

Ollári Viktor,¹ Haig Zsolt²

5G-alapú passzív rádiólokáció városi környezetben

*Az 5G egyes alkalmazási lehetőségei
a hon- és rendvédelem területén*

5G Passive Sensing in Urban Areas

Exploiting 5G as Illuminator of Opportunity

Absztrakt

A passzív rádiólokációs megoldások költséghatékonyasága, egyre csökkenő méretei, gyors telepíthetősége, a lehetséges megvilágító források sokrétűsége, alacsony felderíthetősége okán úgy katonai, mint civil alkalmazhatósága igen sokrétű lehet. Passzív rádiólokáció során arra alkalmas külső megvilágító forrás által kibocsátott és a céltárgyról reflektálódó jeleket detektálja a rendszer. Lehetséges potenciálját tekintve az 5G figyelemre méltó megvilágítóként azonosítható. A passzív rádiólokáció szempontjából a városi térnek kaotikus fizikai és elektromágneses jellemzői vannak, így olyan detektálást támogató technológiák alkalmazása válhat szükségessé, mint a dolgok internete és a mesterséges intelligencia. Jelen tanulmány a releváns szakirodalom feldolgozásával, az 5G-ben mint városi passzív rádiólokációs ökoszisztéma megvilágító forrásában rejlő lehetőséget vizsgálja.

Kulcsszavak: 5G, radar, passzív érzékelés, mesterséges intelligencia, IoT

¹ Doktori hallgató, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, e-mail: ollari.viktor@protonmail.com

² Iskolavezető-helyettes, egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, e-mail: haig.zsolt@uni-nke.hu

Abstract

The cost-efficiency, decreasing size, rapid deployment, variety of possible illumination sources and low detectability of passive radar solutions make them suitable for a wide range of military and civil applications. A passive radar system detects signals emitted by an illuminator of opportunity and reflected from the target. The potential of 5G technology can make it a remarkable illuminator. The chaotic physical and electromagnetic characteristics of the urban space may require the use of detection-enhancing technologies such as the Internet of Things and artificial intelligence. Based on relevant publications, this paper examines the potential of 5G as an illumination of opportunity for a passive radar ecosystem in an urban environment.

Keywords: 5G, radar, passive sensing, artificial intelligence, IoT

Bevezető

Passzív rádiólokáció során egy arra alkalmas külső, nem együttműködő megvilágító forrás (IoO)³ által kibocsátott és a céltárgyról reflektálódó jeleket detektálja a rendszer.⁴ IKT-intenzív korunk az IoO-k széles körét kínálja. Az IoO-k esetében jellemzően nincs ráhatásunk a kibocsátási paraméterekre (például időváltozós karakterisztikák, kisugárzás iránya stb.), illetve számos tényező generálhat zavart, módosíthatja a visszavert jel sajátosságait, akadályozhatja annak terjedését, különösen települési környezetben. A városi IoO ökoszisztémák összetettsége és a város (mint földrajzi tér) passzív rádiólokáció szempontjából kaotikus fizikai és elektromágneses jellemzői olyan detektálást támogató technológiák, mint a dolgok internete (IoT)⁵ és a mesterséges intelligencia (MI) alkalmazását teszik egyre inkább szükségessé. A multisztatikus⁶ passzív rádiólokációs rendszerek kialakítását támogató városi környezet az olyan kihívásokra is, mint az alacsony radar-keresztmetszetű objektumok detektálása is optimális választ kínálhat.

Jelen tanulmány az 5G-ben mint IoO-forrásban rejlő lehetőséget vizsgálja, a releváns szakirodalom feldolgozásával. A publikáció rá kíván mutatni arra, hogy az 5G-t olyan sajátosságai, mint a nagy sáv szélesség, MIMO és nyálábformálás (*beamforming*), illetve az OFDM moduláció alkalmazása potenciális, hatékonyan kiaknázható IoO-vá tehetik a passzív rádiólokációs rendszerek számára városi környezetben. A kutatás célja az 5G-t mint lehetséges IoO-t kiaknázó, IoT- és MI-elemeket tartalmazó, komplex passzív rádiólokációs keretrendszer felvázolása.

³ Illuminator of Opportunity.

⁴ HAIG et al. 2014.

⁵ Internet of Things (dolgok internete) – Minden olyan eszköz, amelyek egymással összekapcsolódva infrastruktúrát alkotnak, hozzáférnek az egyes infrastruktúra-elemek által generált, gyűjtött adatokhoz, aktuátorként viselkedhetnek. TÓTH 2023a: 99.

⁶ A rádiólokátor berendezései kettőnél több települési helyen találhatók. Lásd FERENCZY–SZÜCS–BALOG 1998.

A passzív radar és az 5G mint megalapozó technológiák

Passzív radar

A passzív rádiólokáció az IoO felől közvetlenül beérkező („referencia”) és a célobjektumról visszavert jelek beérkezési ideje közti különbséget (illetve a beérkező jel Doppler-eltolódását) vizsgálja; a két jel közti keresztkorreláció a kétdimenziós távolság Doppler-mátrixban ölt testet.⁷ Egy dinamikus, az IoO jelének változásait követő eljárás során a rendszer a referenciacsatornán vett jel Doppler-eltolódásos mutációit létrehozva vizsgálja a felderítő csatornán vett jelet, azaz megfelelteti a célobjektumról visszavert jelet a létrehozott változatokkal, azonosítva azokat, amelyek a legjobban illeszkednek az IoO aktuális jeléhez.⁸ Mivel a vevőegységhez érkező referenciajel elfedheti a visszavert jelet, szükséges ezek szétválasztása, referencia- és megfigyelő-/felderítőcsatornába irányítása. Ez megvalósítható segédantennákkal, illetve fázisvezérelt antennarendszerek alkalmazásával.⁹

A célobjektum helyzetének meghatározására több lehetőség adott passzív rádiólokáció esetén. Bisztatikus¹⁰ rendszer esetén a detektált objektum egy ellipszis test (ellipszoid) felszínén van, amelynek fókuszpontjaiban az IoO és a vevőantenna van. A pozíció a távolságmérés (ellipszoid) és a célpont által visszavert jel beérkezési irányának (DoA)¹¹ azonosításával határozható meg. A céltárgy az ellipszoid és a DoA-nyaláb metszéspontjában található.

Multisztatikus rádiólokációs ökoszisztéma alkalmazása esetén az ellipszoidok metszéspontjait kiszámítva is meghatározható a célpont pozíciója. Városi környezetben lehetséges opció, hogy az IoO és a vevőantenna egyazon helyen található, így nincs köztük érdemleges távolság, azaz a monosztatikus rádiólokációs helymeghatározási eljárás alkalmazandó. Monosztatikus jelleg esetén a célobjektum egy gömbszelet felszíne és a DoA-nyaláb metszéspontjában van.¹²

IoO lehet, a teljesség igénye nélkül, minden aktív radar, mobilkommunikációs rendszerek (4G, 5G, WiFi, mikrohullámú hozzáférési [WiMAX] szolgáltatások), analóg és digitális rádió- vagy TV- (FM-/DAB-/DVB-T-) sugárzók, az ürbe telepített technológiák.¹³ Az utóbbiak kapcsán a GNSS-¹⁴ hálózatok kutatói megállapítják, hogy alacsony adóteljesítményük okán alkalmazásuk kevésbé „költséghatékony”, ezért érdemesebb a jelentős elemszámú konstellációval rendelkező, széles sávú adatkommunikációs szolgáltatásokat nyújtó szolgáltatók műholdjaira építeni.¹⁵ Ilyen lehet a 600 LEO és 35 GEO műholdat üzemeltető Eutelsat OneWeb, illetve az 5800 elemből álló LEO konstellációval rendelkező StarLink.¹⁶

⁷ COLONE-FILIPPINI-PASTINA 2023; NATO STO 2017.

⁸ NÚÑEZ-ORTUÑO et al. 2023: 2–5.

⁹ PETŐ 2013; NÚÑEZ-ORTUÑO et al. 2023: 7–9.

¹⁰ A lokátor adója és vevőberendezése egymástól távol települ. Lásd HAIG et al. 2017.

¹¹ Direction of Arrival.

¹² KUSCHEL-CRISTALLINI-OLSEN 2019; SKOLNIK 1981.

¹³ BALAJTI 2019a.

¹⁴ Global Navigation Satellite System.

¹⁵ NÚÑEZ-ORTUÑO et al. 2023.

¹⁶ PULTAROVA 2025.

5G

Az újgenerációs mobilkommunikációs hálózatok már inkább az informatikai hálózatokhoz sorolhatók.¹⁷ A 4G–5G–6G közti generációs léptékváltás mértékét mutatja be az alábbi, 1. táblázat.

1. táblázat: Egyes 4G-, 5G- és 6G-mérőszámok összehasonlítása

	4G	5G	6G
Adatátviteli sebesség	1 Gbps	20 Gbps	1000 Gbps
Felcsatlakoztatható eszközök száma	100 000 / km ²	1 000 000 / km ²	100 / m ³ ¹⁸
Késleltetési idő	10 ms	1 ms	0.1 ms
Max. csatorna sávszélesség	20 MHz	0.1/0.4/2 GHz (FR1/FR2-1/FR2-2) ¹⁹	100 GHz
Maximum spektrális hatékonyság	15 bps/Hz	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Vertikális lefedettség	n/a	300 m	10 000 m

Forrás: a szerzők szerkesztése a 3GPP Műszaki jelentés (2022): 3GPP TR 21.916 V16.1.0, ETSI Műszaki Specifikáció (2022): TS 138 104 V17.7.0 adatai alapján

Az 5G-rendszerarchitektúrában 3 fő elem különíthető el:²⁰

- végponti készülékek (UE)²¹ – minden olyan eszköz, amely az 5G-hálózatra képes csatlakozni;
- rádiós hozzáférési hálózat (RAN)²² – az UE és az 5G-maghálózat közti kapcsolatot létrehozó eszközök ökoszisztémája;
- CORE (5G-maghálózat) – egy szolgáltatásalapú, az úgynevezett hálózati funkciókat felölölő keretrendszer.

Az 5G-nél már teljesen különválnak a RAN és CORE az átviteli (transzport) funkcióktól, továbbá a felhasználói és vezérlési síkok. Mindez kiegészül azzal, hogy a hálózat egy adott fizikai csomópontja számos logikai csomópontot „megtestesíthet”. Azaz a teljes rugalmasság, a szolgáltatások magas szintű biztosítása és szegmentálása érdekében.

A megcélzott teljes lefedettség megvalósítása érdekében a szabványalkotók alapvető jövőbeni hálózati elemként számolnak a műholdas, valamint a nagymagasságú (18–22 km) platformrendszerekkel (HAPS),²³ a 6G esetében az intelligens jeltükröző/-továbbító felületekkel (IRS).²⁴ A HAPS légköri és műholdas 5G-/6G-jelforrások kiegészítő IoO-ként szolgálhatnak a passzív rádiólokáció számára.

¹⁷ TÓTH 2023b: 79.

¹⁸ A 6G a lefedett tér vertikális kiterjedését is figyelembe veszi, ezért térfogat alapon határozza meg a célértéket.

¹⁹ FR1 = 0,41–7,125 GHz (UHF, L-sáv, UWB, S-sáv, C-sáv); FR2-1 = 24,25–52,6 / FR2-2 = 52,6–71 GHz (Ka-sáv, V-sáv).

