

1. SZÁMÚ FÜGGELÉK (A PÁLYAMŰ BORÍTÓLAPJÁNAK MINTÁJA)

36. Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Had- és Rendészettudományi Szekció
Budapest, 2023. április 18-20.
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Rendészettudományi Kar

Rádió iránymérési eljárások szoftverrádiós megoldásokkal történő szemléltetésének lehetőségei

Jelige: *koktélcseresznye*

Pályamunka lezárásának időpontja: 2022.08.

2023.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	3
1. RÁDIÓ IRÁNYMÉRÉS SZEREPE AZ ELEKTRONIKAI HADVISELÉSBEN.....	5
1.1. Elektronikai támadás	5
1.2. Elektronikai védelem	6
1.3. Elektronikai megfigyelés	6
1.4. Az elektronikai hadviselés funkciói.....	7
2. RÁDIÓ IRÁNYMÉRÉS	8
2.1. Forgó antenna-karakterisztikájú iránymérő rendszerek	9
2.1.1. Bellini-Tosi elv.....	12
2.1.2. Hurokantennák alkalmazásának fizikai korlátai	16
2.1.3. Adcock antennák.....	16
2.2. CDAA rendszerek	23
2.3. Doppler/ Pszeudó-doppler rádió iránymérők	27
2.3.1. Doppler jelenség.....	27
2.3.2. Doppler rádió iránymérő rendszer.....	28
2.3.3. Pszeudó-doppler rádió iránymérő rendszer	30
2.4. Korrelációs interferometrián alapuló rádió iránymérő rendszerek	34
2.4.1. Interferometria	34
2.4.2. Interferometria a rádió iránymérésben	35
2.4.3. Az iránymérés kétértelműségének kérdése	38
2.4.4. Korrelatív interferometria	38
2.5. Jelterjedési időkülönbség (TDOA) mérésének elvén működő rádió iránymérő/helymeghatározó rendszerek	41
2.6. Hibrid iránymérési megoldások	45
3. SZOFTVERVEZÉRELT RÁDIÓK ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGE	47
3.1. Működési elv	48
3.2. Lehetőséges alkalmazási területek.....	49
3.3. Iránymérő rendszerek SDR-ek segítségével történő modellezési lehetőségei.....	51
3.4. Rádió iránymérő berendezések szoftver vezérelt rádió rendszerek segítségével történő modellezésének előnyei az oktatásban	56
ÖSSZEFOGLALÁS	57
HIVATKOZÁSOK.....	58

BEVEZETÉS

A hadviselés egyidős az emberiség történelmével és folyamatos kölcsönhatásban van vele. A háborúk a világ kezdete óta nagy hatást gyakoroltak az különféle kultúrák, civilizációk vagy akár az egész emberiség fejlődésének, alakulásának irányára. Az ellenségeskedés, a fegyveres szembenállás rengeteg negatív hatása mellett rendelkezett pozitív következményekkel is: nagyon sokáig a hadviselés képezte a technológiai fejlődés hajómotorját. A szándék, hogy a saját erők technológiai fölényre tegyenek szert az ellenséges csaptokkal szemben, így növelve a siker esélyét, gyakran olyan tudásanyag létrejöttét vont maga után, mely a későbbiekben a polgári lakosság javát szolgálta. Elég csak a gyógyászat terén a traumatológiai, sebészeti eljárásokra gondolni, de ide sorolhatnánk az olyan mérnöki áttöréseket is, mint a szintetikus üzemanyagok vagy akár a rakétatechnológia, mely nélkül a holdraszállás, vagy a ma oly széles körben használt műholdak föld körüli pályára állítása megvalósíthatatlan álom lenne csupán.

A történelem előrehaladtával egyre jelentősebbé vált a technológiai fejlődés tekintetében a polgári szegmens is. Napjainkban a hadviselés egyre gyakrabban vesz át, fejleszt tovább és alkalmaz olyan technológiai megoldásokat, melyek eredetileg békés polgári célokra lettek feltalálva, gondoljunk csak maghasítás elvére vagy a vezeték nélküli kommunikációra.

A hadviselés fejlődésben a legnagyobb ugrást az elektromosság és az elektromágneses hullámok révén történő kommunikáció lehetőségeink implementálása jelentette. A hadviselés egy következő korba lépett: lehetőség nyílt viszonylag nagy távolságú, valós idejű kommunikációra az egyes katonai alakulatok között, ami új dimenzióba helyezte a csaptok irányítását és vezetését, addig soha nem látott komplexitású manővereket és koordinációt téve lehetővé. Hamar megjelent az igény az ellenséges rádiókommunikáció felderítésére, akadályozásra és az ellenséges elektromágneses sugárforrások helyének meghatározására. Ez az igény hívta életre a hadviselés azon szegmensét, amelyet napjainkban elektronikai hadviselésként ismerünk.

Az elektronikai hadviselés nélkül nem képzelhetők el a modern háborúk. Jó példa erre 2022 februárjában Oroszország által Ukrajna ellen indított támadás is, mely esetén jól megfigyelhető, hogy az elektromágneses spektrum megfelelő kihasználásért, birtoklásáért vívott küzdelem az összhaderőnemi harc fontos elemévé vált. Éppen ezért különösen fontos, hogy a jövő elektronikai hadviselési tisztjei szakmájuk mesterei legyenek, felkészültségük kifogástalan, ismereteik naprakészek legyenek. Ez csak akkor valósulhat meg, ha nem csak a technikai

eszközök tekintetében követi a fejlődést a haderő, hanem a személyi állomány kiképzésébe, felkészítésébe is integrálásra kerülnek az oktatási területen megjelenő újítások, trendek. Ebben a tekintetben kiemelt fontosságú a műszaki képzésekben sikerrel alkalmazható projekt alapú oktatási módszer alkalmazásának kiterjesztése a katonai oktatási területre is.

Ezen dolgozat tartalmi keretein belül az elektronikai hadviselés alapfogalmainak rövid ismertetésén túl, a rádió iránymérési megoldásokkal kapcsolatos ismeretek átadásának egy újfajta megközelítése, annak implementálási lehetőségei kerülnek vizsgálatra.

1. RÁDIÓ IRÁNYMÉRÉS SZEREPE AZ ELEKTRONIKAI HADVISELÉSBEN

Az elektronikai hadviselés (EW¹) az erők azon képessége, mely lehetővé teszi az elektromágneses spektrum saját célok elérése érdekében történő hatékony kihasználását, legyen szó rádió adóvevő állomásokról, radarokról vagy akár infravörös tartományban üzemelő felderítő eszközökről. Az elektronikai hadviselés célja továbbá, hogy a szembenálló erőket gátolja ezen lehetőségek kiaknázásában. [1]

A magyar katonai terminológia vonatkozásában az elektronikai hadviselés fogalmának meghatározását a Magyar Honvédség Összhaderőnemi Elektronikai Hadviselés Doktrínája fogalmazza meg:

„Az elektronikai hadviselés olyan katonai tevékenység, amely elektromágneses környezetben, az elektromágneses energia tudatos használatával biztosítja az elektromágneses műveletek részeként végrehajtott támadó és védelmi jellegű hatások/célok elérését.”² [2]

Elektromágneses környezetnek nevezzük egy adott környezetben létező elektromágneses jelenségek összességét. Az elektromágnes környezet képezi a fegyveres küzdelem elektromágneses színterét, ahol a szembenálló fegyveres erők elektromágneses jelek kisugárzása és vétele alapján működő eszközei tevékenységet folytatnak. [3]

A Magyar Honvédség Összhaderőnemi Elektronikai Hadviselés Doktrínájának megfelelően az elektronikai hadviselés három fő területre osztható fel:

- elektronikai támadás (EA³);
- elektronikai védelem (ED⁴);
- elektronikai megfigyelés (ES⁵).

1.1. Elektronikai támadás

Az elektronikai támadás az elektronikai hadviselés azon részterülete, amely az elektromágneses energiát olyan céllal alkalmazza, hogy ellehetetlenítse a szembenálló fél számára az elektromágneses környezet hatékony kihasználását. Ezen törekvés magába foglalja az ellenséges

¹ EW – Electronic Warfare

² Forrás: Magyar Honvédség Összhaderőnemi Elektronikai Hadviselés Doktrína, 12. oldal

³ EA – Electronic Attack

⁴ ED – Electronic Defence

⁵ ES – Electronic Surveillance

vezetési- és irányítási rendszerek (C2⁶) működésének akadályozását, megbontását, gyengítését, megtevesztését vagy akár pusztítását, semlegesítését is. [2]

A gyakorlatban ezen terület ritkán kerül önállóan alkalmazásra, általában kiegészül az elektronikai támadással és/vagy elektronikai védelemmel, hiszen a megfelelő működés feltételezi a szembenálló fél elektronikai harcrendjének (EOB⁷) beható ismeretét.

1.2. Elektronikai védelem

Az elektronikai védelem célja az elektromágneses környezet saját egységek által történő minél hatékonyabb felhasználásának biztosítása az elektromágnes energiák megfelelő alkalmazása révén.

„Az elektronikai védelem alkalmazható többek között olyan saját elektromágneses műveletként, mint az elektronikai felderítés, a megfigyelés, a célmegjelölés (pl: ISTAR képességen belül)⁸ és a hálózat-alapú képességek védelmére az ellenség elektronikai támadása ellen.”⁹ [2]

Az elektronikai védelem fő célkitűzése önállóan vagy más területek bevonásával erők, eszközök, rendszerek, esetenként személyek védelme. Eszközei lehetnek irányított energiájú fegyverek és/vagy elektronikai zavarás megvalósítására alkalmas berendezések. Kiváló példa erre műveleti területen a rádióvezérelt improvizált robbanóeszközök (RCIED¹⁰) elleni védelem.

1.3. Elektronikai megfigyelés

Az elektronikai megfigyelés célja a folyó műveletek során figyelmeztetést vagy vészjelzést biztosítani a műveletekbe bevont alakulatok parancsnokainak és az alakulatok döntéshozók és segítők szervei (törzs) számára, a szembenálló erők elektromágnes térben kifejtett tevékenységnek megfigyelése révén. Ez elektronikai megfigyelés biztosítja továbbá döntéshozók és segítők számára az elektromágneses környezet tekintetében a helyzetismeret (SSA¹¹) minél magasabb szinten tartását az ellenfél elektronikai harcrendjének körvonalazásával és folyamatos pontosításával.

⁶ C2 – Command and Control

⁷ EOB – Electronic Order of Battle

⁸ ISTAR – Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance

⁹ Forrás: Magyar Honvédség Összhaderőnemi Elektronikai Hadviselés Doktrína, 13. oldal

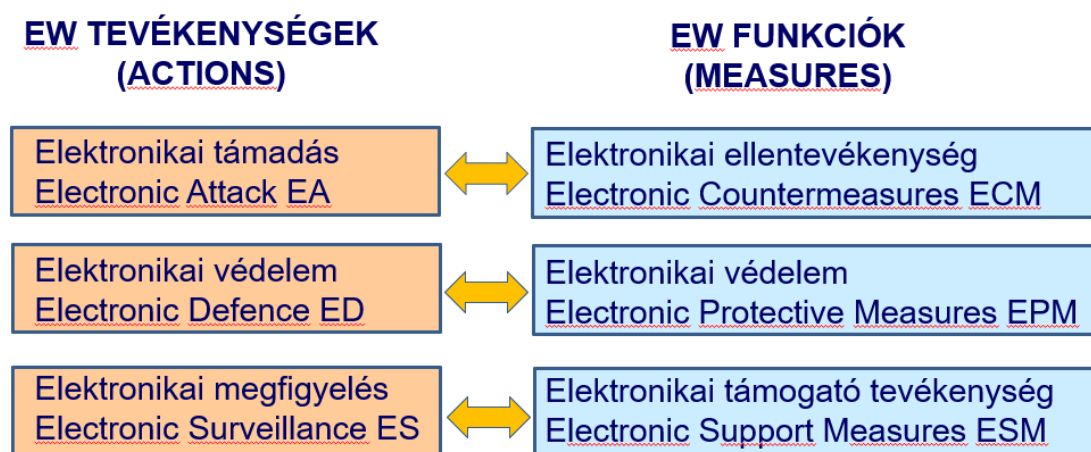
¹⁰ RCIED – Radio Controlled Improvised Explosive Device

¹¹ SSA – Shared Situational Awareness

1.4. Az elektronikai hadviselés funkciói

Az elektronikai hadviselés előbbiekben ismertetett területeihez (más megnevezéssel élve tevékenységeihez) különböző funkciók rendlehetőek (lásd 1. ábra). Ezek a következők:

- elektronikai támogatási funkció (ESM¹²);
- elektronikai ellentevékenységi funkció (ECM¹³);
- elektronikai védelmi funkció (EPM¹⁴).



1. ábra Elektronikai hadviselés tevékenységei és funkciói¹⁵

Ezen dolgozat szempontjából kiemelkedő fontossága az elektronikai megfigyelésnek és a hozzá társuló elektronikai támogató tevékenységnek van, hiszen annak ellenére, hogy más funkció esetében is megjelenik a rádió iránymérés és a pozíciómeghatározás, azok leghangsúlyosabban itt érhetők tetten. Jól illusztrálják ezt az elektronikai hadviselési doktrína vonatkozó sorai is:

„Az elektronikai támogatás az elektronikai hadviselés azon funkciója, amely az ellenség helyzetére vonatkozó tájékozottság és a fenyegetés késedelem nélküli felismerése céljából magában foglalja az elektromágneses kisugárzások kutatását, felfedését és azonosítását, valamint a kisugárzók helyének meghatározását.” [2]

¹² ESM – Electronic Support Measures

¹³ ECM – Electronic Counter Measures

¹⁴ EPM – Electronic Protective Measures

¹⁵ Forrás: e. t. Prof. dr. Haig Zsolt ezredes, *Elektroniaki Hadviselés bevezető előadás*, Nemzeti Közsolgálati Egyetem Elektroniaki Hadviselés Tanszék, 11. dia

2. RÁDIÓ IRÁNYMÉRÉS

A rádió iránymérés (RDF¹⁶) az elektronikai hadviselés, azon belül is a SIGINT¹⁷/ESM¹⁸, fontos eleme. A rádióiránymérés célja valamely tetszőleges forrású elektromágneses sugárzás irányvonalának (LOB¹⁹) a rádióhullámok terjedési sajátosságainak segítségével történő meghatározása. [4]

A rádióiránymérés és helymeghatározás eszköze a rádió iránymérő. A rádió iránymérő egy olyan elektronikai eszköz, mely az elektromágneses hullámok beérkezési irányának (vagy azimutjának) egy meghatározott referencia irányhoz vonatkoztatott meghatározására szolgál. Minden iránymérő berendezésnek rendelkeznie kell a következő három alapvető szerkezeti elemmel, melyek a következők: antennarendszer, vevőberendezés, valamint jelfeldolgozó processzor.

A korszerű iránymérési technikákat rendszerint három fő csoportra szokták felosztani: amplitúdó-érzékeny iránymérés, fázis-érzékeny iránymérés, valamint jelterjedési időkülönbség mérésén alapuló iránymérés.

Eredetét tekintve a rádióiránymérés majdnem egyidős magával a rádióval. A legkorábbi elektromágneses sugárforrás irányának megállapításához fűződő dokumentált kísérletek 1888-ból származnak és Heinrich Rudolf Hertz német fizikushoz köthetők. Hertz felfedezte egy nyílt hurok antennával kísérletezve, hogy az adott antenna valamilyen szintű irányítottsággal rendelkezik. Amikor az antenna síkja a sugárforrás irányába mutatott maximális jelerősséget lehetett mérni, de elforgatás hatására a jelerősség csökkent, míg elérte minimumát. A későbbiek folyamán a kísérletet hajlított dipólantennák esetében is elvégezte, azok is bizonyos szintű irányítottságot mutattak. [5] Ezen felfedezés követte ki az utat az első iránymérő berendezések megalkotása fele.

Az idő múlásával, a technológia színvonal fejlődésével és az elektromágneses hullámok részletesebb megismerése révén újabb és újabb rádióiránymérési megoldások láttak napvilágot úgy, mint a forgó antenna-karakterisztikájú iránymérő rendszerek, doppler és pszeudó doppler iránymérő rendszerek, Wattson-Watt elven működő rendszerek, valamint a fázis interferrometrikus módszeren alapuló iránymérő rendszerek.

¹⁶ RDF – Radio Direction Finding

¹⁷ SIGINT – Signal Intelligence

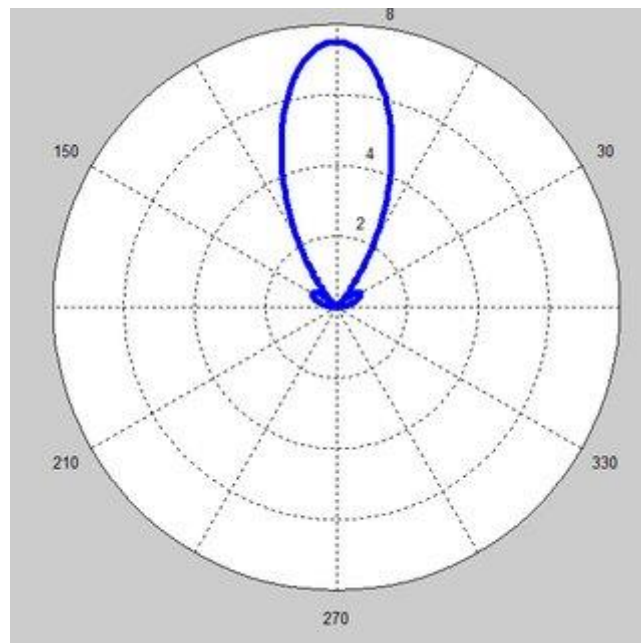
¹⁸ ESM – Electronic Support Measures

¹⁹ LOB – Line of Bearing

2.1. Forgó antenna-karakterisztikájú iránymérő rendszerek

A legkorábbi és legegyszerűbbnek tekinthető megoldás a már fent említett forgó antenna-karakterisztikájú iránymérési eljárás, mely az amplitúdó-érzékeny iránymérési eljárások csoportjába sorolandó, mivel a minimum vagy maximum módszert alkalmazza. Az eljárás korai úttörői John Stone Stone (szabadalmát 1902-ben nyújtotta be) vagy Lee de Forest (szabadalmát 1904-ben nyújtotta be). [6] [7]

A maximum módszer lényege, hogy egy erősen irányított antennát vízszintes és függőleges síkon mozgatva keressük azt az pozíciót, melyben az antenna a legnagyobb jelerősséget szolgáltatja. Amikor az antenna ebben a pozícióban van, akkor az elektromágneses sugárforrás irányába mutat. Az alábbi ábrán (lásd 2. ábra) egy erősen irányított antenna (Yagi antenna) iránykarakterisztikájának polárdiagram segítségével történő ábrázolását figyelhetjük meg. [6] [7]

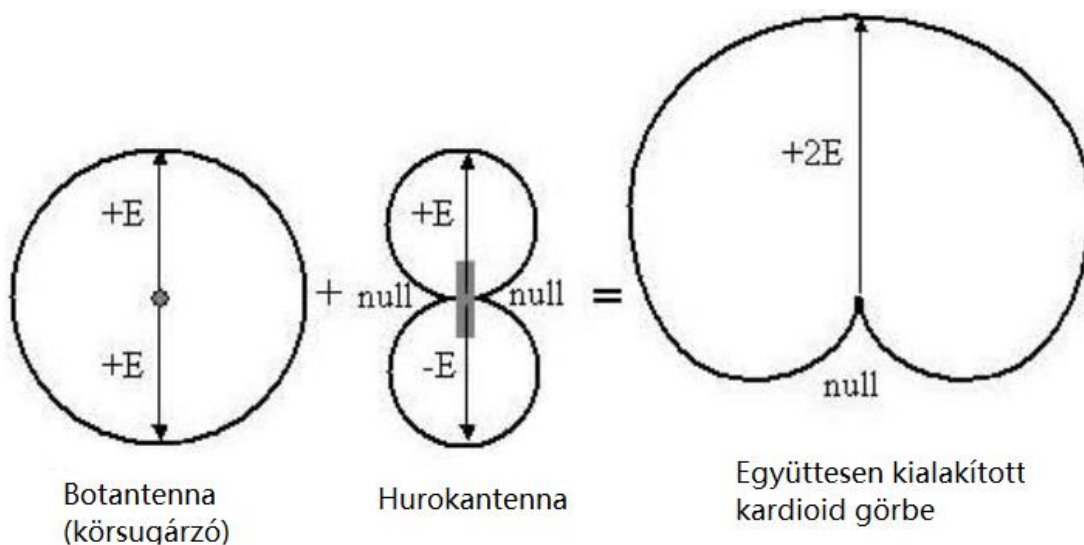


2. ábra Példa erősen irányított antenna iránykarakterisztikájára²⁰

A minimum módszer esetén legegyszerűbb esetben egy kör karakterisztikájú botantennát és egy hurokantennát együttesen alkalmazunk. A két antenna eredőjét polárdiagram segítségével vizsgálva észrevehető, hogy az iránykarakterisztika kardiod görbe jellegű. (lásd 3. ábra) Ezen iránykarakterisztika esetében a maximum irány irányélességi szöge nagy, ezért nem kimondottan alkalmas irány meghatározására. A nullirány (minimum) ezzel szemben jóval

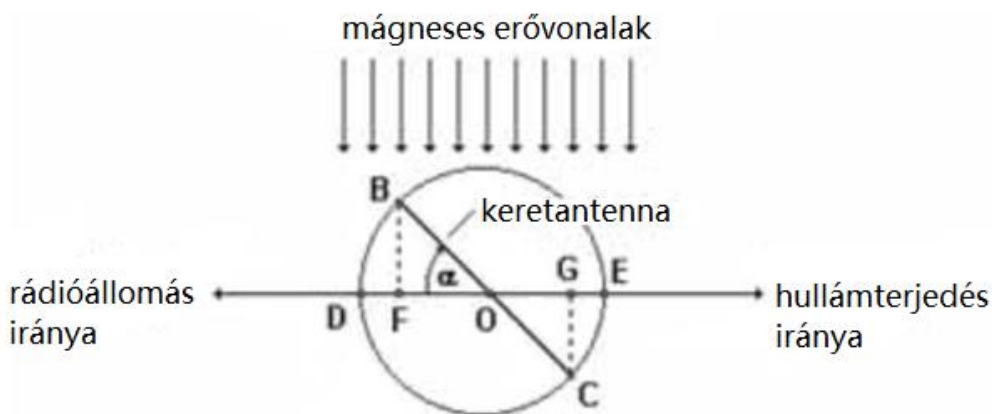
²⁰ Forrás: https://www.researchgate.net/figure/Polar-plot-of-Directivity-of-the-Yagi-Antenna_fig3_338655112
[Hozzáférés dátuma: 2022.03.20.]

pontosabb iránymeghatározást tesz lehetővé. Ebben az esetben a jelminimummal ellentétes irányban található az elektromágneses sugárforrás. [4] [8] [9]



3. ábra Botantenna és hurokantenna eredője: kardioid görbe²¹

A minimum és maximum módszer az amplitúdó-érzékeny iránymérési eljárás alapelveinek speciális megközelítései. Ezen elveket még érthetőbben egy keretantenna segítségével lehet szemléltetni. Tekintsük az alábbi ábrát (lásd 4. ábra).



