

A kiadványhoz kapcsolódó viták, statisztikák és szerzői profilok a következő címen olvashatók: <https://www.researchgate.net/publication/356998779>.

Magán 5G hálózatok: 5G hálózatok: Konceptiók, architektúrák és kutatási környezet

Cikk az IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing című folyóiratban - december 2021

DOI: 10.1109/JSTSP.2021.3137669

SZITÁCIÓK

0

READS

1,584

8 szerző, köztük:



Miaowen Wen

Dél-kínai Műszaki Egyetem

250 PUBLIKÁCIÓ **5,153** IDÉZET

NÉZZE MEG
AZ
ADATLAPOT



Kyeong Jin Kim

Mitsubishi Electric Research Laboratories

230 PUBLIKÁCIÓ **2,499** IDÉZET

NÉZZE MEG
AZ
ADATLAPOT



Qiang Li

Jinan Egyetem (Guangzhou, Kína)

44 PUBLIKÁCIÓ **783** IDÉZET

NÉZZE MEG
AZ
ADATLAPOT



David Lopez-Perez

Bell Laboratories, Alcatel Lucent

198 PUBLIKÁCIÓ **6,522** IDÉZET

NÉZZE MEG
AZ
ADATLAPOT

E kiadvány néhány szerzője szintén dolgozik ezeken a kapcsolódó projekteken:



Az 5G hálózatok új technológiái (NOMA, teljes duplex stb.) [Projekt megtekintése](#)



NOMA - Non-Orthogonal Multiple Access [Projekt megtekintése](#)

Magán 5G hálózatok: 5G hálózatok: Konceptiók, architektúrák és kutatási környezet

Miaowen Wen, *Senior Member, IEEE*, Qiang Li, *Member, IEEE*,
Kyeong Jin Kim, *Senior Member, IEEE*, David López, *Senior Member, IEEE*,
Octavia A. Dobre, *Fellow, IEEE*, H. Vincent Poor, *Life Fellow, IEEE*,
Petar Popovski, *Fellow, IEEE*, és Theodoros A. Tsiftsis, *Senior Member, IEEE*

Absztrakt

A privát ötödik generációs (5G) hálózat egy dedikált 5G hálózat, amely továbbfejlesztett kommunikációs jellemzőkkel, egységesített csatlakozási lehetőséggel, optimalizált szolgáltatásokkal és testre szabott biztonsággal rendelkezik egy adott területen belül. A nyilvános és a nem nyilvános 5G hálózatok előnyeit egyaránt magába foglalva a privát 5G hálózatok az iparban, az üzleti életben, a közműveknél és a közszférában találtak alkalmazást. Az ipar 4.0 ígéretes gyorsítójaként a magán 5G hálózat koncepciója a közelmúltban jelentős kutatási figyelmet kapott az ipar és a tudományos élet részéről. Ez a cikk az egyik első kísérlet arra, hogy átfogó képet adjon a magán 5G hálózatokkal kapcsolatos kutatásról. Konkrétan, ez a cikk először áttekintést nyújt a privát 5G hálózatok koncepciójáról és architektúrájáról. Ezután tárgyalja a magán 5G hálózatok megvalósítási kérdéseit és kulcsfontosságú alaptermotechnológiáit, majd a vonzóbb felhasználási eseteket és a létező valós demonstrációkat. Végül megvizsgál néhány kutatási kihívást és jövőbeli irányt a magán 5G hálózatokkal kapcsolatban.

Indexkifejezések

5G, magánhálózatok, nem nyilvános hálózatok, a dolgok ipari internete (IIoT), ipar 4.0.

Miaowen Wen a Dél-kínai Műszaki Egyetem Elektronikai és Információs Mérnöki Karán dolgozik, Guangzhou 510640, Kína (e-mail: eemwwen@scut.edu.cn).

Qiang Li a Jinan Egyetem Információtudományi és Technológiai Főiskoláján dolgozik, Guangzhou 510632, Kína (e-mail: qiangli@jnu.edu.cn).

