

Major Gábor, Albert Csongor

A rádiólokáció fejlődéstörténete és napjainkban betöltött szerepe

A rádióhullámok felfedezése és felhasználása óriási technológiai lehetőségnek bizonyult az emberek kezében. A rádióhullámok reflektálódásának segítségével meg tudjuk határozni különböző tárgyak helyzetét. Ebben a publikációban e találmány, nevén nevezve a radar¹ fejlődéstörténetének folyamatát szeretnénk a megjelenésének első pillanatától napjainkig vizsgálni. A radarrendszerek fejlődése a hadiipar bemutatásának egyik fontos alappillére, a másik pillér a civil légi közlekedés biztonságosságának és hatékonyságának állandó növelése. Ezek a radarrendszerek napjainkban is állandó fejlődésen mennek keresztül a kapcsolódó új technológiai vívmányoknak köszönhetően.

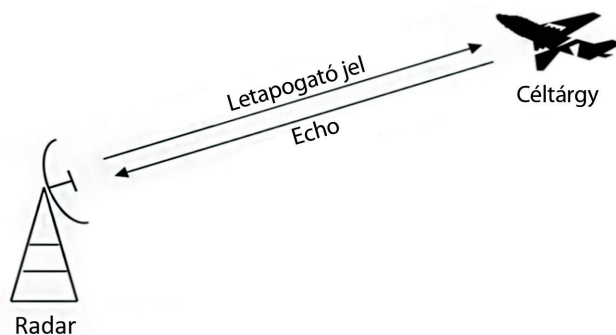
Kulcsszavak: radar, lokátor, rádiófelderítés, fejlesztés, észlelés, pontosság, rádióhullám, antenna

1. Bevezetés

A rádiólokáció a tárgyak vagy objektumok távolságának és helyzetének meghatározását az elektromágneses hullámok használatával teszi lehetővé. Az elektromágneses hullámok térben való terjedése során áthaladva az atmoszférán ütköznek a hullámhosszával összemérhető kiterjedésű szilárd testekkel. Amikor ezek a hullámok találkoznak egy tárggyal vagy objektummal, egy részük visszaverődik, visszatérve az eredeti forrás irányába (1. ábra). A rádiólokációs rendszerek ezt a visszavert jelet érzékelik, és felhasználják az objektumok helyzetének és távolságának meghatározására [9], [24].

Az érzékelők által kapott jeleket feldolgozzák és értelmezik a rendszerbe épített algoritmusok segítségével. Ezek a szoftverek megállapítják az objektum távolságát, irányszögét ezáltal a helyzetét, a kijelzőn pedig megjelenítik ezeket az információkat a felhasználó számára. Az idő vagy a fázis különbségét használják fel a visszavert jelek érzékelésére és az objektumok távolságának meghatározására. Ha ismerjük a küldött és a visszavert jel közötti időeltérést, vagy fáziskülönbséget, akkor meghatározhatjuk az objektum távolságát és helyzetét [9], [24].

¹ A radar egy olyan rendszer, amely rádióhullámok segítségével érzékeli és lokalizálja a tárgyakat. Működése során rádióhullámokat sugároz, és érzékeli a környezetben lévő tárgyakról visszaverődő visszhangokat. A radarrendszereket általában a repülésben, a navigációban és az időjárás-előrejelzésben használják.



1. ábra
A radar működésének alapelve [19]

A rádiólokáció felhasználásának számos alkalmazási területe van, beleértve a légi közlekedést, a hajózást, a járművek automatizált navigációját, a térképezést és helymeghatározást, a térfigyelést és a katonai alkalmazásokat (mint például az elektronikai támogató tevékenység, az elektronikai ellentevékenység és az elektronikai védelem [14]). A technológia folyamatos fejlődése és alkalmazásainak növekedése új lehetőségeket nyit meg a rádiólokáció területén, ami további innovációkat és fejlesztéseket eredményezhet a jövőben [8].

2. A rádiólokáció fejlődéstörténete

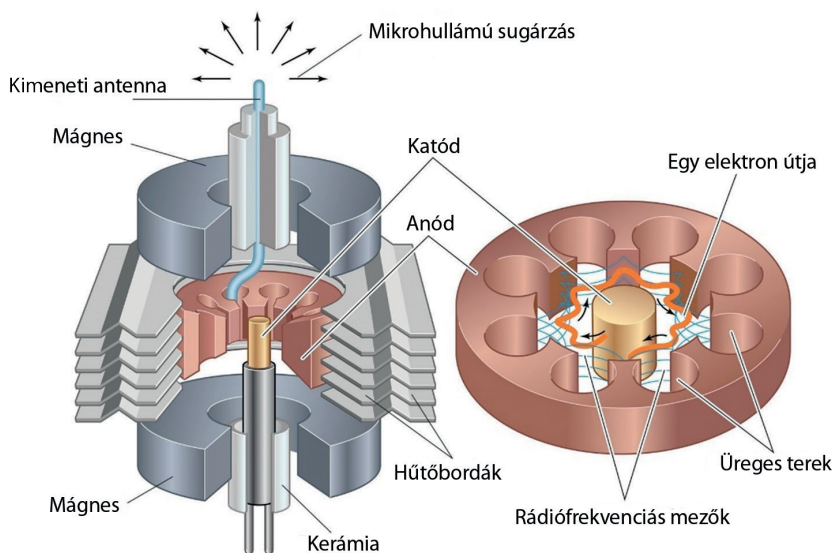
A rádiólokáció fejlesztésének története hosszú múltra tekint vissza, még a világháború előtti évekbe. Már a 19. században fontos fejlesztések folytak a rádióhullámok megismerésére, és azóta is gyorsan fejlődő terület a hétköznapi felhasználás és a tudományok világában [12], [23].