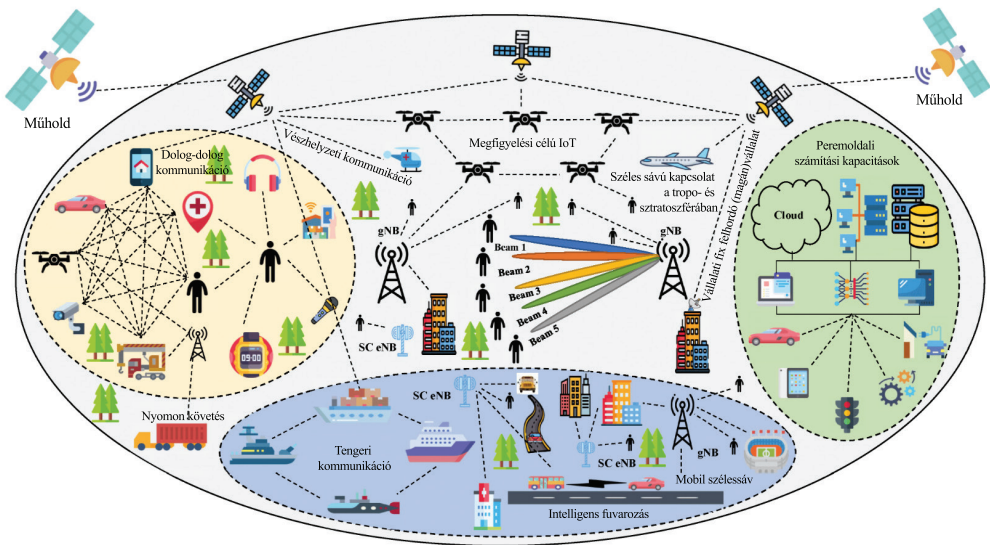
²⁰ TÓTH 2023b.

²¹ User Equipment.

²² Radio Access Network.

²³ Jellemzően drónokra/lég hajókra telepített gNB-k (High Altitude Platform Systems, Towers in the Skies 2021).

²⁴ FARKAS 2023: 24; TÓTH 2023b: 55; LIU et al. 2024; 3GPP TR 21.918 V0.2.0 (2024-02).



gNB = 5G bázisállomás (Next-Generation Node B)
 SC eNB = Kiscellás 4G bázisállomás (Evolved Node B)
 BEAM = Rádiónyaláb

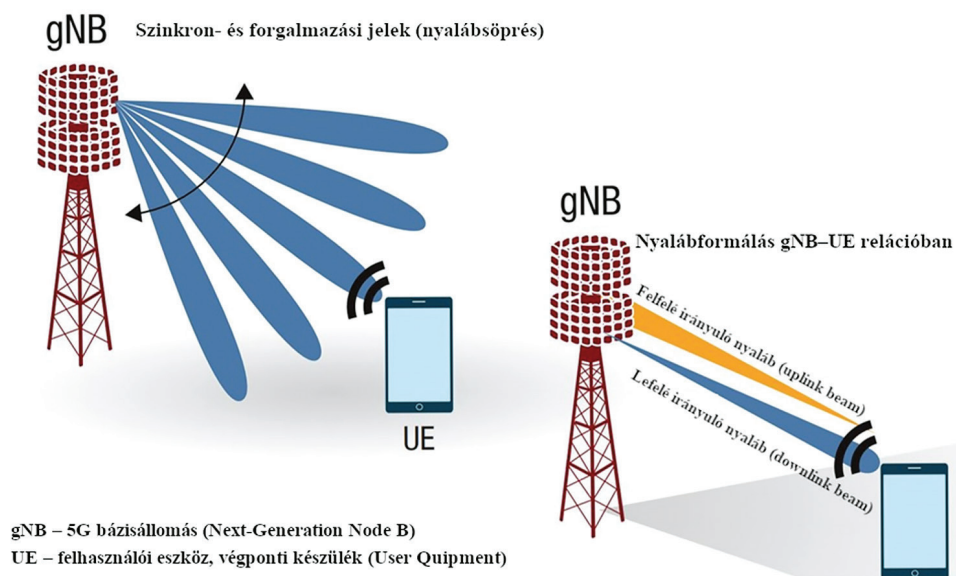
1. ábra: 5G-/6G-ökoszisztéma

Forrás: www.mdpi.com/electronics/electronics-11-00121/article_deploy/html/images/electronics-11-00121-g001.png alapján a szerző fordítása

A passzív rádiólokáció szempontjából kiemelendő még a technológia kínálta csatorna-sávszélesség és a heterogéncellás ökoszisztéma. Míg az FR1 a nagy területi lefedettséget biztosítja korlátozott bázisállomás (gNB)²⁵ darabszám mellett (makrocellás struktúra), az 1. táblázatban vázolt mérőszámok elsődlegesen az FR2 alkalmazása mellett teljesülnek. Az FR2 kiaknázása, annak terjedési sajátosságai (jelentős útvonalvesztés) okán, csak kiscellás ökoszisztémában lehetséges. A passzív rádiólokáció szempontjából lényeges szempont, hogy az FR2-ben érhető el a legnagyobb csatorna-sávszélesség (2GHz). Igaz, az FR1-hez képest jelentősen kisebb teljesítmény (0,25–2 W) mellett.

Az 5G gNB-k képesek párhuzamos, az adott UE pozíciójára fókuszáló rádiónyalábokat generálni (2. ábra). A nyalábképzés során az 5G MIMO antenntömbök egyes elemi antennáit külön-külön táplálják a továbbítandó jellel. A jel fázisát és amplitúdóját úgy módosítják, hogy ennek eredményeként az elemi antennák adott klasztere egy irányított rádiónyalábot hozzon létre. A masszív MIMO és a nyalábképzés technológiák, hatékonyabb adatátvitelt biztosítása mellett mérsékelhetik az interferenciák zavaró hatásait.

²⁵ Next Generation NodeB: újgenerációs bázisállomás.



2. ábra: Nyalábmenedzsment

Forrás: RAMALINGAM 2018 alapján a szerző fordítása

Az 5G-rendszerek hatékonyságának, ellenálló képességének növelése érdekében aktívan vizsgálják az MI alkalmazási lehetőségeit a MIMO, a nyalábképzés, az útvonalválasztás, zavartatás és zavarásdetektálás terén.²⁶ Az 5G-hálózatok szofisztikált támadása, a szabvány által támogatott nagy szabadságfokú (dinamikus) jelkeretfeltöltési, -kialakítási lehetőség, a szinkronizációs jelek szabad elhelyezése (stb.) okán, kihívást jelent.²⁷ Az időszinkront biztosító GNSS-jelek zavarása, a vonatkozó védelmi funkciót aktiválva, eredményezheti a támadott gNB kényszerített leválasztását a hálózatról.²⁸ Azonban megfelelő paraméterezéssel, alternatív időszinkronforrások biztosításával ezek a támadások hatékonyabban elháríthatók, különösen a kiscellás ökoszisztémával kiegészült hálózatok esetén. Passzív rádiólokáció szempontjából az 5G IoO-k zavarása csak olyan egyértelmű művelettel lehetséges, amely felhívna a védelemért felelős szervezetek figyelmét a behatolás tényére.

5G-alapú passzív rádiólokáció városi környezetben

Az intenzív városi EM környezet napjainkban már lehetővé teszi költséghatékony (rejt-hető) passzív rádiólokációs érzékelő hálózatok kialakítását, amelyek közel teljes körű területi lefedettség mellett biztosíthatják a célobjektumok detektálását, mozgásuk követését. Elméleti szinten, frekvenciaosztásos (FDD)²⁹ üzemmódot és szabvány

²⁶ KHEDKAR et al. 2023.

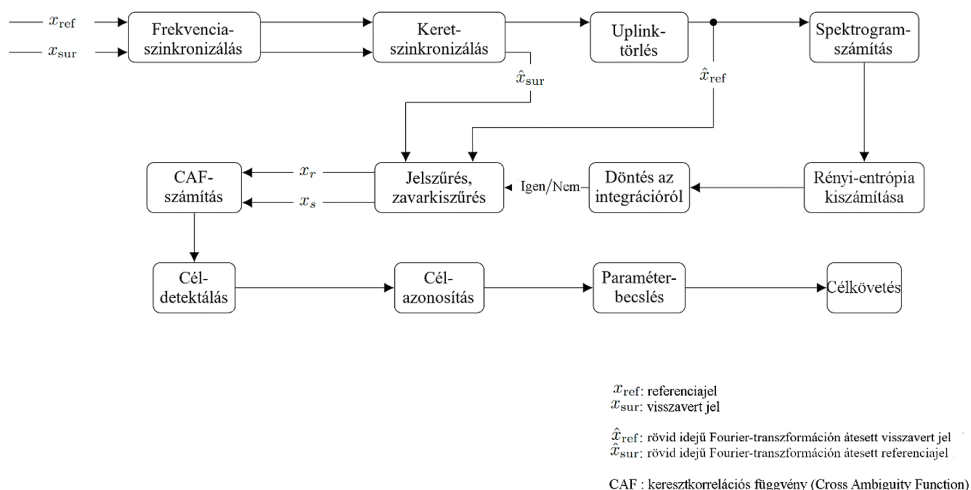
²⁷ BIRUTIS et al. 2022.

²⁸ WÜHRL et al. 2023.

²⁹ Frequency Division Duplex.

szerinti maximális alvivő frekvenciát (2 GHz) feltételezve, akár 30 m/s sebességgel mozgó, kis méretű objektumok detektálása is biztosított lehet egy 5G-t kiaknázó passzív rádiolokációs ökoszisztémában.³⁰ Jelenleg azonban az időosztásos (TDD)³¹ üzemmód alkalmazása jellemző.

TDD esetében a passzív rádiolokáció célú jelfeldolgozás jellemzően a „hagyományos” eljárás szerint történik, azzal a módosítással, hogy a keresztkorreláció számítása előtt szükséges elvégezni a frekvencia- és keretszinkronizálás mellett az uplink kiszűrését a jelből. Számos szerző javasolja azon magas erőforrás-allokációval rendelkező jelek, jeltöredékek azonosítását, amelyek adaptív integrálásával biztosítható a kis RCS-ű célobjektumok hatékony detektálása (3. ábra). Mindemelett a gépi és mélytanulás-algoritmusok, az MI-technológia releváns megoldásainak alkalmazása ma már nélkülözhetetlen a hatékonyabb detektálás, osztályozás és követés érdekében.³²



3. ábra: 5G-alapú passzív rádiolokációs jelfeldolgozás

Forrás: MAKSYMUK et al. 2023 alapján a szerző fordítása

Az 5G 3GPP szabvány szerinti sávszélessége (5 MHz – 2 GHz)³³ optimális távolságfelbontást eredményezhet. Valós alkalmazási környezetben az 5G aktuális sávszélessége függ a továbbított tartalomtól. Az adattartalom ingadozása az 5G-hullámforma (keret erőforrás-allokáció, jel időtartam) módosulását, a keresztkorrelációs függvény változását, a távolságfelbontási érték változékonyságát vonhatja maga után.³⁴

A keresztkorreláció szempontjából azon loO-k a legoptimálisabbak, amelyek periodicitásszegények, spektrális komponensei közel kiegyenlítettek és egyenletesen szétterítettek („zajszerűek”).³⁵ Az 5G-jel modulálása (OFDM) a hatékony kereszt-

³⁰ LIU et al. 2022.

³¹ Time Division Duplex.

³² MAKSYMUK et al. 2023.