Kyeong Jin Kim a Mitsubishi Electric Research Laboratories, Cambridge, MA 02139, USA (e-mail: kkim@merl.com).

David López Huawei Technologies, 92100 Boulogne-Billancourt, Franciaország, Algorithm and Software Design Department (e-mail: dr.david.lopez@ieee.org).

Octavia A. Dobre a Memorial University, St. Johns, NL, Kanada, Mérnöki és Alkalmazott Tudományok Karának munkatársa (e-mail: odobre@mun.ca).

H. Vincent Poor a Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA, Villamosmérnöki Tanszékének munkatársa (e-mail: poor@princeton.edu).

Petar Popovski az Aalborgi Egyetem munkatársa, 9220 Aalborg, Dánia (e-mail: petarp@es.aau.dk).

Theodoros A. Tsiftsis a Jinan University, Zhuhai 519070, Kína, Intelligent Systems Science and Engineering School of Intelligent Systems Science and Engineering, Zhuhai 519070, Kína, valamint a Dept. of Computer Science and Telecommunications, University of Thessaly, Lamia 35131, Görögország (email: tsiftsis@ieee.org).

I. TÁBLÁZAT

ÖSSZEHASONLÍTÁS A WI-FI 6 ÉS A PRIVÁT 5G KÖZÖTT.

	Spektrum	Lefedtség	Megbízhatóság	Mobilitás és telephelyen kívül	Biztonság	Kültéri alkalmasság	Költségek	Alkalmazási forgatókönyvek
Wi-Fi 6	Engedély nélkül	Helyi	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Alacsony	Nem küldetéskritikus
Privát 5G	Engedélyezett	Széles	Magas	Magas	Magas	Magas	Magas	Küldetéskritikus

I. BEVEZETÉS

Az ötödik generációs (5G) mobilhálózatokat világszerte kiépítik. Az 5G hálózatok alakítják az ipari világot és a mindennapi életünket is, számos új alkalmazást tesznek lehetővé a több Gbps-os csúcsebességű, rendkívül alacsony késleltetésű és rendkívül nagy megbízhatóságú adatátviteli sebességek révén [1]-[4]. A mobilhálózat-üzemeltetők tulajdonában és üzemeltetésében lévő nyilvános 5G-hálózatok azonban fontos kihívásokkal is szembe kell nézzenek a széles körű bevezetés előtt. Ezek egyike a lefedettség. A mobilhálózat-üzemeltetők a kiépítési költségek fedezésére szolgáló bevételre törekedve hajlamosak a hálózatokat nagyszámú előfizetővel rendelkező területeken kiépíteni. Ez a kevésbé sűrűn lakott városi területeken gyenge hálózati lefedettséget eredményezhet, a távolabbi zónákban pedig még a lefedettség hiánya is előfordulhat. A lefedettség nem kielégítő lehet a zord rádiófrekvenciás (RF) körülményekkel rendelkező beltéri helyeken sem. Ráadásul egy olyan világban, ahol gyakran fordulnak elő adatszegések és kibertámadások, a csúcstechnológiát képviselő ipari vállalatoknak saját, testre szabott biztonsági irányelvek és helyben tárolt adatok használatára van szükségük, amelyeket a hagyományos nyilvános mobilhálózatok némelyike nem feltétlenül támogat. E hiányosságok miatt a magánhálózatok, amelyeket a 3. generációs partnerségi projekt (3GPP) [5] nem nyilvános hálózatoknak is nevez, jelentős érdeklődést váltottak ki.