2.1. Kezdeti időszak

A rádiólokációs elvek megértésében az első jelentős lépés a 19. század végén és a 20. század elején volt tapasztalható. Ekkor a tudósok felfedezték az elektromágneses hullámok létezését elméleti úton, majd ezt kísérletekkel bizonyították is. Ez a hullámok terjedésében és reflexiózásában mutatkozott meg, amit elsősorban fémes tárgyakon próbáltak, így ezáltal a távolságmérésben rejlő esetleges potenciál lehetősége adódott [12], [23].

Az első jelentős mérőföldkövek a rádiólokáció területén a rádiótechnika mint műszaki terület kialakulásával kezdődtek a 20. század elején. A rádióadók és -vevők kifejlesztése lehetővé tette az elektromágneses hullámok észlelését és megfigyelését a mérnökök számára és azok visszaverődésének érzékelését a vevő antenna által [12], [23].

Albert Wallace Hull² 1924-ben találta fel a magnetront (2. ábra), azt az elektroncsövet, amely megfelelő hatásokkal képes nagy teljesítmény kibocsátására, nagyfrekvenciás jelek formájában [23].



2. ábra
A magnetron felépítése [4]

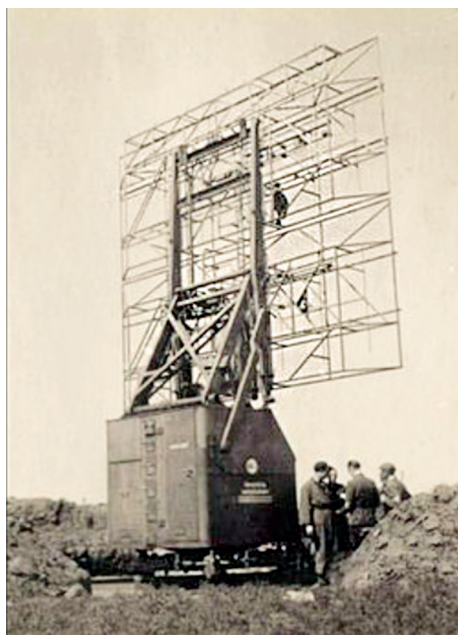
Az elsőként alkalmazott rádiólokációs rendszerek között szerepelt az úgynevezett RDF³-rendszer, amelyet a hajózásban használtak az irány meghatározására, különösen rossz időjárási körülmények között. Az ezen alapuló eszközök azonban még nem voltak képesek pontosan meghatározni a távolságot vagy a tárgyak pontos pozícióját [12], [23].

2.2. A II. világháború és az azt megelőző időszak

A II. világháború előtti években a rádiólokáció fejlesztése gyorsulni kezdett, különösen a katonai légvédelmi célokra történő hadipari fejlesztések terén. A radartechnológia létrehozása és elterjedése az egyik jelentős fejlesztési irány ebben az időszakban. A légvédelmi radarrendszerek lehetővé tették a repülőgépek és más légi járművek detektálását, követését és azonosítását, ez jelentősen hozzájárult a sikeres légtérvédelemhez. E technológiák fejlesztését az országok szigorúan titkosnak tekintették, mivel úgy vélték, hogy a közelgő háborúban jelentős előnyt fog jelenteni számukra [12], [23].

² Albert Wallace Hull (1880. április 19. – 1966. január 22.) amerikai fizikus és villamosmérnök, aki hozzájárult a vákuumcsövek kifejlesztéséhez, és felfedezte a magnetront.

³ Direction Finding – iránymérés (DF), Radio Direction Finding – rádióiránykeresés (RDF), rádióhullámok használata a rádióforrás irányának meghatározására.



3. ábra

Egy korabeli radarantenna a II. világháború időszakából [12]

Az első katonai ütközet, amelyben éles radarrendszert alkalmaztak az az angliai csata volt, ahol a britek a szigetország déli részére antennahálózatot építettek, amelynek neve „Chain Home”⁴ volt (3. ábra). Ez a kezdetleges radarrendszer antennatornyokon alapult, emiatt helyhez kötött volt. A rendszer alkalmazásával a Royal Air Force⁵ sikeresen tudott védekezni a német bombázók támadásai ellen. Miután a német pilóták rájöttek, hogy kapcsolat van a RAF sikeres védekezése és az antennatornyok között, jelentős célokká minősítették azokat. A világháború végére már Németország is rendelkezett sikeresen alkalmazható radartechnológiával, amely jelentősen pontosabb volt, mint az antanthatalmak⁶ által használt berendezések [12].

