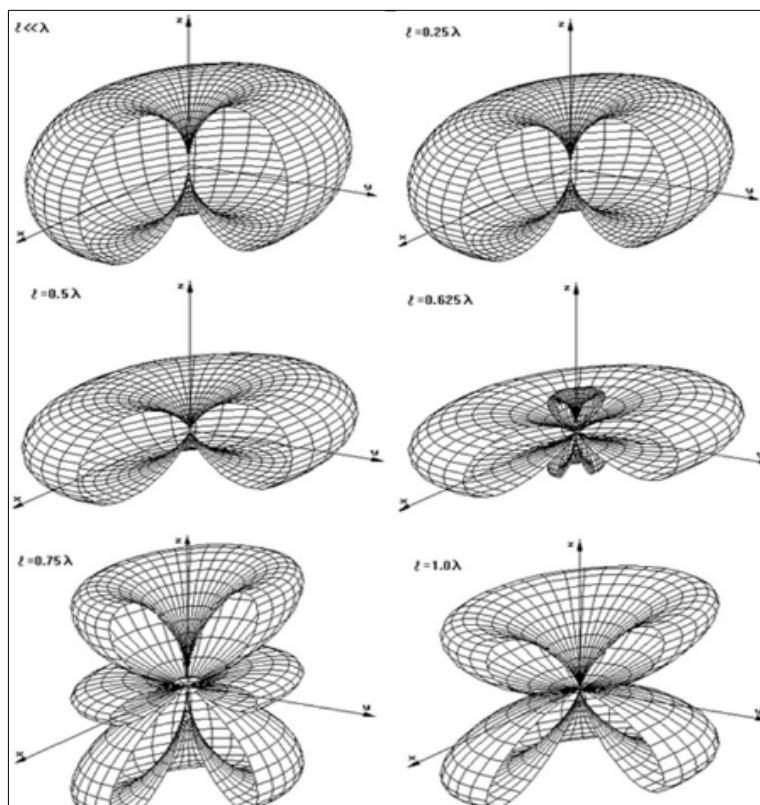
- Úgy kell megépítenünk az antennánkat, hogy az igazodjon a terepviszonyokhoz (legkedvezőbb kisugárzási pont megtalálása), és megfelelően legyen álcázva az ellenséges felderítés elkerülése szempontjából.
- A második pedig az álcázás folyamatánál különös figyelmet kell fordítani arra, hogy az antennához ne érjenek olyan álcázásnál használt vezető anyagok, amelyek rontanák a tervezett antenna paramétereit. Ennek magyarázatára későbbiekben a szigetelők fejezetnél kitérek.

Az antenna méretezésénél a megfelelő frekvencia kiválasztását követően a

hullámhossz megállapítása következik, majd a kapott értékhez kapcsolódó antenna hosszának megállapítása jön. Ezen művelet végrehajtásához legmegfelelőbb az 1.2.5 fejezetben már használt képlet alkalmazásának egyszerűbb változata:

$$\lambda(m) = \frac{300}{f(MHz)} \quad (3.1)$$

A következő ábrán (30. ábra) megfigyelhetjük, hogy a dipól antenna karakterisztikája hogyan változik az antenna hosszúságának függvényében. Ez fontos szerepet játszik az antenna méretezésében és az optimális teljesítmény kisugárzásában. A karakterisztikákból kiolvashatjuk, hogy a legmegfelelőbb (l) hullámhossz tartomány $\lambda/4 < l < \lambda/2$ közé esik, ugyanis ebben a tartományban láthatóan a $\lambda/2$ felé közelítve a kisugárzási karakterisztika ellaposodik.



30. ábra. Dipólus antenna iránykarakterisztikájának a hullámhossz változásának függvényében

Ez az ellaposodás a fő sugárzási irányba hatótávolság növekedést illetve vételi irányba nagyobb érzékenységet jelent. Viszont ha a méretezésnél $\lambda/2$ fölé megyünk és tartunk $5/8\lambda$ irányába ($0,625\lambda$), láthatjuk, hogy megjelennek a középső tartományban a melléknyalábok, amik a teljesítmény egy részét leveszik. Azaz ennyivel kisebb teljesítmény kerül kisugárzásra a számunkra kedvezőnek vett irányba. Ha még inkább közelítünk λ

irányába, láthatjuk, hogy a melléknyalábok növekedésével egyenes arányban csökken a kedvező irányba kisugárzott teljesítmény, ami egyértelműen hatótávolság csökkenéssel jár. Ezért megállapíthatjuk az előzőekből, hogy törekedni kell az antenna készítésénél a $\lambda/4 < l < \lambda/2$ közötti hossza. Az antennák tervezésénél számos összefüggéssel találkozhatunk, ami befolyásolhatja az antenna méretezését.

Ha gyakorlati szempontból nézzük, egy fontos tényezőt még nem vettünk figyelembe. Figyeljük meg, hogy a félhullámú dipól geometriai és elektromos hossza nem azonos, mivel a gyakorlatban nem „végtelen vezetővel” dolgozunk, hanem meghatározott vastagságú vezetővel, továbbá a talaj felett aránylag kis távolságban helyezzük el az antennánkat. A rezonancia érdekében ezeket a hatásokat ki kell egyenlíteni, azaz az antennát az elektromos hosszánál kisebbre kell méretezni. Az alkalmazott huzal, esetleg cső átmérője fontos tényező ebben az esetben. Ezt rövidülési tényezőnek nevezzük. A mi esetünkben viszont (pl. TKV-100-as vezeték vastagsága csekély) elhanyagoljuk ezt a tényezőt, mert a számítások következtében URH tartományban néhány milliméter a rövidülés. Gondoljunk arra, hogy harci körülmények között ekkora pontossággal nem fognak a katonák mérni, ezért már egy előre összeállított értékekkel a legegyszerűbb és leggyorsabb kivitelezni az antennákat.