A magánhálózatok nem pusztán elméleti konstrukció. Bár még mindig a kezdeti stádiumban vannak, ma már léteznek. A negyedik generációs (4G) technológiákra épülő LTE (Long Term Evolution) magánhálózatok például jelenleg már kereskedelmi realitásnak számítanak [6]. A globális LTE-ökoszisztéma előnyeit kihasználva a magán LTE-hálózatok számos ipari alkalmazást képesek támogatni a különböző ágazatokban azáltal, hogy befogadják és feldolgozzák a nagyszámú érzékelő, aktuátor, robot, biztonsági kamera stb. által gyűjtött információkat. Az iparágak azonban egyre szigorúbb teljesítménykövetelményeket támasztanak az áteresztőképesség, a késleltetés, a megbízhatóság, a rendelkezésre állás, a biztonság és az eszközsűrűség tekintetében [7], amelyeket a magán LTE-hálózatok nem tudnak teljesíteni. Például a vezérlőrendszerek és a fizikai működtetők közötti kapcsolatra vonatkozó teljesítménykövetelmények rendkívül szigorúak, és az LTE-technológiák nem tudnak megfelelni nekik [8]. Bár az ilyen típusú felhasználási esetek kielégítésére még mindig használhatók vezeték nélküli technológiák, például a terepi buszkommunikáció, ezek magas karbantartási költségeket igényelnek, és nem biztosítják a jövő iparágai által megkövetelt mobilitást. Különösen az ipar 4.0 fejlődésével a jövő gyára a tárgyak internetének (IoT) és az ipari IoT-nek (IIoT) a küldetéskritikus alkalmazásokhoz szükséges eszközeinek nagy számát fogja magában foglalni [9], ami a vezeték nélküli megoldásokat nem teszi hatékonyá. A nem nyilvános 5G hálózatok kiépítése így logikus fejlődés -és jobban illeszkedik- a fenti ipari igényekhez [10].

A felhasználási esetek széles köre, például repülőterek, bányák és egyetemi környezetek, például egyetemek, kórházak és katonai bázisok számára előnyösek lennének a privát 5G hálózatok. A repülőtereken a nem nyilvános 5G hálózatok lehetővé tesznek néhány új technológiát, beleértve a mobil biztonsági rendszereket és a valós idejű,

szűrőrendszerek. Az általában távoli és alulszolgáltatott, nyilvános hálózati lefedettséggel nem rendelkező területeken található bányák esetében a termelékenység és a biztonság javítása érdekében magán 5G-hálózatokat lehet létrehozni mobilhálózat-üzemeltető nélkül. Az egyetemi környezetekben a privát 5G hálózatok lehetővé teszik a tulajdonosok számára az eszközök nyomon követését és a kívánt szolgáltatások testre szabását. A szerteágazó katonai alkalmazásokkal való megbirkózás és a katonai műveletek hatékonyságának javítása érdekében a katonai műveletek 5G-alapú magánhálózatait intenzíven tanulmányozzák [11].

Érdemes megjegyezni, hogy a Wi-Fi új generációja, nevezetesen a Wi-Fi 6 is képes jelentősen javítani a kapacitást és az adatátviteli sebességet a korábbi Wi-Fi generációkhoz képest, és az ipari vertikális ágazatokban a vezeték nélküli összeköttetés egyik jelöltjévé vált [12]. Az I. táblázatban összehasonlítást készítettünk a privát 5G és a Wi-Fi 6 között a spektrum, a lefedettség, a megbízhatóság, a mobilitás, a biztonság, a kültéri alkalmasság, a költségek és az alkalmazási forgatókönyvek tekintetében. Amint az I. táblázatban látható, a Wi-Fi 6 fő előnye az alacsony telepítési költségben rejlik, különösen az ügyféloldalon.

Az engedély nélküli spektrum nem csak a Wi-Fi eszközökön, hanem a mobil eszközökön keresztül is elérhető erőforrás. A 3GPP Rel. 13 és 14 három különböző megközelítést szabványosított a cellás technológia számára az engedély nélküli spektrum kihasználására, nevezetesen az LTE vezeték nélküli helyi hálózat (WLAN) rádiószintű integrációját IPsec-alagúttal (LWIP), az LTE-WLAN aggregációt (LWA) és a Licensed-Assisted Access (LAA) [13].