A radarfejlesztések később a II. világháborúban kulcsfontosságú szerepet játszottak az ellenséges csapások megelőzésében és elhárításában. A radarok nagyban hozzájárultak az ellenséges erők bombázóinak felderítéséhez és megsemmisítéséhez, valamint a tengeri csaták kimenetelében is szerepet játszottak [12], [23].

⁴ Chain Home vagy röviden CH volt a kódneve azoknak a part menti korai előrejelző radarállomásoknak, amelyeket a Királyi Légierő (RAF) épített a II. világháború előtt és alatt a repülőgépek észlelésére és követésére. Eredetileg RDF néven ismerték, és 1940-ben az Air Ministry Experimental Station Type 1 (AMES – Légiügyi Minisztérium Kísérleti Állomás) hivatalos nevet kapta.

⁵ A brit Királyi Légierő (angolul Royal Air Force, RAF, jelentése „Királyi Légierő”).

⁶ Az antant kifejezés az Anglia és Franciaország között 1904. április 8-án Londonban aláírt szerződés, az Entente cordiale (szívélyes egyetértés) kifejezésből származik, és általában a szövetségi rendszer (antanthatalmak = Nagy-Britannia és Franciaország) és a körükbe csoportosult országok együttes jellemzésére használjuk.

2.3. Hidegháború

A hidegháború ideje alatt a radarok fejlesztése és precizítása továbbra is kulcsszerepet játszott a katonai stratégiában és a légtér védelmében. Az Egyesült Államok és a Szovjetunió közötti feszültségek miatt mindkét fél jelentős erőforrásokat fektetett a radarfejlesztésbe és azok alkalmazásába [3], [11], [29].

A legfontosabb alkalmazási terület a légi és űrfelderítés volt. A radarrendszerek lehetővé tették a légtérsértés felderítését, továbbá jelentős szerepet játszottak a légtér ellenőrzésében és a légi közlekedés biztosításában. Az űrfelderítés és az űrkutatás is fontos helyet foglalt el a hidegháborús űrversenyben, segítve a műholdak követését és az űrben történő események megfigyelését [3], [29].

Emellett a radarok fontos szerepet játszottak a nagy hatótávolságú rakétavédelemben is. Mindkét fél nagyobb mennyiségű ballisztikus rakétát és interkontinentális ballisztikus rakétát fejlesztett, amelyeket gyakran nukleáris fejjel láttak el, amelyek rendkívüli fenyegetést jelentettek a hidegháború során. A radarok segítettek a rakéták detektálásában és nyomon követésében, lehetővé tették a lehetséges korai riasztást és a védelmi intézkedések meghozatalát [3], [11], [29].

2.4. A radarok civil felhasználása a II. világháború után

Az 1950-es évektől kezdve a radarok nemcsak a katonai szférában, hanem a civil felhasználásban is jelentős fejlődésen mentek keresztül. Ennek köszönhetően egyre szélesebb körben kezdték alkalmazni. Ezzel egy időben megjelent a másodlagos radar fogalma is. Ebben az időszakban az egyik legjelentősebb alkalmazási területté nőtte ki magát a légiforgalom-irányítás, ahol jelentős volt a térhódítása a másodlagos radarnak. Mivel ebben az esetben nem a rádióhullámok reflektálásának érzékelésén alapult a felderítés, hanem egy kérdés és a rá adott válasz kisugárzásán és fogadásán, ezért óriási mennyiségű energia megspórolása mellett több információt is megtudhattunk a másodlagos radar által az észlelt légi járműről [7], [16].

A mind szélesebb körben és mindinkább forszírozott használat során 1941-ben rájöttek, hogy a radarindikátoron nemcsak a fémes tárgyak jelennek meg, hanem a zivatarfelhők is. Az amerikaiak már 1943-ban kezdetleges meteorológiai radarokat is használtak az időjárás előrejelzésére a hajók és a légi járművek számára. A technológia a világ számos pontján az 1950-es években terjedt el, legyen az USA, Európa vagy a Szovjetunió. A világháborút követő évtizedekben a radarok egyre fontosabb szerepet kaptak az időjárás-előrejelzésben és a meteorológiai, éghajlati megfigyelésekben. A radarok segítették az időjárási viszonyok és viharok követését, így előrevetítettek meteorológiai jelenségeket, mint az eső, a hó, a viharok és más meteorológiai jelenségek. Ezáltal növelték az előrejelzések pontosságát és az időben történő riasztásokat, aminek jelentős szerepe volt a veszélyes időjárási körülmények kezelése szempontjából a repülési és hajózási tevékenységek megtervezése során [5], [21].

3. Radarok csoportosítása

Mint minden mást, a radarokat is csoportosíthatjuk különböző „jellemvonásaik” szerint. A két legfontosabb csoportosítási szempont a működési elv és a felhasználás [10], [24], [28].

3.1. Működési elv szerint

Két alapvető technológia van a radarok működési elve szerint, ezek felderítési mechanizmusban teljesen eltérnek egymástól [24], [28].