3.2.1 Méréseknél alkalmazott MH. harcászati rádiók [15]

A méréseknél alkalmazott rádiók: a Kongsberg típusú MRR rádiók (Multi Role Radio), amely a legnagyobb számban alkalmazott típus a Magyar Honvédségben. A méréseknél két alaptípusát alkalmaztuk, az MH-300 (kézi) és MP-300 (háti) rádiókat.

Kongsberg MH-300

Frekvenciatartomány: 30–87.975 MHz (2320 csatorna)

Csatorna sávszélesség : 45 kHz

RF moduláció : GMSK

Kimenő teljesítmény : 16 mW, 1 W

Antennacsatlakozó: BNC 50 Ω

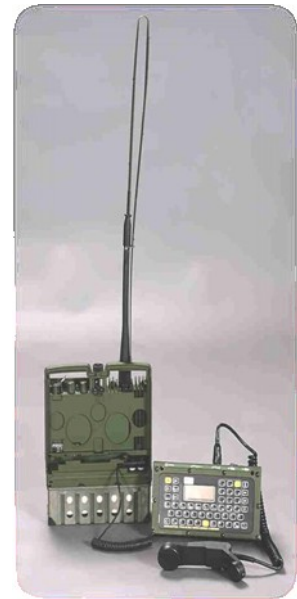
Működési hőmérséklet: -35 °C 55 °C



31. ábra. Kongsberg MH-300

Kongsberg MP-300

Frekvenciatartomány :	30.000 – 87.975 MHz
Csatorna sávszélesség:	45 kHz
RF moduláció típusa	GMSK (gauss eloszlású minimális eltolásos moduláció)
Adatmoduláció	Orthogonal M-ary
Csatornatávolság	25 kHz
Kimenő teljesítmény	10mW, 500 mW vagy 5 W
Antennacsatlakozó	50Ω BNC-csatlakozó



32. ábra. Kongsberg MP-300

3.2.2 Szigetelőanyagok kivitelezése [2][15]

Az antennák megfelelő működésének érdekében szükséges a fémes rögzítő eszközök szigetelőkkel való elválasztása az antennától. Ezek alkalmazása a rögzítési pontoknál, illetve a feszítési részeknél kiemelt fontosságú. Az alábbi ábrán (33. ábra) néhány alternatív „improvizált” szigetelő kivitelezési módot láthatunk.



33. ábra. Alternatív szigetelők

Ezekre a szigetelésekre különös figyelmet kell fordítani, mert ha az antennát nem választjuk el megfelelően, akkor ezáltal a rezonáns hosszúsága megnövekedhet, és nem a várt eredmények fognak mutatkozni. Fontos, hogy megfelelő szigetelő anyagot használjunk. Ezek

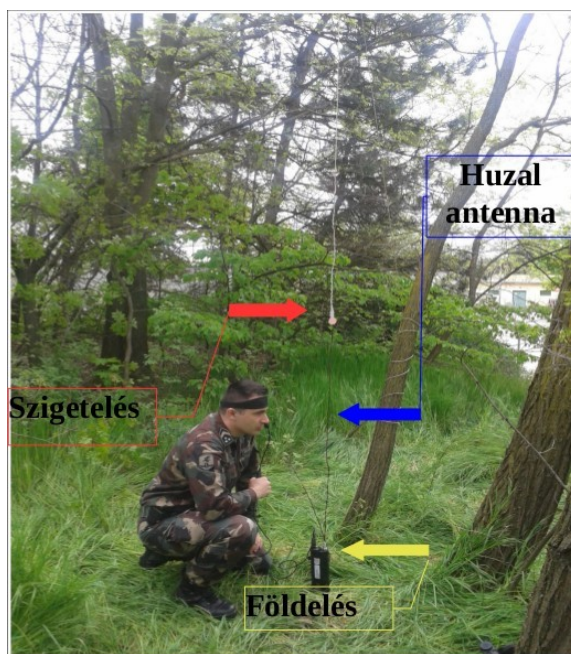
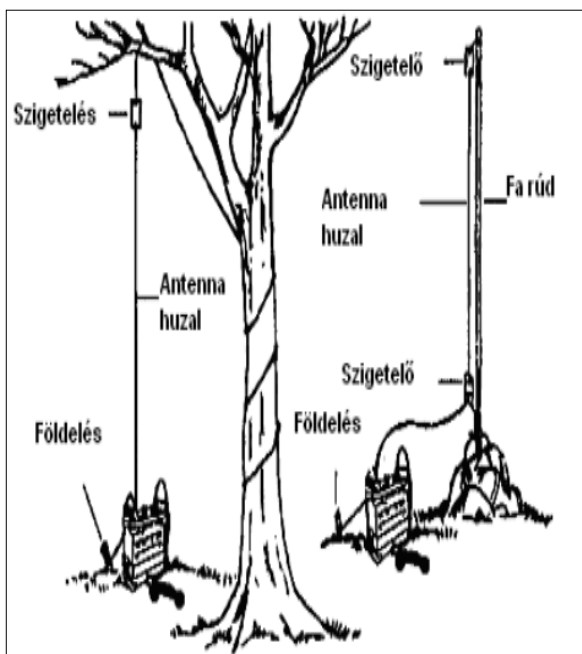
az eszközök, anyagok egy gyakorlat közben akár egy hátizsákban is fellelhetők. Kialakításuk nem igényel nagy szakértelmet, és minimális időt vesz igénybe az elkészítésük. Láthatjuk a képen, hogy akár egy pillepalack több részét is felhasználhatjuk, vagy akár egy póló darabját (száraz textíliát), vagy esetleg száraz fadarab is alkalmassá válhat.