4. ábra Amplitúdó-érzékeny iránymérési eljárás (szemléltető ábra)²²

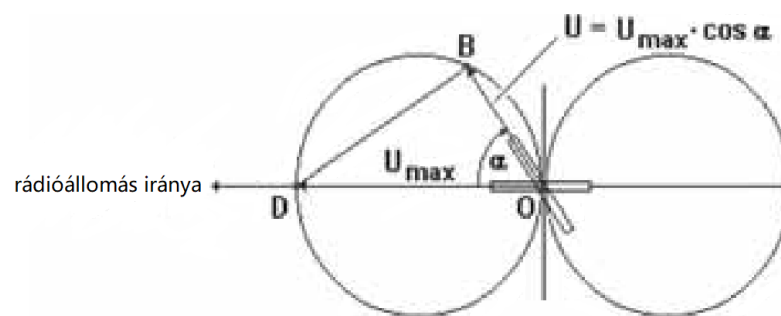
Az ábra felülnézetből ábrázol egy keretantennát, mely éppen BC pozícióban található. Az FG a BC szakasz vetülete hullámterjedés/rádióállomás irányát megadó egyenesre (továbbiakban

²¹ Forrás: <https://askfrance.me/q/comment-les-positions-nulles-de-l-adf-trouvent-elles-l-emplacement-du-ndb-60553532624> [Hozzáférés dátuma: 2022.03.21.]

²² Forrás: K. L. V. L. V. S. Haig Zsolt, Elektronikai Hadviselés, Budapest: Nemzeti Közszerződési Egyetem, 2014. 109. oldal

irányegyenes) és nem más, mint a keretantenna mágneses erővonalak szempontjából megfigyelhető effektív mérete. Jelöljük α -val a keretantenna pillanatnyi helyzetét és az irányegyenes által bezárt szöget. A keretantennán áthaladó mágneses erővonalak száma DE helyzetben maximális. Belátható, hogy az FC szakasz $\cos \alpha$ -szorosa DE-nek, ami azt jelenti, hogy a BC helyzete összefüggésben van BC hatásos felületével, ami meghatározza a rajta áthaladni képes mágneses erővonalak számát (DE helyzetben maximális, mert ekkor merőlegesek a beeső mágneses erővonalak a keretantenna síkjára), ami viszont meghatározza a DE helyzetben mérhető feszültséget (mérhető feszültség = $\cos \alpha$ * maximális feszültség – $\alpha = 0^\circ$ $\alpha = 180^\circ$ fokok esetén maximális $\cos \alpha = 1$ maximális). [4] [6] [7]

Ha a fenti ábrán ismertetett keretantennát körbeforgatjuk (O - forgásközéppont) és minden egyes pozícióban felszerkesztjük a mért feszültséget irány szerint (BC szakasz által meghatározott egyenes), megkapjuk a keretantenna polárdiagram segítségével felülnézetből ábrázolt (XY sík szerinti metszet) iránykarakterisztikáját (lásd 5. ábra). Az eredmény egy úgynevezett „nyolcas diagramm”. [4] [6] [7]



5. ábra Keretantenna iránykarakterisztikája polár digram segítségével ábrázolva²³

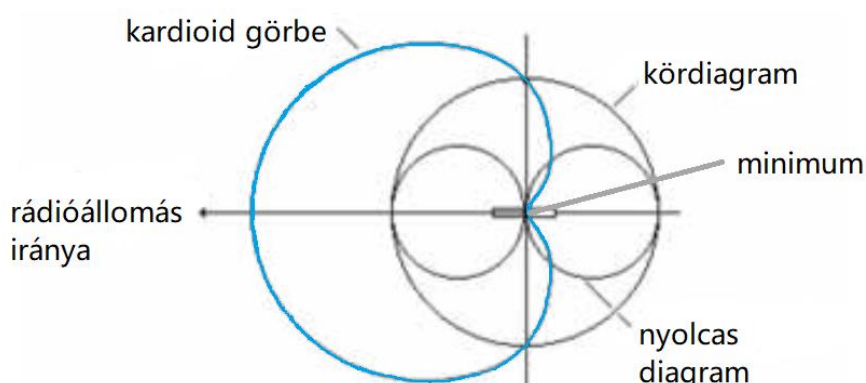
A legelső rádió iránymérő berendezések a keretantennával vett jelet hanggá alakították. Az antenna forgatásával az így keletkező hang erőssége változott, ezt a változást érzékelt az operátor saját érzékszerveivel. Amikor a hang a legerősebb volt, akkor az állomás a keretantenna síkjával párhuzamosan helyezkedett el, amikor a leghalkabb akkor a keretantenna síkjára merőlegesen. A gyakorlatban az operátor számára gyakran egyszerűbb volt a „leghalkabb pozíció” megtalálása, ezért leggyakrabban ez került alkalmazásra. [4] [6] [7]

A fentiekben már megállapításra került, hogy a keretantenna egyetlen 360° -os körülfordulása esetén a mérhető feszültségnek kétszer van maximuma (ellenkező irányú: $\cos 180^\circ = -1$) és kétszer van minimuma (180° -os eltérésekkel). Ebből következik a rádió iránymérés egyik

²³ Forrás: K. L. V. L. V. S. Haig Zsolt, Elektronikai Hadviselés, Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014. 110. oldal

fontos alapvető tulajdonsága: a kétértelműség. A fent bemutatott eljárással az operátor csak azt tudja megállapítani, hogy a sugárforrás milyen relatív irányban helyezkedik el, azt viszont nem, hogy középpont (antenna) által ketté osztott egyenes melyik tartományában van. („előttünk vagy mögöttünk”).

Ennek a problémának a kiküszöbölésére nyújt megoldást a fentiekben már említett kardioid iránykarakterisztika alkalmazása (lásd minimum módszer). Ebben az esetben a keretantenna forgásközéppontjába egy olyan ostorantennát építenek be, amely által vett jelerősség megegyezik a keretantenna által vett maximális jelerősséggel. Az vertikálisan polarizált ostorantenna minden irányban egyforma előjelű feszültségű jelet biztosít (vízszintes síkban irányfüggetlen), ezt összegezve a keretantenna jelével null hely alakul ki ott, ahol a keretantennának negatív maximuma volt (lásd 6. ábra, az alábbi ábrán – kardioid görbe kék színnel került kiemelésre). [6] [7]



6. ábra Kardioid görbe minimumhelye²⁴

Az így megszerkesztett antennarendszer már csupán egy minimum és egy maximum hellyel rendelkezik, tehát a rendszer kétértelműsége kiküszöbölésre került.

2.1.1. Bellini-Tosi elv

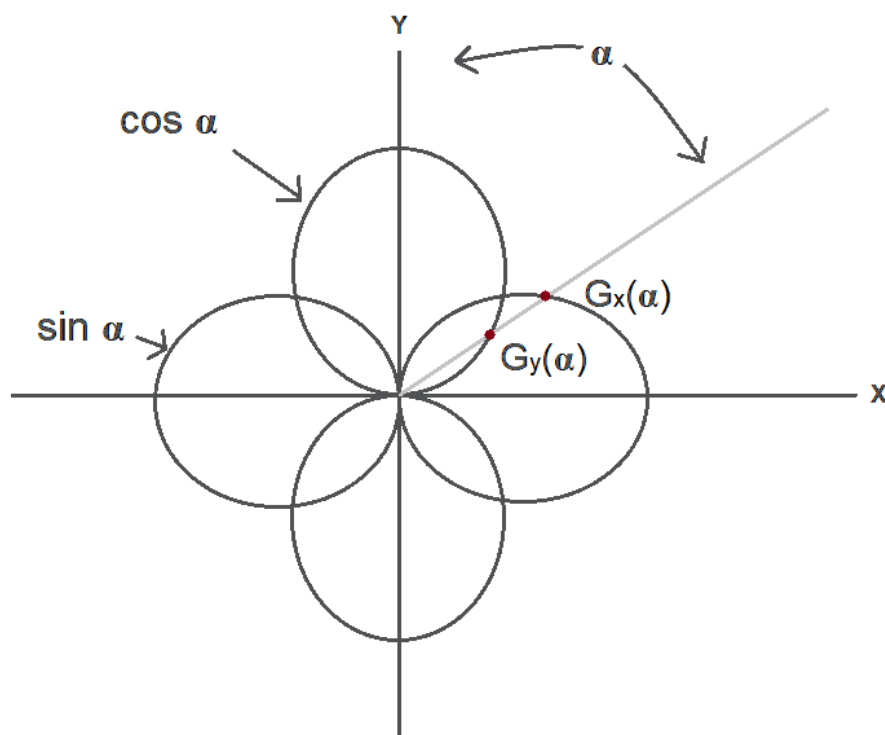
A korai rádió iránymérő rendszerek esetében még szükséges volt fizikailag forgatni az antennarendszert. Ez számos problémát vetett fel, mely nehezítette a hatékony üzemeltetés fenntartását. Emberi erőre vagy egy sor mechanikai megoldásra volt szükség, hogy biztosítani lehessen az antennák megfelelő forgatását, ez a rendszert bonyolultabbá, nehezebbé és meghibásodásra hajlamosabbá tette.

²⁴ Forrás: Saját szerkesztéssel kiegészítve: K. L. V. L. V. S. Haig Zsolt, Elektronikai Hadviselés, Budapest: Nemzeti Közszerológiai Egyetem, 2014. 110. oldal

Ennek a problémának a kiküszöbölésére alkotta meg 1907-ben két olasz tiszt, név szerint Ettore Bellini és Alessandro Tosi a később róluk Bellini-Tosi iránymérőnek nevezett rendszert. [7]

Bellini és Tosi két egymásra merőleges hurokantennát alkalmazott (crossed loop antenna), melyek az amplitúdó összehasonlítás elve alapján adták meg a sugárforrás irányát.

Az amplitúdó összehasonlítás elvének megértéséhez tekintsük az alábbi ábrát (lásd 7. ábra).



7. ábra Amplitúdó összehasonlítás módszere²⁵

Az ábrán két egymással 90°-ot bezáró hurok antenna iránykarakterisztikája látható polárdiagram segítségével ábrázolva. Megfigyelhető a két egymásra merőleges „nyolcas” iránykarakterisztika. A szürke egyenes a sugárforrás irányát jelöli. Megfigyelhető továbbá, hogy az Y tengely mentén fekvő merőleges „nyolcas” iránykarakterisztika antennanyeresége $\cos$ míg az X tengely mentén fekvő merőleges „nyolcas” iránykarakterisztika antennanyeresége $\sin$ függvényszerűen változik α szög szerint (Y tengelytől való eltérés). $G_y(\alpha)$, valamint $G_x(\alpha)$ az elektromágneses sugárzás beérkezési pontjainál egyik, illetve másik antenna nyeresége. $G_y(\alpha)$, valamint $G_x(\alpha)$ bizonyos V_y és V_x feszültségértékeknek feleltethetők meg, melyek

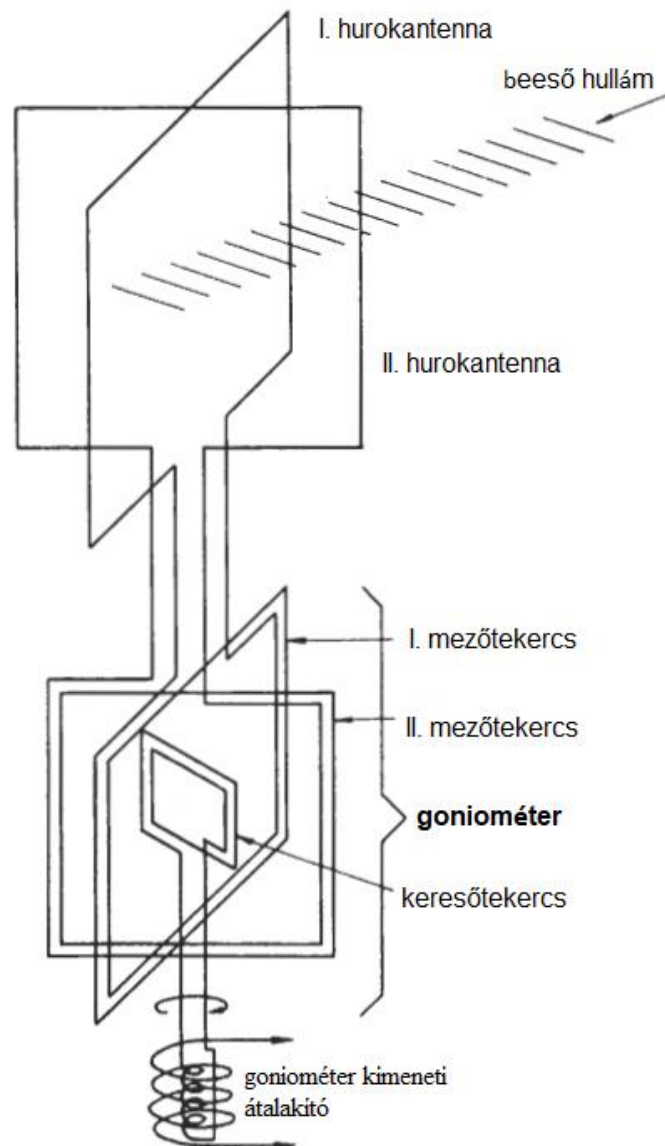
²⁵ Forrás: Saját szerkesztés H. H. Jenkins, Small-Aperture Radio Direction-Finding, London: Artech House Inc., 1991. 14. oldal alapján

arányosak az α beesési szög szinuszával és koszinuszával. Ezen összefüggések felhasználásával és ezek logaritmusát véve kapjuk: $\log(\tan \alpha)$ melyből további matematikai műveletek segítségével megállapítható α szög mértéke. Fontos kiemelni, hogy az iránymérés kétértelműségének megszüntetésére ebben az esetben is szükség van. [7]

A fentiekben ismertetett antennaelrendezés esetében a fizikai forgatás meglehetősen sok problémába ütközne. Ahhoz, hogy a fentiekben bemutatott rendszer az elveknek megfelelően működjön, a rendszert alkotó hurok antennáknak minden jellemzőjükben meg kell egyezniük egymással. Ez azt is jelenti, hogy a földhöz és az közelben lévő tárgyakhoz képesti kapacitásuknak is meg kell egyeznie, különben a rendszer nullpontja (a kétértelműség megszüntetése utáni állapotról van szó) eltolódik és a rendszer pontatlansága nő. A felmerülő egyenlőtlenségek kiegyenlítése könnyedén kivitelezhető fix, nem mozgó rendszer esetén, azonban 360° -os körbefordulásokat végző antennarendszer esetén szinte lehetetlen. Emiatt felmerült az igény egy olyan rendszerre, mely nem igényli az antennák tényleges fizikai mozgatását. Erre kínált megoldást az 1907-ben szabadalmaztatott Bellini-Tosi féle elektromágneses goniométerre épülő rendszer. A rendszert egészen a 1980-as évekig széles körben alkalmazták tengeri navigációra, valamint h-f sávban működő civil és katonai felhasználású iránymérő berendezésekben. [6] A berendezés sematikus ábrája lentebb látható. (lásd 8. ábra)

A rendszer két egyforma, egymásra merőleges azonos tengelyen lévő hurokantennából, két mezőtekercsből, egy keresőtekercsből, valamint egy kimeneti átalakító fokozatból áll. Az egyes hurokantennákban fellépő feszültségek rendre megjelennek az adott antennának megfelelő mezőtekercsben. Az I. hurokantennában indukálódó feszültség a goniométerben az I. mezőtekercsen jelenik meg, II. hurokantenna feszültsége a II. mezőtekercsben jelenik meg. Amennyiben a beérkező hullámok úgy metszik az I hurokantenna iránykarakterisztikáját, hogy az adott antennán feszültség maximum alakul ki, abban az esetben a II. hurokantennán feszültség minimum észlelhető (ideális esetben semmilyen feszültség nem jelenik meg). Ennek megfelelően az I. mezőtekercsen is feszültség maximum alakul ki, míg a II. mezőtekercsen nem mérhető feszültség. Ebben az esetben, ha a keresőtekercs derékszöget zár be az I. mezőtekerccsel, akkor a keresőtekercsben null feszültség mérhető. Fordított esetben (II. hurokantennán van feszültség maximum) analóg módon akkor lesz null feszültség a keresőtekercsen, ha az merőleges a II. mezőtekercsre. Ez alapján könnyedén belátható, hogy amennyiben a fent nevesített esetektől eltérő módon (eltérő szögben) esik be az elektromágneses hullám, úgy a keresőtekercsen egy időben csak két jól meghatározott

pozícióban (iránymérés kétértelműségének következtében – monopol antenna alkalmazásával az előbbieken már ismertetett módon szüntethető meg) mérhető feszültség minimum. Észrevehető, hogy keresőtekercs forgatása során mért feszültségek azonos válaszkarakterisztikát mutatnak az egy hurokantenna forgatása során mért feszültségértékekkel. A rendszert bemutató sematikus ábrán látható kimeneti átalakító szerepe az induktív csatolás megvalósítása, ezzel kiküszöbölve a csúszóérintkezők használatát, növelve a mérések pontosságát. [6]



8. ábra Bellini-Tosi iránymérő rendszer sematikus ábrája²⁶

²⁶ Forrás: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, Naval Shore Electronics Criteria, Washington: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, 1973. 444. oldal

A Bellini-Tosi féle rendszer kiküszöböli a fizikai forgatást igénylő rendszerek esetében felmerülő problémákat, továbbá nagy előnye, hogy lehetővé teszi, hogy az antenna rendszer nagyobb távolságban helyezkedjen el a goniométertől, ezért az antenna fizikailag távolabb helyezhető a kezelőtől. [6] [10]

2.1.2. Hurokantennák alkalmazásának fizikai korlátai

Az eddigi megoldások során azt feltételeztük, hogy az elektromágneses sugárzást kibocsátó antenna vertikálisan polarizált, tehát a mágneses térerősség vonalak teljes egészében párhuzamosak a földfelszínnel. Horizontális polarizáltságú antennával rendelkező sugárforrás esetében viszont a mágneses térerősség vonalak merőlegesek a földfelszínre. A hurokantenna iránykarakteristikája ebben az esetben is „nyolcas” alakú, viszont a nullhelyek 90° -os eltolódásával kell számolni (a vertikálisan polarizált hullám nullhelyeihez képest). Amennyiben a beeső hullám se nem teljesen vízszintes se nem teljesen függőlegesen polarizált, akkor a nullhelyek eltolódása 0° és 90° fok között változhat. [6] [11]

Alacsonyabb frekvenciatartományok esetében az elektromágneses hullámok jellemző módon felületi hullámok formájában terjednek. Ebben az esetben a vertikálisan polarizált komponens erőteljes. Magasabb frekvenciák esetében viszont megjelenik a térhullám formájában való terjedés is és jelentősebb horizontális polarizáltságú komponens érhető tetten. Ez elmozdulásokhoz vezethet a nullhelyek tekintetében, ami iránymérési hibákat eredményezhet. [6] [11] A fenti problémák kiküszöbölésére az Adcock antennák alkalmazása kínál megoldást.

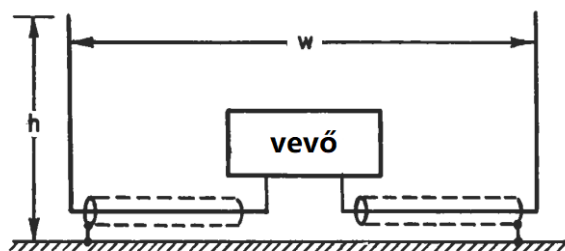
2.1.3. Adcock antennák

A róla elnevezett antennakonfigurációt egy bizonyos brit mérnök, Frank Adcock fejlesztette ki és szabadalmaztatta 1919-ben (British Patent No. 130490²⁷). Érdekes megjegyezni, hogy a találmány megszületésének pillanatában Adcock a Brit Expedíciós Erők tisztjeként teljesített szolgálatot a háború sújtotta Franciaországon. Találmányának felhasználása jelentős a mai napig, úgy civil, mint katonai vonatkozásban egyaránt. [12] [13]

Az előbbieken már ismertetésre került, hogy milyen rádió iránymérési problémák léphetnek fel HF sáv esetén hurokantennák alkalmazása során a térhullámú terjedés miatt. A problémák fő oka a függőleges antennaszakaszokat összekötő vízszintes szakaszok jelenléte. A problémák okozása mellett gyakorlati jelentőségük hullámtani szempontból nincs. Mechanikai szempontból a ténylegesen forgó antennák esetében a merevítés szerepe hárul rájuk.