3.1.1. Elsődleges radarok

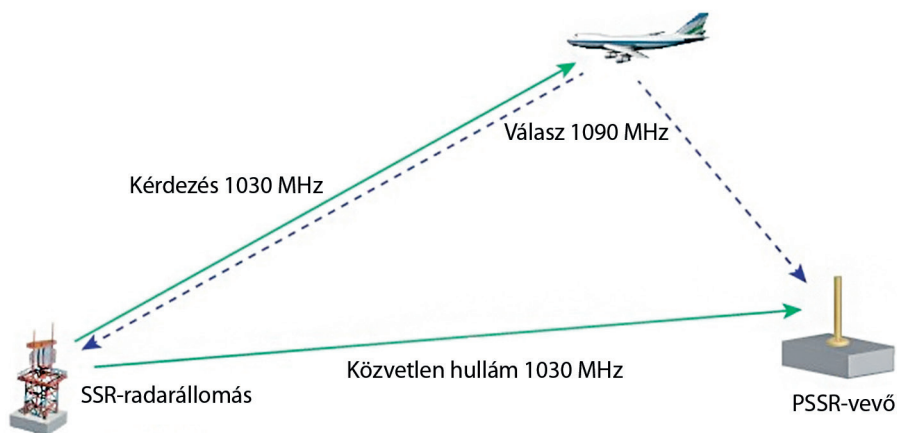
Az elsődleges radar (Primary Surveillance Radar) működési alapelve az, hogy a radarantenna nagy teljesítményű elektromágneses impulzust bocsát ki a felderítendő céltárgy irányába, az elektromágneses impulzus visszaverődik a repülő tárgyról, viszont ez a visszaverődő impulzus nagyságrendekkel kisebb lesz, mint a kibocsátott. A visszaverődő jel egy része a vevőbe kerül. A visszavert jel „utazási” idejéből egy számítógépes rendszer kiszámítja a céltárgy valódi távolságát. A kibocsátott jel oldalszögéből és helyszögéből pedig kiszámítható a tárgy vízszintes távolsága és a radarhoz viszonyított helyzete egyaránt [24], [25], [26].

Az elsődleges radarrendszereknek kulcsfontosságú szerepük van azon repülőgépek észlelésében, amelyek a személyzet hanyagságából adódóan vagy ellenséges céllal nem jelentkeznek be az adott ország légterébe érve a másodlagos radar által érzékelt frekvencián. Emiatt az elsődleges radarok védelmi célt szolgálnak az adott ország számára, míg napjainkban a másodlagos radarok, amelyekről a következő részben írunk, az egyre bonyolultabb nemzetközi légi forgalom lebonyolításában játszanak fontos szerepet [10].

3.1.2. Másodlagos radarok

A másodlagos radar (Secondary Surveillance Radar) működési alapelve, hogy az interogátor küld egy kérdést a repülőgép-transzponder⁷ felé 1030 MHz-en, amelyet vesz a repülőgép transzpondere és feldolgozza, majd a kérdésre a repülőgép jeladója 1090 MHz-en küld választ a földi másodlagos radarnak (4. ábra). A transzponder által küldött válasz az elmúlt évtizedek során sokat módosult, ezáltal nemcsak a repülőgép távolságát és azonosítóját adja meg, hanem különböző más adatokat is mint magasság vagy sebesség. A transzponder válasza nagyban függ az interogátor által kibocsátott kérdéstől, amely lehet Mode A, B, és S. A katonai repülőgépek irányításánál is megjelenik a másodlagos radar, azzal a különbséggel hogy a katonai gépeknél a transzponder válaszában típusát Mode 1, 2, 3, 4 kóddal jelölik, de ezek megfeleltethetők a civil változat elvárásainak. Ez a rendszer azonosítja egyedi azonosító alapján a repülőgépeket és követi azokat az általuk sugárzott jelek által, amelyeket transzponderrel sugároznak [7], [16].

⁷ A transzponder a repülésben használt radar-válaszjeladó megnevezése, amely név az angol transmit (továbbít, sugároz) és responder (válaszadó) szavak összevonásából származik.



4. ábra

Másodlagos radar működése, az interogátor és a transponder kommunikációja [22]

A másodlagos radarok fő funkciói közé tartozik a repülőgépek pontos azonosítása és követése a légtérben, amely lehetővé teszi a légi irányítók számára a biztonságos légi forgalom irányítását és felügyeletét. Emellett elengedhetetlenek a légi közlekedési hatóságok számára a légi forgalom felügyeletében és a biztonsági intézkedések végrehajtásában [7], [16].

3.2. Rendeltetés szerint

A légi közlekedés biztonságának növelése miatt a repülőterek üzemeltetői több részre osztották a feladatokat, amelyekhez radarberendezés szükséges. E feladatok ellátására különböző adottsággal rendelkező berendezéseket követelnek meg [10].

3.2.1. Távolkörzeti radar (Air Route Surveillance Radar)

A távolkörzeti radarberendezések olyan rendszerek, amelyek nagy távolságra képesek észlelni és követni a repülőgépeket. Ezek a berendezések kiterjedt területeket képesek lefedni, mert nagy hatótávolsággal rendelkeznek, ami lehetővé teszi a korai figyelmeztetést és az idejében történő reagálást a légtérben zajló eseményekre [10].