3.2.3 Monopol antenna megoldások [6][15][17]

Monopol antenna megoldások közül némely egyszerűbb és érdekes megoldás megépítésre került. Az megépített antennákat URH frekvenciákon vizsgáltam (analóg üzemmódban) kis teljesítménnyel (1-5 W, különböző korszerű harcászati rádióeszközökkel) és ehhez mérten reális távolságon belül, közepesen beépített területen (1-1,5 km). Az antennák megépítésénél alkalmazott „frekvencia-improvizált antennahossz táblázat” sikeresnek bizonyult, amely a későbbiekben (3.3 fejezet) lesz részletesen bemutatva. Az épített antennák „jól vizsgáztak”, mivel mindegyikkel sikeres összeköttetést tudtunk létrehozni.

Egyszerű monopol szükségantenna

Monopol szükségantennák készítésének legegyszerűbb példája a 34. ábrán látható. Az antenna hosszát gyorsan meghatározhatjuk a korábbi (illetve a 3.3 részben található táblázat szerint) összefüggés alapján, majd a megfelelő hosszú vezető szálból levágva, egyik végét csatlakoztatjuk a táplálási ponthoz, azaz a rádió adóvevőjének rádiófrekvenciás kimenetéhez.

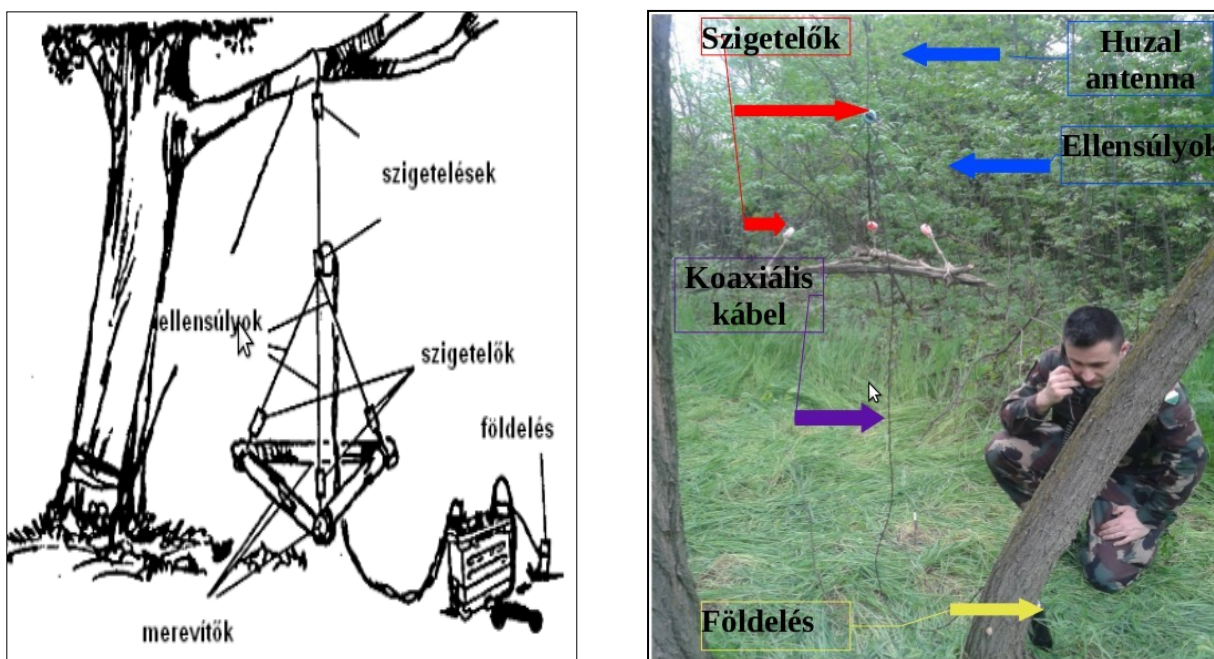


34. ábra. Hagyományos monopol szükségantennák, és ezek alapján megépítve a gyakorlatban

A másik végét az 34. ábrán látható módon, a szigetelőanyagok közbeiktatásával valamilyen magas rögzítési ponthoz kötjük. A rádiót célszerű „letestelni”, azaz leföldelni. Így a talaj egyfelelől ellensúlyt (rádiófrekvenciás tükröt) képez, ami a karakterisztika szimmetriáját, illetve a földfelszínen, a fősugárzási síkban a térerősséget megnöveli. Ennek függvényében a várható hatótávolság jelentősen megnövekedhet. A megépített antennát (magaslaton) 1km-re lévő ellenállomással, 1W teljesítménnyel, 34 MHz körüli frekvencián (táblázat szerinti hosszúsággal, huzalból készült antennával) tesztelve, 3/4-es beszédérthetőséget (a beszéd érthetősége 1-5 pontig értékelhető forgalmazási minőség) értünk el.

Groundplane antenna

A 35. ábrán a Groundplane antennának a kivitelezését láthatjuk, amelyet olyan esetekben célszerű alkalmazni, amikor az antennát föld-függetlenül, magasan a talajszint felett kell telepíteni. A kiképzési foglalkozás során törekedtem a szemléltetésre, ezért szigetelőnek jól látható anyagot használtam. A valóságban viszont törekedni kell arra, hogy az antenna a környezetbe beolvadjon. A készítésénél olyan eszközöket kell használni, ami a közvetlen környezetünkben találhatóak, mert az álcázásnál itt is fontos, hogy ne váljunk felfedhetővé. Az antenna elkészítésénél az ellensúlyok $\lambda/4$ hosszúságúak és egy szabályos háromszög alapú gúlat alkotnak, amelyek $\lambda/4$ hosszúságú függőleges sugárzóval 130° szöget zárnak be.