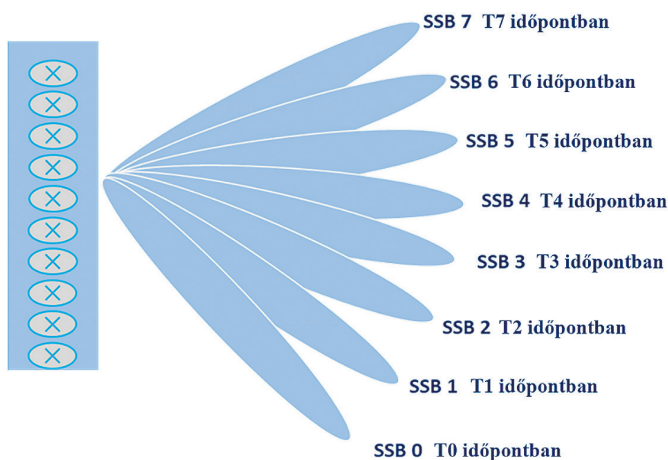
³³ 3GPP TS 38.102-1 V18.5.0 (2024-03).

³⁴ KSIĘŻYK et al. 2023.

³⁵ SELLER et al. 2019.

korrelációhoz járulhat hozzá. Szemben a 4G fix 15 kHz-es alvivő-távolságú OFDM modulációjával az 5G-szabvány már rugalmasabb megközelítést biztosít. 15 és 960 kHz között a 2 hatványaival multiplikálható az alvivőtávolság. Mindezek együttesen biztosítják a jel spektrális szétterítését, zajszerű viselkedését.

Amennyiben nincs adatforgalom, a gNB csak titkosítatlan szinkronizációs jelblokk- (például SSB³⁶) sorozatokat sugároz ki a tér különböző pontjai felé (SSB „sörprés” – 4. ábra). Az SSB a downlink felépítéséhez és szinkronizáláshoz szükséges információkat tartalmazza, amelyek alapján az UE azonosítja és kiválasztja a cellát, a számára leghatékonyabb nyalábot, megismeri a gNB-hez, hálózathoz kapcsolódást biztosító információkat. Az SSB-sorozatokat, konfigurálásától függően, 5–160 milliszekundumonként, előre definiált pozícióra³⁷ és nyalábszámban (FR1-ben 4/8, FR2-ben legfeljebb 64) sugározza ki a gNB. Az SSB-k helyspecifikus információkat tartalmaznak, amelyeket az UE visszaküld a gNB-nek. A gNB ez alapján engedélyezi a kapcsolatot, és csökkenti a szomszédos UE-k interferenciáját. Amennyiben a gNB támogatja a nyalábformálást, egyidejűleg több SSB-nyalábot bocsát ki, amelyek az alkalmazott frekvenciatartománytól és hálózati beállításoktól függően legfeljebb 7,2/57,6/230,4 MHz (FR1/FR2-1/FR2-2) sávszélességűek lehetnek. Az SSB demodulálásával és a fizikai forgalmazási csatorna (PBCH)³⁸ információkinyerésével, a kibocsátott nyalábok egyedileg azonosíthatóvá válnak a passzív rádiólokáció számára. A referenciacsatornán vett SSB jel (kvázi) félaktív rádiólokációs adatfeldolgozásával a céltárgy sebessége alacsony pontossággal, de pozíciója jól azonosítható.³⁹



4. ábra: SSB sörprés

Forrás: www.linkedin.com/pulse/pulse/illustration-5g-ssb-beam-sweep alapján a szerző fordítása

³⁶ Synchronization signal block.

³⁷ Vertikális és horizontális nyalábszélesség, azimuth, vertikális döntés stb.

³⁸ Physical Broadcast Channel.

³⁹ LIN et al. 2019; ABRATKIEWICZ et al. 2023; ETSI Műszaki Specifikáció (2024): TS 138 213 V17.8.0.

Városi környezetben, különösen kiscellás 5G hálózati struktúrában, az SSB-t kiaknázó passzív rádiólokáció esetében a maximális egyértelmű hatótávolság jellemzően figyelmen kívül hagyható, azonban ha a sebesség mérése szempont, akkor a maximális egyértelmű sebességgel számolni szükséges. Így valójában nem Doppler-, inkább alkalmazásdilemmával szembesülünk. A detektált objektumról visszavert jel frekvenciája a (radiális) mozgás sebességétől és irányától függően megváltozik (Doppler-csúszás). Amennyiben ez a változás meghaladja a kibocsátott SSB-impulzus ismétlődési frekvenciáját (PRF),⁴⁰ a sebesség meghatározása bizonytalanává válik.

$$V_{max} = \frac{\lambda \cdot f_{PR}}{4}$$

(V_{max} : maximális egyértelmű sebesség, f_{PR} : az SSB impulzus ismétlési frekvenciája, λ : vivő hullámhossz.)⁴¹

Figyelembe véve az SSB PRF-ének maximális értékét (200 Hz) a fenti képlet, a már elérhető (700 MHz, 3,6 GHz) és a tervezett (24 GHz) 5G-frekvenciák ismeretében meghatározható az elérhető V_{max} . Tehát: 700 MHz-nél 21,41 m/s, 3,6 GHz-nél 4,16 m/s, 24 GHz-nél 0,62 m/s. Azaz a frekvencia növekedésével csökken a V_{max} .

A városi környezet egy további kihívása, hogy a gNB felől közvetlenül érkező, illetve az egyéb objektumokról visszaverődő jelek okozta interferencia mellett, a nagyszámú, szomszédos csatornákon kommunikáló UE-k által generált zavarokat (IUI)⁴² is kezelnie kell a passzív rádiólokációs rendszernek. Habár az IUI hatása a mobilkommunikációra jellemzően nem jelentős, a célobjektum által visszavert jel elnyomására képes lehet.⁴³

Detektálás szempontjából elsődlegesen az UAV⁴⁴-ok esetében okoz jelentős kihívást a kis méretű hatásos keresztmetszet (RCS),⁴⁵ amely a célobjektum felületére jutó energiasűrűség mellett függ:

- a megvilágítás szögétől;
- a megvilágított felület méretétől és annak jellemzőitől (anyag, alak, kiterjedés stb.);
- a célobjektum mérete és a hullámhossz viszonyától;
- a rádióhullám polarizációjától stb.

A megvilágítás szempontjából egy 5G-t kiaknázó városi IoO ökoszisztémában az FR1 gNB antennák magas telepítése, viszonylag nagy száma, pozicionálása egyszerre előny és hátrány. Elméletileg eséllyel sugározzák be – adott esetben több irányból – a célobjektumokat úgy, hogy a megfigyelőantenna értékelhető jelet fogjon be. Városi környezetben, földközeli magasságban, csökken a közvetlen FR1 megvilágítás lehetősége. Az FR2 és annak mikrocellás ökoszisztémája nagyobb földfelszínközeli lefedettséget, megfelelő megvilágítási szög esetén magasabb RCS értéket biztosíthat.

⁴⁰ Pulse-repetition frequency.

⁴¹ KSIĘŻYK et al. 2023: 13.

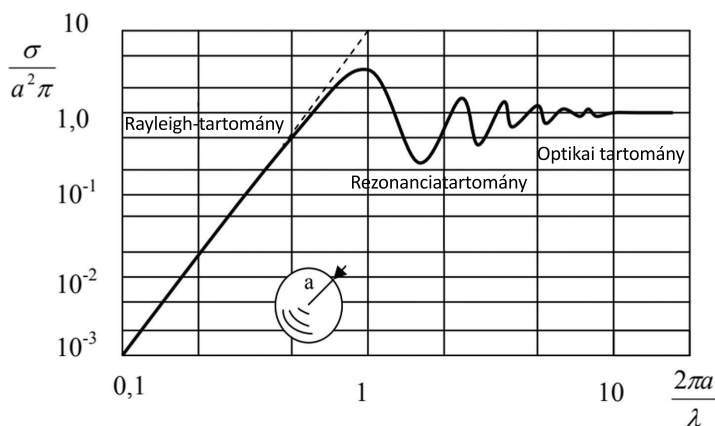
⁴² Inter User Interference (felhasználók közti interferencia).

⁴³ LYU-LIU-FAN 2022.

⁴⁴ Unmanned Aerial Vehicle – pilóta nélküli légi jármű.

⁴⁵ Radar Cross Section.

A méret és a hullámhossz viszonya az elektromos méret (ka szorzat)⁴⁶ révén elemezhető, ahol „a” azon legkisebb gömb sugara, amely befoglalja a célobjektumot. Amennyiben a ka szorzat 1-nél kisebb, a hatásos keresztmetszet a Rayleigh-tartomány szerint viselkedik (fordítottan arányos λ^4 -nel). 1 körüli eredménynél az RCS már a Mie/rezonanciatartomány sajátosságai szerint értelmezhető, az RCS az optikai tartományban jellemző érték körül oscillál. A hullámhosszváltozásokra az RCS erősen reagál. Az optikai tartományban a ka 10 feletti értéket vesz fel, és a célobjektum apertúrasugárzóként kezelhető (5. ábra).⁴⁷



5. ábra: Lokátor céltárgy-gömb hatásos keresztmetszete a hullámhossz függvényében

Forrás: FERENCZY-SZÜCS-BALOG 1998: 81

A ka -t vizsgálva, az FR1 GHz alatti tartományában csak az 5 cm-nél kisebb „a” értékkel rendelkező célobjektumok értelmezhetők a Rayleigh-tartományban. A GHz-es FR1 tartományban a potenciális célobjektumok többségénél a rezonancia és mérettől függően az optikai tartomány szerinti RCS-jellemzők veendők figyelembe. Mindez azt is jelenti, hogy FR2-ben alig akad rezonanciatartományhoz sorolható céltárgy.

Egyes foratókönyvek

Az objektumdetektálás jellemzően két fő foratókönyv-főcsoportra (jármű-, emberalak-detektálás) különíthető el. Az 5G IoO célú kiaknázásakor szükséges figyelembe venni, hogy a makrocellás 5G rádiós hálózati struktúrában, városi környezetben a többutas terjedés jelentősége hatványozottan érvényesül. Továbbá a jelenlegi 5G-hálózatokban elérhető maximális sávszélesség esetén a radarfelbontás többméteres lesz. Ez a tervezett tömeges üzleti és kedvtelési célú UAV-alkalmazás, illetve a jármű- és gyalogosforgalom detektálásának igénye esetében már problematikus érték.⁴⁸

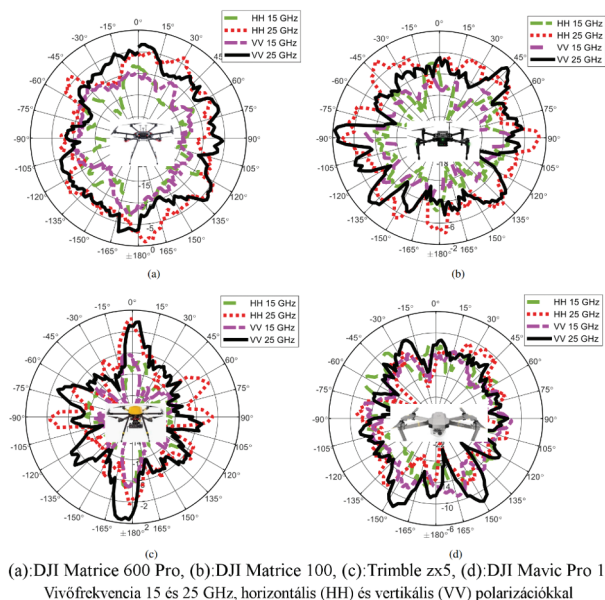
⁴⁶ $k = 2\pi/\lambda \Rightarrow (2\pi/\lambda) \times a \Rightarrow 2\pi a/\lambda = k$: a hullámszám, a: azon legkisebb gömb sugara, amely befoglalja a célobjektumot, λ : vörös hullámhossz.