3.2.2. Közelkörzeti radar (Terminal Surveillance Radar)

A közelkörzeti radarberendezés a repülőterek közelkörzeti területeiben megnövekedett számú repülőgép felszállását, leszállását és átrepülését hivatott követni. Vannak közelkörzetek, ahol csak az adott repülőtér légi forgalmát kell követni, ezért rendszeresen ellátja a repülőtéri ellenőrző radar szerepkörét is. Működésileg és felépítésileg nagyon hasonló a távolkörzeti radarhoz, viszont hatótávolságban elmarad attól [10].

3.2.3. Repülőtéri légtérelenőrző radar (Airport Surveillance Radar)

Míg a közelkörzeti radar egy bizonyos körzet összes repülőtérének légtérforgalmát irányítja, addig bizonyos nagy forgalmú repülőterek ezenkívül el kell legyenek látva saját légtérelenőrző radarral. Ez a radar műszeres megközelítés végrehajtására is alkalmas [10].

3.2.4. Leszállító radar (Precision Approach Radar)

Ez a radarberendezés a futópálya precíziós megközelítését teszi lehetővé különböző időjárási viszonyok között [10].

3.2.5. Repülőtéri ellenőrző, gurító radar

E radartípusok a repülőtér földi forgalmát figyelik, beleértve a futópályát és a taxiutakat. A repülőtér földi forgalmába beletartoznak a nem repülő járművek, mint például a földi kiszolgálást segítő járművek [10].

4. Magyarország korszerű radartechnikája

Magyarország NATO-csatlakozásának egyik feltétele volt, hogy a szövetség által használt valamely radartechnikára váltsa le az elavult P-37 szovjet gyártmányú lokátort (adatok az 1. táblázatban láthatók) [17].

Magyarország a P-37 rádiólokátorok modernizálása mellett vásárolt három darab olasz gyártmányú, RAT-31 DL típusú háromdimenziós távolkörzeti radart. Ezeket az ország három különböző pontjára úgy helyezték el, hogy lefedje Magyarország egész légtérét 500 km-es hatótávolságával, ezért Békéscsaba, Bánkút és Medina lett a telepítési hely. A RAT-31 DL rádiólokátor egy L-sávú, szilárd testű, fázisvezérelt, 3D-s felderítő lokátor. A radarantennatömbök egy gömb alakú búrával vannak körülvéve a mechanikai védelem érdekében (5. ábra) [17].



5. ábra

A Békéscsabán üzemelő RAT-31 DL radarkomplexum [17]

A RAT-31 DL radarkomplexum felépítése tartalmaz egy elsődleges és egy másodlagos radarrendszert. Ezek egymásra helyezve növelik a megbízhatóságot, mi több, a fent említett ismeretlen gépek is felderíthetővé válnak, amelyek nem kommunikálnak a másodlagos radarral [17], [18].

1. táblázat
A szovjet P-37 és a RAT-31 DL összehasonlítása [17]

	P-37 „Bar Lock”	RAT-31DL
frekvencia	2695–3115 MHz (S-sáv)	1–2 GHz (L-sáv)
antennafelület		77 m ²
radarimpulzus ismétlődési idő [PRT]	2,6 ms; 1,3 ms	
radarimpulzus ismétlődési frekvencia [PRF]	375 pps; 750 pps	
radarimpulzus hossza [τ]	1,2 μs	
csúcsteljesítmény	5–700 kW	84 kW
átlagteljesítmény	5–700 W	
mérési távolság	350 km	500 km
sáv szélesség	2°	
találatok pásztázásonként	> 8	1–3
antennaforgási sebesség	3/6 rpm	6 rpm

5. A radartechnológia jelen és jövőbeli fejlődése

A rádiólokáció napjainkban fejlődő iparág, mivel a leterhelt légtér és légi forgalom figyelése és a katonai repülő eszközök elhárításának fontossága a 21. században új értelmet nyert, emiatt a radartechnika egyre pontosabbá válása kulcsfontosságú az adott országok számára [1], [3].

5.1. Újítások és fejlesztések a radartechnológiában

A 21. században a radartechnológiában számos jelentős innováció és korszerűsítés jelent meg, köztük a Magyarországon rendszeresített RAT-31DL típusú radar is példa rá. E korszerű technológiai innovációk jelentősen javították a radarok teljesítményét és alkalmazhatóságát civil és katonai szempontból egyaránt. Ezek közé tartozik a digitális jelfeldolgozás elterjedése, amely lehetővé teszi a radarjelek pontosabb elemzését és a háttérzaj csökkentését, ezáltal növelve a radarok érzékenységet és hatékonyságát [13], [30].

A széles sávú és többsávú radarok elterjedése további információkat nyújt a célokról és növeli a radarok alkalmazhatóságát változatos környezetekben. Ezzel szemben az aktív elektronikus szkennelés (AESA)⁸ lehetővé teszi az elektronikus irányítást és fókuszálást, ami gyorsabb és hatékonyabb célkövetést tesz lehetővé [6], [30].

⁸ Active Electronically Scanned Array – aktív elektronikusan pásztázott tömb: egy számítógép által vezérelt antennatömb, amelyben a rádióhullámok nyalábjá elektronikusan irányítható különböző irányokba az antenna mozgása nélkül.