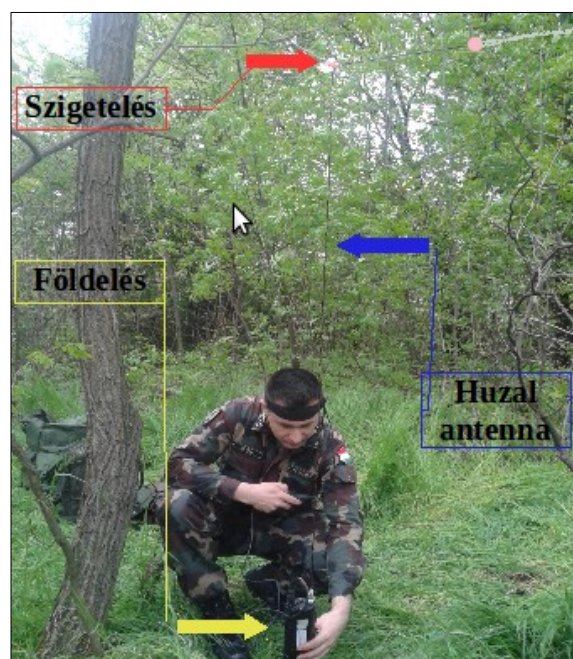
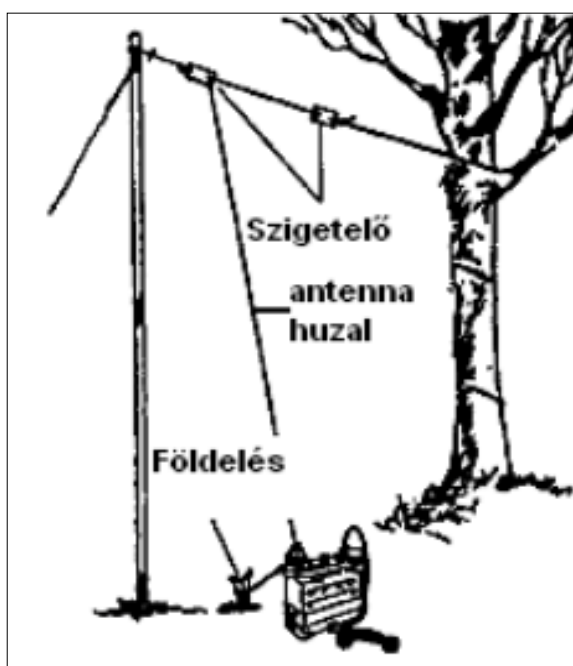


35. ábra. Groundplane szükségantenna, és ennek alapján megépítve gyakorlatban

A sugárzó és az ellensúlyok egymástól el vannak szigetelve. Az antenna aszimmetrikus áramtáplálású, így a sugárzó és az ellensúly végeken feszültségmaximum jön létre. A sugárzó és az ellensúlyok által bezárt szög növelése által az antenna talpponti impedanciája nagyobb lesz, hozzávetőlegesen 50 ohm, így 50 ohmos koaxiális kábellel közvetlenül is táplálható. A sugárzó méretezésénél, figyelembe kell venni az antenna sugárzási jelgörbe alakulását, illetve a tereptárgyaktól mentes környezetben legalább $\lambda/4$ magasságig felemelni „rögzíteni”. A megépített antennát (magaslaton) az 1km-re lévő ellenállomással 1W teljesítménnyel, megközelítőleg 86 MHz körüli frekvencián (táblázat szerinti hosszúsággal készült antennával, illetve ellensúlyokkal) tesztelve 3/3-as beszéd érthetőséget, azaz közepes minőséget értünk el.

Tetőkapacitív résszel ellátott monopol antenna

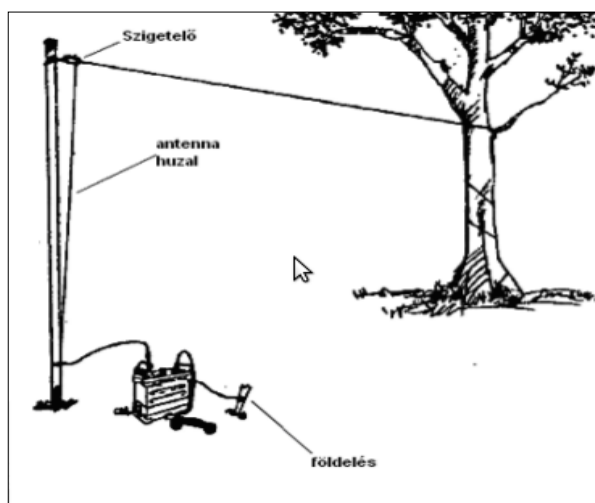
Ezzel az antenna típussal elméletben és ebben az esetben, gyakorlatban is jobb minőséget értünk el, mint a többi antennával. A megoldás (36.ábra) abban rejlik, hogy a vezető szálunk felső hajlított részével az antennánk elektromos hossza nagyobbnak látszik. Ez a kialakítás akkor is előnyös lehet, ha a rendelkezésünkre álló vezeték kevés. A kiépítés során az antenna vége egy fához lett rögzítve szigetelő közbeiktatásával, illetve a hajlat kialakításánál szintén hasonló megoldás lett kialakítva. Lényegesen jobb eredményt tudunk elérni, ha a vezetők koaxiális kábel (árnyékoló és a belső vezető szál összekötésével).