²⁷ Brit Szabvány Szám 130490

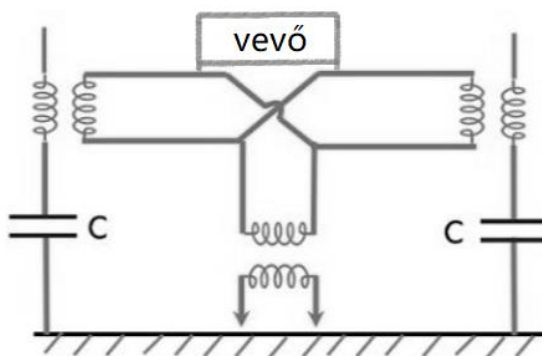
Hurokantennák vízszintes komponenseinek eltávolítása vagy teljes árnyékolása révén Adcock antennához jutunk. (lásd 9. ábra)



9. ábra Árnyékolt keresztelemű U-Adcock antenna²⁸

Az fenti ábra egy olyan U-Adcock antennát ábrázol, mely úgy került megalkotásra, hogy egy h magasságú és w szélességű hurokantenna felső vízszintes szakaszát eltávolították, az alsót pedig árnyékolták. Az így kapott antenna hullámtani szempontból kizárólag függőleges elemekkel rendelkezik és iránykarakterisztikája azonos egy ugyanilyen szélességű és magasságú hurokantennáéval.

Lehetőség van a direkt csatolás helyettesítésére induktív csatolás segítségével. Az ilyen módszerrel megvalósított antennákat csatolt Adcock antennának nevezzük. (lásd 10. ábra) A vertikális elemek és a vevő között elhelyezkedő kábeleket szükséges árnyékolni, mivel egymáshoz közel helyezkednek el és ellentétes fázisban vannak. [6] [14]



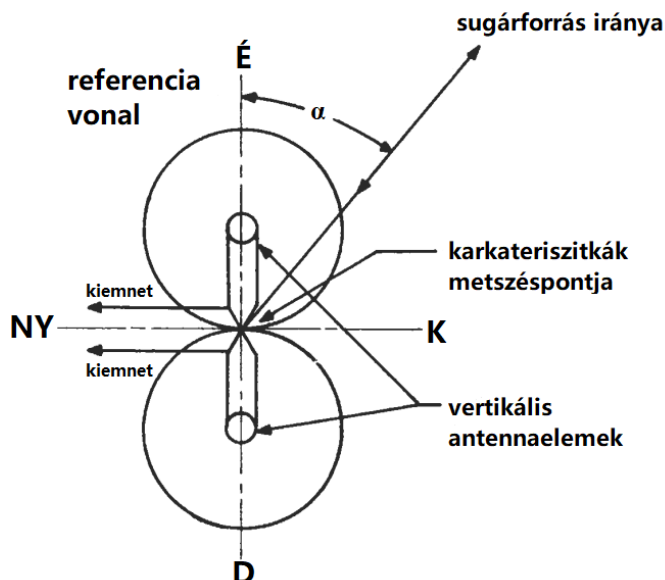
10. ábra Csatolt Adcock antenna²⁹

²⁸ Forrás: Forrás: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, Naval Shore Electronics Criteria, Washington: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, 1973. 446. oldal

²⁹ Forrás: Saját szerkesztéssel kiegészítve: <https://electronicsdesk.com/adcock-antennas.html> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.05.]

Bár az Adcock antennák ugyanúgy felhasználhatók mechanikai forgatást alkalmazó rendszerek esetén is, leggyakrabban a már hurokantennák esetében bemutatott goniométer alapú megoldást szokták az esetek túlnyomó többségében alkalmazni.

A U-Adcock antenna az egyszerű hurokantennához hasonlóan „nyolcas” iránykarakterisztikával rendelkezik. (lásd 11. ábra)



11. ábra U-Adcock antenna iránykarakterisztika³⁰

A fenti ábrát értelmezve könnyen észrevehető a hasonlóság a hurokantennákkal. Tekintsük referencia vonalnak a két vertikális antennaelem által meghatározott egyenest az egyszerűbb hivatkozás érdekében tájoljuk az ábrán látható módon az égtájak szerint. Amennyiben a beérkező rádióhullám É-D irányú a kimeneteken feszültségminimum jelenik meg, K-NY irányú beesés esetén viszont feszültség minimum figyelhető meg. Ezen rendszer esetében is fennáll az iránymérés kétértelmősége és a probléma feloldása és goniométerrel történő rendszerbe szervezés is a hurokantennáknál már bemutatott módon történik. [6] [14]

Adcock antennát használó rendszerek esetében az érzékenység és a hatékony mérésre alkalmas sáv szélesség függ az antennatávolságtól. A fenti ábra ideális esetet ábrázol: a karakterisztika koszinusz szerinti eloszlást mutat a beesési szög függvényében. A valóságban azonban a karakterisztika nem tisztán, tökéletesen koszinusz jellegű, hanem annak csak közelítője és nagyjában függ az antennatávolságtól (jelöljük d -vel) és a mért elektromágneses hullám

³⁰ Forrás: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, Naval Shore Electronics Criteria, Washington: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, 1973. 447. oldal

hullámhosszától (jelöljük λ -val). Az összefüggés például a fent ábrázolt két vertikális elemmel rendelkező rendszer esetén a közvetkezőképpen néz ki: [6] [14]

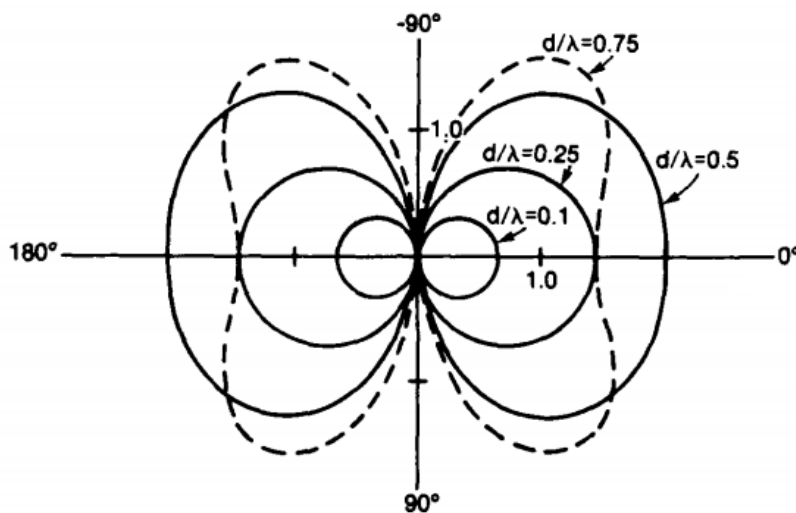
$$G = 2 * G_A * \sin \left(\pi * \frac{d}{\lambda} * \cos(\alpha) \right), \text{ ahol:}$$

G_A = egyetlen vertikális elem nyeresége;

λ = beékező elektromágneses hullám hullámhossza;

α = beékező elektromágneses hullám beesési szöge.

Belátható, hogy amennyiben a $\frac{d}{\lambda}$ értéke tart nullához, az iránykarakterisztika is tart az ideális koszinuszos jelleg felé (lásd szemléltetésül az alábbi 12. ábrát). [15]



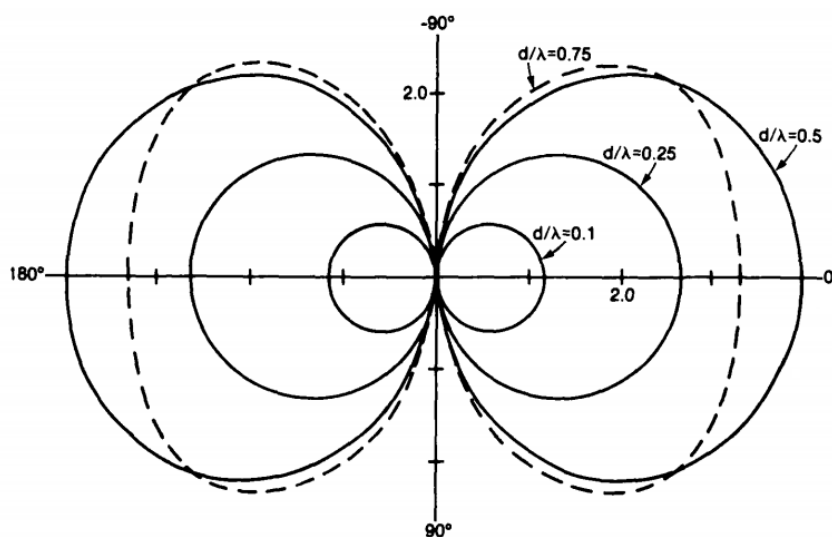
12. ábra Két elemből álló Adcock antenna nyereségének hullámhosszfüggése³¹

Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a hullámhossznak az antenntávolság sokszorosának kell lennie az optimális mérés érdekében, tehát az alacsony frekvenciák mérése sokkal több gondot okoz az optimális antenna fizikai méreteiből adódóan. Az antennarendszerek optimális mérési sávszélessége sokkal nagyobb mértékben függ az antenntávolságtól, mintsem az antennaelem fizikai (hullámhosszal összemérhető) méretétől. Gyakorlatban iránymérés hibahatárának elfogatható keretek között tartása érdekében a $\frac{d}{\lambda}$ értéke általában nem haladja meg 0,25-öt (1:4-hez arány).

³¹ Forrás: Communications Electronic Warfare Section - Electronic Warfare Division, „Review of Conventional Tactical Radio Direction Finding Systems,” Deffence Research Establishment , Ottawa, 1989., 7. oldal

A fenti megállapítások érvényesek négy elemből álló Adcock antennarendszerek esetében is. A következő ábra (lásd 13. ábra) egy négy elemből álló Adcock antenna nyereségnek hullámhosszfüggőségét ábrázolja. [15]

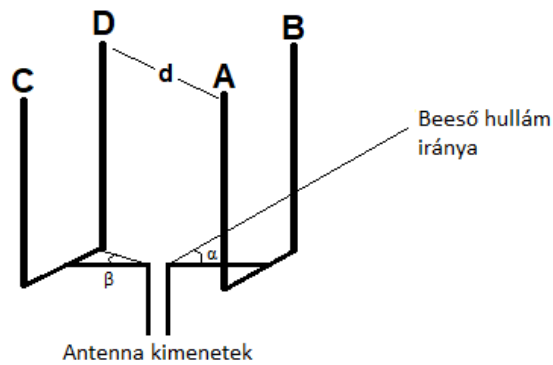
Észrevehető, hogy a rendszer kevésbé érzékeny $\frac{d}{\lambda}$ értékének növekedésére, mint az egyszerű kételemű rendszer.



13. ábra Négy elemből álló Adcock antenna nyereségének hullámhosszfüggése³²

A szóban forgó rendszer az egyszerű két elemből álló verziónak egy némiképp összetettebb változata: az egyes antennaelemek egy ketté osztott antennapárral lettek helyettesítve (lásd 14. ábra), tehát ebben a rendszerben is csupán két tápvonal szerepel, így elégséges egyetlen egyszerű goniométer alkalmazása.

³² Forrás: Communications Electronic Warfare Section - Electronic Warfare Division, „Review of Conventional Tactical Radio Direction Finding Systems,” Deffence Research Establishment , Ottawa, 1989. 7. oldal



14. ábra Osztott antennapárokból álló négyelemű Adcock antennarendszer sematikus vázlata³³

Az antennarendszer nyereségét leíró összefüggés hasonló a kételemű rendszeréhez:

nyereség = $2 * \text{antennanyereség} * [\sin(\pi * \frac{d}{\lambda} * \cos(\alpha - \beta)) + \sin(\pi * \frac{d}{\lambda} * \cos(\alpha + \beta))]$,
ahol β az osztott antenna két elem és a középpont által alkotott szög félszöge. Értéke leggyakrabban $22,5^\circ$ és $27,5^\circ$ közötti. A többi paraméter megegyezik a fenti összefüggésben szereplő paraméterekkel.

Az antennakimeneteken megjelenő jel a két antennapár összegzett jele közötti különbség, jelen esetben $|(A+B) - (C+D)|$.

Ez eddigi adatok és diagramok tanulsága alapján belátható, hogy a négyelemű rendszer nagyságrendekkel nagyobb sávszélességben képes megfelelően üzemelni, akár az 1:1-hez $\frac{d}{\lambda}$ arány is elérhető vagy akár túl is szárnyalható. [15]

Az oktális hiba³⁴ gyakorlatban akkor jelentkezik, amikor a nem teljesen koszinuszos iránykarakterisztikájú antennaelemek együttesen kerülnek alkalmazásra teljesen koszinuszos goniométerrel.

Az vertikális antennaelemek számának növelésével és gondos elrendezésével az oktális hiba jelentősen csökkenthető nagyobb $\frac{d}{\lambda}$ arányok esetében is.

A legelterjedtebb a nyolc elemből álló Adcock antennarendszerek alkalmazása, mivel két négy elemből álló rendszer együttes meghatározott konfigurációban történő alkalmazása révén az oktális hiba jelentősen csökkenthető (akár 2° fok alá). [15]

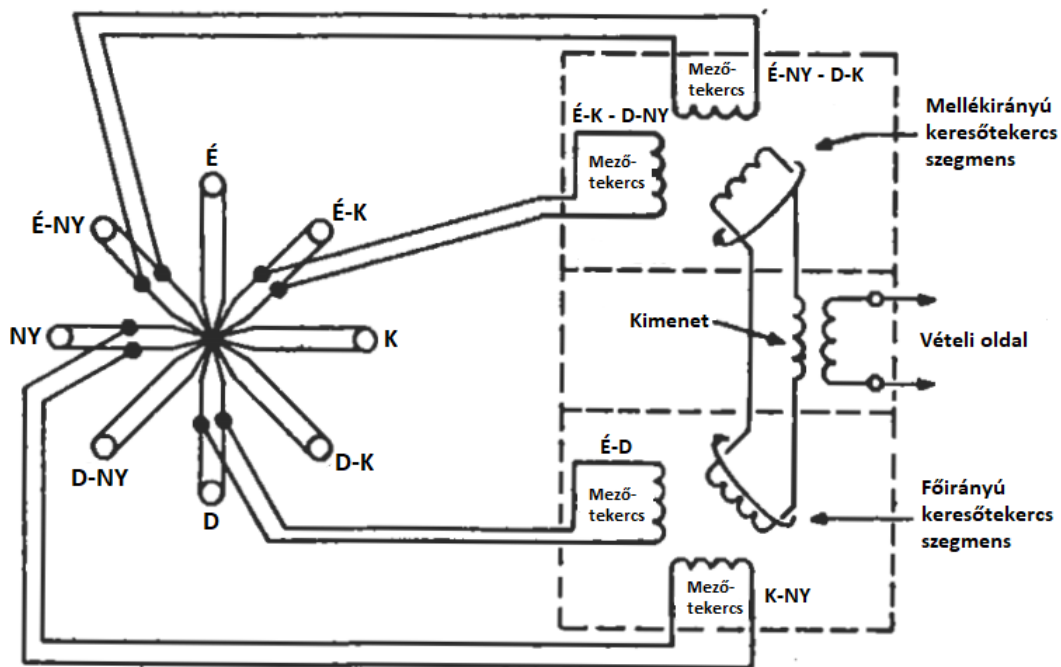
³³ Forrás: Saját szerkesztés Communications Electronic Warfare Section - Electronic Warfare Division, „Review of Conventional Tactical Radio Direction Finding Systems,” Defence Research Establishment, Ottawa, 1989. 6. oldal alapján

³⁴ oktális hiba = antenntávolság hiba

Négyelemű Adcock antennarendszer esetén megfigyelhető, hogy az oktális hiba függ az elektromágneses hullám beesési szögétől is. Mérésekkel megállapítható, hogy az első oktális hiba maximum a referenciaponttól (13. ábrán látható 0°) 22.5° fokra található és 45° -onként periodikusan újra és újra megjelenik. Ennek a problémának a kiküszöbölésére alkalmaznak egy másik, az első négyelemű Adcock antennarendszerrel teljes mértékben azonos rendszert, melyet az első rendszerhez képest 45° -kal elforgatva építenek be. Az ellentétes fázisban lévő oktális hibafüggvények egymásra rakódása kölcsönös kioltást eredményez.

Az ilyen rendszerek esetében már tandem, vagy két állapotú goniométer alkalmazása szükséges (két négyelemű rendszer egyidejű alkalmazása miatt négy tápvonal jelenik meg), melyhez egy közös keresőtekerces tartozik. (lásd 15. ábra)

A mezőtekerces megfelelő pozicionálása révén elérhető, hogy a beérkező hullám nullpozíciója a keresőrotor mindkét szegmensén egybeessen így kialakul a már többször említett „nyolcas” iránykarakterisztika. Az iránymérés kétértelműsége ebben az esetben is fennál és az Adcock antennarendszer geometriai középpontjába telepített az antennaszegmensek nyereségével azonos nyereségű ostorantenna alkalmazásával szüntethető meg.



15. ábra Nyolcelemű Adcock antennarendszer tandem goniométerrel³⁵

³⁵ Forrás: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, Naval Shore Electronics Criteria, Washington: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, 1973. 448. oldal

2.2. CDAA³⁶ rendszerek

A körkörösén telepített antennarendszerek (CDAA), más néven Wullenweber, a fentiekben már ismertetett megoldásokon alapulnak, de azoktól sok szempontból el is térnek. Vételi karakterisztikájukból adódóan sokkal hatékonyabb iránymérést tesznek lehetővé, mint az eddig bemutatott megoldások. Történetük a Második Világháború idejére nyúlik vissza. Egy német mérnök fejlesztette ki, név szerint Dr. Hans Rindfleisch was Wullenwever. [16] Az első ilyen rendszert Hjörring városában telepítették. Már ez a rendszer is jelentősnek mondható 40 antennából állt, amelyek egy 120 méter átmérőjű körön helyezkedtek el, melynek közepén a feldolgozó központ állt. A későbbi rendszerek sokkal nagyobb, akár 120-as antennaszámmal is rendelkeztek. Az ilyen rendszereket nagy méretük és az őket alkotó sok, egymáshoz relatíve közel elhelyezett vertikálisan polarizált antenna miatt szokás „elefántketrecnek” is nevezni. (lásd 16. ábra)

Felépítését tekintve körsugárzó antennákból áll melyek egy körön szimmetrikusan, egymástól egyenlő távolságra helyezkednek el. Az antennák közti távolság a megfigyelni kívánt frekvenciatartomány függvénye. Ezen konfiguráció leggyakrabban az HF sávban kerül alkalmazásra, mert ez az a sáv, melyben nagytávolságú kommunikáció is lebonyolításra kerül. Többek között ezt azt a tartományt alkalmazzák a hajók, valamint tengeralattjárók is, így a rendszer kimondottan alkalmas ezen eszközök irányának, valamint együttes alkalmazás esetén, pozíciójának meghatározására. A tenger vagy óceánpartra telepített Wullenweber rendszerek, a sós víz hullámterjedésre gyakorolt előnyös hatásainak köszönhetően, akár 3200-4000 tengeri mérföld távolságból érkező jel felfedésére is alkalmasak. Pontosságuk igen jó, megközelítőleg fél fok körüli (Amerikai Egyesült Államok Haditengerészetének AN/FRD-10 rendszere). [17]

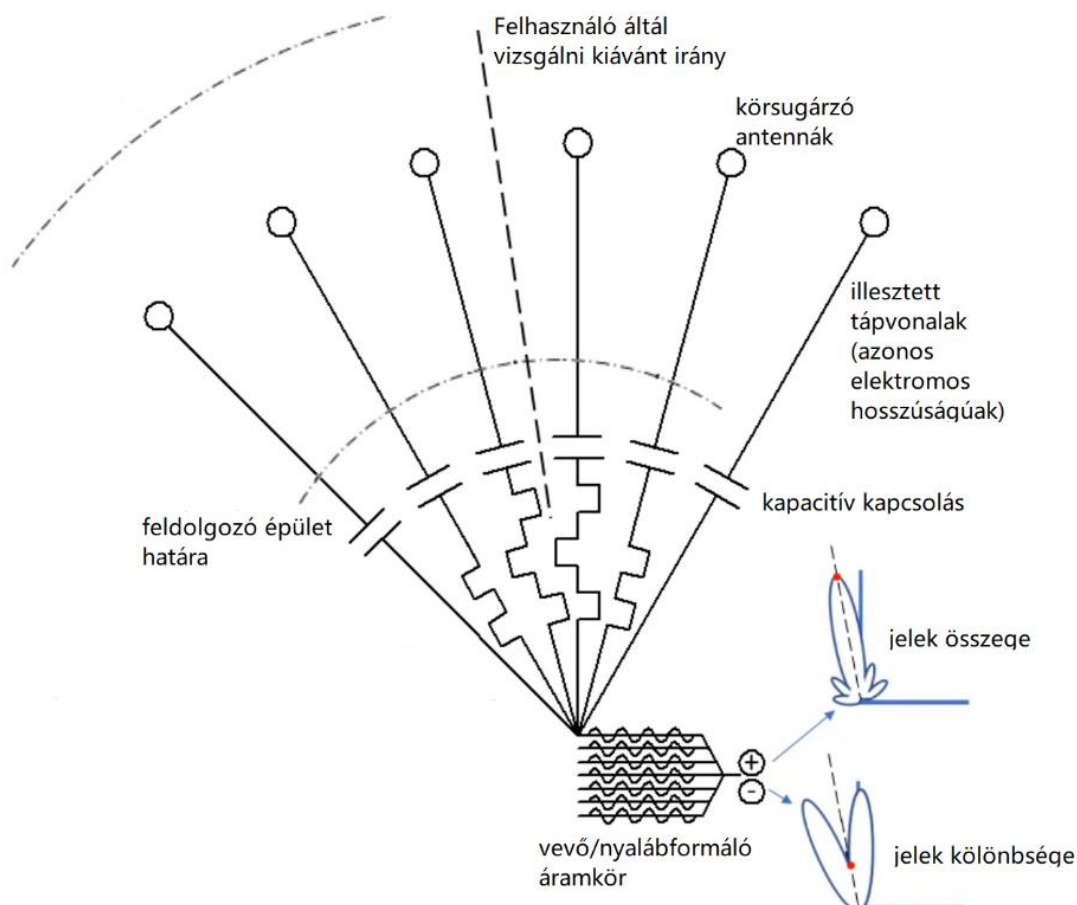
³⁶ CDAA: Circularly Disposed Antenna Array



16. ábra Példa CDAA/Wullenweber antennarendszerre³⁷

Felfedés során egyes változtatott antennacsoportok által vett jeleket figyelik (lásd 17. ábra) (egyidőben a rendszerben található körsugárzó antennák egyharmada van használatban). [18]

³⁷ Forrás: B. Bowman, „A look inside a classified Cold War-era antenna site, now shut down,” Internet Archive: WaybackMachine, 25 04 2016. [Online].
Available <https://web.archive.org/web/20170501061010/http://www.ktva.com/inside-a-classified-cold-war-era-antenna-site-now-shut-down-625/>. [Hozzáférés dátuma: 2022.03.09.].