⁴⁷ FERENCZY-SZÜCS-BALOG 1998; KONCZ 2007.

⁴⁸ SELLER et al. 2020; KSIĘŻYK et al. 2023.

UAV-detektálás

A polgári UAV-ok kis mérete, szerkezeti kialakítása, a gyártásukhoz felhasznált anyagok sajátosságai, a reptetésüket jellemző haladási magasság és annak dinamikus változása, amely kiegészül a manőverezési sokszínűséggel, jelentős kihívások elé állítja a passzív rádiólokációt, különösen városi környezetben. Esetükben RCS-növelő tényező lehet az eszköz akkumulátora, illetve egyéb hasznos teher (például kamera és egyéb érzékelők), feltéve, hogy a megvilágítás szöge láthatóvá teszi azt (6. ábra). Mivel a hasznos teher és akkumulátor jellemzően a drónok hasrészén található, az FR1 megvilágítás korlátozottan, a célobjektum repülési iránya, vertikális emelkedésének és horizontális elfordulásának szögétől függően teszi lehetővé a kiegészítő RCS-növelő hatásának kiaknázását.

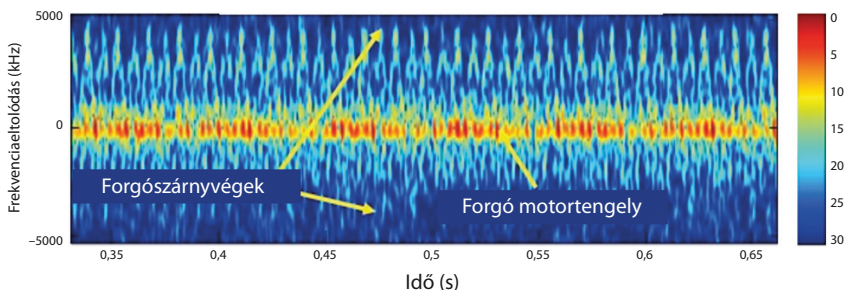


6. ábra: Négy UAV RCS-szignatúrája (dBm^2) az azimuth relációjában

Forrás: EZUMA et al. 2021

A kültéri FR2-es mikrocellás ökoszisztémák már magasabb valószínűséggel biztosíthatnák az alacsonyan repülő UAV-ok magasabb RCS-értéket eredményező megvilágítását. FR2-ben az alacsony hullámhossz okán jelentősebb szerepet kap az UAV-ok formavilága, az élek és kiszögellések generálta diffrakció és szórás. Mindemellett a megfigyelőantennák optimális elhelyezése is kihívást jelent. Amint arra a 6. ábra is rámutat, a megvilágítás szöge alapvető jelentőségű a minél nagyobb RCS-elérés szempontjából. Mivel nem szűken körülhatárolható repülési magasságban mozgó eszközök detektálása a feladat, városi környezetben a visszavert és referencialelek vételét biztosító antennák komplex hálózatának alkalmazása lehet hatékony, de költségnövelő megoldás.

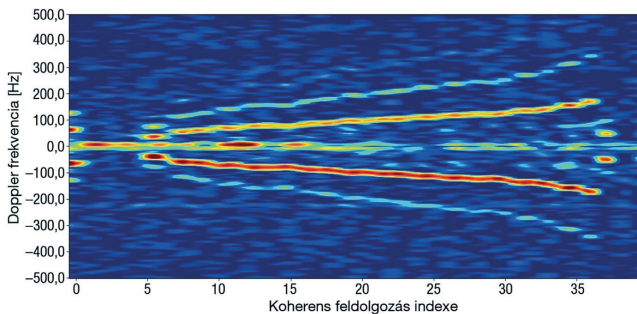
Egyes kutatások, a forgószárnyas modellekre fókuszálva, a mikro-Doppler-jelenség kiaknázhatóságára mutatnak rá. Az UAV-ok forgószárnyai szintén frekvenciaeltolást hoznak létre, amelyek periodikus, időben változó modulációt generálnak az eszköz által visszavert jel vivőfrekvenciájában. A moduláció a vivőfrekvenciától, a forgási sebességtől, a forgás- és a beeső jel által bezárt szögtől függő harmonikus frekvenciákat tartalmaz, amelyek azonosíthatóvá válhatnak az UAV által visszavert jel Doppler-spektrumában (7. ábra).⁴⁹ 5G-környezetben a 3 GHz feletti FR1 loO-k már biztosíthatják a kisebb méretű drónok felderítését. FR2-es loO-k esetén az UAV-ok túlnyomó hányadánál az optikai szórásstartomány sajátosságai veendő figyelembe, amelyben a szóráspont modell alkalmazható a mikro-Doppler-szignatúra kinyerésére. Ekkor a célobjektumról visszavert jel szóródása diszkrét pontokban realizálódik.



7. ábra: 45°-ban besugárzott, négy forgólapátos UAV radiális sebesség generálta mikro-Doppler szignatúrája – a szerző fordítása

Forrás: JIAN–LU–CHEN 2017

Alacsonyabb frekvenciák esetén a forgószárny mérete összemérhetővé válik az loO jelének hullámhosszával, így a mikro-Doppler nem aknázható ki, azonban a rotor által a vevő irányába sugárzott jel periodikus változásait vizsgálva az FR1 tartomány is alkalmas lehet a drón detektálására (8. ábra), egyértelműen megkülönböztetve azokat más objektumoktól (például madárraj).⁵⁰



8. ábra: Gyorsuló forgószárny spektrumképe

Forrás: SELLER et al. 2020

⁴⁹ CHEN et al. 2006; SELLER et al. 2020; BEASLEY et al. 2020.

⁵⁰ SELLER et al. 2020.

Az egynél több forgószárnyal rendelkező UAV-ok detektálásának kihívásaira jellemzően géptanulás-algoritmusokra épülő, a mikro-Doppler-jellemzők azonosítását célzó megoldásokat javasol több szerző. A javasolt eljárások figyelemre méltók, azonban a szerzők jellemzően optimális lefedettséggel, hálózati forgalommal, illetve a ma még alig alkalmazott FR2 tartomány kiaknázásával számolnak, említés szintjén érintve a nyálábformálás lehetséges hatásait.⁵¹

Az 5G-alapú passzív rádiólokáció tartalomfüggőségének csökkentésére egy Rényi-entrópiára épülő megoldást javasolnak más szerzők.⁵² Megállapításuk szerint az entrópia és a downlink erőforrás-kiosztás közti direkt összefüggés kiaknázható egy, a passzív rádiólokációs rendszerek hatékonyságát növelő, adaptív jelintegrációs algoritmus megalkotásához. Az ismertetett megoldás a vevő által fogott OFDM-jel idő-frekvencia raszterre alakítja rövid idejű Fourier-transzformációval (STFT),⁵³ ezzel biztosítva az alvívők kiosztásának és az időjellemzőknek a közvetlen elemzését. A Rényi-entrópia segítségével vizsgálja az 5G-hálózat aktuális erőforrás-kiosztását. Az 5G-hálózat maximális terhelésével (például nagy méretű fájl letöltése) meghatározható a maximális entrópia (kalibrálás). A magasabb entrópiaszint több alvívőt, ezek növekvő időtartamát feltételezi, ami növelheti a hatékony integrációs időt, így lehetőséget biztosít például távolabbi célpontok detektálására. A kalibrálást követően a rendszer csak azon jeleket, jeltöredékeket veszi figyelembe (akkor végez adaptív integrációt), ha azok megfelelő entrópiaszinttel⁵⁴ rendelkeznek. A kutatók által elvégzett kísérletek igazolták, hogy az eljárás biztosíthatja egy kisebb méretű drón detektálását is. Azonban, mint a szerzők is rámutatnak, a nyálábformálásos forgatókönyveket a jövőben tervezik vizsgálni.⁵⁵

Más kutatók javaslata az SSB-ben rejlő, rövid idejű Fourier-transzformációval kinyert adatok felhasználására épít, egy tanulni képes neurális háló rendszerbe iktatásával. Megállapításuk szerint az SSB, relatíve rögzített struktúrája okán, egyértelműbben reagál külső (például UAV okozta) zavarokra. A detektált zavarokat a neurális háló elemzi, a zavarjellemzők osztályozásával elkülöníti a háttérzajt a lebegő/mozgó UAV generálta jellemzőktől. A bemutatott eljárás jelentős részt immunis az 5G kihívásaira, mint a nyálábképzés és adatfüggő forgalmazási paraméterek, azonban az elvégzett kísérletek viszonylag zavartatásmentes környezetben zajlottak, továbbá a javasolt megoldás inkább egy 5G-alapú jelenlét- és mozgásérzékelő.⁵⁶

Emberi jelenlét detektálása

A humán jelenlét esetében a távolság és sebesség meghatározásához a legtöbb jelet a törzsről visszavert jelek biztosítják. A mikro-Doppler-jellemzők mélytanulás-támogatású elemzésével például a végtagok mozgásával, a légzéssel és szívveréssel kapcsolatos

⁵¹ XU et al. 2019.

⁵² MAKSYMUK et al. 2023.

⁵³ Short-time Fourier Transform.

⁵⁴ PL a maximális entrópiáérték 90%-át meghaladó kitöltésű jelkeretek.

⁵⁵ MAKSYMUK et al. 2023.

⁵⁶ LIN et al. 2023.

információk is kinyerhetők.⁵⁷ Az emberi járás mikro-Doppler-karakterisztikája lehetőséget nyújt az állati mozgás kiszűrésére. Másfelől az emberi mozgás komplexitása akár dinamikusan változó radarkeresztmetszetet is eredményezhet. Kihívást jelent továbbá az emberi test összetett struktúrája, illetve azon sajátossága, hogy magasabb frekvenciák mellett kevésbé tükrözi, hanem inkább szórja a megvilágító által kisugárzott jeleket.⁵⁸ Emellett, magasabb frekvenciatartományokban, maga a ruházat anyaga és formája (például gyűrődések) alakíthat ki kiugró visszaszórási pontokat.⁵⁹

A releváns tanulmányok jelentős része a csatornaállapot információs referencijel (CSI-RS)⁶⁰ kiaknázhatóságára épít. A felmutatott eredményeket – mint az emberi jelenlét, mozgás, gesztusok (például egyes kézjelek), életfunkciók (például légzés) detektálása – nem kisebbítve szükséges rámutatni, hogy az elvégzett kísérletek zárt terekre fókuszáltak, limitált létszámú célponttal és az adatforgalmazást folyamatosnak feltételezve, ami valós 5G-környezetben nem biztosítható, továbbá a CSI-RS alkalmazása közvetlen hozzáférést feltételez az adott hírközlési hálózathoz. A vázolt kihívások kezelésére az SSB kiaknázása megoldás lehet.⁶¹

A jövő technológiai kilátásai

A passzív rádiólokációs technológia jelenlegi alkalmazási és fejlesztési trendjeit figyelembe véve előrevetíthető, hogy a rádiólokáció is egyfajta szimbiotikus, hálózatos ökoszisztémává válik.⁶² A magas EM zajterhelésű városi környezetben három kiemelt kihívást szükséges kezelnie a technológiának:

- közvetlen IoO-célobjektum rálátással nem rendelkező területek minimalizálása;
- nagy hatékonyságú zavartatás- és zavarásállóság, azaz a nem kívánt jelek eliminálása;
- a célobjektumok detektálására, osztályozására és akár azonosítására, követésére alkalmas jelek befogása.