36. ábra. Tetőkapacitív szükségantenna, és ennek alapján megépítve gyakorlatban

Ezt a megoldást alkalmazva a vezetők (antennák) átmérőjét megnövelnénk, ami a kisugárzás szempontjából jobb tulajdonságokkal ruházza fel antennánkat, pluszba sávszélesség és teljesítmény kisugárzás terén hozhat javulást. A megépített antennát (magaslaton) az 1km-re lévő ellen-állomással 1W teljesítménnyel, 34 MHz körüli frekvencián (táblázat szerinti hosszúságnak megfelelően épített antennával) tesztelve 4/4-es beszédérthetőséget értünk el.

Ha nagyobb hosszúságú vezeték áll rendelkezésünkre a kiépítésnél, akkor a 37. ábrán látható módon építhetünk nagyobb tetőkapacitással rendelkező antennát.



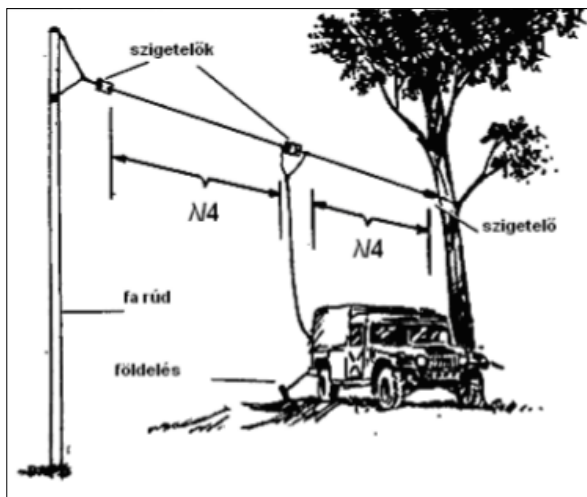
37. ábra. Félhullámú tetőkapacitív monopól antenna

Ezzel az antennával nagyobb frekvenciatartományt tudunk lefogni, ez abban az esetben nyújthat könnyedséget, ha két egymástól távolabb lévő frekvenciának is meg kell feleljen az antennánk. Ebben az esetben arra kell törekedni, hogy a két távolabbi frekvencia hullámhossza $\lambda/4 < l < \lambda/2$ között legyen.

3.2.4 Dipól antenna megoldások [6][16][17]

Ezt az antennát általában az eredeti dipól antenna pótlására használják abban az esetben, ha az eredeti antenna megsérülne vagy elszakadna. Ezt az antennát félhullámú dipólus antennának nevezzük. Kialakítását tekintve a 38. ábrán láthatjuk. A „félhullámú” kifejezés arra utal, hogy az antenna azon a frekvencián rezonál, amelyen az antenna geometriai hossza éppen a fele. A kialakítás a legegyszerűbb dipól antennák egyike, a horizontálisan polarizált dipól. Láthatjuk, hogy a kifeszített végek (akár oszlophoz, akár fához) illetve a két vezető szál szigetelővel van elválasztva, és középről vannak meg táplálva.

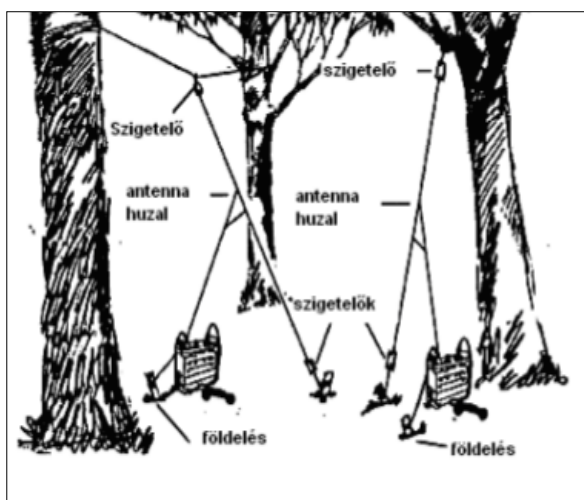
A megfelelő hullámhossz ebben az esetben megegyezik $\lambda/4$ -el. Ha több frekvenciát szeretnénk használni, akkor itt is szintén vegyük figyelembe az iránykarakterisztikát és ennek függvényében válaszuk ki a megfelelő hullámhosszt, ami $\lambda/4 < l < \lambda/2$ legyen.



38. ábra. Horizontálisan polarizált dipól antenna

Abban az esetben, ha az ellenállomás iránya ismert és bepozícionálható, akkor érdemes a jobb minőség érdekében a 180° szöget (két vezető szál által bezárt szög) az ellenállomás irányába kisebbre venni, mert arányosan ebbe az irányba nagyobb teljesítmény sugározható ki, ezáltal növelhető a hatótávolság (fordított arányosság van a bezárt szög és a kisugárzott teljesítmény között irány szerint).

A 39. ábrán látható antenna kialakítása hasonló az előbbihez, viszont itt a polarizáció ellentétes, ezért ezt az antennát vertikálisan polarizált antennának nevezzük.