Az adaptív impulzus sűrűségű⁹ (APD-)¹⁰ radarok képessé teszik az impulzusok sűrűségének dinamikus változtatását a környezeti viszonyoknak és a célok jellemzőinek megfelelően, ezzel növelve a radarok rugalmasságát és alkalmazhatóságát. Emellett az automatizált célfelismerő és -követő rendszerek segítenek azonosítani és követni a potenciális célokat nagy adatmennyiségek mellett is [1], [20].

5.2. A radarok általános kihívásai és technikai korlátai

A radarok működése számos kihívással és technikai korlátozással jár együtt. Ezek a kihívások jelentősen befolyásolhatják a radarok hatékonyságát és pontosságát, valamint korlátozhatják alkalmazási területeiket is. Az egyik legfontosabb kihívás a radarok számára a szóródás és visszaverődés. A változó környezeti tényezők, az időjárás vagy a környező tárgyak, jelentős szóródást és visszaverődést okozhatnak, ami nehezítheti a célok pontos észlelését és követését. Ennek kiküszöbölésére a statikus tárgyakat a radarrendszer nem jeleníti meg [24].

A radarokat zavarhatja az elektromágneses interferencia, amelyeket más eszközök vagy a környezet sugároz. Ezek a nem befolyásolható zavarok akadályozhatják a radarok pontosságát [20]. A radarok hatótávolsága korlátot jelent az elektromágneses hullámok terjedési tulajdonságai miatt, mivel a föld görbülete miatt a hullámok a föld felszínén nem tudnak tovább terjedni, ha az túl alacsonyan van, és amiatt nem tud a kibocsátott hullám róla visszaverődni [25], [26].

A radarok képességei határainak meghatározásában az is fontos tényező, hogy milyen felbontású képet tudnak alkotni a környezetükről. A térbeli felbontás fontos tényező, amely befolyásolhatja a radarok teljesítményét. A radar térbeli felbontása az a képesség, amely lehetővé teszi a radarrendszer számára, hogy megkülönböztesse a különböző tárgyakat vagy célokat térbeli elhelyezkedésük alapján. Mindez alapvető fontosságú a radarrendszer teljesítményének és funkcionalitásának szempontjából. Kisebb célok észlelése vagy a célok közötti megkülönböztetés néha kihívást jelenthet ebből a szempontból. A nagy hatótávolságú és magas felbontású radarrendszerek magas energiaigénnyel járnak, ami további korlátokat jelenthet az elterjedésüket és alkalmazhatóságukat tekintve [13], [27]. Ezenkívül a kisebb célok észlelése vagy a célok közötti megkülönböztetés is nehezebb lehet a nagyobb térbeli felbontású rendszerek esetében. Ezért fontos a radarrendszerek tervezése során figyelembe venni az egyensúlyt a felbontás, a hatótávolság és az energiafogyasztás között.

A radarok által gyűjtött adatok feldolgozása és értelmezése is komoly számítási kapacitást igényel a nagy mennyiségű adatok elemzése során. Az automatizált célfelismerés és követés rendszereinek fejlesztése jó út lehet a radarok modernizációja szempontjából. Ezek a kihívások és korlátok komplex tervezést és fejlesztést igényelnek annak érdekében, hogy a radarok hatékonyan működjenek és kielégítsék az adott alkalmazási igényeket [2].

⁹ Ez a radartípus fejlett feldolgozási technikákat alkalmaz a célpontok felderítésének és követésének javítására kedvezőtlen időjárási körülmények között. Az adaptív impulzussűrűségű radart úgy tervezték, hogy a radarjelek átviteli teljesítményét és frekvenciáját az adott környezet és a célpont jellemzői alapján optimalizálja. Ez pontosabb és megbízhatóbb észlelést tesz lehetővé, ami különösen hasznos az olyan alkalmazásokban, mint az időjárás-figyelés, a légi forgalmi irányítás és a katonai megfigyelés.

¹⁰ Adaptive Pulse Density – adaptív impulzussűrűség.

Tehát ezek az általános kihívások és technikai korlátok (úgy mint a zavarok és az interferencia, a térbeli felbontás és a hatótávolság, az energiafogyasztás, a célok megkülönböztetése, a szögfelbontás és a fedett területek) rámutatnak arra, hogy a radarrendszerek fejlesztése és működtetése bonyolult feladat lehet, és számos tényezőt kell figyelembe venni a hatékony és megbízható működés érdekében. A radarrendszerek tervezése során ezeket a tényezőket mindig figyelembe kell venni, hogy optimalizálják a teljesítményt és a funkcionalitást a kívánt alkalmazásokban.