A kihívásokra adott válaszok részét képezhetik a:⁶³

- polarimetrikus diverzitást kiaknázó,⁶⁴ komplex IoO- (5G FR1, FR2, GNSS stb.) felhasználást biztosító referencia-/megfigyelőantenna-hálózatok;
- kiegészítő, detektálás, osztályozás, azonosítás feladatait támogató érzékelő technológiák, mint például
 - akusztikus;
 - elektro-optikai;
 - szeizmikus érzékelők;

⁵⁷ CARO-BLOICE 1971; FEREIDOUNI et al. 2022; HUAN et al. 2023; DEEP et al. 2020.

⁵⁸ ADIB et al. 2015; KIM-HA-KWON 2015.

⁵⁹ YAMADA-TANAKA-NISHIKAWA 2005.

⁶⁰ Channel State Information Reference Signal.

⁶¹ TANG et al. 2020; ASHLEIBTA et al. 2021; LI et al. 2021.

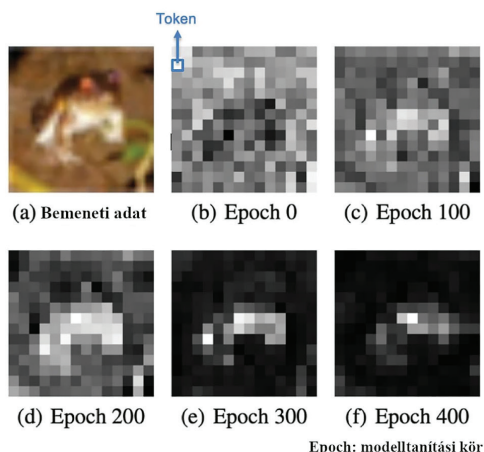
⁶² BALAJTI 2019b.

⁶³ COLONE-FILIPPINI-PASTINA 2023; GOMEZ-DEL-HOYO-GRONOWSKI-SAMCZYNSKI 2022; MAKSYMUK et al. 2024.

⁶⁴ Duál-polarimetrikus antennák alkalmazásával a visszavert és a referencijel horizontális és vertikális verziója is befogadható.

- dinamikus antenna és érzékelő platformok (UAV, UGV⁶⁵);
- a passzív radar ökoszisztéma hatékony vezérlését biztosító MI-megoldások.

A rádiólokáció területén is alkalmazott géptanulás-algoritmusok mellett a mélytanulás és a multimodalitás⁶⁶ felé mozduló, figyelemre méltó absztraháló, adaptációs, szemantikai és szentimentelemzési, következtetési, osztályozási képességekkel rendelkező LLM⁶⁷-ek jelenthetik az MI célirányos alkalmazásának közvetkező lépéscsőfokát.⁶⁸ A nagy nyelvi modellek jellemzően az úgynevezett transzformerek⁶⁹ által létrehozott és súlyozott logikai egységekkel (token)⁷⁰ dolgoznak.⁷¹ A tanítási és éles munkafolyamataik során a tokenek egymásutániségének valószínűségeit vizsgálják. A modellek megtaníthatók arra, hogy mire fókuszáljanak, a vizsgált információ mely része releváns számukra, így azokra helyezik a figyelmet, kirekesztve az irreleváns adatszegmenseket (9. ábra).⁷²



Epoch: modelltanítási kör

9. ábra: LLM figyelemmechanizmus – a szerző fordítása

Forrás: TARZANAGH et al. 2023

A vázoltak alapján további vizsgálatok tárgya lehet, hogy a multimodális LLM-ek milyen hatékonysággal:

- segíthetik a radarképek kiértékelését, a gyenge radarjelek kiaknázását, a zavarjelek eliminálását, a kiegészítő érzékelőkből származó adatok feldolgozását;

⁶⁵ Unmanned ground vehicle – vezető nélküli földfelszíni jármű.

⁶⁶ A modell képes a szöveges, képi, hangalapú információ kezelésére és generálására.

⁶⁷ Large Language Model.

⁶⁸ CHANG et al. 2024; WU et al. 2024.

⁶⁹ A transzformátor modell egy figyelem- (attention) mechanizmusra épülő, mélytanulási architektúra (neurális hálózat). A szekvenciális adatokban lévő kapcsolatok megfigyelése révén képes kontextus- és jelentésazonosításra. A figyelemmechanizmus teszi lehetővé a modell számára, hogy a bemeneti adatok bizonyos részeire szelektíven fókuszáljon. VASWANI et al. 2017.

⁷⁰ A modell által kezelt (be-/kimeneti) adat egy kisebb szeletének numerikus reprezentációja.

⁷¹ BINGLI-VARGAS 2024.

⁷² KIRILLOV et al. 2023; TARZANAGH et al. 2023; ZHANG et al. 2024.

- támogathatják a fázisvezérelt antennarendszerek vezérlését, azok akár valós idejű finomhangolásával, a rendszerparaméterek folyamatos értékelése és automatikus módosítása révén;⁷³
- ismerhetik fel, és orvosolhatják a passzív rádiólokációs ökoszisztéma IT-elemeinek sebezhetőségeit;⁷⁴
- segíthetik elő a rádiólokációs rendszerek proaktív kiber- és zavarás elleni védelmét a szokványostól eltérő, lehetséges támadási mintázatokat megjelenítő rendszeresemények azonosításával.

Szükséges azonban a technológia kihívásait szem előtt tartani. Egy multimodális LLM tanító adatbázisa olyan mennyiségű adatot igényel, amellyel a rádiólokáció terén kevesen rendelkeznek. Ez a tanító adatok mesterséges generálásával, modellezéssel áthidalható.⁷⁵ Továbbá a radarszignatúrák összetettsége és azok jellege számos környezeti körülmény függvénye, különösen városi környezetben. Tehát a modell mintafelismerő képessége ki kell terjedjen valamennyi, a detektálást befolyásoló környezeti körülmény azonosítására.

A technológia korlátai között meg kell említeni az úgynevezett „hallucinációt”,⁷⁶ illetve adatkezelő képességeiknek – erőforrásigényük mellett – korlátot szab az is, hogy adott időintervallumban mekkora mennyiségű tokent képesek feldolgozni (kontextusablak).⁷⁷

A fent vázoltak alapján a passzív rádiólokáció valószínűsíthető, középtávú fejlődési iránya a komplex, dinamikus adaptációra képes, kognitív rendszerek felé mutat. Egy kognitív rendszer, rádiólokációs és egyéb érzékelői révén, valós időben képes:

- környezetét felmérni és értékelni;
- a megszerzett ismereteit tárolni;
- a fentiekre alapozottan, proaktívan kezelni a felmerülő feladatokat és problémákat.⁷⁸

Városi környezetben alkalmazott rádiólokáció szempontjából a 6G hozhat jelentős paradigmaváltást, feltételezve a mikrocellás struktúrák dinamikus elterjedését és a Tera-hertz tartomány kiaknázását. Az ITU-R M.2160-0 (11/2023) ajánlásban szereplő 3D pozicionálást és leképezést biztosító ISAC⁷⁹ forgatókönyv kapcsán olyan irányokban is folynak kutatások, mint az autonóm járművek közlekedésének monitorozása és irányításuk támogatása, gyalogosforgalom megfigyelése, a „ruhán és takarófelületen átlátó” objektumdetektálás (10. ábra).⁸⁰

⁷³ Li et al. 2024; WANG et al. 2024.

⁷⁴ XU et al. 2024.

⁷⁵ KARLSSON 2023.

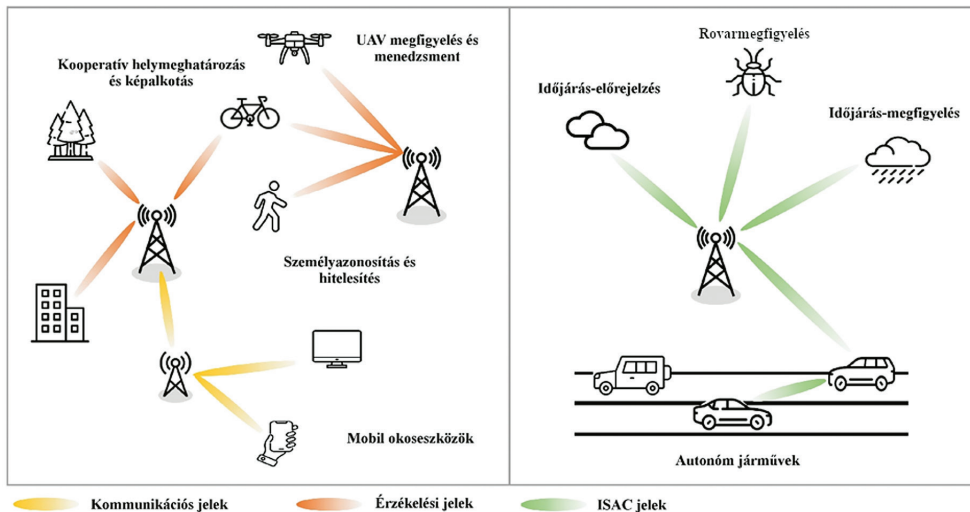
⁷⁶ Elégtelen mennyiségű információ esetén a modell nem koherens kimeneti eredményt produkál.

⁷⁷ KARSA 2024; GARTENBERG 2024; OpenAI et al. 2024 (GPT-4: 8192 token, GPT-4o: 128 000 token, Gemini 1.5: 1M token).

⁷⁸ GURBUZ et al. 2019.

⁷⁹ Integrated Sensing and Communications – integrált érzékelés és kommunikáció.

⁸⁰ STRINATI et al. 2024.



10. ábra: Az ISAC alkalmazás okosvárosi környezetben – a szerző fordítása

Forrás: KIM et al. 2024

Következtetések

A passzív rádiolokáció szempontjából problematikus az alacsony sugárzási energia, de a relatív kis detektálási távolság és a városi (sűrű) 5G gNB ökoszisztéma kompenzálhatja e kihívások egy részét. A 5G gNB „bőség” lehetővé teszi a multisztatikus passzív rádiolokációs ökoszisztéma kialakítását, eliminálva a mono-/bisztatikus bizonytalanságot, biztosítva a célobjektumok nagyobb pontosságú pozicionálását. Az 5G MIMO- és nyálbképzés technológiák támogatják a célobjektumok térbeli pozíciójának további pontosítását, mozgási sajátosságainak azonosítását. Az alkalmazott jelmoduláció, az elérhető frekvenciatartományok, a kiaknázható maximális sáv szélesség, elméleti szinten magas hatékonyságú passzívradar-megoldások kiszolgálását tenné lehetővé.