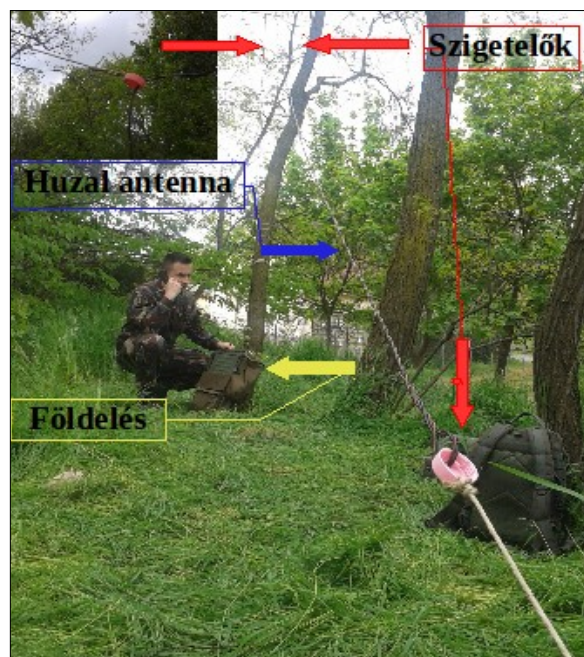
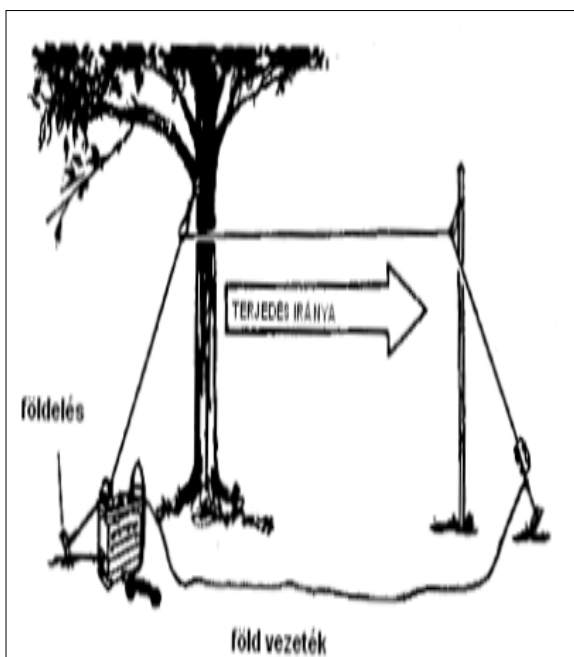


39. ábra. Vertikálisan polarizált dipól

3.2.5 Haladóhullámú antennák megoldásai [16][17][18]

Az 40. ábrán az egyik legegyszerűbb antenna típus látható, amelyet egyaránt alkalmazhatunk URH illetve RH frekvenciatartományban. Ez az antenna az iránykarakterisztikáját és felépítését tekintve az egyik legkedveltebb antenna. Láthatjuk, hogy többféleképpen kiépíthető. A 40. ábrán látható antenna két szigetelővel van elválasztva a környezetétől, és a vezetősál 45° -os szögben van rögzítve.

Egy gyakorlati kísérlet keretében teszteltünk egy haladó hullámú szükségantennát (más néven lejt antennát) erősen szegdelt, urbanizált területen 5W adóteljesítménnyel és 50. MHz körüli frekvencián egy korszerű URH MRR harcászati rádióval [18]. Referenciaértéknek a rádiók rendszeresített antennáit alkalmaztuk (antennacsonk, szalagantenna, félbehajtott szalagantenna, 1,9m-es botantenna, gépjárműves antenna). A lejt antenna egy megközelítőleg 5λ hosszúságú vezető szárból állt. A 2. táblázatban látható mért értékek alapján, a szükség antenna több esetben is jobban teljesített gyári társaival szemben, a választott antenna előnyösebb tulajdonságainak köszönhetően.



40. ábra. Trapéz alakú haladó hullámú szükségantenna, és ez alapján megépítve a lejtantenna

2. táblázat. Különböző antennák mérése URH tartományban

Mérések	ÁLLOMÁS 1			ÁLLOMÁS 2		
	Antenna típusa	Vétel (decibel)	Zajérték (decibel)	Antenna típusa	Vétel (decibel)	Zajérték (decibel)
1	Szalagantenna	38	10	Csonk	64	00
2	Szalagantenna	27	23	Szalagantenna	48	01
3	Szalagantenna	22	21	Félbehajtott szalagantenna	44	00
4	Szalagantenna	66	09	Lejtantenna	80	03
5	Szalagantenna	27	24	1,9 m bot antenna	56	03
6	Félbehajtott szalagantenna	29	23	Szalagantenna	49	02
7	Félbehajtott szalagantenna	44	21	Lejtantenna	72	02
8	Félbehajtott szalagantenna	28	06	Csonk	58	00
9	Félbehajtott szalagantenna	37	09	Félbehajtott szalagantenna	63	02
10	Félbehajtott szalagantenna	31	22	1,9 m bot antenna	57	03
11	1,9 m bot antenna	68	25	1,9 m bot antenna	80	04
12	1,9 m bot antenna	27	24	Szalagantenna	56	03
13	1,9 m bot antenna	22	24	Félbehajtott szalagantenna	42	02
14	1,9 m bot antenna	53	22	Lejtantenna	79	02
15	Gépjárműves antenna	71	08	Lejtantenna	80	03

3.3 Improvizált antennák megvalósítására vonatkozó javaslatok [15]

Az előző fejezetekben ismertetett képletek alapján kiszámolhatjuk a félhullámú dipól antennához szükséges hullámhosszt ($\lambda/2$) mindkét tartományban. Ezekből az összefüggésekből, értékekből a monopól antennához tartozó hullámhossz ($\lambda/4$) is meghatározó.