17. ábra Wullenweber antennarendszer egy szeletének sematikus vázlata³⁸

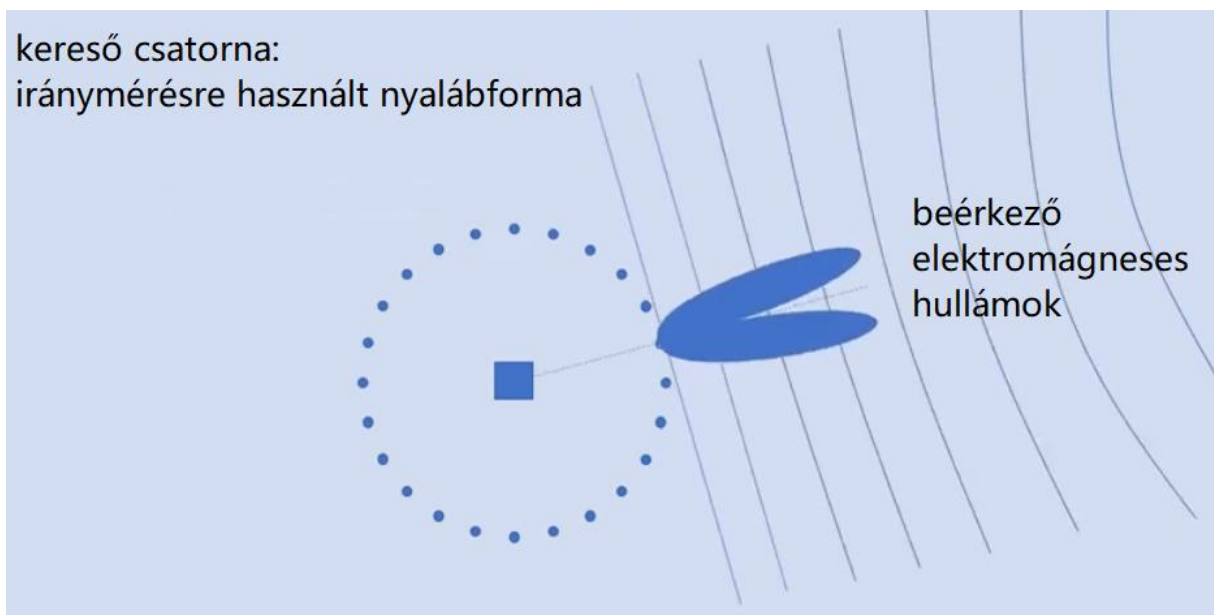
A Wullenweber antennarendszer működésben lévő szegmensének iránykarakterisztikáját antennakombináló technikák alkalmazásával az adott szegmensben található kösugárzó antennák egyéni iránykarakterisztikáit összegezve hozzák létre. Egy meghatározott, adott jelre fókuszálódó antennákat jellegzetesen késleltető vonalakkal összekapcsolva alkalmazzák. A rendszer két csatornán képes üzemelni: összeg csatornán, valamint különbségi csatornán. Az összegcsatornán egy keskeny, nagyon jól irányított, kis irányélességi szöggel rendelkező keresőnyaláb jön létre. (lásd 18. ábra).

Miután sikerült észlelni a keresett jelet, a rendszert át lehet kapcsolni különbségi csatornára, mely egy nagyon éles nullhellyel rendelkező iránykarakterisztika kialakulását eredményezi (lásd 19. ábra). Az iránykarakterisztika jellegzetességeiből adódóan ebben az esetben nem merül fel az iránymérés kétértelműségének problémája.

³⁸ Forrás: GMT 400, „CDAA, Circularly Disposed Antenna Array, Wullenweber Antenna. What Are They and How Do They Work?,” 01 09 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=26NVgfmQrqq>. [Hozzáférés dátuma: 2022.03.09.].



18. ábra Összeg csatornán megjelenő keresőnyaláb³⁹



19. ábra Rádióiránymérésre használt nyalábforma a különbség csatornán⁴⁰

Wullenweber antennákat napjainkban nem használnak elterjedten, mivel ezen rendszerek telepítése és üzemeltetése meglehetősen költséges (kiépítés akár milliódolláros tétel is lehet) és csak a telepítési hely meghatározott körzetében képesek működni, és egyáltalán nem mobilisek.

³⁹ Forrás: GMT 400, „CDAA, Circularly Disposed Antenna Array, Wullenweber Antenna. What Are They and How Do They Work?,” 01 09 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=26NVgfmQrqq>. [Hozzáférés dátuma: 2022.03.09.].

⁴⁰ Forrás: GMT 400, „CDAA, Circularly Disposed Antenna Array, Wullenweber Antenna. What Are They and How Do They Work?,” 01 09 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=26NVgfmQrqq>. [Hozzáférés dátuma: 2022.03.09.].

2.3. Doppler/ Pszeudó-doppler rádió iránymérők

A rádióiránymérők egy másik megvalósítási megközelítése Doppler elv alkalmazása. A következőkben a Doppler jelenség, valamint a jelenséget működésük során felhasználó rendszerek kerülnek röviden ismertetésre.

2.3.1. Doppler jelenség

A jelenséget először Christian Doppler osztrák matematikus és fizikus írta le 1842-ben „Az ég kettőscsillagai és pár más csillag színéről” című monográfiájában. A jelenséget Doppler a vasúti szállítás térnyerésének köszönhetően fedezte fel. Az 1830-as évek tájékára a vonatok már képesek voltak elérni az 50 kilométer óránkénti sebességet is elérni. Doppler azt figyelte meg, hogy a nagy sebességgel a megfigyelő fele közlekedő szerelvény hangja magasabb (frekvenciája nagyobb) és miután elhalad a megfigyelő mellett mélyebbé válik (frekvenciája alacsonyabb lesz). Doppler elméletét a fényre is kiterjesztette és elsősorban az egymás körül keringő kettős csillagok fényében megjelenő kék és vörös komponensek megmagyarázására alkalmazta. Elmélete szerint a megfigyelő fele haladó csillag fénye kékebbnek (magasabb frekvencia), míg a távolodó csillag vörösebbnek látszik (alacsonyabb frekvencia) (lásd 20. ábra: látható fény spektruma). A hipotézis méréssel történő vizsgálatát 1845-ben elsőként Christophorus Henricus Diedericus Buys Ballot végezte el hanghullámok esetében. Sikeresen bizonyítani, hogy közeledő gyorsan haladó hangforrástól érkező hang frekvenciája magasabb a mérési ponton, mint a távolodó hangforrástól érkező hangé.



20. ábra Látható fény spektruma⁴¹

Hippolyte Fizeau francia fizikus Dopplertől függetlenül fedezte fel ugyanezen jelenséget elektromágneses hullámok esetében 1848-ban. Éppen ezért francia nyelvterületen némely esetben a jelenséget szokás Doppler-Fizeau jelenségnek is nevezni. Ezen megnevezés máshol

⁴¹ Forrás: Saját szerkesztés https://shopdelta.eu/a-feny-hullamhossza_123_aid733.html alapján [Hozzáférés dátuma: 2022.03.15.].

nem terjedt el széles körben, mivel Doppler felismerésével hat évvel megelőzte Fizeaut. [19] [20]

Abban az esetben, amikor vevő és a hullámforrás sebessége egy adott tehetetlenségi viszonyítási rendszerben kisebb, mint a hullám terjedési sebessége, a jelenséget a következő összefüggés írja le:

$$f = \left(\frac{c \pm v_r}{c \pm v_s} \right) f_0$$

ahol f vevőponton érzékelt frekvencia;

f_0 a forrás frekvenciája;

v_r a vevő sebessége (előjele pozitív, ha a forrás irányába halad, negatív, amennyiben a forrástól távolodik);

v_s a forrás sebessége (előjele negatív, ha vevő irányába halad, pozitív, amennyiben a vevőtől távolodik). [21]

2.3.2. Doppler rádió iránymérő rendszer

A fentiekben már ismertetésre került Doppler elv akkor is érvényesül, ha körkörös pályán mozgó antennát tekintünk vevőpontnak. A körkörös mozgás során lesznek olyan időpillanatok, melyek során az antenna a sugárforrás irányába halad (érzékelt frekvencia nő), lesznek olyanok, melyek során az antennától távolodik (érzékelt frekvencia csökken), amikor az antenna a jel beesési egyenesére merőlegesen mozdul (nincs változás az érzékelt frekvenciában) el, és olyan időpillanatok is, melyek a fent nevesített állapotok közötti köztes állapotokat eredményeznek. Észrevehető, hogy szabályos kör alakú pályán, egyenletes sebességgel mozgó antenna által vett jel frekvenciája periodikusan, szinuszosan váltakozik, annak megfelelően, hogy az antenna éppen pálya mely szakaszán tart (az antenna pozíciójában a kör alakú pályára szerkesztett érintő iránya merre mutat). [22] [23] Ezáltal egy szinusszal frekvenciában modulált (FM) jel keletkezik, melyet szokás Doppler szinusz hullámnak is nevezni. Ezen szinuszjel frekvenciája azonos a forgás frekvenciájával.

A forgásközbeni frekvenciaváltozás nagysága (S) a hullámhossz (λ) és a szögsebesség (w) függvénye:

$$S = \frac{r W}{\lambda}, \text{ ahol } r \text{ körpálya sugara.}$$

Matematikai átalakításokat követően (rad/s átalakítása Hz-é) a következő összefüggéshez jutunk:

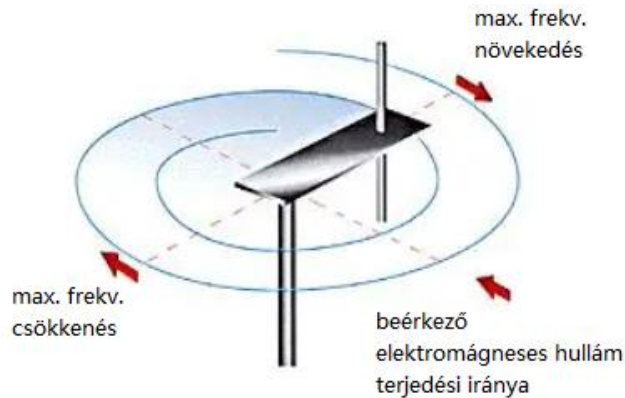
$$S = \frac{r F_r F_c}{48}$$

ahol r a kör sugara;

F_r az antenna forgási frekvenciája, míg F_c a megfigyelt jel frekvenciája.

Ezen iránymérő berendezések a gyakorlatban 1941-ben jelentek meg az Egyesült Királyságban, ahol is a német 250 MHz-en üzemelő korai figyelemezető radarok felderítésére használták őket. A háború vége felé, 1943-tól kezdődően már UHF tartományban működő rendszerek is megjelentek, melyeket az 560 MHz-en üzemelő német Würzburg radarok felderítésre alkalmaztak.

Doppler rendszerek esetében (lásd 21. ábra) nem jelenik meg az iránymérés kétértelműségének problémája, hiszen az adott pontban szerkesztett érintő, melynél a frekvencia eltérés maximális, nem csak azt az egyenest adja meg, amelyen az elektromágneses sugárforrás található, hanem az antenna elmozdulási irányának ismerete miatt a sugárforrás irányát is. A körpálya adott pontjának északhoz tájolása révén a mért irány térképre szerkeszthetővé válik.



21. ábra Doppler iránymérő berendezés sematikus vázlata⁴²

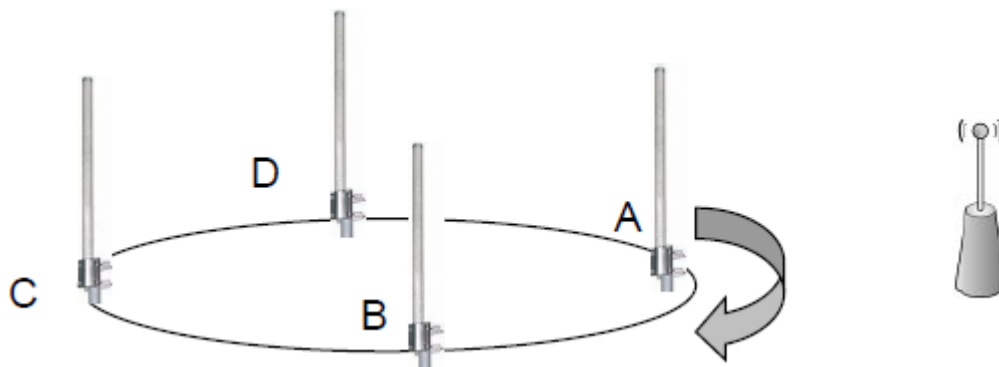
Fontos kiemelni, hogy ezen eljárás pontossága és megvalósíthatósága nagyban függ a vizsgált frekvenciatartománytól. Az ezen az elven működő rendszer igazán jól magas frekvenciák esetében működik (a megfigyelt jel frekvenciája az összefüggésben a nevezőben szerepel). Nagy frekvencia esetén a frekvenciaváltozás mértéke jelentősebb, így pontosabb mérést tesz lehetővé. Mi több, a frekvencia növekedésével az antennaméret csökken, a rendszer kompaktabbá válik. A rendszer megvalósítása alacsonyabb frekvenciák esetén fizikai

⁴² Forrás: <https://dopsys.com/doppler-principle-of-operation/> [Hozzáférés dátuma: 2022.03.20.].

nehézségekbe ütközik. Az megfigyelt jel alacsonyabb frekvenciájából adódó frekvenciaváltozás csökkenésének ellensúlyozására a forgási pálya sugarának növelése, valamint az antenna forgási frekvenciájának növelése jelentene megoldást. Ez komoly mechanikai kihívásokat jelent, mivel amellet, hogy gyakorlatban előállítható mechanikai rezgések/forgások frekvenciája nagyságrendekkel elmarad az elektromágneses hullámok frekvenciájától, a frekvencia csökkenésével arányosan nő az optimális vételhez szükséges antenna fizikai mérete. A gyakorlatban tehát ez annyit tesz, hogy minél alacsonyabb frekvenciájú jelre szeretnénk pontosan irányt mérni, annál gyorsabban kell annál nagyobb antennát annál nagyobb sugarú körön forgatni. Ez bizonyos határokon túl már fizikailag nehezen megvalósítható, instabil, meghibásodásra hajlamos eszköz létrejöttét eredményezni. [22]

2.3.3. Pszedó-doppler rádió iránymérő rendszer

A fentiekben bemutatott Doppler rendszer által igényelt fizikai forgatás következtében fellépő hibák kiküszöbölése céljából született meg a pszedó-doppler rádió iránymérési eljárás. Az ezen az elven működő rendszerek több, kör alakban elhelyezett, fix antennát alkalmaznak, melyeket meghatározott sorrendben kapcsolnak a vevő bemenetére. (lásd 22. ábra).



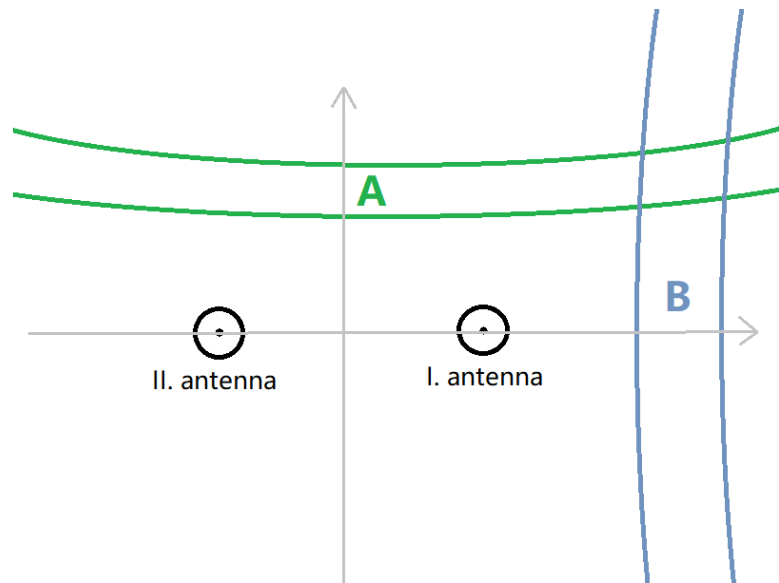
22. ábra Pszedó-doppler rádió iránymérő rendszer sematikus vázlata⁴³

A pszedó-doppler rendszer működési elvének megértéshez tekintsünk két egyforma tulajdonságokkal rendelkező egyszerű körsugárzó antennát. (lásd 23. ábra)

Az elektromágnes sugárforrástól kellően nagy távolságra (az adó távolterében) elhelyezkedő vevőponon az elektromágneses hullámok egymással párhuzamos, kvázi görbület nélküli hullámfronttal jelennek meg. Abban az esetben, ha a két antenna merőlegesen helyezkedik el a

⁴³ Forrás: https://www.researchgate.net/figure/Doppler-Pseudo-Doppler-is-a-direction-finding-system-based-on-the-phase-measurement-The_fig4_289779492 [Hozzáférés dátuma: 2022.03.25.].

beeső elektromágneses sugárzás irányára fáziskülönbség nem észlelhető (ábrán látható A eset). Abban viszont, ha a fenti ábrán látható antennák a beeső elektromágnes sugárzás irányával párhuzamosan helyezkednek el (ábrán látható B eset), akkor a két antennán a beérkező jel esetében érzékelt fáziskülönbség az elektromágnes hullám hullámhosszának (λ) és az antennák közötti távolságnak a függvénye. Amennyiben az antennák közötti távolságot úgy választjuk meg, hogy a hullámhossz egynegyede legyen ($\frac{\lambda}{4}$), akkor a fáziskülönbség pontosan 90° .

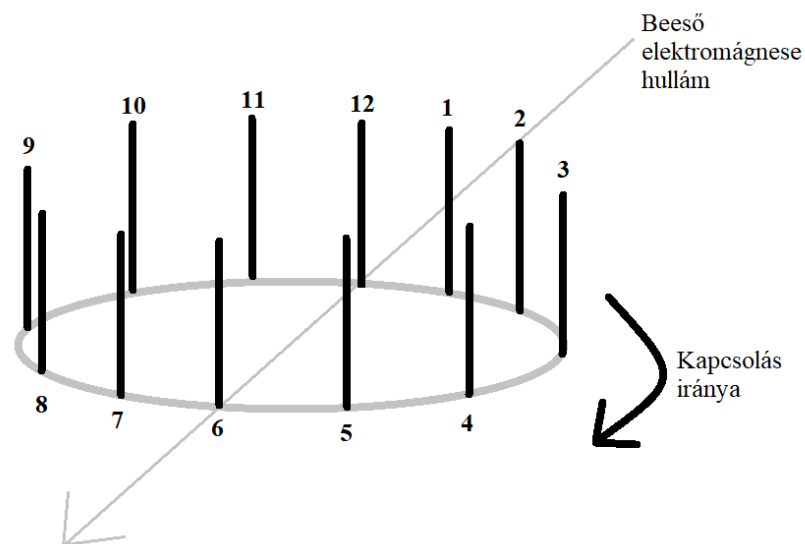
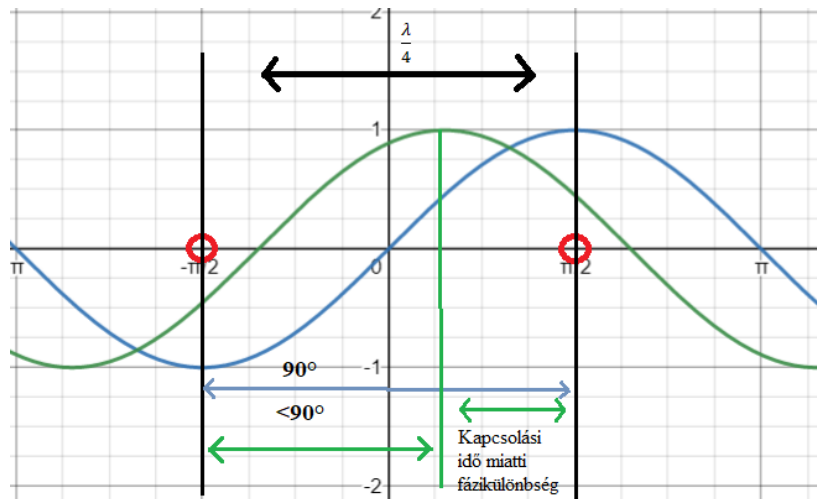


23. ábra Pszeudó-doppler rendszer működési elvét szemléltető ábra⁴⁴

A gyakorlatban, ha nem egyszerre vesszük a két antennáról érkező jelet, hanem átkapcsolunk az egyik antennáról a másikra és úgy vizsgáljuk a jel fázisát, akkor a mérésben fellép egy bizonyos késleltetés, így a fáziskülönbség valamennyivel kevesebb, mint 90° lesz, mivel az átkapcsolás ideje alatt a hullám már megtett egy bizonyos távolságot az első antennától a második antenna irányába. (lásd 24. ábra) [23]

Most tekintsünk egy 12 elemből álló antennarendszert, melyben az elemek egy körben helyezkednek el egymástól egyenlő távolságra (egy óra lapján lévő számokhoz hasonlóan). Legyen a sugárforrás 12 óra irányában. Az antennák közti kapcsolás valósuljon meg az óramutató irányával megegyező irányban, a kapcsolási idő pedig állandó (lásd 25. ábra).