Számos kutatás érvel az 5G loO-kénti kiaknázhatósága mellett az UAV, földi jármű, emberi jelenlét detektálási forgatókönyvek esetén. A mikro-Doppler-hatás kiaknázására épülő, elsődlegesen az FR2 tartományban hatékony, UAV- és emberi jelenlétet detektáló megoldások a Doppler-spektrum célobjektum-specifikus – például rotor-mozgás, emberi tevékenység (járás, légzés) – sajátosságait elemzik.⁸¹ A Rényi-entrópia számításán alapuló, az FR1 tartományban is eredménnyel alkalmazható eljárás, az optimális erősségű (RCS-növelő) jelek, jeltörödékek kinyerésére fókuszál.⁸² Az elemzett javaslatok azonban optimális alkalmazási környezetet (belteret, nagyobb és „üresebb” külső területet, légtér) és/vagy folyamatos, jelentős adattartalmú (egyetlen, széles

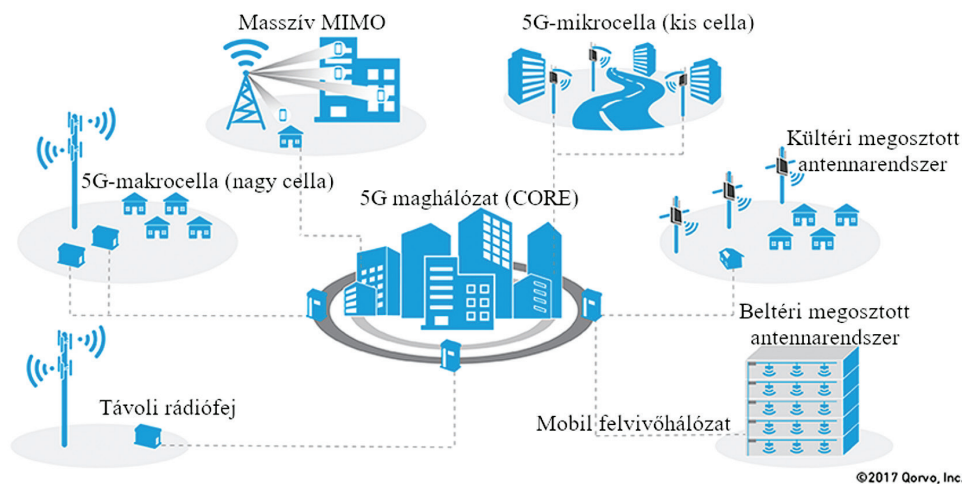
⁸¹ KIM-HA-KWON 2015; TANG et al. 2020.

⁸² MAKSYMUK et al. 2023.

nyalábban továbbított) forgalmazást, egyes megoldásoknál együttműködő loO-t feltételeznek. A vizsgált szakirodalom nem kínál egyértelmű megoldást egy 5G-alapú, nem együttműködő loO ökoszisztémát feltételező passzív rádiólokációs eljárásra.

Az emberi jelenlét, mozgás, illetve a köztéri objektumok detektálását biztosító „mozgócel-felderítő” (kis méretű, mobilis) katonai és polgári rádiólokációs megoldások jellemzően kis hatótávolságú, folyamatos sugárzású, aktív eszközök.⁸³ Ehhez hasonló, „kvázi-folyamatos” jellegű sugárzás az FR1 tartomány 1 GHz alatti szegmensével kiszolgált területeken, illetve az SSB kiaknázásával érhető el az 5G-hálózatokban. Azonban az SSB-nyalábok paraméterezése, az alkalmazott nyalábok maximális száma tekintetében magas szabadságfok mellett járhatnak el a hálózatüzemeltetők, így az SSB-paraméterezés „végeredménye” nem szükségszerűen esik egybe a rádiólokáció céljaival.⁸⁴

A napjainkban alkalmazott városi FR1 (~3,6 GHz) 5G gNB ökoszisztéma területileg korlátozottan (szektoriálisan) tekinthető praktikus loO-nak. A jellemzően több tíz méter magasba telepített antennák által kiszolgált városi térnek csak bizonyos hányada rendelkezik közvetlen antennarátással, amely arány utcaszinten akár 50% alá is csökkenhet.⁸⁵ Az FR1 gNB telepítési struktúra az UAV detektálás szempontjából hatékony lehet, de szükséges számolni azzal, hogy a referenciaantennák telepítési pontjainak meghatározása az átlagosnál részletesebb tervezést igényel, a városi környezetben diffrakció és reflexió okozta zavarjelek kezelése jelentős kihívást jelent, valamint, hogy a céltárgy közvetlen megvilágítása nem folytonosan biztosított, különösen a felszínközeli térszegmensekben.



11. ábra: 5G heterogén hálózati struktúra

Forrás: NGUYEN 2017 alapján a szerző fordítása

⁸³ FERENCZY-SZÜCS-BALOG 1998.

⁸⁴ DREIFUERST-HEATH 2023.

⁸⁵ Az adott térpont megvilágítása függ pl. annak vertikális pozíciójától, a környező tér beépítettségétől, az épített tér sajátosságaitól és egyéb földrajzi jellemzőitől, járműforgalomtól. Lásd THOMAS-WILLIS-CRAIG 2006.

Egy városi komplex (FR1 + FR2) gNB ökoszisztéma (11. ábra) optimális loO-hálózatot és többirányú (RCS-növelő) célobjektum-megvilágítást biztosíthat.⁸⁶ Az FR1 vázolt rálátási sajátosságai és az FR2 gNB-k alacsony kisugárzási teljesítménye azonban korlátozó tényezőt jelenthet. Ezért a detektálás optimalizálása érdekében kiemelt fontosságú a megfelelően pozicionált, a polarimetrikus diverzitást kiaknázó, akár dinamikus platformra telepített elemekkel kiegészített számos loO típus kiaknázására képes, többsávú referencia-/megfigyelőantenna ökoszisztéma.⁸⁷

Az FR2 frekvenciatartomány terjedési sajátosságai szükségessé teszik a több cella átfedéssel kiszolgálását biztosító antennák sűrű, jellemzően alacsony magasságú telepítését. Mindez biztosíthatja a potenciális felszíni és ahhoz közeli célobjektumok akár több loO általi megvilágítását.

FR2-ben elvárás az UE és a gNB antennája közti közvetlen rálátás, így a szolgáltatók az SSB-nyalábok paraméterezésekor kerülni fogják a magasabb térpontok és az épületek meddő besugárzását.⁸⁸ Azon fiktív esetben, amikor az adott kültéri FR2-es gNB lesz hivatott kiszolgálni⁸⁹ a környező épületek kommunikációs igényeit, vagy ha az olyan szolgáltatások, mint az 5G-alapú UAV-vezérlés azt „kikényszerítik”, a magasabb térpontok SSB-sóprése is megvalósulhat.

További kihívás, hogy az FR2-es gNB-k esetében várhatóan dinamikusán váltakozik majd az SSB-sóprés mintázata, a nyalábok paraméterezése, igazodva a gNB aktuális forgalmazási, igénybevételi sajátosságaihoz. Mindemelllett a kis nyalábszélesség, a legfeljebb 200 Hz-es PRF és az FR2-1 esetében az elérhető legnagyobb SSB-sáv szélesség (57,6 MHz) további hatékonyságkorlátozó tényezőként jelentkezhet, különösen a kis méretű légi objektumok és az emberi jelenlét detektálása terén.

A vonatkozó hazai jogszabályok⁹⁰ által csak közvetetten támogatott kiskapu lehet a mobilkommunikációs szolgáltató által biztosított hozzáférés az 5G RAN-hoz. Ezzel csökkenthető a passzív rádiólokáció referencijelnek való kitettsége, mivel a szükséges (kisugárzott jelet leíró) információk közvetlenül kinyerhetők az érintett gNB-kből. Emellett a szolgáltató által fel nem használt SSB-nyalábokat a vizsgált térszegmensek felé aktiválva, kibocsátási paramétereiket az adott detektálási feladathoz optimalizálva jelentős többletinformáció kinyerése is biztosítható.

A fent vázoltak alapján egyedüli, nem együttműködő loO-ként, jelen ismereteink szerint, az 5G korlátozott hatékonyságú. Optimális hatékonyságú megvilágítás az FR1 és FR2 cellastruktúrák egyidejű kiaknázása esetén lehetséges. Egy városi passzív lokációs ökoszisztéma hatékonysága tervezetten telepített (a kiemelt fontosságú területek megvilágítását optimalizáló), loT-eszközök, valamint az MI alkalmazásával növelhető. Az loT-szegmens hármast jelent: aktiváló, pontosító technológiákkal (hang, kép, hő, szeizmikus érzékelők) támogathatja a passzív rádiólokációs szegmenst; megnövelt adatforgalmat generálva biztosíthatja a szükséges (RCS-optimalizáló) megvilágítást

⁸⁶ SEMKIN et al. 2020, EZUMA et al. 2021.

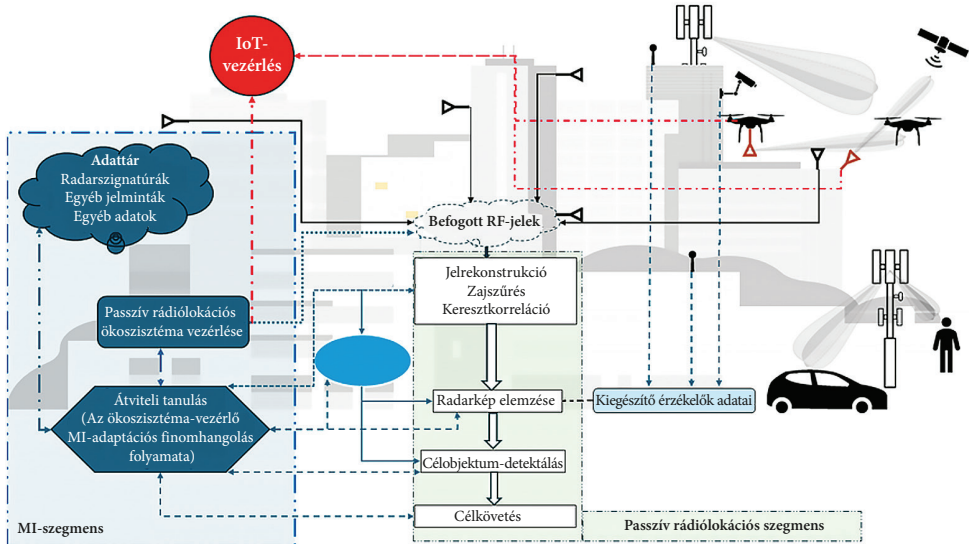
⁸⁷ COLONE-FILIPPINI-PASTINA 2023.

⁸⁸ Az FR2 frekvenciák nem hatolnak át a falakon.

⁸⁹ PL. átjátszók révén, amelyek biztosítják az FR2 5G-jel épületbe jutását.

⁹⁰ PL. 2003. évi C. tv., 2021. évi XCIII. tv.

hatékonyságot; illetve dinamikus, automatikusan pozicionálható platformot⁹¹ képezhet az ökoszisztéma érzékelő és adatgeneráló elemei számára.



12. ábra: Egy MI-vezérlésű passzív rádiólokációs ökoszisztéma

Forrás: a szerző szerkesztése

A javasolt ökoszisztémát az alábbi három fő szegmens szimbiózisa alkotja:

- *MI-szegmens biztosítja*
 - az ökoszisztéma feladatspecifikus, a környezet változásait és a detektált célobjektum sajátosságait figyelembe vevő vezérlését;
 - a beérkező RF-jelek és egyéb adatok elemzésének, értékelésének, feldolgozásának, valamint
 - a célobjektum-detektálás és -követés funkciók támogatását;
 - az ökoszisztéma adaptív jellegét és rezilienciáját az átviteli tanulás⁹² révén;
 - a releváns adatok tárolását.
- *A passzív rádiólokációs szegmens végzi*
 - az 5G, illetve egyéb IoO-k referencia- és célobjektumok jeleinek befogását és feldolgozását;
 - a radarkép elemzését, a célobjektumok detektálását és célkövetést, figyelembe véve az IoT-szegmensből származó adatokat, az MI-szegmens támogatásával.
- *Az IoT-szegmens tartalmazza*
 - az ökoszisztémába integrált egyéb (például akusztikus, szeizmikus, videó, LiDAR stb.) szenzorokat;

⁹¹ PL UAV, UGV.