Excel táblázat és a megfelelő függvény használatával (a gyorsabb számítás érdekében) könnyen kiszámíthatóvá válnak a tartományokra (URH, RH) vonatkozó megfelelő hullámhosszúságok. A kapott értékeket frekvencia függvényében táblázatba rendezve, illetve a megfelelő átszerkesztésekkel és rajzokkal kiegészítve jó segítségnek bizonyulhatnak. Így még bázis körülmények között felkészülhetünk a későbbi alkalmazásra. A táblázatba foglalt hullámhosszúságok frekvencia függvényében 30-88 MHz-ig tartanak. Azért bontottam csak erre a tartományra, mert a Magyar Honvédségben a leggyakrabban használt rádió (Kongsberg harcászati rádió) frekvenciatartományának felel meg.

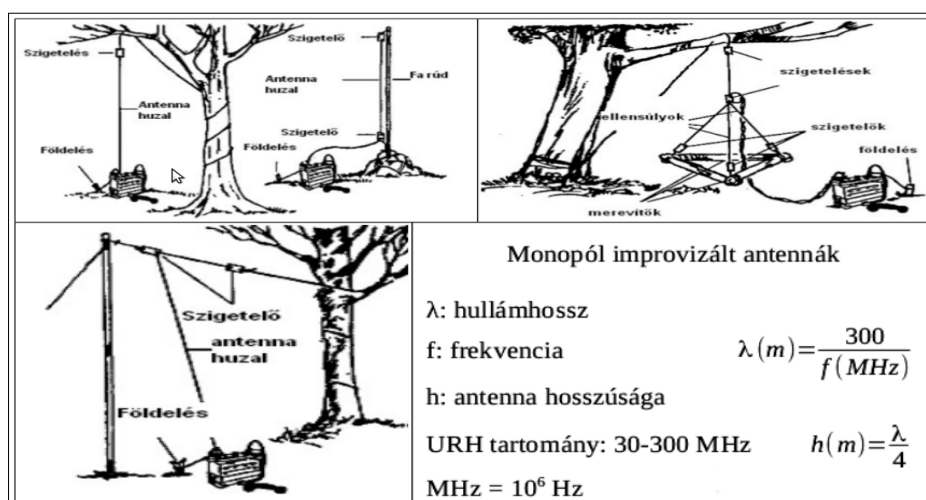
A katonák kerülhetnek különböző nem várt helyzetekbe, ahol hirtelen cselekedni kell és a különböző felmerülő problémák tükrében gyors megoldásra van szükség. Ilyen helyzetek például a MEDAVAC⁴ vagy METHANE⁵ jelentések leadása, amelyekre külön kialakított kártyák állnak a katonák rendelkezésére. Ezen kártyák mindig a katonánál vannak, hogy veszély helyzetben segítségükre legyenek. Ezen kialakult helyzetekben a katona nem engedheti meg magának a késlekedést! Személyes tapasztalatból és tudományos kutatásokból ismert, hogy stressz, vagy nagy nyomás alatt lévő katona nem tudja visszaadni 100%-ban a megszerzett tudást vagy megfelelően feleleveníteni a szükséges információt (adatok, képletek, improvizált antenna rajzok, megoldások, kivitelezések), a motorikus reflexek lecsökkennek, csak egyszerűbb feladatok elvégzésére lesznek képesek. Viszont e kártyák (3. táblázat) segítségével lerövidíthetjük a rendelkezésre álló időt és feladatukat a célnak megfelelően pontosan elvégezhetik. Ezen kártyák alapján, javasolom az improvizált antennák megépítésére vonatkozó megoldást. Az általam szerkesztett kártya tartalmazza az improvizált antennák vázlatrajzait (41. ábra), fontosabb összefüggéseit, illetve a frekvenciatartományokhoz tartozó antenna hosszúságait. A kártya lényege, hogy a gyakorlatban segítséget nyújtson, azaz az oktatásokon elhangzottak az előbbieken vázolt helyzetekben is akadály nélkül végrehajtásra kerüljenek. Gondoljunk arra az esetre, hogy a katona nem mindig lesz olyan szituációban, hogy különböző képletekkel (akár számológéppel) számoljon, vagy akár antennákat szerkesszen, ezért e kártya segítségével a szükséges lépések lényeges leegyszerűsítésre kerültek.

⁴MEDICAL EVACUATION „Egészségügyi kiürítés”.

⁵ Katonai agronómia , jelentési forma.

3. táblázat. Improvizált antenna hosszak a frekvencia függvényében

f(MHz)	h(m)	f(MHz)	h(m)	f(MHz)	h(m)	f(MHz)	h(m)	f(MHz)	h(m)	f(MHz)	h(m)
30	2,5	40	1,88	50	1,50	60	1,25	70	1,07	80	0,94
31	2,42	41	1,83	51	1,47	61	1,23	71	1,06	81	0,93
32	2,34	42	1,79	52	1,44	62	1,21	72	1,04	82	0,91
33	2,27	43	1,74	53	1,42	63	1,19	73	1,03	83	0,90
34	2,21	44	1,70	54	1,39	64	1,17	74	1,01	84	0,89
35	2,14	45	1,65	55	1,36	65	1,15	75	1,00	85	0,88
36	2,08	46	1,63	56	1,34	66	1,14	76	0,99	86	0,87
37	2,03	47	1,60	57	1,32	67	1,12	77	0,97	87	0,86
38	1,97	48	1,56	58	1,29	68	1,10	78	0,96	88	0,85
39	1,92	49	1,53	59	1,27	69	1,09	79	0,95		



4.ábra. Monopól improvizált antennák „segédleti kártya”

Összegzés

Korunk információs műveleteiben komoly feladat hárul a csapatok szervezet-, és nem szervezetszerű rádiós katonáira. Az antennák esetleges törése, szakadása során azok javítása emelt szintű ismereteket követel meg a katonáktól. Egyes nyugati hadseregek ezeket az oktatási kérdéseket beemelték kiképzési programjaikba, szabályzókat, és oktatási segédleteket hoztak létre (pl.: USA hadserege), azonban a Magyar Honvédség kiképzési tematikájából egyelőre kimaradtak ezek a foglalkozások (egy-egy egyedi esettől eltekintve). Személyes műveleti tapasztalataim és a tudományos kutatásokat tanulmányozva arra a következtetésre jutottam, hogy ezekre az ismeretekre itthon is szüksége van a katonáknak.