6. Következtetés

A radartechnológia fejlődése az elmúlt évtizedekben nagyon jelentős volt, és ma is fontos szerepet játszik a különböző területeken, mint például a katonai felderítés, a légi forgalom irányítása, az űrkutatás, a meteorológia, vagy éppen az autonóm járművek. A radartechnológia jövőbeni fejlődésében több kutatási irány is kirajzolódik, mint például a növekvő felbontás és pontosság. Ez várhatóan lehetővé teszi majd a kisebb célok jobb észlelését és azonosítását. A következő terület a fejlesztés terén az új frekvenciák felhasználása, ami a hagyományos rádiófrekvenciák mellett egyre nagyobb figyelmet fordít a milliméteres és szubmilliméteres hullámhosszúságú rádióhullámok, valamint a LIDAR¹¹ radarok kutatására és fejlesztésére. Ezek a rendszerek lehetővé tehetik a nagyobb adatsűrűségű információgyűjtést és a jobb felbontású képek elérését. Ilyen további kutatás lehet még a mesterséges intelligencia és gépi tanulás alkalmazása. A mesterséges intelligencia és a gépi tanulás egyre nagyobb szerepet kap a radaradatok feldolgozásában és értelmezésében. Ezeknek a technológiáknak a célok azonosításában, a zavaró jelenségek szabályozásában és a radarrendszerek hatékonyságának növelésében is feladata lesz. A mikroelektronika és a nanotechnológia fejlődésének köszönhetően a radarrendszer méretének és költségének csökkentése lehet a miniatűr radarrendszerek hatalmas nyeresége. Ezáltal lehetővé válik majd a minél szélesebb körű alkalmazás például a személyi elektronikai eszközökben, a földi-vízi járműveken, vagy éppen a pilóta nélküli légi járművek fedélzetén, amelyek ezáltal a fedett nemzetbiztonsági jellegű műveletekben is nagyobb szerepet kaphatnak [15]. Végül a kvantumtechnológiával összhangban a jövőben várható fejlődésnek a kvantumradarok is részei lehetnek, amelyek a kvantumelv¹² alapján működnek, és lehetővé teszik a jelenlegi radarrendszerekkel összehasonlíthatatlanul jobb teljesítményt és pontosságot.

Összességében elmondható, hogy a radartechnológia folyamatosan és dinamikusan fejlődik, az új technológiák és alkalmazási területek felhasználása során mindinkább hatékonyan, olcsóbban, pontosabban és lényegesen szélesebb körben használható.

¹¹ A LIDAR (Light Detection and Ranging) olyan technológia, amelyet távolságok mérésére és tárgyakról és környezetekről nagy felbontású 3D-képek készítésére használnak. Lézersugarakat bocsát ki, és rögzíti a sugarak visszaverődésének idejét, ami pontos méréseket és térképezést tesz lehetővé.

¹² A kvantummechanikai határozatlansági reláció alapvető, elméleti határ bizonyos fizikai mennyiségek egyszerre, teljes pontossággal való megismerhetőségére. Ilyen mennyiségpár például a hely és az impulzus, minél pontosabb értéke van az egyiknek, annál pontatlanabb a másiknak.

Felhasznált irodalom

- [1] Balajti I., „A magyar légtérellenőrzés jövőbeni műszaki kihívásai,” *Haditechnika*, 52. évf. 3. sz. pp. 27–31. 2018. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.52.2.07>
- [2] Balajti I., „A XXI. századi radarrendszerekkel szemben támasztható elvárások,” *Haditechnika*, 53. évf. 3. sz. pp. 3–8. 2019. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.3.01>
- [3] Balajti I., „Új kihívások a hazai légtérellenőrzésben,” *Haditechnika*, 53. évf. 2. sz. pp. 2–7. 2019. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.2.01>
- [4] Britannica, *magnetron*. szócikk, [é. n.]. Online: www.britannica.com/technology/magnetron
- [5] Budai O., *Földbázisú távérzékelés a meteorológiában*. Szakdolgozat, Budapest, ELTE, 2009. Online: https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/BSc/Budai%20Oliver_2009.pdf
- [6] D. A. Ausherman, A. Kozma, J. L. Walker, H. M. Jones, E. C. Poggio, „Developments in Radar Imaging,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-20. évf. 4. sz. pp. 363–400, 1984. Online: <https://doi.org/10.1109/TAES.1984.4502060>
- [7] D. G. Terrington, „Development of Secondary Surveillance Radar for Air-Traffic Control,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 112. évf. 5. sz. p. 861, 1965. Online: <https://doi.org/10.1049/piee.1965.0150>
- [8] Almássy Gy. szerk., *Mikrohullámú kézikönyv*. Budapest, Műszaki, 1973.
- [9] Farkas V., *Mikrohullámú technika I.*, 2. kiadás, Budapest, Műszaki, 1980.
- [10] Géczi J., Békési L., „A repülésben alkalmazott radarrendszerek,” *Repüléstudományi Közlemények*, Különszám, pp. 1–5. 2007. Online: <https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/handle/20.500.12944/51>
- [11] Kalina B., „Magyar lokátorfejlesztések 1950–1953,” in *Ezer év innováció Magyarországon (a 2000. évi ankét anyaga)*. Tanulmányok a természettudományok, a technika és az orvoslás történetéből. Budapest, Műszaki és Természettudományi Egyesületek Szövetsége Tudomány- és Technikatörténeti Bizottsága, pp. 105–107. 2001. Online: <https://doi.org/10.23716/TTO.08.2001.15>
- [12] Kibra, *Korai radarfejlesztések*. [é. n.]. Online: <http://users.atw.hu/kibra/site/page.php?147>
- [13] M. E. Russell, „Future of RF Technology and Radars” in *2007 IEEE Radar Conference*, Waltham, MA, USA, Apr. 2007, pp. 11–16. Online: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2007.374184>
- [14] Major G., „A pilóta nélküli légijármű rendszerek használata az elektronikai hadviselésben,” *Repüléstudományi Közlemények*, 29. évf. 3. sz. pp. 301–315. 2017. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-22-0490_Major_Gabor.pdf
- [15] Major G., „A pilóta nélküli légijármű rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások,” *Repüléstudományi Közlemények*, 27. évf. 1. sz. pp. 115–120. 2015. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf
- [16] O. O. Strelnytskyi, I. V. Svyd, I. I. Obod, O. S. Maltsev, G. E. Zabolodko, „Optimization of Secondary Surveillance Radar Data Processing,” *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 11. évf. 5. sz. pp. 1–8. 2019. Online: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2019.05.01>
- [17] Rajnai J. I., „A Magyar Honvédség NATO-kompatibilis 3D radarállomásai,” *Haditechnika*, 52. évf. 6. sz. pp. 27–30. 2018. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.52.6.09>
- [18] S. Tomei, et al., „Progress on the Study for the Use of Long-Range Radars for Space Situational Awareness” *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)*, Florence, Italy, 2020, pp. 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/RadarConf2043947.2020.9266560>