⁹² Átviteli vagy transfertanulás. MI-modell tanítási technika, amely lehetővé teszi korábbi feladatokból származó ismeretek felhasználását egy új feladat megoldásához, hatékonyságának növeléséhez. A javaslat vonatkozásában, annak folyamatos önfejlesztő, adaptációs képességére utalok az elnevezéssel.

- a szegmens statikus elemeit (5G-kommunikátorok, megfigyelő- és referenciaantennák); illetve
- dinamikus platformjait (például a fenti pontban jelzett eszközökkel felszerelt UAV-ok).

A városi környezet heterogén, volatilis környezeti jellege és célobjektumok vázolt sajátosságai okán, az MI-szegmens rálátással és irányítási kompetenciákkal kell rendelkezzen, illetve folyamatos tanulás, adaptálódás révén biztosítja a rendszer rezilienciáját. A javasolt ökoszisztéma (lásd 12. ábra) alaphelyzeti állapotban multimodális felderítést végez 5G SSB pásztázás és más IoO-k kiaknázásával, illetve az integrált szenzorhálózat révén. A detektált potenciális célobjektumok mozgását és egyéb paramétereit MI-támogatással elemzi a rendszer. A kiemelt figyelmet igénylő célobjektum detektálása esetén, amennyiben a rendelkezésre álló adatok nem elégségesek, az MI dönthet nagyobb pontosságú információ beszerzéséről. Ennek érdekében célspecifikusan hangolhatja a csatlakoztatott referencia- és megfigyelőantennákat, további adatokat gyűjthet a szenzorhálózatból. Az RCS növelése érdekében hatékonyabb megvilágítási és jelbefogási helyzetbe pozicionálhatja a dinamikus platformokat. Továbbá a célobjektum útvonala mentén a statikus és dinamikus IoT-elemek kommunikátorait aktiválva magas adattartamú, akár 400 MHz sávszélességű nyalábok révén pontosíthatja a kapcsolódó méréseket. A vázolt megoldás hátránya, hogy szemben a hagyományos passzív rádiólokációval, kevésbé mobilis, magasabb a beszerzési és üzemeltetési költsége.

Összegzés

Jelen publikáció rá kívánt mutatni arra, hogy kiemelten városi környezetben az 5G – *köszönhetően olyan jellemzőinek, mint a nagy sávszélesség, masszív MIMO, nyalábformálás, OFDM moduláció stb.* – magas potenciállal rendelkező IoO lehetőség a passzív rádiólokációs ökoszisztémák számára. A releváns szakirodalom elemzését követően, bemutatva alkalmazásának korlátozó tényezőit, az alaphipotézis teljes mértékben nem igazolható. A jelzett hátrányok kompenzálására egy komplex, passzív radar, MI és IoT fő szegmenseken nyugvó megoldást mutattunk be vázlatosan.

Városi környezetben az 5G egy diverz, az IoO-k széles körét (4G, DAB, DVB-T, FM, GNSS, WiFi stb.) alkalmazni képes ökoszisztéma részeként, makro- (FR1) és mikrocellás (FR2) RAN struktúra egyidejű alkalmazása mellett tekinthető egy hatékony passzív rádiólokációs rendszer magas rezilienciájú összetevőjének. IoT-megoldások rendszerbe iktatásával az 5G IoO-k hatékonysága célirányosan és rugalmasan növelhető. MI-támogatással nemcsak a jelfeldolgozás sebessége és komplexitása, de az 5G-t IoO-ként alkalmazó passzív rádiólokációs rendszer alkalmazási köre is rugalmasan növelhető, kitágítva annak katonai/rendvédelmi/civil biztonsági alkalmazását.

Felhasznált irodalom

- 3GPP.org (2022): *The 5G standard, Release 18*. Online: www.3gpp.org/ftp/Inbox/Marcoms/3GPP_Poster%20v2.pdf
- ABRATKIEWICZ, Karol – KSIĘŻYK, Adam – PŁOTKA, Marek – SAMCZYŃSKI, Piotr – WSZOŁEK, Jacek – ZIELIŃSKI, Tomasz Piotr (2023): SSB-Based Signal Processing for Passive Radar Using a 5G Network. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 3469–3484. Online: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3262291>
- ADIB, Fadel – SU, Chen-Yu – MAO, Hongzi – KATABI, Dina – DURAND, Frédo (2015): Capturing the Human Figure Through a Wall. *ACM Transactions on Graphics*, 34(6). Online: <https://doi.org/10.1145/2816795.2818072>
- ASHLEIBTA, Aboajeila Milad – TAHA, Ahmad – KHAN, Muhammad A. – TAYLOR, William – TAHIR, Ahsen – ZOHA, Ahmed – ABBASI, Qammer H. – IMRAN, Muhammad A. (2021): 5G-Enabled Contactless Multi-User Presence and Activity Detection for Independent Assisted Living. *Scientific Reports*, 11. Online: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96689-7>
- BALAJTI István (2019a): Új kihívások a hazai légtérellenőrzésben. Rendszerintegrációs alapok, passzív rádiólokáció. *Haditechnika*, 53(2), 2–7. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.2.01>
- BALAJTI István (2019b): A XXI. századi radarrendszerekkel szemben támasztható elvárások. *Haditechnika*, 53(3), 3–7. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.3.01>
- BEASLEY, Piers – RITCHIE, Matthew – GRIFFITHS, Hugh – MICELI, William – INGG, Michael – SIMON, Lewis (2020): *Multistatic Radar Measurements of UAVs at X-band and L-band*. 2020 IEEE Radar Conference, Florence, Italy, 2020, 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/RadarConf2043947.2020.9266444>
- BINGLI, Liao – VARGAS, Vasconcellos (2024): *Extending Token Computation for LLM Reasoning*. arXiv:2403.14932v3. Online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.14932>
- BIRUTIS, Agnius – MYKKELTVEIT, Anders – ULVERSØY, Tore – BORLAUG, Øystein Dag – KÅRSTAD, Jørn (2022): *A Study of 5G New Radio and Its Vulnerability to Jamming*. Norwegian Defence Research Establishment. Online: www.ffi.no/en/publications-archive/a-study-of-5g-new-radio-and-its-vulnerability-to-jamming
- CARO, C. G. – BLOICE, J. A. (1971): Contactless Apnoea Detector Based on Radar. *The Lancet* 298(7731), 959–961. Online: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(71\)90274-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(71)90274-1)
- CHANG, Yupeng – WANG, Xu – WANG, Jindong – WU, Yuan – YANG, Linyi – ZHU, Kaijie – CHEN, Hao – YI, Xioyuan – WANG, Cunxiang – WANG, Yidong et al. (2024): A Survey on Evaluation of Large Language Models. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 15(3). Online: <https://doi.org/10.1145/3641289>
- CHEN, Victor C. – LI, Fayin – HO, Shen-Shyang – WECHSLER, Harry (2006): Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42(1), 2–21. Online: <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603402>

- COLONE, Fabiola – FILIPPINI, Francesca – PASTINA, Debora (2023): Passive Radar: Past, Present, and Future Challenges. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 38(1), 54–69. Online: <https://doi.org/10.1109/MAES.2022.3221685>
- DEEP, Yoshana – HELD, Patrick – RAM, Shobha Sundar – STEINHAUSER, Dagmar – GUPTA, Anshu – GRUSON, Frank – KOCH, Andreas – ROY, Anirban (2020): Radar Cross-Sections of Pedestrians at Automotive Radar Frequencies Using Ray Tracing and Point Scatterer Modelling. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 14(6), 833–844. Online: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0471>
- DREIFUERST, Ryan M. – HEATH, Robert W. (2023): Massive MIMO in 5G: How Beamforming, Codebooks, and Feedback Enable Larger Arrays. *IEEE Communications Magazine*, 61(12), 18–23. Online: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2300064>
- EZUMA, Martins – ANJINAPPA, Chethan Kumar – SEMKIN, Vasilii – GUVENC, Ismail (2021): *Comparative Analysis of Radar Cross Section Based UAV Classification Techniques*. arXiv:2112.09774v1. Online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.09774>
- FARKAS Tibor (2023): A kommunikációs és információs rendszerek értelmezése napjainkban: Követelmények és kihívások. In TÓTH András (szerk.): *Új típusú kihívások az infokommunikációban*. Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó, 11–30.
- FEREIDOUNI, Farshad – MOHAMMADI, Seyed T. – SHAHRABI, Vahed F. – JAHANTIGH, Farhad (2022): Human Health Risk Assessment of 4-12 GHz Radar Waves using CST STUDIO SUITE Software. *Journal of Biomedical Physics Engineering*, 12(3), 285–296. Online: <https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.1272>
- FERENCZY Gábor – SZÜCS Péter – BALOG Károly (1998): *Rádiólokáció alapjai*. Budapest: Bolyai János Katonai Műszaki Főiskola.
- GARTENBERG, Chaim (2024): What is a Long Context Window? *Blog.google*, 2024. február 16. Online: <https://blog.google/technology/ai/long-context-window-ai-models>
- GOMEZ-DEL-HOYO, Pedro – GRONOWSKI, Konrad – SAMCZYNSKI, Piotr (2022): *The STARLINK-Based Passive Radar: Preliminary Study and First Illuminator Signal Measurements*. 23rd International Radar Symposium (IRS), Gdansk, Poland, 2022, 350–355. Online: <https://doi.org/10.23919/IRS54158.2022.9905046>
- GURBUZ, Sevgi Z. – GRIFFITHS, Hugh D. – CHARLISH, Alexander – RANGASWAMY, Muralidhar – GRECO, Maria Sabrina – BELL, Kristine (2019): An Overview of Cognitive Radar: Past, Present, and Future. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 34(12), 6–18. Online: <https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2953762>
- HAIG Zsolt – KOVÁCS László – VÁNYA László – VASS Sándor – NÉMETH András (2014): *Elektronikai hadviselés*. Budapest: Nemzeti Közszerzői Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar.
- HUAN, Sha – WU, Limei – ZHANG, Man – WANG, Zhaoyue – YANG, Chao (2023): Radar Human Activity Recognition with an Attention-Based Deep Learning Network. *Sensors*, 23(6). Online: <https://doi.org/10.3390/s23063185>
- JIAN, Michael – LU, Zhenzhong – CHEN, Victor C. (2017): *Experimental Study on Radar Micro-Doppler Signatures of Unmanned Aerial Vehicles*. IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017, 0854–0857. Online: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944322>
- KARLSSON, Alexander (2023): *Radar Signal Processing using Artificial Neural Networks*. PhD-dissertáció. KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science