- Az LWIP és az LWA használata során a nem engedélyezett spektrum kihasználása érdekében a mobilhálózat az ilyen nem engedélyezett csatornákhöz az egymással együttműködő Wi-Fi hozzáférési pontokon (AP) keresztül fér hozzá. Az LWIP esetében a csomagok Wi-Fi és cellás útvonalak közötti megosztása az internetprotokoll (IP) rétegén történik, míg az LWA esetében a csomagadat-konvergencia protokoll (PDCP) rétegén. Az előbbi univerzálisabb, mivel bármilyen Wi-Fi AP-vel működik, míg az utóbbi többek között a szabványosított LWA felhasználói berendezések (UE) visszajelzései és egyéb eszközei révén a csomagok Wi-Fi és cellás útvonalak közötti felosztásával biztosít szigorúbb ellenőrzést.
- Ezzel szemben, amikor az LAA-t használják a nem engedélyezett spektrum kihasználására, a cellatechnológiát, és nem a Wi-Fi-t használják közvetlenül az engedély nélküli csatornákhöz való hozzáféréshez. Fontos megjegyezni, hogy az LAA megköveteli, hogy a vezérlési sík kezeléséhez egy licencelt szolgáltatót párosítsanak a nem licencelt szolgáltatóval. Érdemes megemlíteni továbbá, hogy az LAA a Wi-Fi-hez nagyon hasonló, nem licencelt csatornához való hozzáférési protokollt, azaz a hordozóérzékeléses többszörös hozzáférést (CSMA) alkalmazza, így enyhíti a Wi-Fi és a mobilhálózat együttélési problémáit.

Megjegyzendő, hogy a 3GPP a 15. és az azt követő Rel. 15-ben egy új technológiát fejlesztett ki az engedély nélküli spektrumhoz való hozzáférés lehetővé tételére, más néven új rádió-engedély nélküli (NR-U) technológiát. Ez a technológia, amely a korábbiakra, azaz az LWIP/LWA/LAA-ra, valamint a MuLTFire, a néhány nagy gyártó és üzemeltető által kifejlesztett ipari szabványra épül, jelentős előnyt jelent elődeivel szemben. Önálló technológiáról van szó, amely nem igényel engedélyes szolgáltatót az engedély nélküli sávokban való működéshez. Az NR-U AP-k ráadásul számos új, kifinomult 5G cellás funkciót is ki tudnak használni, amint azt később részletezzük [14].

A lefedettséggel kapcsolatos problémák leküzdése érdekében egyre több lakossági Wi-Fi ügyfél telepít otthonában több antennával rendelkező AP-eket, mivel ezek sugáralakítási képességei nagyobb lefedettséget biztosítanak az egyantennás társaikhoz képest. A vezetékes internetkapcsolathoz csatlakozó, és ezt a kapcsolatot vezeték nélküli backhaul-kapcsolaton keresztül a kiterjesztő AP-kkal megosztó master AP-t használó mesh-megoldások

továbbfejlesztése érdekében a Wi-Fi iparág az elmúlt években a 802.11s mesh WLAN-hálózati szabványon alapuló, kifinomultabb fogyasztói mesh-termékeket vezetett be. Ezek a mesh-alapú megoldások továbbra is a következő alapelvekre épülnek

a Wi-Fi lefedettség növelése a kiterjesztők számára vezeték nélküli háttérrel biztosító master AP használatával, de a végfelhasználói élményt is képesek javítani az olyan funkcióknak köszönhetően, mint a zökkenőmentes barangolás az AP-k között és a hálós hálózat automatizált konfigurálása [15].