⁴⁴ Forrás: Saját szerkesztés



A vevőre érkező jel fázisát vizsgálva megállapítható, hogy amikor a rendszer 1-2-3-4-5 óránál található antennákra kapcsol (fizikailag forgó antenna esetében a sugárforrástól történő távolodásnak felel meg), akkor a mért fáziskülönbség nagysága csökken, míg amikor a rendszer 7-8-9-10-11 óránál található antennákra kapcsol (fizikailag forgó antenna esetében a sugárforrás irányába történő közeledésnek felel meg), akkor a mért fáziskülönbség nagysága nő. 11-12-1 antennák, valamint 5-6-7 antennák között kapcsolva a fáziskülönbség nagysága állandó (fizikailag forgó antenna esetében a beeső elektromágnes sugárzás irányára merőleges elmozdulásnak felel meg).

⁴⁵ Forrás: Saját szerkesztés

⁴⁶ Forrás: Saját szerkesztés

Az így kapott fáziskülönbség adatok alapján létrehozható a korábbiakban említett Doppler szinusz hullám, hiszen ezen pontok rajta vannak a szinusz hullám grafikus képén. Belátható, hogy minél több fáziskülönbség mérési eredménnyel rendelkezünk (ami nagyobb antennaszámot jelent), annál pontosabban lehet reprodukálni a forgó antennával létrehozható Doppler szinusz hullámot, annál nagyobb a mérés pontossága. [22] A tényleges irány meghatározása a fizikailag forgatott antenna esetéhez hasonlatosan történik. A Doppler szinusz hullám kerül összehasonlításra a referencia jellel (ebben az esetben a referencia jel az órajel, amely az antennák közötti kapcsolást vezérli.)

A pszeudó-doppler rádió iránymérő rendszerek nem tartalmaznak mozgó alkatrészeket, ezáltal doppler rendszerekhez képest könnyedén megvalósíthatók és széles körben elterjedtek. Bár ez az eljárás a korábban már ismertetett elektronikusan forgatott antennarendszerekhez (Adcock antenna rendszer goniométerrel kombinálva) képest lassabb iránymérést tesz lehetővé, a modern rendszerek esetében ez inkább csak elméleti szinten jelentkezik, a gyakorlatban közel elenyésző. Jelentős előnyük viszont az, hogy sokkal egyszerűbb antennarendszert igényelnek, mint a korábban bemutatott, az iránykarakterisztika minimum helyének segítségével irányt mérő rendszerek. Az egyszerű dipól vagy monopól antennák már elegendőek a fizikai megvalósításhoz. A rendszer tovább egyszerűsíthető, ha a kapcsolat az antennáknál kerül megvalósításra, így a vevőbe csupán egy tápvonal vezet, így egyetlen erősítő is elegendő (nincs szükség antennánként egyre). A kompakt felépítés miatt több antennarendszer is egy szerkezetbe építhető, így növelve az optimálisan vizsgálható frekvenciatartomány nagyságát. (lásd 26. ábra).



26. ábra Példa különböző frekvenciatartományok megfigyelésére alkalmas pszeudó-doppler antennarendszerek együttes alkalmazására⁴⁷

⁴⁷ Forrás: <https://dopsys.com/> – Doppler Systems LLC [Hozzáférés dátuma: 2022.04.05.].

A pszeudó-doppler rendszerek jelentősebb hátulütője a nagyobb jelfeldolgozási igény, mivel a fizikailag forgó antennához képest az elmozdulás nem folyamatos, hanem szakaszos, a keletkezett jel sem teljesen egyenletes, további feldolgozásra szorul. Ezen felül a kapcsolórendszer elektromágneses zajt is generálhat, melyet szűréssel el kell távolítani. A modern jelfeldolgozó eljárások képesek ezeket a negatív hatásokat elhanyagolható szintre redukálni. [22] [24]

2.4. Korrelációs interferometrián alapuló rádió iránymérő rendszerek

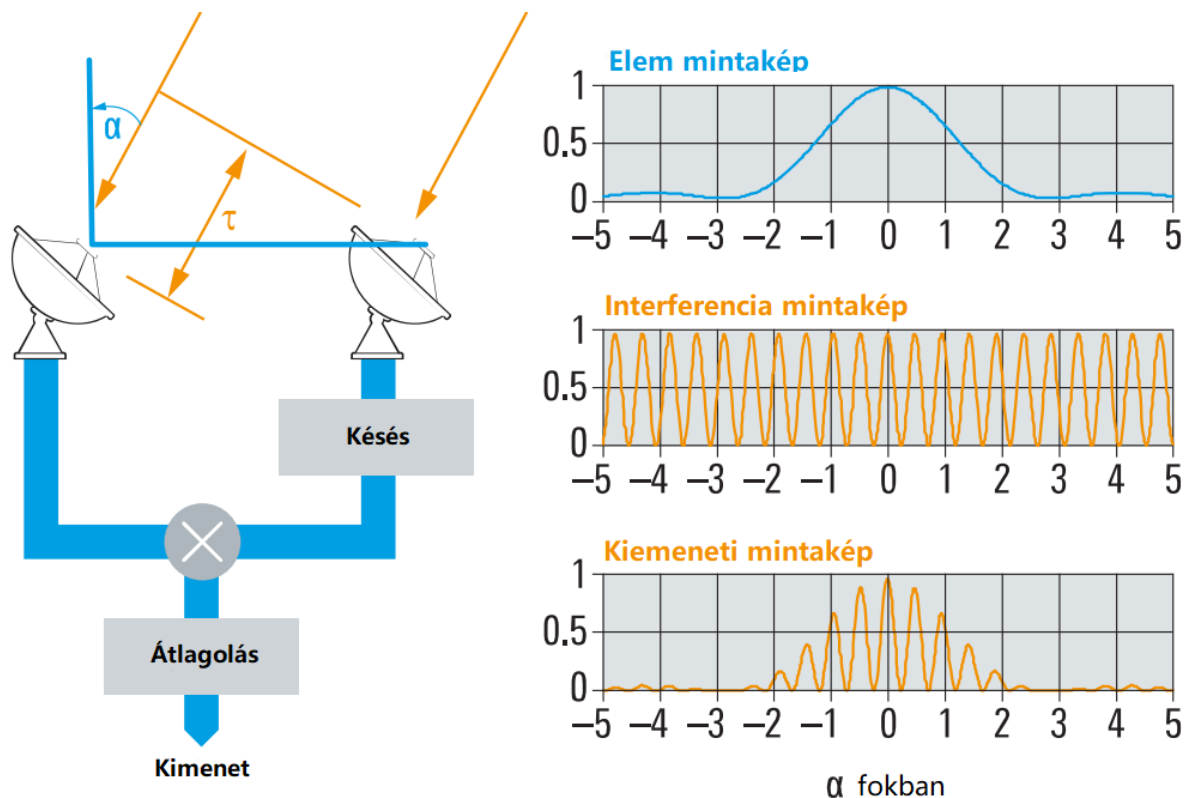
Az iránymérő berendezések esetében széles körben alkalmazott a korrelációs interferometria elve, amely a rádiócsillagászatban ismert interferométereken alapszik, annak továbbfejlesztésével született.

2.4.1. Interferometria

Amikor azonos frekvenciájú, de eltérő fázisban lévő elektromágneses hullámok találkoznak, interferencia lép fel. Interferencia esetén az azonos fázisban lévő elektromágneses hullámok teljes mértékben erősítik egymást (ideális esetben, amikor két hullám azonos fázisú, a szuperpozíció révén létrejött hullám amplitúdója az azt alkotó hullámok amplitúdójának összege – azonos amplitúdójú részhullámok esetén az eredményhullám amplitúdója az egyes részhullámok amplitúdójának kétszeresével egyenlő). Abban az esetben, ha a két hullám ellentétes fázisban van, akkor kioltás lép fel (az ellentétes fázisban lévő hullámok szuperpozíciója révén keletkező hullám amplitúdója a két részhullám amplitúdóinak különbsége – azonos amplitúdójú részhullámok esetén az eredményhullám amplitúdója zérus, teljes kioltás lép fel). A két ismertetett fázisállapottól (megegyező, valamint ellentétes fázis) eltérő azonos nagyságú amplitúdóval rendelkező részhullámok esetén az eredményhullám amplitúdójának nagysága valahol zérus és a kétszeres részhullámamplitúdó között lesz, ebből lehet meghatározni a két részhullám egymáshoz viszonyított fáziskülönbségét. Az így eredményül kapott relatív fáziskülönbség értelmezése révén információkhoz juthatunk mechanikai stressz értékével, mérendő távolságokkal, kvantummechanikai folyamatokkal, részecskefizikai jelenségekkel, biomolekuláris interakciókkal, folyadékok terjedési sebességével és számos más egyéb jelenséggel kapcsolatban. Legismertebb alkalmazási területei többek között az asztrológia, száloptika, mérés tan, oceanográfia, szeizmológia, valamint a spektroszkópia. [25] [26]

2.4.2. Interferometria a rádió iránymérésben

Az interferometria elvének iránymérésre történő felhasználása először a rádiócsillagászatban jelent meg. Ebben az alkalmazási kontextusban az elképzelés az volt, hogy az rádió iránymérő rendszer érzékenységét és felbontását azáltal kívánták növelni, hogy több egymástól több hullámhossz távolságra lévő antenna jelét egymásra helyezték. [27] Ezt az alapelképzelést az alábbi ábra szemlélteti. (lásd 27. ábra)

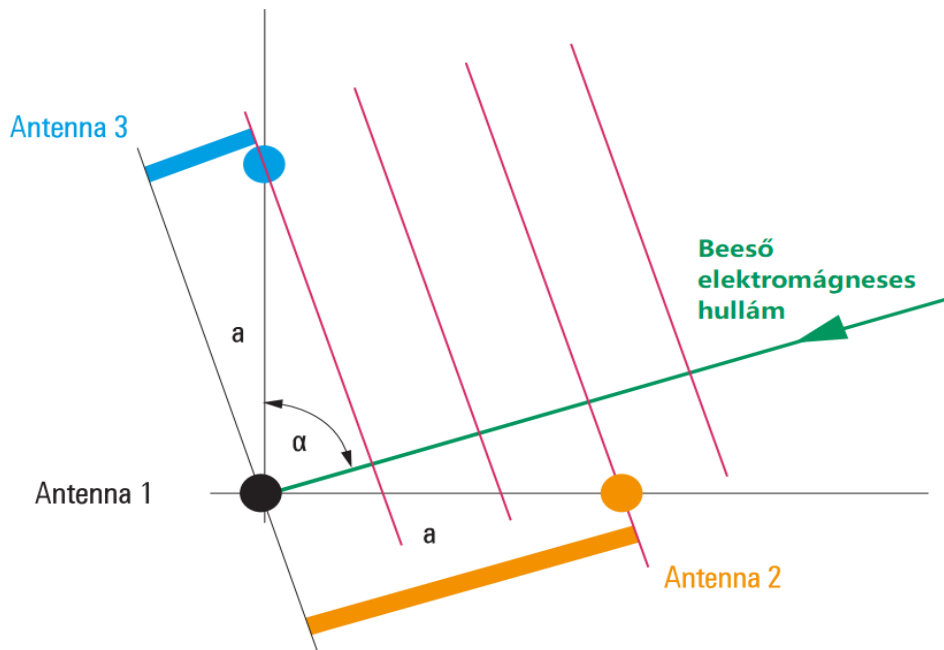


27. ábra Rádiócsillagászatban alkalmazott klasszikus, két elemből álló interferométer blokkvázlata és mérési képe⁴⁸

A fenti ábrán jól kivehető az interferencia kép többértelműsége, melyet az egyes antennaelemek (rádiócsillagászatban leggyakrabban paraboloid antennák) irányítottsága hivatott kiküszöbölni. [28]

Legalább három antenna egy időben történő alkalmazása esetén (amennyiben ezek egymáshoz képest fél hullámhossz távolságon belül helyezkednek el) kiküszöbölhető az iránymérés többértelműsége úgy is, hogy a felhasznált antennák nem irányítottak (egyszerű kórsugárzó antennák). Tekintsük az alábbi ábrát (lásd 28. ábra):

⁴⁸ Forrás: Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation, „Direction Finders: Introduction into Theory of Direction Finding,” Rohde & Schwarz, 2010. 34. oldal



28. ábra Három körsugárzó antennából álló interferométer sematikus vázlata⁴⁹

Az ábrán három körsugárzó antenna látható: Antenna 1, Antenna 2, valamint Antenna 3. Fontos, hogy az antennák ne kollineárisan kerüljenek elhelyezésre, mert abban az esetben az antennák által alkotott egyenesre merőlegesen beérkező elektromágneses hullám mindhárom mérési ponton azonos fázissal jelenik meg (fentiekben említésre került, hogy a hullámforrástól kellően nagy távolságra a hullámfront síknak tekinthető, úgy ahogyan ezt a fenti ábra is szemlélteti). Az hullámfront az útkülönbség miatt nem egy időben éri el az egyes antennákat, ennek megfelelően az egyes antennák jele között fáziskülönbség jelentkezik.

A fenti konfiguráció esetében jelöljük az egyes pontokon mért fázist rendre Φ_1 , Φ_2 , valamint Φ_3 -vel, ekkor az elektromágneses hullám beesési szöge a következőképpen fejezhető ki:

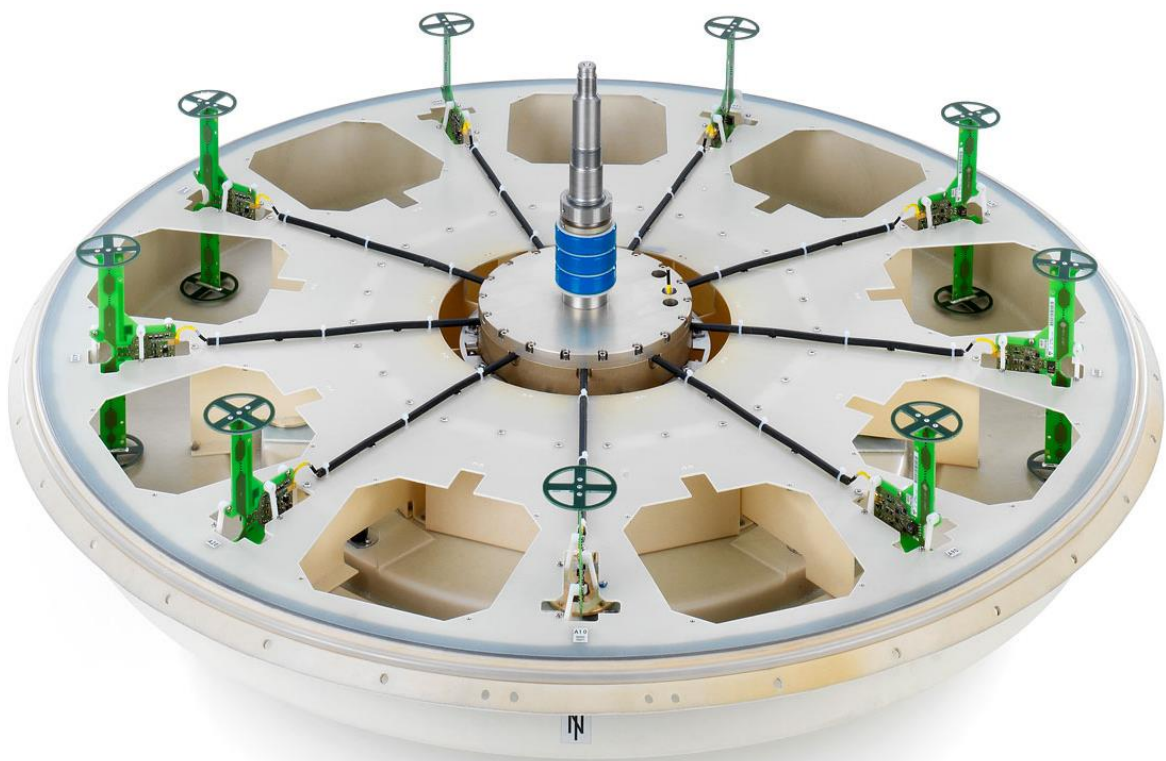
$$\hat{\alpha} = \arctan \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Phi_3 - \Phi_1}$$

a vízszintes síktól való eltérés pedig a következő összefüggésnek megfelelően alakul:

$$\hat{\varepsilon} = \arccos \frac{\sqrt{(\Phi_2 - \Phi_1)^2 + (\Phi_3 - \Phi_1)^2}}{2\pi a / \lambda} \quad [28]$$

⁴⁹ Forrás: Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation , „Direction Finders: Introduction into Theory of Direction Finding,” Rohde & Schwarz, 2010. 35. oldal

A gyakorlatban háromnál jóval több és leggyakrabban páratlan számú antennából álló rendszereket szoktak alkalmazni, melyeket egy radonban helyeznek el (lásd 29. ábra). Ennek több oka is van. Egyrészt csökkenti az iránymérés hibahatárát, másrészt megfelelő elrendezés esetén lehetővé teszi az adott frekvenciatartomány optimális vizsgálatát (az antennák közötti távolság kisebb, mint a vizsgált beeső hullám hullámhosszának a fele). A leggyakrabban alkalmazott elrendezések közé tartozik a közös csúccsal rendelkező egyenlő szárú háromszögeken alapuló konfiguráció, valamint a kör alakú konfiguráció. A háromszög alakú konfiguráció leggyakrabban 30 MHz alatt kerül alkalmazásra. Magasabb frekvenciákon a cirkuláris elrendezés preferált. A kör alakú elrendezés nagy előnye, hogy a rendszer bármely antennája esetében az antennák egymásra hatásából adódó iránykarakterisztika változás mértéke azonos, továbbá az antennaárbóc hatása a rendszerre is minimális. Mi több, a rendszer a középponthoz képesti szimmetriája a rendszer mérési pontosságát a beesési iránytól függetlenné teszi. [28] [29]



29. ábra Rhode & Schwarz gyártmányú ADD153SR típusú UHF/VHF iránymérő korrelatív interferometriás irányméréshez használt antenna⁵⁰

⁵⁰ Forrás: https://www.rohde-schwarz.com/br/produtos/seguranca-de-defesa-aeroespacial/opcoes-de-receptores-e-radiogoniometros/rs-add153sr_63493-10508.html [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.].

2.4.3. Az iránymérés kétértelműségének kérdése

Mint ahogyan a korábban bemutatott iránymérési megoldások esetében, úgy az interferometria elvén működő rendszerek esetében is megjelenik a rádió iránymérés kétértelműségének problémája, így ennek kiküszöbölése érdekében a rendszerek tervezése folyamán különös figyelmet kell szentelni az antennák közti távolság és az antennaszám megválasztásának.

A fentiekben bemutatott három elemű interferométer esetében a probléma úgy oldható fel, hogy az antennák közötti távolságot a megfigyelni kívánt legmagasabb frekvenciájú hullám félhullámhosszánál kisebbre választjuk.

Háromnál több elemű konfigurációk esetében két megoldást szokás alkalmazni: „töltött” vagy „ritkített” antenna tömböt kell létrehozni.

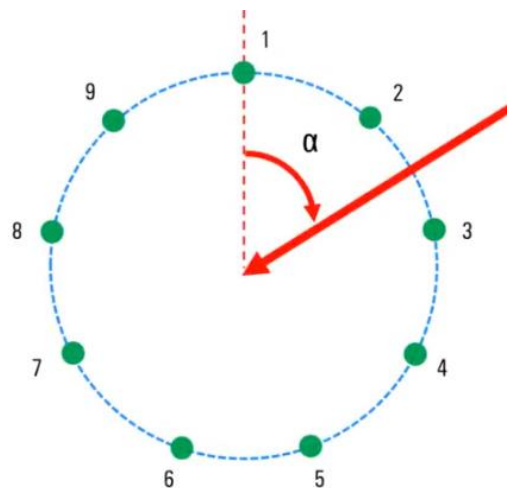
A „töltött” tömb esetében a szomszédos antennák közötti távolság mindig kisebb, mint 180° . A másik lehetőség („ritkített” antenna tömb) esetén a konfiguráció legalább két egymással szomszédos antennája között nagyobb fáziskülönbségnek kell lennie, mint 180° . Napjainkban a leggyakrabban a kétértelműséget úgy oldják fel, hogy a rendszer összes antennájáról egy időben vett jelet összevetik előre kimért beesési szögesetekkel, ez a módszer a korrelatív interferometria.