- (EECS), Intelligent systems, Information Science and Engineering. Online: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1797382>
- KARSA Róbert (2024): Tűzvédelmi szakértői rendszer létrehozása nagy nyelvi modellek segítségével. *Rendvédelem*, 13(2), 26–36. Online: <https://doi.org/10.53793/RV.2024.2.3>
- KHEDKAR, Ashok – MUSALE, Sandeep – PADALKAR, Ganesh – SURYAWANSHI, Ravikant – SAHARE, Shashikant (2023): An Overview of 5G and 6G Networks from the Perspective of AI Applications. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series B*, 104(6), 1329–1341. Online: <https://doi.org/10.1007/s40031-023-00928-6>
- KIM, Youngwook – HA, Sungjae – KWON, Jihoon (2015): Human Detection Using Doppler Radar Based on Physical Characteristics of Targets. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(2), 289–293. Online: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2336231>
- KIM, Hahyun – KIM, Gayeong – SHIM, Sunghoon – JANG, Sukbin – SONG, Jiho – LEE, Byungju (2024): Key Technologies for 6G-Enabled Smart Sustainable City. *Electronics*, 13(2). Online: <https://doi.org/10.3390/electronics13020268>
- KIRILLOV, Alexander et al. (2023): *Segment Anything*. arXiv:2304.02643. Online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.02643>
- KONCZ Miklós Tamás (2007): Lunenberg reflektor radarkeresztmetszetének mérése összehasonlító módszerrel. *Hadmérnök*, 2(3), 100–185. Online: http://hadmernok.hu/archivum/2007/3/2007_3_koncz.pdf
- KSIĘŻYK, Adam – PŁOTKA, Marek – ABRATKIEWICZ, Karol – MAKSYMIAK, Radosław – WSZOŁEK, Jacek – SAMCZYŃSKI, Piotr (2023): Opportunities and Limitations in Radar Sensing Based on 5G Broadband Cellular Networks, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 38(9), 4–21. Online: <https://doi.org/10.1109/MAES.2023.3267061>
- KUSCHEL, Heiner – CRISTALLINI, Diego – OLSEN, Karl Erik (2019): Tutorial: Passive Radar Tutorial. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 34(2), 2–19. Online: <https://doi.org/10.1109/MAES.2018.160146>
- LI, Wenda – PIECHOCKI, Robert J. – WOODBRIDGE, Karl – TANG, Chong – CHETTY, Kevin (2021): Passive WiFi Radar for Human Sensing Using a Stand-Alone Access Point. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(3), 1986–1998. Online: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3006387>
- LI, Xiang – WEN, Congcong – HU, Yuan – YUAN, Zhenghang – ZHU, Xiao Xiang (2024): Vision-Language Models in Remote Sensing: Current Progress and Future Trends. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 12(2), 32–66. Online: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2024.3383473>
- LIN, Luning – YU, Ningning – WANG, Yong – SHI, Zhiguo (2023): *5G Spectrum Learning-Based Passive UAV Detection in Urban Scenario*. IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Dalian, China, 2023, 1–5. Online: <https://doi.org/10.1109/ICCC57788.2023.10233342>
- LIN, Xingqin – LI, Jingya – BALDEMAIR, Robert – CHENG, Jung-Fu Thomas – PARKVALL, Stefan – LARSSON, Daniel Chen (2019): 5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology. *IEEE Communications Standards Magazine*, 3(3), 30–37. Online: <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1800036>
- LIU, Hongshan – QIN, Tong – GAO, Zhen – MAO, Tianqi – YING, Keke – WAN, Ziwei – QIAO, Li – NA, Rui – LI, Zhongxiang – HU, Chun – MEI, Yikun – LI, Tuan – WEN, Guang-

- hui – CHEN, Lei – WU, Zhonghuai – LIU, Ruiqi – CHEN, Gaojie – WANG, Shuo – ZHENG, Dezhi (2024): *Near-Space Communications: the Last Piece of 6G Space-Air-Ground-Sea Integrated Network Puzzle*. arXiv:2401.00283. Online: <https://doi.org/10.34133/space.0176>
- LIU, Yan – DAN, Yangpeng – WAN, Xianrong – Yi, Jianxin (2022): *Investigations on 5G-Based Passive Sensing for IoT Applications*. IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2022, 823–828. Online: <https://doi.org/10.1109/ICCC56324.2022.10065876>
- LYU, Xiaoyong – LIU, Baojin – FAN, Wenbing (2022): Signal Processing in Passive Radar with Multi-User MIMO-OFDM Signal. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 113. Online: <https://doi.org/10.1186/s13634-022-00947-3>
- MAKSYMIOUK, Radosław – HOYO, Pedro Gomez del – ABRATKIEWICZ, Karol – SAMCZYNSKI, Piotr – KULPA, Krzysztof (2024): 5G-Based Passive Radar on a Moving Platform – Detection and Imaging. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 18(12), 2414–2426. Online: <https://doi.org/10.1049/rsn2.12559>
- MAKSYMIOUK, Radosław – PŁOTKA, Marek – ABRATKIEWICZ, Karol – SAMCZYŃSKI, Piotr (2023): *5G Network-Based Passive Radar for Drone Detection*. 24th International Radar Symposium (IRS), Berlin, Germany, 1–10. Online: <https://doi.org/10.23919/IRS57608.2023.10172437>
- NATO STO (2017): *Passive Coherent Locator History and Fundamentals*. 2017. augusztus 23. Online: www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/STO-EN-SET-243/EN-SET-243-01.pdf
- NGUYEN, Tuan (2017): Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1). *Qorvo.com*, 2017. május 17. Online: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>
- NÚÑEZ-ORTUÑO, José M. – GONZÁLEZ-COMA, José – LÓPEZ, Rubén Nocelo – TRONCOSO-PASTORIZA, Francisco – ÁLVAREZ-HERNÁNDEZ, María (2023): Beamforming Techniques for Passive Radar: An Overview. *Sensors (Basel)*, 23(7). Online: <https://doi.org/10.3390/s23073435>
- OpenAI et al. (2024): *GPT-4 Technical Report*. arXiv:2303.08774v6. Online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.08774>
- PETŐ Tamás (2013): *Több csatornás DVB-T alapú passzív radar*. BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar. 2013. október 25. Online: <https://tdk.bme.hu/VIK/HWBeagy/Tobb-csatornas-DVBT-alapu-passziv-radar>
- PULTAROVA, Tereza (2025): Starlink Satellites: Facts, Tracking and Impact on Astronomy. *Space.com*, 2025. március 28. Online: <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>
- RAMALINGAM, Manoharan (2018): 5G NR Beam Management and Beam Scheduling (everything about the beams). *LinkedIn*, 2018. július 12. Online: www.linkedin.com/pulse/5g-nr-beam-management-scheduling-everything-beams-ramalingam
- SKOLNIK, Merrill I. (1981): *Introduction to Radar Systems. Second Edition*. Singapore: McGraw-Hill.
- SELLER Rudolf – PETŐ Tamás – DUDÁS Levente – KOVÁCS Levente (2019): Passzív radar. I. rész. *Haditechnika*, 53(6), 51–55. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.6.10>

- SELLER Rudolf – PETŐ Tamás – DUDÁS Levente – KOVÁCS Levente (2020): Passzív radar. II. rész. *Haditechnika*, 54(1), 43–47. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.54.1.09>
- SEMKIN, Vasilii – HAARLA, Jaakko – PAIRON, Thomas – SLEZAK, Christopher – RANGAN, Sundee – VIKARI, Ville (2020): Analyzing Radar Cross Section Signatures of Diverse Drone Models at mmWave Frequencies. *IEEE Access*, 8, 48958–48969. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979339>
- STRINATI, Emilio Calvanese – ALEXANDROPOULOS, George C. – AMANI, Navid – CROZZOLI, Maurizio – MADHUSUDAN, Giyyarpuram – MEKKI, Sami – RIVET, François – SCIANCALEPORE, Vincenzo – SEHIER, Philippe – STARK, Maximilian – WYMER-SCH, Henk (2024): *Towards Distributed and Intelligent Integrated Sensing and Communications for 6G Networks*. arXiv:2402.11630. Online: <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2400056>
- TANG, Chong – LI, Wenda – VISHWAKARMA, Shelly – CHETTY, Kevin – JULIER, Simon – WOODBRIDGE, Karl (2020): *Occupancy Detection and People Counting Using WiFi Passive Radar*. 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20), Florence, Italy, 2020, 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/RadarConf2043947.2020.9266493>
- TARZANAGH, Davoud Ataee – LI, Yingcong – ZHANG, Xuenchen – OYMAK, Samet (2023): *Max-Margin Token Selection in Attention Mechanism*. arXiv:2306.13596v4. Online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.13596>
- THI PHUOC VAN, Nguyen – TANG, Liqiong – DEMIR, Veysel – HASAN, Syed F. – MINH, Nguyen D. – MUKHOPADHYAY, Subhas (2019): Review-Microwave Radar Sensing Systems for Search and Rescue Purposes. *Sensors*, 19(13). Online: <https://doi.org/10.3390/s19132879>
- THOMAS, Nicholas J. – WILLIS, Mike J. – CRAIG, Ken H. (2006): The Relative Importance of Different Propagation Mechanisms for Radio Coverage and Interference Prediction in Urban Scenarios at 2.4, 5.8, and 28 GHz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(12), 3918–3920. Online: <https://doi.org/10.1109/TAP.2006.886571>
- TÓTH András (2023a): Az Internet of Things rendszerek biztonsági kihívásai. In TÓTH András (szerk.): *Új típusú kihívások az infokommunikációban*. Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó, 99–136.
- TÓTH András (2023b): Az 5G-technológia jellemzői és a kialakításában rejlő kihívások. In TÓTH András (szerk.): *Új típusú kihívások az infokommunikációban*. Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó, 51–98.
- VASWANI, Ashish – SHAZEER, Noam – PARMAR, Niki – USZKOREIT, Jakob – JONES, Llion – GOMEZ, Aidan N. – KAISER, Lukasz – ILLIA Polosukhin (2017): *Attention Is All You Need*. arXiv:1706.03762v7. Online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
- WANG, Siqin – XIAO, Huang – LI, Yun – ZHANG, Ce – NING, Huan – ZHU, Rui – LI, Zhenlong – YE, Xinyue (2024): GPT, Large Language Models (LLMs) and Generative Artificial Intelligence (GAI) Models in Geospatial Science: A Systematic Review. *International Journal of Digital Earth*, 17(1). Online: <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2353122>
- WU, Shengqiong – FEI, Hao – QU, Leigang – CHUA, Tat-Seng (2024): *NExT-GPT: Any-to-Any Multimodal LLM*. arXiv:2309.05519v3. Online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.05519>

- WÜHRL, Tibor – BAROSS, Márk Tamás – GYÁNYI, Sándor – VARGA, Péter János (2023): *5G Synchronization Problems with GNSS Interference*. IEEE 6th International CAN-DO-EPE Conference, Budapest, Hungary, 2023, 149–154. Online: <https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE60507.2023.10417998>
- XU, Fengtong – HONG, Tao – ZHAO, Jincheng – YANG, Tao (2019): Detection and Identification Technology of Rotor Unmanned Aerial Vehicles in 5G Scene. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(6). Online: <https://doi.org/10.1177/1550147719853990>
- XU, HanXiang – WANG, Shenao – LI, Ningke – WANG, Kailong – ZHAO, Yanjie – CHEN, Kai – YU, Ting – LIU, Yang – WANG, Haoyu (2024): *Large Language Models for Cyber Security: A Systematic Literature Review*. arXiv:2405.04760v2. Online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.04760>
- YAMADA, Naoyuki – TANAKA, Y. – NISHIKAWA, Kunitoshi (2005): *Radar Cross Section for Pedestrian in 76GHz Band*. European Microwave Conference, Paris, France, 2005. Online: <https://doi.org/10.1109/EUMC.2005.1610101>
- ZHANG, Duzhen – YU, Yahan – DONG, Jiahua – LI, Chenxing – SU, Dan – CHU, Chenhui – YU, Dong (2024): *MM-LLMs: Recent Advances in MultiModal Large Language Models*. arXiv:2401.13601v5. Online: <https://doi.org/10.18653/v1/2024.findings-acl.738>