Kutatásaim során összegyűjtöttem, rendszereztem a fellelhető szakirodalmat, ezekből igyekeztem egy olyan összegzést készíteni, amely jó alapot szolgáltat az elméleti és gyakorlati szükségantenna készítési foglalkozásokhoz. Különös figyelmet fordítottam az elméleti-fizikai alapokra, hogy azok a példákon keresztül segítsék a könnyebb megértést. Rádióamatőr és más fizika tankönyveket felhasználva igyekeztem más megvilágításba helyezni ezen ismereteket. Kísérleteimben összehasonlítottam a korszerű harcászati rádiókhoz rendszeresített antennákat az általam készített improvizált antennákkal. A kísérletek eredményeként és az eddigi kiképzési tapasztalatim alapján bemutattam néhány olyan szükségantennát, amelyek nagy eséllyel jól alkalmazhatók a katonai mindennapokban, elkészítésük, oktatásuk jó hatásokkal bír.

Irodalmi Jegyzék

- [1] Dr. Haig Zsolt- Dr.Várhegyi István: Információs műveletek I. kötet, Egyetemi jegyzet: Budapest 2004. pp. 88-119.
- [2] Dr. Bárdos Sándor (1975): Közösségi vevőantenna-rendszerek, Műszaki könyvkiadó.
- [3] N.M.Izjumov (1951): Rádiótechnikai Tanfolyam: Tankönyvkiadó.
- [4] V.G.Boriszov (1953): A kezdő rádióamatőr, Népszava.
- [5] I.Grekov (1955): Rezonancia, Műszaki könyvkiadó.
- [6] Karl Rothhammer(1977): Antenna könyv, Műszaki könyvkiadó.
- [7] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó.
- [8] Holics László: Fizika III, Nemzeti Tankönyvkiadó.
- [9] dr. Jurisits József, dr. Szűcs József (2005): Fizika 10, Mozaik kiadó.
- [10] Jurisits József, Pál Tamás, Venczel Ottó (1989): Fizika V, Nemzeti Tankönyvkiadó.
- [11] Klatsmányi Béla, Pintér István (1995): Elektronikus Készülékek, Műszaki könyvkiadó.
- [12] Jóvér Balázs (2001): Rádióhullámok és antennák, BME.
- [13] Flórián Endre (1956): Hullámterjedés, Műszaki könyvkiadó.
- [14] Stefanik Pál (1978): Rádióamatőrök kézikönyve, Zrínyi Katonai Kiadó.
- [15] Károly Krisztián (2014 megjelenés előtt): Improvizált antennák alkalmazási lehetőségei a Magyar Honvédségben, Társadalom és Honvédelem (folyóirat): ISSN 1417-7293, Nemzeti Közzolgálati Egyetem
- [16] US Marine Corps Antenna Handbook <http://www.scribd.com/doc/299766/USMC-Field-Antenna-Handbook>
- [17] FM 23-10 Cheapter 7 Communication: <http://www.biggerhammer.net/manuals/23-10/ch7.htm>
- [18] A mérési kísérletet Károly Krisztián és a szerző végezte

Ábrajegyzék

- [1] <http://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/Hullam.htm>
- [2] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 457.p.
- [3] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 553.p.
- [4] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 553.p.
- [5] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 554.p
- [6] Szerző műve
- [7] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 572.p
- [8] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 573.p

- [9] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 570.p.
- [10] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 570.p.
- [11] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 571.p.
- [12] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 571.p.
- [13] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 572.p.
- [14] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 581.p
- [15] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 582.p.
- [16] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 612.p.
- [17] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 614.p.
- [18] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 617.p.
- [19] Szerző műve
- [20] Szerző műve
- [21] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 621.p.
- [22] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 621.p
- [23] Holics László (2009): Fizika, Akadémia kiadó, 716-717.p.
- [24] http://94.199.180.149/html/dpi/efeladat/sz_etankonyv/tankonyv.php?p_id=80123
- [25] Jóvér Balázs (2001): Rádióhullámok és antennák, BME, 13.p
- [26] <http://egbolt.atw.hu/atmosfera.html>
- [27] Jóvér Balázs (2001): Rádióhullámok és antennák, BME, 6.p.
- [28] <http://Wiki.ham.hu/index.php/F%C3%A1jl:Dip1.jpg>
- [29] http://en.wikipedia.org/wiki/Monopole_antenna
- [30] Károly Krisztián (2013): Improvizált antennák alkalmazási lehetőségei a Magyar Honvédségben
- [31] Szerző műve
- [32] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.4. alapján szerkesztette a szerző
- [33] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.16. alapján szerkesztette a szerző
- [34] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.5. alapján szerkesztette a szerző
- [35] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.7. alapján szerkesztette a szerző
- [36] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.8. alapján szerkesztette a szerző
- [37] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.9. alapján szerkesztette a szerző
- [38] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.4. alapján szerkesztette a szerző
- [39] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.16. alapján szerkesztette a szerző
- [41] FM 23-10 Cheapter 7 Communication p.5. alapján szerkesztette a szerző
- [42] Szerző műve

Táblázatok

[1] Szerző műve

[2] Szerző műve

[3] Szerző műve