2.4.4. Korrelatív interferometria

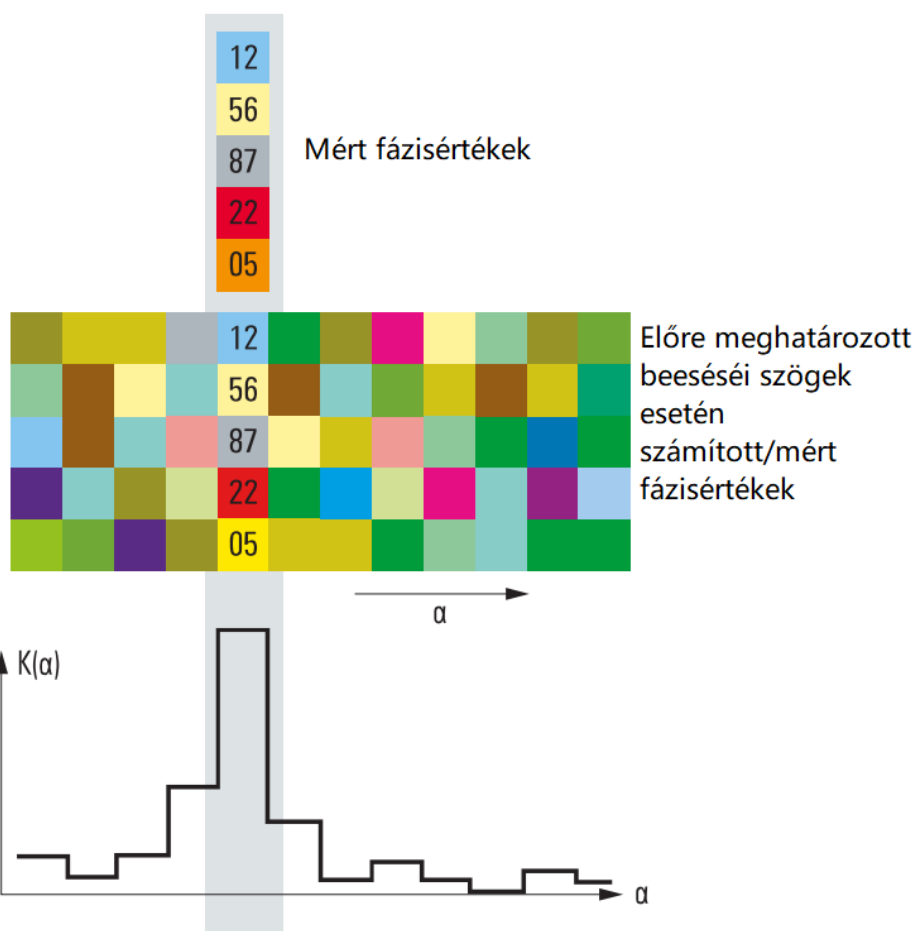
A korrelatív interferometria az eddig bemutatott eljárásokhoz képest viszonylag újkeletű és jelentősen megnövekedett mérési pontosság mellett (1° körüli) más számos előnyel is rendelkezik.

Működése az interferometria elvén történik. Általában páratlan számú kör alakban elhelyezett körsugárzó antennákból álló konfigurációt alkalmaz (példaként lásd a 30. ábrát). Működése során előre meghatározott beesési szögek esetén mért antennánkénti fázisértékekből álló adatbázishoz hasonlítja az éppen megfigyelt jel antennánként mért aktuális fázisértékeit. [30]

Az ábrán 1-el jelölt antenna a rendszer referenciaantennája, az elektromágneses hullám beesési szöge ehhez képest kerül meghatározásra, mely az ábrán α -val került jelölésre. A rendszer antennánként mért fázisértéket digitálisan egy egydimenziós tömbben tárolja, amit a szoftver összehasonlít az adatbázisban lévő meghatározott beesési szögekhez tartozó tömbökkel (a korrelációvizsgálat, innen ered a módszer elnevezése is). (lásd 31. ábra)



30. ábra Korrelatív interferometria elvén alapuló rádió iránymérő rendszer antennakonfigurációjának sematikus vázlata⁵¹



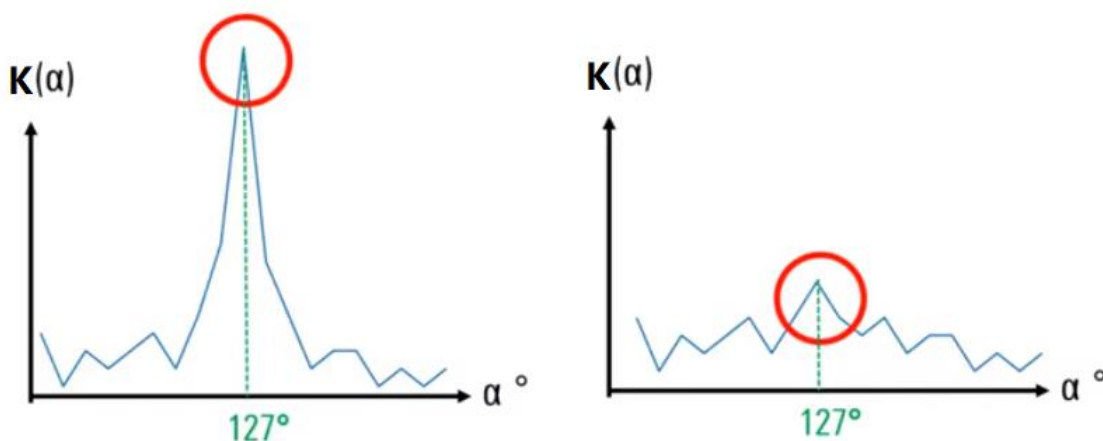
31. ábra Korrelációvizsgálat szemléltetése öt antennából álló rendszer esetén⁵²

⁵¹ Forrás: Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.].

⁵² Forrás: Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation, „Direction Finders: Introduction into Theory of Direction Finding,” Rohde & Schwarz, 2010. 35. oldal

A fenti ábrán grafikusán kerültek ábrázolásra a mérés során létrejött és a gyárilag tárolt tömbök. Az ábra alsó része az adott mérési eredmény sor korrelációs függvényét tartalmazza: a korreláció mértéke, mely $K(\alpha)$ -val került jelölésre az ordinátatengelyen, míg a beesési szög (α) az abszcisszán került ábrázolásra. A függvény grafikus képén megfigyelhető egy kiugrás, egy maximumpont. Ezt korrelációs csúcsnak nevezzük, és az abszcisszatengelyre történő vetülete adja meg a beesési szög értékét. [29] [30]

A korrelatív interferometria egyik sajátossága, hogy beesési szög mértékének meghatározása mellett alkalmas a mért beesési szög valószínűségének (egyes esetekben szokás a beesési szög minőségeként is hivatkozni rá) megállapítására is. (lásd 32. ábra) Ezzel az óriási előnnyel semelyik másik iránymérési megoldás sem rendelkezik.



32. ábra Beesési szög minőségnek szemléltetése a korrelációs függvény segítségével⁵³

A fenti ábrán látható mindkét grafikon esetében a megegyezik a beesési szög mértéke: 127° . A különbség a beesési szög valószínűségében rejlik, melyet korrelációs csúcs abszcisszatengelytől való távolsága mutat. A bal oldali ábrán a korrelációs csúcs élesen kiemelkedik, míg a jobb oldali ábrán csak alig lóg ki. A bal oldali grafikon esetében az az adatbázisban tárolt adatokkal való korreláció mértéke számottevően nagyobb, így az eredmény is megbízhatóbb, mint a jobb oldali grafikon esetében. A beesési szög megállapításának minőségét negatívan befolyásolhatják olyan tényezők, mint a kétutas terjedés vagy a reflexiók.

A korrelatív interferencia elvén működő rendszerek további előnye, hogy egy adott konfiguráció relatíve nagy sáv szélességben (akár 1 GHz sáv szélességet meghaladó tartományban) képes hatékonyan irányt mérni. Azonban azt fontos kiemelni, hogy az

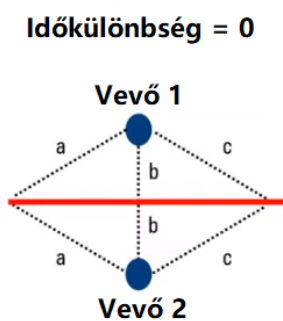
⁵³ Forrás: Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.].

antennakonfiguráció átmérőjének csökkenése negatív hatással van a reflexiók és a kétutas terjedés okozta anomáliákkal szembeni immunitásra (mely az eddig ismertetett rendszerekhez képest a legnagyobb). Mi több, korrelatív interferencia elvén működő rendszerek kevésbé érzékenyek beeső elektromágneses hullámok polarizációjára (a doppler és pszeudó-doppler rendszerek egyik legnagyobb gyengesége). A rendszer egyik számottevő hátulütője, hogy a korrelatív interferencia elvén működő rádió iránymérő rendszerek antennáinak és egyéb kulcsfontosságú elemeinek előállításához nagyságrendekkel pontosabb gyártástechnológia szükséges, mint ez eddig ismertetett megoldások bármelyikének esetében.

2.5. Jelterjedési időkülönbség (TDOA⁵⁴) mérésének elvén működő rádió iránymérő/helymeghatározó rendszerek

Tekintettel arra, hogy a jelterjedési időkülönbség mérésén alapuló iránymérési megoldások számos tekintetben különböznek az eddigiekben tárgyalt eljárásoktól és katonai alkalmazásuk jelentős, nem lehet figyelmen kívül hagyni létezésüket. [31]

A TDOA rendszerek jellegükből adóan nem irányszög mérésére, hanem pozíció meghatározására alkalmasak. [32] A módszer lényege, hogy mintavételi pontokon méri az megfigyelni kívánt elektromágneses hullám (vagy a jel egy kitüntetett pontjának) észlelése között eltett időkülönbséget. A rendszer működéséhez legkevesebb három, egymástól nem egyenlő távolságra elhelyezkedő vevőállomás szükséges. Ennek oka egyszerű. Tekintsük az alábbi ábrát (lásd 33. ábra):



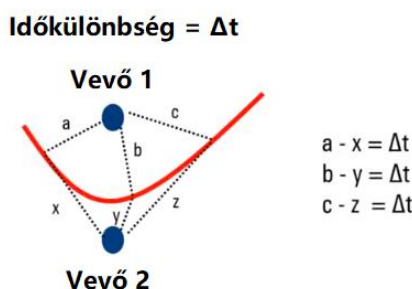
33. ábra Zérus jelterjedési időkülönbség két vevő esetén⁵⁵

Amennyiben a jelterjedési időkülönbség a két vevő között zérus, abban az esetben adott sugárforrás egyenlő távolságra (a pontos távolság nem megállapítható, hiszen a jel

⁵⁴ Time Difference Of Arrival

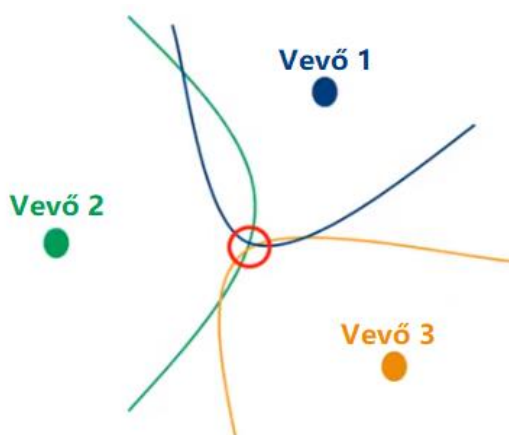
⁵⁵ Forrás: Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.].

kibocsátásának ideje ismeretlen) helyezkedik el mindkét vevőtől. A sugárforrás lehetséges pozícióit grafikusan ábrázolva egy egyenest kapunk (a fenti ábrán látható piros egyenes). Ebből az adatból nem állapítható meg sem irányszög sem pozíció. Hasonló a helyzet akkor is, amikor a két vevő közötti időkülönbség nem zérus. (lásd 34. ábra)



34. ábra Nem zérus jelterjedési időkülönbség két vevő esetén⁵⁶

Ebben az esetben jelterjedési időkülönbség mérhető a két vevő között. A mért időkülönbség (az ábrán Δt -vel került jelölésre) többéle útkülönbség eredményeképpen is létrejöhet. Ha ábrázoljuk a lehetséges pozíciókat ebben az esetben egy hiperbolához jutunk (az ábrán pirossal jelölt vonal). Éppen ezért szokás a jelterjedési időkülönbség mérésén alapuló iránymérésre hiperbolikus iránymérési eljárásnak is hivatkozni. Csupán az így kapott görbe alapján még mindig nem határozható meg sem irányszög sem pozíció. Ahhoz, hogy ezt meg lehessen tenni szükség van egy harmadik vevőre is. (lásd 35. ábra)



35. ábra Három vevőállomás segítségével történő TDOA pozíciómeghatározás⁵⁷

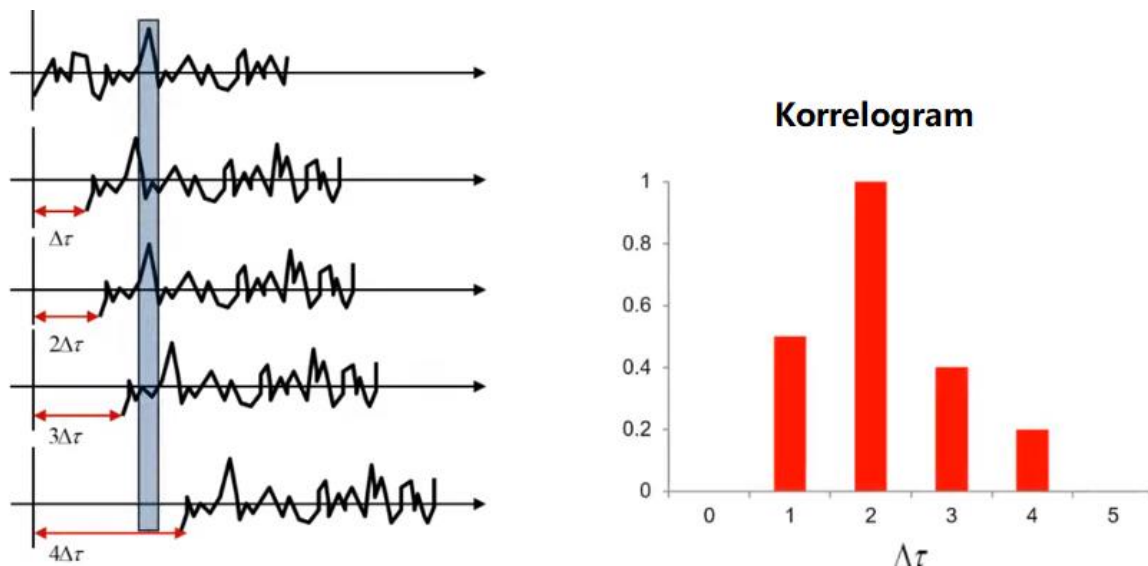
⁵⁶ Forrás: Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.].

⁵⁷ Forrás: Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.].

Abban az esetben, mikor egyidejűleg három antennt alkalmazunk, három hiperbola jelenik meg (rendre képezzük az antennapárok segítségével: 1-2, 2-3, valamint 1-3). A sugárforrás a három hiperbola metszéspontjában található (az ábrán a piros kör jelöli). [29] [32] Mivel a három vevőállomás pozíciója ismert, így a sugárforrás helyzete megadható, ideális esetben, akár 10 méteres pontossággal is. [31]

Felépítését tekintve egy jelterjedési időkülönbség mérésén alapuló rendszer több mérőállomásból és egy mester állomásból áll (ide futnak be az adatok az egyes állomásokról, itt kerülnek elvégzésre a szükséges számítások). A megfelelő működéshez szükséges állomások minimális száma három. Az állomások számának növelésével, bizonyos korlátokon belül, növelhető a mérés pontossága. Gyakorlatban egy sugárforrás pozíciójának megállapítására nem szoktak hat állomásnál többet használni, mert ennél nagyobb számú állomás használata már nem növeli jelentős mértékben a pontosságot viszont a rendszer számítási kapacitás igénye tetemessé válik. A TDOA rendszerek egyik sarkalatos pontja a precíz időmérés és az időszinkron. Ennek érdekében a különböző állomásoknak egyazon órajelet kell használni. Ezt leggyakrabban GPS segítségével valósítják meg, mely egyúttal a különböző állomások pontos helyét is képes megadni. [32] [31]

A jelterjedési időkülönbség mérése esetében keresztkorreláció elvét alkalmazzák. (lásd 36. ábra)

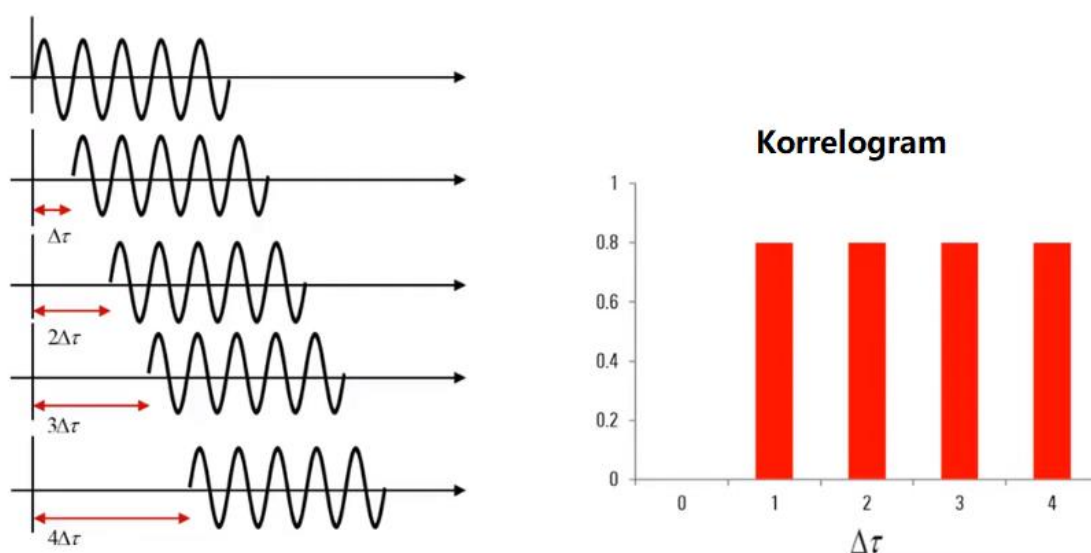


36. ábra Jelterjedési időkülönbség mérése keresztkorreláció révén⁵⁸

⁵⁸ Forrás: Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 03 04 2022].

A folyamat során kiválasztanak a referencia vevő jelből egy jól azonosítható szegmenst (az ábrán ez a szürke sávba eső csúcs a bal oldalon látható legfelső grafikonon) és a vizsgált állomás esetében (amelynek ki szeretnék számítani az időkülönbségét a referencia vevőhöz képest) adott időegységenként vizsgálják a korreláció mértékét. Az így kapott eredmények egy korrelogram segítségével könnyen ábrázolhatóak. Amely időkülönbség értéknél maximális a korreláció (korrelációs csúcs található) az lesz a jelterjedési időkülönbség mértéke. [33]

Fontos kiemelni, hogy korrelációs mérés pontossága nagy mértékben függ a vizsgálni kívánt jel típusától. Ezen mérésfajta főleg szélessávú jelek esetén pontos, keskenysávú jelek esetén vagy CW⁵⁹ jelek esetén felettébb nehéz jól azonosítható jel szegmenst találni, ezért időben a korreláció mértéke alig, vagy rossz esetben egyáltalán nem fog változni, ahogyan ez a következő ábrán is jól látható. (lásd 37. ábra)



37. ábra Jelterjedési időkülönbség mérése során fellépő nehézségek távíró jel esetén⁶⁰

A mérőállomásokkal kapcsolatban fontos megemlíteni, hogy a megvalósításukhoz szükséges antennák nem igényelnek a korrelatív interferometria elvén működő rendszerek esetén alkalmazott antennarendszereknél elengedhetetlen szofisztikált, nagyon precíz gyártástechnológiát. Ennek következtében az egységár viszonylag alacsonyan tartható, így egy nagyobb terület lefedése sem jelent megfizethetetlen költségeket.

A mérési pontosság szempontjából a lefedettség kérdése kulcsfontosságú, hiszen akkor lehet a legpontosabb mérési eredményekhez jutni, ha a megfigyelt sugárforrás a mérőállomások között

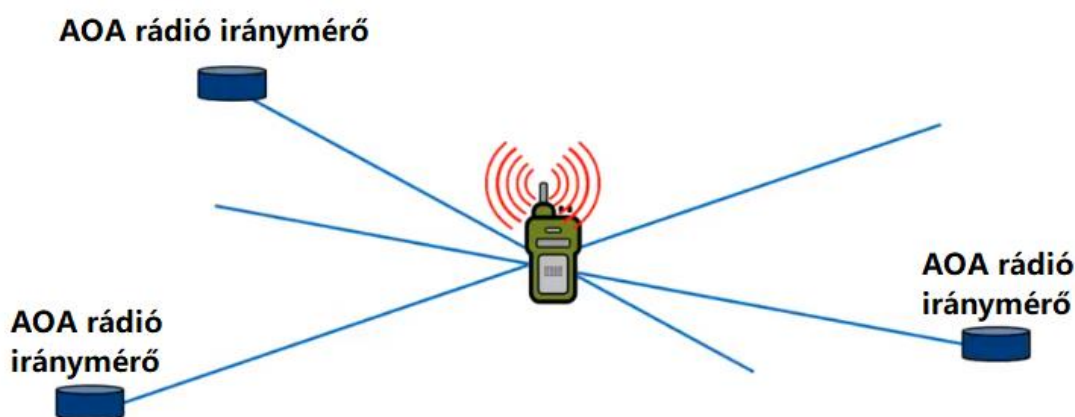
⁵⁹ CW: continuous wave (folyamatos hullám / távíró jel)

⁶⁰ Forrás: Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.]