- [19] Seller R., Pető T., Dudás L., Kovács L., „Passzív radar I. rész,” *Haditechnika*, 53. évf. 6. sz. pp. 51–55. 2019. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.6.10>
- [20] Szökrényi Z., „Radarok elektronikai védelme II. Gyakorlati megközelítés,” *Hadmérnök*, 14. évf. 1. sz. pp. 297–320. 2019. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.1.24>
- [21] Szupercella.hu, *Radaros alapismeretek 2.* 2011. Online: www.szupercella.hu/radar2
- [22] T. Otsuyama, J. Honda, K. Shiomi, G. Minorikawa, Y. Hamanaka, „Performance Evaluation of Passive Secondary Surveillance Radar for Small Aircraft Surveillance,” *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, 2015, pp. 1527–1530. Online: <https://doi.org/10.1109/EuMC.2015.7346066>
- [23] Tóth F., „A radartechnika alapjai 1. rész – Történeti áttekintés,” *Magyar Elektronika*, 2016. január 26. Online: www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-1-resz-toerteneti-attekintes
- [24] Tóth F., „A radartechnika alapjai 2. rész – A működési elv,” *Magyar Elektronika*, 2016. március 8. Online: www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-2-resz-a-mkoedesi-elv
- [25] Tóth F., „A radartechnika alapjai 3. rész – A radar hatótávolsága,” *Magyar Elektronika*, 2016. április 11. Online: www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-3-resz-a-radar-hatotavolsaga
- [26] Tóth F., „A radartechnika alapjai 5. rész – Hatótávolság: néhány további kérdés,” *Magyar Elektronika*, 2016. június 6. Online: www.magyar-elektronika.hu/tartalom/tartalom/a-radartechnika-alapjai-5-resz-hatotavolsag-nehany-tovabbi-kerdes
- [27] Tóth F., „A radartechnika alapjai 6. rész – A radaregyenlet a gyakorlatban,” *Magyar Elektronika*, 2016. augusztus 4. Online: www.magyar-elektronika.hu/tartalom/a-radar-technika-alapjai-6-resz-a-radaregyenlet-a-gyakorlatban
- [28] Tóth F., „A radartechnika alapjai 9. rész – Másodlagos radarrendszer,” *Magyar Elektronika*, 2016. november 10. Online: www.magyar-elektronika.hu/tartalom/a-radartechnika-alapjai-9-resz-masodlagos-radarrendszer
- [29] V. G. Gorokhov, *Scientific Investigation, Technological Development and Economical Governmental Support: The Historical Development of RADAR Science and Technology*. 2009. Online: www.itas.kit.edu/pub/v/2009/goro09a.pdf
- [30] W. Wiesbeck, L. Sit, „Radar 2020: The Future of Radar Systems,” *2014 International Radar Conference*, Lille, France, 2014, pp. 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.7060395>

The Development History of Radiolocation and Its Role Nowadays

The discovery and use of radio waves proved to be a huge technological opportunity in the hands of people. This made it possible to accurately determine the location of various radio wave reflective objects. In my study, I would like to examine the process of the development history of this invention, called radar, from the first moment to the present day. Demonstrating the significant role of the military industry during the development of radar systems is one of the important pillars, the other pillar is the constant increase in the safety and efficiency of civil aviation. Even today, these radar systems undergo constant development thanks to the new technological achievements.

Keywords: *radar, locator, radio reconnaissance, development, detection, accuracy, radio wave, antenna*

Dr. Major Gábor adjunktus Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék major.gabor@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-2927-127X	Gábor Major, PhD Senior Lecturer Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft Onboard Systems major.gabor@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-2927-127X
Albert Csongor BSc-hallgató Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Állami Légiközlekedési Szak Katonai Repülőműszaki Szakirány Avionika Modul albert.csongor2016@gmail.com orcid.org/0009-0003-2503-4012	Csongor Albert BSc student Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training State Aviation Faculty Military Aeronautical Engineering Avionics Module albert.csongor2016@gmail.com orcid.org/0009-0003-2503-4012