és a nem azoktól távolabb található. Egy megfelelő lefedettségű terület esetén lehetőség van arra, hogy azoknak a szenzoroknak a jelét vegyük csak figyelembe, melyek a sugárforrás feltételezett pozíciója körül helyezkednek el. Fontos kiemelni, hogy a jelterjedési időkülönbség mérésén alapuló iránymérő rendszerek esetén a szűkebb megfigyelhető jeltartományt ellensúlyozza a többutas terjedés okozta zavarokkal szembeni nagyfokú ellenállóképesség. Ezen iránymérő megoldást leggyakrabban fixen telepítve, városi környezetben (előtrébe kerül a többutas terjedés hatásaival szembeni rezisztencia) mobiltelefonok helyének meghatározására szokás alkalmazni. [31] [32]

2.6. Hibrid iránymérési megoldások

A rádió iránymérő rendszereket tekintve az elmúlt néhány évtized egyik talán legérdekesebbnek mondható újítása a hibrid iránymérő rendszerek megjelenése. Ahogyan ezt a rendszerek elnevezése is sugallja, egy adott rendszer két vagy több, a fentiekben bemutatott módszer együttes alkalmazását jelenti. Az esetek túlnyomó többségében a jelterjedési időkülönbség mérésén alapuló rendszereket kombinálnak amplitúdó vagy fáziskülönbség mérésén alapuló rendszerekkel, melyek a referencia irányhoz képesti beesési szög meghatározására alkalmasak. A továbbiakban ezekre az eljárásokra beesési szög meghatározásán alapuló eljárásként hivatkozok (AOA⁶¹). Ahogy az már korábban említésre került, egy AOA rendszer segítségével meghatározható az elektromágneses sugárforrás iránya, míg három iránymérő berendezés segítségével, háromszögeléssel a kisugárzó állomás pozíciója is (lásd 38. ábra). [34]

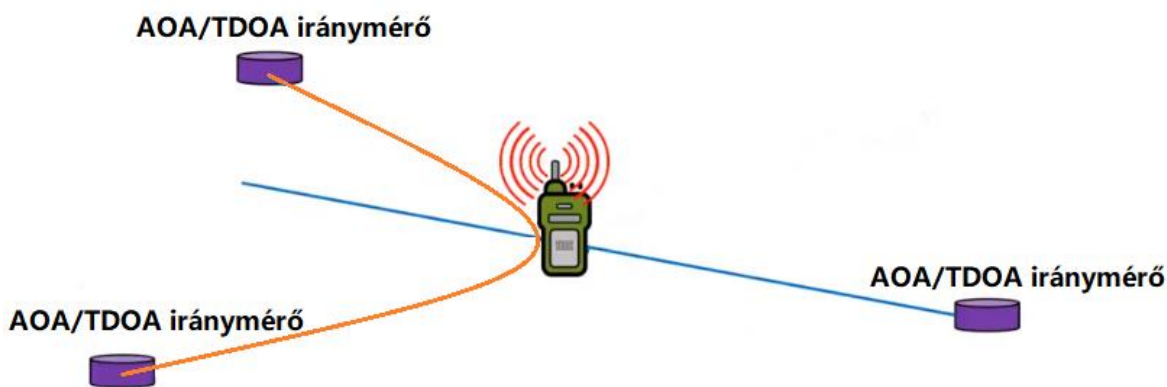


38. ábra Sugárforrás pozíciójának meghatározása háromszögekés útján, AOA rádió iránymérő állomások segítségével⁶²

⁶¹ AOA: Angle Of Arrival – „Beesés Szöge”

⁶² Forrás: Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.].

A TDOA rendszerek segítségével történő pozíciómeghatározás már korábban kifejtésre került. (lásd 34. ábra). Hibrid rendszerek estében a pozíció meghatározása történhet tisztán AOA iránymérő állomások felhasználásával háromszögeléssel, vagy tisztán TDOA iránymérő állomások alkalmazásával a hiperbolák metszésének elvével, valamint ezen módszerek együttes alkalmazására (lásd 39. ábra)



39. ábra AOA és TDOA megoldások alkalmazása egy hibrid rendszeren belül⁶³

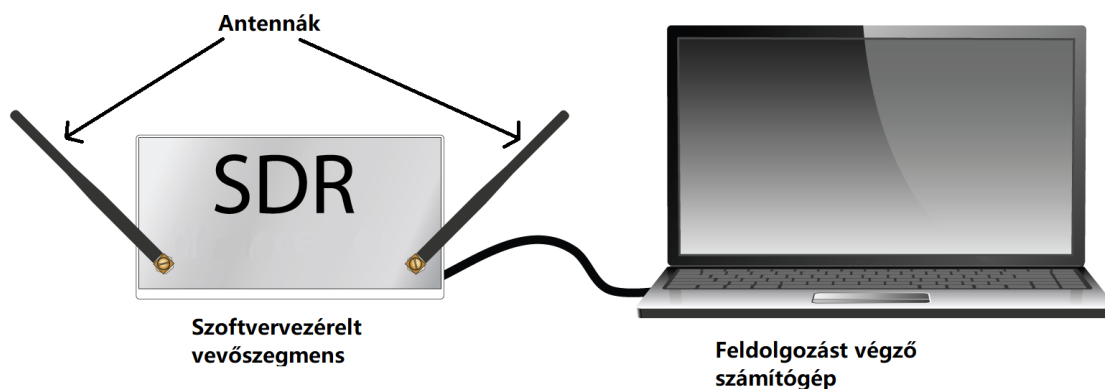
Ahogy az ábrán is látható két hibrid állomás a jelterjedési időkülönbség mérését végzi, míg a harmadik állomás valamilyen irányszög mérési eljárást végezt. A hibrid helymeghatározó rendszerek nagy előnye a nagyfokú adaptivitásban rejlik. Az operátornak lehetősége van a terep és a vizsgálni kívánt jel típusa szerint a legalkalmasabb konfiguráció kiválasztására. Szélessávú jelek esetén, mikor erőteljes a többutas terjedés hatása az adott területen (átszegdelt terep, beépített terület), célszerű a jelterjedési időkülönbség mérésére hagyatkozni, míg keskenysávú jelek vagy CW jelek esetén – elhanyagolható többutas terjedésből eredő zavarhatások mellett – a beesési szög mérésére alapuló valamely módszer alkalmazása eredményesebb. Speciális esetekben az üzemmódok kevert alkalmazása adhatja a legpontosabb eredményt (az egyes állomások környezetét kell figyelembe venni hullámterjedés sajátosságainak szempontjából).

⁶³ Forrás: Saját szerkesztés a következő forrásból átvett ábrarészlet alapján Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 2022.04.06.].

3. SZOFTVERVEZÉRELT RÁDIÓK ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGE

A szoftvervezérelt rádiók (SDR⁶⁴) olyan elektromágneses hullámok utján történő kommunikációra tervezett eszközök, melyek esetében a tradicionálisan analóg, hardveres módon megvalósított részekységek és funkciók (például keverők, szűrők, erősítők, modulátorok, valamint demodulátorok) digitális eljárásokkal, szoftveresen kerülnek kiváltásra egy személyi számítógép, mikro számítógép, vagy éppenséggel beágyazott rendszerre támaszkodva. [35] Bár az elképzelés nem újkeletű (már az 1970-es években foglalkozott az elképzeléssel az Amerikai Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma), széles körben történő elterjedésük csak az utóbbi évtizedben valósult meg a digitális technológia és a jelfeldolgozási eljárások gyors és jelentős fejlődésének köszönhetően.

Egy szoftvervezérelt rádió működtetésének minimális feltétele: egy antenna vagy antennarendszer, mely képes az elektromágneses hullámok vételére, egy számítógép a jelfeldolgozásra alkalmas szoftverrel ellátva, (mely abban az esetben, ha a vett jeleket hanggá kívánják alakítani, rendelkezik hangkártyával vagy digitális-analóg átalakító funkcióval a hangszórók működtetése céljából), valamint az antenna és a számítógép között elhelyezkedő fizikai eszköz, mely antenna által vett elektromágneses hullámokat a számítógép processzora számára feldolgozható digitális jelekké alakítja. (lásd 40. ábra)



40. ábra Szoftvervezérelt rádió alapú rendszer sematikus vázlata⁶⁵

A szoftvervezérelt rádióknak katonai szempontból óriási jelentőségük van, hiszen nagymértékű rugalmasságot biztosítanak az analóg technikai eszközökhöz képest, úgy a vizsgálható

⁶⁴ SDR – Software Defined Radio

⁶⁵ Forrás: Saját szerkesztéssel kiegészítve: <https://umtrx.org/tag/sdr/> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.10.].

modulációk, mint a megfigyelhető frekvenciatartomány terén. Emellett előállítási költségeik is sokkal kedvezőbbek.

3.1. Működési elv

A számítógéphez csatlakoztatott hardver (a továbbiakban SDR) szuperheterodin vevőt tartalmaz, mely egy változtatható frekvenciájú oszcillátor (VFO⁶⁶), szűrők, valamint keverők segítségével hangolja a vett jelet egy köztes frekvenciára. Ezt követően a jelet egy analóg digitális átalakító mintavételezi, digitalizálja. Bizonyos speciális alkalmazási módok esetén a vett jel középfrekvenciára keverése mellőzhető és a jel enélkül is mintavételezhető. [35]

Az alkalmazható analóg-digitális átalakítók érzékenysége sokszor nem terjed ki a mikrovolt alatti tartományra, így az antennáról vett jel erősítése szükséges. A probléma feloldására egy alacsony zajszinttel rendelkező erősítőt szokás a közvetlenül a mintavételezési pont elé beilleszteni. Az erősítő fokozat beillesztésével megjelennek az erősítéssel járó problémák is, így ez csak bizonyos mértékig alkalmazható hatásosan. Gyakori probléma, hogy az intermoduláció, melléksugárzás, vagy a felharmonikusok jelenlétéből érkező zaj elnyomja a keresett jelet, így az erősítés után sem érzékelhető javulás. Ezekben az esetekben megoldást jelenthet különféle sávszűrőknek az antenna és a SDR eszköz közé illesztése. (lásd 41./42. ábrák).



41. ábra SDR eszközhöz csatlakoztatható sávszűrő⁶⁷

A sávszűrők alkalmazásának hatalmas hátránya a szoftvervezérelt rádió eszközök esetében, hogy éppen az ilyen eszközök egyik legfontosabb tulajdonságát, a flexibilitást (nagy frekvenciatartomány monitorizálási képességet) rontják le. Éppen ezért a komplexebb SDR eszközök nem csupán egy antennabemenettel rendelkeznek, mint a felső ábrán látható eszköz, hanem több, meghatározott frekvenciatartományra optimalizált bemenettel rendelkeznek. A

⁶⁶ VFO – változtatható frekvenciájú oszcillátor

⁶⁷ Forrás: <https://www.rtl-sdr.com/tag/filter/> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.10.].

SDR eszköz vizsgálni kívánt frekvenciatartománynak megfelelően választja ki legelőnyösebb tulajdonságokkal rendelkező bemenetet.



42. ábra Sávszűrővel ellátott SDR eszköz (RTL-SDR Dongle)⁶⁸

A digitalizált jelet ezt követően speciálisan erre a célra írt szoftverek segítségével dolgozzák fel. Ezen szoftverek gyakran nyílt forráskódúak (például SDRSharp, Airspy SDR), így lehetőség van a felhasználó egyéni igényei szerint a feladathoz igazítani a szoftveres hátteret, bővítmények (pluginok) segítségével specializálni a programot, személyre szabni a kezelői felületet/grafikai interfészt (GUI⁶⁹).

3.2. Lehetőséges alkalmazási területek

Mint ahogyan az már a fentiekben említésre került, SDR eszközöknek a nagyszámú elérhető analóg és digitális modulációs módoknak és a számítógépes jelfeldolgozásnak köszönhetően számtalan alkalmazási területe van. A feni ábrán látható, alacsony költségű (megközelítőleg 35 amerikai dollár), bárki által megvásárolható RTL-SDR dongle segítségével megvalósítható projektek a teljesség igénye nélkül a következők [36]:

- nem kódolt rendvédelmi/katasztrófavédelmi rádiókommunikáció monitorizálása;
- légiirányítási csatornák figyelése;
- légijárművek követése térképen a kisugárzott pozícióadatok visszafejtése révén;
- ACARS⁷⁰ kommunikáció visszafejtése;
- nyílt trónkölt rádióhálókat figyelése;
- titkosítatlan digitális rádiók közti hangüzenetek elfogása (P25, D-STAR);
- személyi csipogók üzeneteinek elfogása;

⁶⁸ Forrás: <https://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-com-broadcast-fm-band-stop-filter-88-108-mhz-reject-now-for-sale/> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.10.].

⁶⁹ GUI – Graphical User Interface

⁷⁰ ACARS – Aircraft Communication Addressing and Reporting System

- tengeri hajók helyadatainak visszafejtése;
- babafigyelők és vezeték nélküli telefonok hallgatása;
- meteorológiai ballonok követése és a kisugárzott adatok vétele;
- vezeték nélküli szenzorok jeleinek dekódolása;
- VHF tartományú amatőr rádiósok adásának vétele;
- GSM⁷¹ sniffing;
- műholdak és Nemzetközi Űrállomás kommunikációjának vétele;
- meteorológiai műholdak képének vétele;
- rádiócsillagászat;
- randomszámgenerálás;
- különféle TEMPEST⁷² mérések elvégzése (például Van Ech-phreaking lásd 43. ábra);
- elektromágneses hullámforrások irányának meghatározása;
- elektromágneses hullámforrások pozíciójának meghatározása háromszögelés segítségével.



43. ábra Van Ech-phreaking RTL-SDR dongle felhasználásával⁷³

⁷¹ GSM – Groupe Spécial Mobile

⁷² TEMPEST – Telecommunications Electronics Material Protected from Emanating Spurious Transmissions

⁷³ Forrás: <https://twitter.com/vk5qi/status/934005125932204032/photo/1> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.11.].

A lehetséges alkalmazások köre tetszés szerint bővíthető a jelelemző szoftver módosításával, speciális alkalmazási esetekre történő alakításával a hardver szabta határok között. Mi több, az egyszerűbb szoftvervezérelt rádióeszközök nem csak szoftveresen módosíthatóak (szabadszoftveres kezelőfelületek kiváló lehetőséget biztosítanak a kódolási képességek elmélyítésére), de lehetőség van magának a hardvernek is valamilyen szintű módosítására, több egysatornás eszköz egybeépítése révén többcsatornás vevők létrehozására (nagyban támogatja az ezen eszközökkel kísérletezők fejlődését, mélyebb megértést hardveres, mikroelektronikai téren).

3.3. Iránymérő rendszerek SDR-ek segítségével történő modellezési lehetőségei

A fentiekben említett alkalmazási lehetőségek közül, jelen dolgozat esetében, a rádió iránymérésnek és a helymeghatározásnak van kiemelkedő jelentősége. SDR eszközök segítségével a korábban ismertetett rádió iránymérési megoldások mindegyike megvalósítható.

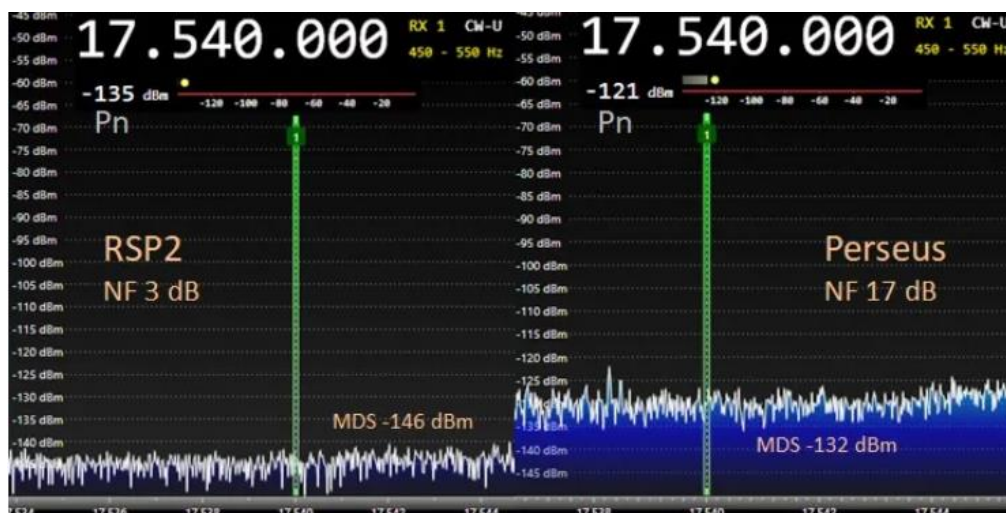
Lehetőség van forgó antenna-karakterisztikájú iránymérő berendezések modellezésére szervomotorok vagy léptetőmotorok felhasználásával (lásd 44. ábra).



44. ábra Szervomotorok segítségével mozgatható irányított antenna⁷⁴

⁷⁴ Forrás: <https://www.aeroexpo.online/prod/uav-factory-ltd-europe/product-174156-63523.html> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.11.].

A fenti ábrán egy szervomotorok segítségével forgatott irányított antenna látható. Az antenna forgatásával a megfigyelt jel erőssége változik (forgó antenna-karakterisztikájú iránymérő berendezések), mely jól nyomon követhető az SDR alapú rendszerek grafikus felhasználói felületén. (lásd 45. ábra)



45. ábra Jelerősségek közti különbség szemléltetése⁷⁵

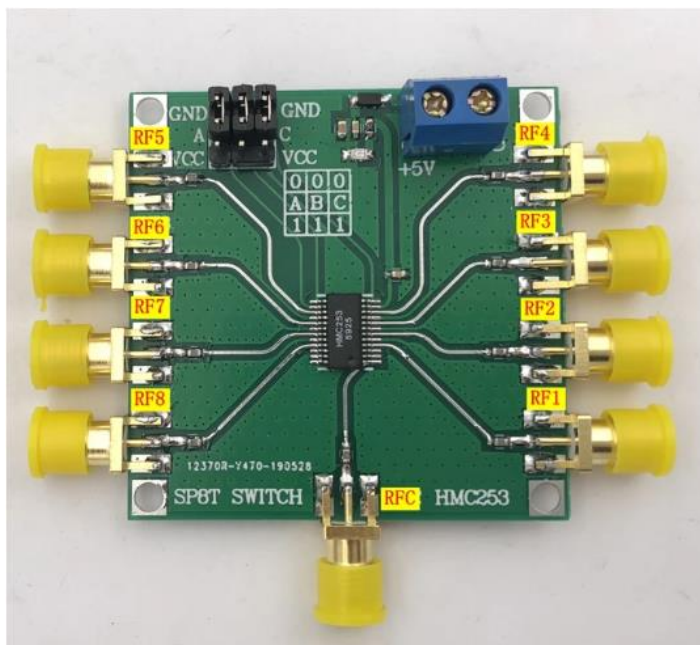
A fenti ábrán jól látható, hogy amikor erősebb a jelszint, akkor az irányított antenna fő nyalábja a sugárforrás fele néz (jobb oldali vízszintes diagram), más esetben a jelszint alacsonyabb (bal oldali vízszintes diagram). A szervomotor vagy léptetőmotor alaphelyzettől történő elmozdulása és a jelerősség változása közötti összefüggés (elfordulás-jelerősséggfüggvény) segítségével meghatározható a sugárforrás mozgatómotor alaphelyzetéhez képesti relatív irányszöge. A mozgatómotor alaphelyzetének valamely északi irányhoz igazítása esetén relatív irányszög is az adott északhoz tájolttá válik.

Elektromosan forgatott (goniométer alapú) iránymérő rendszerek modellezése az előbbiekkal analóg módon történik. Ezen esetekben kevesebb szoftveres ismeret birtokában kevés hardveres módosítás használatával hozható létre működő rendszer.

Hasonló módon építhetők meg Doppler elvű SDR alapú rádió iránymérő rendszerek is. Ezek megvalósításában a mechanikai forgatás kellő sebességének biztosítása, valamint a mérési időpillanatok forgó antenna pozíciójához történő rendelése jelenti a legnagyobb kihívást. Megépítésük éppen ezen okokból kifolyólag nehézkes és az alacsonyabb költségvetésű, oktatási jellegű projektek keretében megvalósuló rendszerek hibavalószínűsége nagy.

⁷⁵ Forrás: <http://play.fallows.ca/wp/radio/software-defined-radio/understanding-sdr-spectrum-noise-floor/>
[Hozzáférés dátuma: 2022.04.11.].

Sokkal hatékonyabb és egyszerűbb SDR-ek alkalmazása esetén pszeudó-doppler rádió iránymérő berendezések modellezése, hiszen olcsó és jó minőségű antennakapcsolók (lásd 46. ábra) segítségével nagyon gyors és alacsony elektromágneses zajkibocsátással járó elektromos/„digitális” antennaforgatás valósítható meg.



46. ábra Nyolc csatornás antenna kapcsoló modul⁷⁶

Pszeudó-doppler rendszer esetében a forgatott antenna nyomon követése sokkal egyszerűbb feladat, hiszen az adott portokhoz tartozó antenna helye térben ismert, a tájolás és adatfeldolgozás is leegyszerűsödik. A mérés pontossága hardveresen a kapcsolható antennabemenetek számától függ (virtuális forgatás felbontásának finomságát határozza meg). Ezeknek a rendszereknek a megvalósítása már középhaladó szoftveres ismeretek kíván meg, mechanikus alkotóelemek elektromos/digitális helyettesítése növeli a komplexitást.

Bár SDR eszközök segítségével épített Doppler és pszeudó-doppler rendszerek bonyolultsági foka nagyobb a forgó antenna-karakterisztikájú iránymérő berendezésekéhez képest, mégis elmarad az interferometrikus és korrelatív interferometria, valamint jelterjedési időkülönbség mérésnek elvén működő rendszerekéhez képest. A haladó szoftveres ismeretek szüksége mellett magasabb hardveres tudás is szükséges. Ezen rendszerek esetében a méréseket egy időben párhuzamosan kell végezni (legyen szó fázis vagy időkülönbség méréséről), így az egycsatornás SDR eszközök alkalmazási nem elegendő. A fáziskülönbség elvén működő

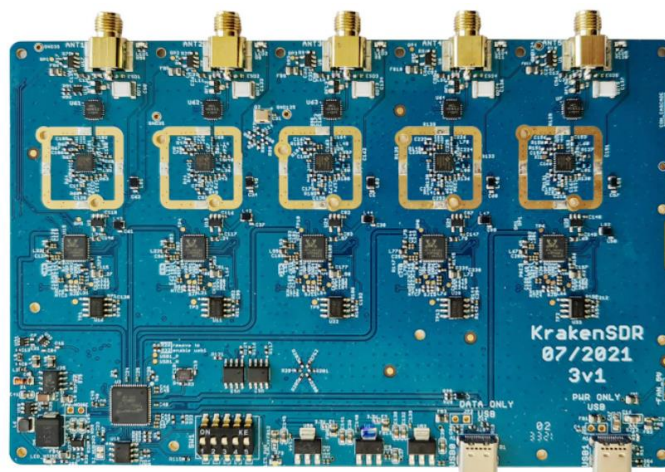
⁷⁶ Forrás: <https://www.aliexpress.com/item/4000938742707.html> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.11.].

adaptív antennarendszerek esetén, a többi módszerhez hasonlóan az elemszám (csatornaszám) határozza meg az iránymérés pontosságát. [37] [38] [39] [40]

Lehetőség van előre gyártott többcsatornás SDR eszközök vásárlására és alkalmazására is, mint például a KerberosSDR (lásd 47. ábra) (négy közös órajellel ellátott csatornával rendelkezik) vagy a KrakenSDR (lásd 48. ábra) (öt közös órajellel ellátott csatornával rendelkezik).



47. ábra KerberosSDR⁷⁷



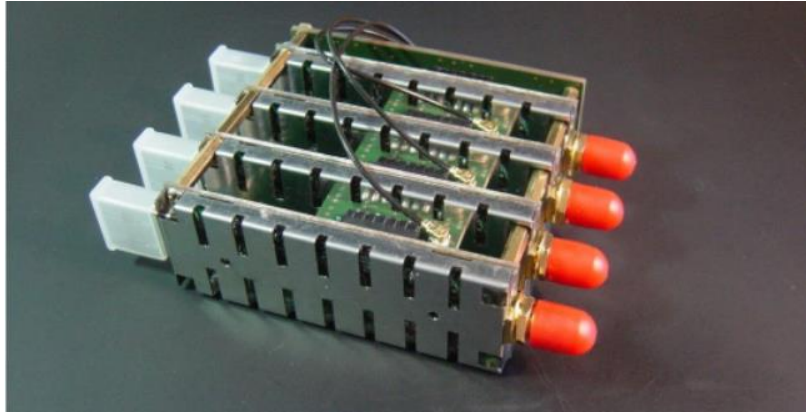
48. ábra KrakenSDR⁷⁸

Az előre gyártott többcsatornás SDR-ek választása tekinthető az egyszerűbb megoldásnak. Haladó hardveres ismeretek birtokában lehetőség van egyszerűbb, egycsatornás SDR-ek (például RTL-SDR Dongle) összeépítésére is, így hozva létre a kívánt többcsatornás eszközt.

⁷⁷ Forrás: <https://www.rtl-sdr.com/kerberos-sdr-now-available-for-pre-order-on-indiegogo/> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.11.].

⁷⁸ Forrás: <https://www.crowdsupply.com/krakenrf/krakensdr> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.11.].

Bár ez a megoldás bonyolultabb és időigényesebb nagyobb rugalmasságot, skálázhatóságot biztosít, hiszen a csatornák számának megválasztása az építőn múlik. (lásd 49. ábra, illetve 50. ábra)



49. ábra Négycsatornás épített SDR eszköz⁷⁹

Az ábrán egy órajelet biztosító modulból és négy RTL-SDR Dongle-ből álló rendszer látható. Szükség szerint kiegészíthető egyéb modulokkal is, úgy, mint sávszűrők, antenna kapcsolók.



50. ábra Példa nagy csatornaszámú koherens vevőre⁸⁰

⁷⁹ Forrás: <https://coherent-receiver.com/products/coherent-receivers/1-supervisory-and-4-coherent-channels> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.11.].

⁸⁰ Forrás: <https://coherent-receiver.com/products/coherent-receivers/1-supervisory-and-4-coherent-channels> [Hozzáférés dátuma: 2022.04.11.].

A csatornaszám az alkalmazási igényeknek megfelelően nagymértékben növelhető. Ezzel arányosan növekszik az előállítási ár és az üzemeltetési komplexitás (szoftveres lekezelési szempontokat figyelembe véve) is.

3.4. Rádió iránymérő berendezések szoftver vezérelt rádió rendszerek segítségével történő modellezésének előnyei az oktatásban

A fentiekben felvázolt rádió iránymérő rendszer modellek tantermi, avagy laboratóriumi esetleg tudományos diákköri tevékenység keretében történő megépítésük kiváló lehetőséget nyújt a rádióelektronikai felderítés – elektronikai hadviselés területén tanuló tisztjelöltek számára szakmai ismeretiek magasabb szinten történő elsajátítására, a hullámterjedés, elektromágnes hullámok, modulációs módok és vevőberendezések fizikai felépítésének jobb megértésére. Ebben az esetben is érvényesek „*A Dolgok Internete (IoT) technológia fejlődési tendenciái és felhasználási lehetőségei a katonai műszaki felsőoktatásban*” című tudományos diákköri dolgozatban megfogalmazott megállapítások, miszerint műszaki jellegű tisztképzés gyakorlatiasabbá tétele új oktatási módszerek implementálásán keresztül magasabb szintű, naprakészebb és jobb minőségű képzés biztosítását teszi lehetővé a honvéd tisztjelöltek számára. [41] Az is megállapítást nyert, hogy a projekt alapú tanulás az egyik leghatékonyabb módja műszaki jellegű ismeretek tartós memorizálásnak és mély megértésének. Szoftvervezérelt rádiórendszereken alapuló projekteket szervesen megába foglaló oktatási modell nem csupán a hallgatók egyéni épülést szolgálja, de jelentős hosszútávú előnyökkel kecsegtet a Magyar Honvédség számára is. Amellett, hogy a hallgatók analitikus, problémamegoldó, valamint önálló forráskutatási és feldolgozási képessége nagy mértékben fejlődne, a Magyar Honvédség olyan műszaki tudással rendelkező tisztekkel gyarapodna, akik képesek bármikor a meglévő rendszerek magasszintű üzemeltetésére, haderőfejlesztésben beszerzésre kerülő új rendszerek zökkenőmentes integrációjára, esetlegesen civil-katonai együttműködések, vagy tisztán katonai projektek keretében saját rendszerek megalkotása céljával történő kutatási-fejlesztési tevékenységek folytatására. Az érintett személyi állomány ilyen jellegű kompetenciákkal történő felruházása tökéletesen illeszkedne a modern, professzionális hadseregekkel szemben támasztott elvárásokhoz, valamint a folyamatban lévő, átfogó haderőfejlesztési program feladatrendszeréhez és kihívásaihoz.

ÖSSZEFOGLALÁS

Ezen dolgozat keretein belül részletesen ismertetésre, valamint összehasonlításra kerültek az elterjedtebb, illetve szélesebb körben ismert rádió iránymérési megoldások, úgy, mint a forgó antenna-karakterisztikájú iránymérő berendezések, doppler és pszeudó-doppler elven működő rendszerek, korrelatív interferometria és jelterjedési időkülönbség mérésén alapuló rendszerek. Ezt követően bemutatásra került a szoftvervezérelt rádió technológia és a szoftvervezérelt rádiók iránymérési rendszerek modellezésében oktatási célzattal történő felhasználási lehetőségei. Végül az SDR rendszerek oktatásra gyakorolt hatásainak vizsgálata következett.

Mindent összevetve kijelenthető, hogy a haditechnikai rendszerekben bekövetkező változások lekövetése mellett elengedhetetlen az ismeretek átadásnak rendszerét is folyamatosan javítani és fejleszteni. Ennek egyik lehetősége a katonai műszaki felsőoktatás vonatkozásában a projekt alapú oktatási módszer szélesebb körben történő alkalmazása, melynek kitűnő kiindulási alapot nyújtanak szoftvervezérelt rádió rendszerek iránymérő berendezések modellezésre történő, fentiekben ismertetett, alkalmazási lehetőségei. Az eddigi információk fényében kijelenthető, hogy az adott területet illetően további kutatások folytatása indokolt, valamint a felvázolt SDR alapú iránymérő rendszerek tényleges, gyakorlatban történő megvalósítása számos új, hasznos tapasztalatot biztosíthat.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Lockheed Martin Corporation, „Electronic Warfare,” Lockheed Martin Corporation, 2022. [Online]. Available: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/electronic-warfare.html>. [Hozzáférés dátuma: 10 04 2022].
- [2] Magyar Honvédség, *Magyar Honvédség összhaderőnemi elektronikai hadviselés doktrína*, Magyar Honvédség, 2014.
- [3] e. t. Prof. dr. Haig Zsolt ezredes, Szerző, *Elektronikai Hadviselés bevezető előadás*. [Performance]. Nemzeti Közsolgálati Egyetem Elektronikai Hadviselés Tanszék.
- [4] K. L. V. L. V. S. Haig Zsolt, *Elektronikai Hadviselés*, Budapest: Nemzeti Közsolgálati Egyetem, 2014.
- [5] RDF PRODUCTS, „WN-001 Web Note,” RDF PRODUCTS, Vancouver, Washington, USA 98682, 2007.
- [6] Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, Naval Shore Electronics Criteria, Washington: Department Of The Navy Naval Electronic Systems Command, 1973.
- [7] H. H. Jenkins, *Small-Aperture Radio Direction-Finding*, London: Artech House Inc., 1991.
- [8] e. t. Prof. dr. Haig Zsolt ezredes, Szerző, *Rádióelektronikai felderítés SIGINT*. [Performance]. Elektronikai Hadviselés Tanszék, 2021.
- [9] G. N. E. O. C. N. C. K. A. Ogonna F. Anaebio, „Performance Improvement of a Direction Finding System,” *European Journal of Engineering Research and Science*, évfolyam 5, szám 1, 2020.
- [10] A. Salisbury, „Safeguarding vessels by radio,” *Popular Science Monthly*, évfolyam: 88, szám 3, pp. 451-453, 1916.
- [11] D. N. András, Szerző, *Hullámterjedés*. [Performance]. Elektronikai Hadviselés Tanszék, 2021.
- [12] E. R. Eaton, *Improvements in Means for Determining the Direction of a Distant Source of Electro-magnetic Radiation*, Mewburn, 1919.
- [13] W. G. D. N. T. W. M. S. Terence C. Green, „Quadrupole adcock direction finder and antenna therefor”. Amerikai Egyesült Államok Szabadalom száma: 05/348479 / G01S3/22; H01Q21/14; (IPC1-7): G01S5/04, 02/17/1976 02 1976.
- [14] R. Y., „Electronics desk,” Electronics Desk, 2022. [Online]. Available: <https://electronicsdesk.com/adcock-antennas.html>. [Hozzáférés dátuma: 05 03 2022].

- [15] Communications Electronic Warfare Section - Electronic Warfare Division, „Review of Conventional Tactical Radio Direction Finding Systems,” Deffence Research Establishment , Ottawa, 1989 .
- [16] J. Proc, „Gander,” [Online]. Available: <http://jproc.ca/rrp/gander.html>. [Hozzáféres dátuma: 09 03 2022].
- [17] B. Bowman, „A look inside a classified Cold War-era antenna site, now shut down,” Internet Archive: WaybackMachine, 25 04 2016. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20170501061010/http://www.ktva.com/inside-a-classified-cold-war-era-antenna-site-now-shut-down-625/>. [Hozzáféres dátuma: 09 03 2022].
- [18] GMT 400, „CDAA, Circularly Disposed Antenna Array, Wullenweber Antenna. What Are They and How Do They Work?,” 01 09 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=26NVgfmQrqq>. [Hozzáféres dátuma: 09 03 2022].
- [19] N. Giordano, College Physics: Reasoning and Relationships, Cengage Learning, 2009.
- [20] M. Poessel, „Waves, motion and frequency: the Doppler effect,” WayBackMachine, 2011. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20170914003837/http://www.einstein-online.info/spotlights/doppler>. [Hozzáféres dátuma: 20 03 2022].
- [21] L. Q. G. Joe Rosen, Encyclopedia of Physical Science, Facts On File, 2010.
- [22] T. N. C. Joseph D. Moell, Transmitter Hunting: Radio Direction Finding Simplified, McGraw Hill Professional, 1987.
- [23] United States. Department of the Army, Radio Direction Finding (Field manual ; FM 30-476), Department of Defense, Department of the Army, 1977.
- [24] D. D. Sadler, Szerző, *HF Radio Direction Finding*. [Performance]. Roke Manor Research Ltd a Siemens Company, 2010.02.25.
- [25] A. H. Bryan Bunch, The history of science and technology : a browser's guide to the great discoveries, inventions, and the people who made them, from the dawn of time to today, Boston: Houghton Mifflin, 2004.
- [26] P. Hariharan, Basics of Interferometry - 2nd Edition, Sydney, Australia: School of Physics, University of Sydney, 2006.10.09.
- [27] F. G.-S. P. N. W. Bernard F. Burke, An Introduction to Radio Astronomy, Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [28] Rohde & Schwarz Radiomonitoring & Radiolocation , „Direction Finders: Introduction into Theory of Direction Finding,” Rohde & Schwarz, 2010.

- [29] Rohde Schwarz, „YouTube Hu,” YouTube, 21 02 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=N8rZIAHxAH4&t=179s>. [Hozzáférés dátuma: 03 04 2022].
- [30] N. M. T. A. Y. N. M. A. B. B. B. M. U. I. Bature, „Multi-baseline Emitter Location System: A Correlative Interferometer Approach,” *Nigerian Journal of Engineering*, évfolyam 27, szám 2, pp. 92-98, 02 08 2020.
- [31] L. Joong-Soo, „The Direction Finding Error of TDOA Method According to the Antenna Arrangement,” *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, évfolyam 11, szám 11, pp. 4503-4508, 2010.
- [32] Anitsu Company, „Time Difference of Arrival (TDOA) - Application Note,” Anitsu Company, United States, 2017.
- [33] Panoradio SDR, „TDOA LOCALIZATION - Correlation for Time Delay Analysis,” Panoradio SDR, 08 04 2016. [Online]. Available: <https://panoradio-sdr.de/panoradio-sdr/>. [Hozzáférés dátuma: 09 04 2022].
- [34] Rhode & Schwartz, „The best of both worlds – hybrid radiolocation by conventional direction finding (AoA) and TDOA,” [Online]. Available: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/212/NEWS_212_TDOA_english.pdf. [Hozzáférés dátuma: 10 04 2022].
- [35] K. M. N. A. Markus Dillinger, *Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions*, Chichester: Wiley, 2003.
- [36] RTL-SDR.COM, „RTL-SDR (RTL2832U) and software defined radio news and projects. Also featuring Airspy, HackRF, FCD, SDRplay and more.,” RTL-SDR.COM, [Online]. Available: <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>. [Hozzáférés dátuma: 21. április 2022.].
- [37] A. Németh és V. Folkmann, „Direction Finding Based on Adaptive Antennas,” in *Slovak University of Technology*, Bratislava, 2002.
- [38] A. Németh és V. Folkmann, „Íránymérés adaptív antennarendszerrel,” *Híradástechnika*, évfolyam 3, pp. 49-54., 2004.
- [39] A. Németh, „Adaptív antennarendszer hardverének realizációja,” *Bolyai Szemle*, évfolyam 1, pp. 75-83., 2004.
- [40] A. Németh, „Adaptív antennarendszer szimulációja,” in *Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem*, Budapest, 2003.
- [41] B. Zoltán, *A Dolgok Internete (IoT) technológia fejlődési tendenciái és felhasználási lehetőségei a katonai műszaki felsőoktatásban*, Budapest: Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Elektronikai Hadviselés Tanszék, 2020.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Elektronikai hadviselés tevékenységei és funkciói.....	7
2. ábra Példa erősen irányított antenna iránykarakterisztikájára	9
3. ábra Botantenna és hurokantenna eredője: kardiodoid görbe.....	10
4. ábra Amplitúdó-érzékeny iránymérési eljárás - szemléltető ábra	10
5. ábra Keretantenna iránykarakterisztikája polár digram segítségével ábrázolva.....	11
6. ábra Kardiodoid görbe minimumhelye.....	12
7. ábra Amplitúdó összehasonlítás módszere	13
8. ábra Bellini-Tosi iránymérő rendszer sematikus ábrája	15
9. ábra Árnyékolt keresztlemű U-Adcock antenna.....	17
10. ábra Csatolt Adcock antenna	17
11. ábra U-Adcock antenna iránykarakterisztika	18
12. ábra Két elemből álló Adcock antenna nyereségének hullámhosszfüggése.....	19
13. ábra Négy elemből álló Adcock antenna nyereségének hullámhosszfüggése.....	20
14. ábra Osztott antennapárokból álló négyelemű Adcock antennarendszer sematikus vázlata	21
15. ábra Nyolcelemű Adcock antennarendszer tandem goniométerrel	22
16. ábra Példa CDAA/Wullenweber antennarendszerre	24
17. ábra Wullenweber antennarendszer egy szeletének sematikus vázlata	25
18. ábra Összeg csatornán megjelenő keresőnyaláb.....	26
19. ábra Rádióiránymérésre használt nyalábforma a különbség csatornán	26
20. ábra Látható fény spektruma	27
21. ábra Doppler iránymérő berendezés sematikus vázlata.....	29
22. ábra Pszeudó-doppler rádió iránymérő rendszer sematikus vázlata.....	30
23. ábra Pszeudó-doppler rendszer működési elvét szemléltető ábra	31
24. ábra Kapcsolási időből adódó fáziskülönbségeltérés	32
25. ábra 12 antennából álló pszeudó-doppler rendszer.....	32
26. ábra Példa különböző frekvenciatartományok megfigyelésére alkalmas pszeudó-doppler antennarendszerek együttes alkalmazására	33
27. ábra Rádiócsillagászatban alkalmazott klasszikus, két elemből álló interferométer blokkvázlata és mérési képe	35
28. ábra Három körsugárzó antennából álló interferométer sematikus vázlata.....	36

29. ábra Rhode & Schwarz gyártmányú ADD153SR típusú UHF/VHF iránymérő korrelatív interferometriás irányméréshez használt antenna.....	37
30. ábra Korrelatív interferometria elvén alapuló rádió iránymérő rendszer antennakonfigurációjának sematikus vázlata	39
31. ábra Korrelációvizsgálat szemléltetése öt antennából álló rendszer esetén	39
32. ábra Beesési szög minőségnek szemléltetése a korrelációs függvény segítségével.....	40
33. ábra Zérus jelterjedési időkülönbség két vevő esetén	41
34. ábra Nem zérus jelterjedési időkülönbség két vevő esetén	42
35. ábra Három vevőállomás segítségével történő TDOA pozíciómeghatározás	42
36. ábra Jelterjedési időkülönbség mérése keresztkorreláció révén	43
37. ábra Jelterjedési időkülönbség mérése során fellépő nehézségek távíró jel esetén.....	44
38. ábra Sugárforrás pozíciójának meghatározása háromszögek útján, AOA rádió iránymérő állomások segítségével	45
39. ábra AOA és TDOA megoldások alkalmazása egy hibrid rendszeren belül.....	46
40. ábra Szoftvervezérelt rádió alapú rendszer sematikus vázlata	47
41. ábra SDR eszközhez csatlakoztatható sávszűrő	48
42. ábra Sávszűrővel ellátott SDR eszköz (RTL-SDR Dongle).....	49
43. ábra Van Ech-phreaking RTL-SDR dongle felhasználásával	50
44. ábra Szervomotorok segítségével mozgatható irányított antenna	51
45. ábra Jelerősségek közti különbség szemléltetése	52
46. ábra Nyolc csatornás antenna kapcsoló modul.....	53
47. ábra KerberosSDR.....	54
48. ábra KrakenSDR.....	54
49. ábra Négy csatornás épített SDR eszköz	55
50. ábra Példa nagy csatornaszámú koherens vevőre.....	55