Az IEEE 802.11be, a szabványos Wi-Fi 7, amelyre a következő generációs Wi-Fi épül, számos olyan fejlesztést tartalmaz, amelyek segítenek a késleltetés csökkentésében és a megbízhatóság növelésében. Az IEEE 802.11be szabványban meghatározott jobb többsávú képességek, amelyek a 6 GHz-es sávban rendelkezésre álló nagy sáv szélesség kihasználására szolgálnak, jelentősen csökkentik a késleltetést és növelik a megbízhatóságot. A nagyobb spektrum és a jobb kezelés természetesen gyorsabb csatornához jutást, kevesebb interferenciát és nagyobb felhasználói teljesítményt eredményez. A szerencsejáték-vállalatok a késleltetés csökkentése érdekében az IEEE 802.11 szabványban is szorgalmazták a konkrét fejlesztéseket, különös tekintettel a jelátviteli többletköltségek csökkentésére, ~~pl~~ a többszörös bemenetű, többszörös kimenetű (MIMO) eljárásokban, ami a csatornához való hozzáférés és a késleltetés előnyeit eredményezi. Mindezek után az engedélyezett frekvencián futó magán 5G hálózatoknak megkérdőjelezhetetlen előnyük van a megbízhatóság tekintetében a nem engedélyezett sávokon futó Wi-Fi hálózatokkal szemben. A csatornához való hozzáférés ideje nagy terhelésű forgatókönyvek esetén csökken, mivel a bázisállomásoknak (BS) nincs szükségük a "listening-before-talk" eljárásra. Továbbá, mivel egy adott frekvenciasávban működő összes BS ugyanahhoz az üzemeltetőhöz tartozik, a hálózati koordináció hatékonyan megvalósítható a csatornához való hozzáférési idő és az interferencia további csökkentése, valamint a felhasználói átviteli teljesítmény növelése érdekében. Az 5G BS-ek a késleltetés és a megbízhatóság optimalizálása érdekében kihasználhatják a 3GPP Rel. 15/16/17-ben meghatározott, általában kifinomultabb médium-hozzáférés-vezérlési (MAC) réteg, valamint az ultra-megbízható, alacsony késleltetésű kommunikáció (URLLC) jellemzőit. Az ilyen jellemzők közül kiemeljük [16]:

- Alacsony késleltetésű funkciók:
 - Nagyobb segédhordozó-távolság, rövidebb átviteli időtartamokkal.
 - Gyakori fizikai lefelé irányuló vezérlőcsatorna (PDCCH) felügyelet, amely csökkenti az 1. rétegbeli vezérlőinformációk késleltetését.
 - Mini-nyerőgépek kevesebb szimbólummal.
 - Konfigurált megadás, amely lehetővé teszi az UE számára, hogy önállóan továbbítsa a felhordási adatokat anélkül, hogy ütemezési kérelmet kellene küldenie és várnia kellene a felhordási megadásra.
 - Lefelé irányuló elővételi jog.
- Nagyobb megbízhatósági jellemzők:
 - Több slotos ismétlés.
 - Alacsony spektrális hatékonyságú MCS/CQI táblázatok.
 - PDCP duplikáció.

Az NR-U és a Wi-Fi 7 összehasonlításakor ezek az előnyök eltűnnek, mivel az engedély nélküli spektrumot ismeretlen és ellenőrizhetetlen csomópontokkal osztják meg. Az NR-U-nak mégis lehetnek előnyei, mivel - mint már említettük - kihasználhatja a fejlett MAC protokollok és az URLLC funkciók előnyeit. Fontos azonban kiemelni, hogy a magán 5G, Wi-Fi 6 és Wi-Fi 7 hálózatok várhatóan egymás mellett léteznek és kiegészítik egymást. Ebben a felmérésben csak a privát 5G vezeték nélküli hálózatokra összpontosítunk.

A. Magán 5G hálózatok

Az 5G technológiákra épülő privát 5G hálózat egy helyi hálózat, amely egy adott területen belüli dedikált vezeték nélküli összeköttetést biztosít [17]. Ami még fontosabb, hogy a tulajdonos önállóan kezelheti, aki a hálózat minden aspektusát teljes mértékben ellenőrizheti, például a prioritási ütemezést, az erőforrás-elosztást, a biztonságot stb. A vállalati felhasználók meghatározhatják saját biztonsági stratégiáikat, és az érzékeny és védett adatokat helyben tarthatják. Az Ethernetnel ellentétben a privát 5G hálózat megszabadul a költséges és terjedelmes vezetékes berendezésektől, és képes nagyszámú eszköz összekapcsolására egy dinamikus környezetben, ahol az emberek és a tárgyak mozgásban vannak. A privát LTE-hálózatokkal összehasonlítva a privát 5G-hálózatok mind a rádiós tartományban, mind a rendszerarchitektúrában előnyökkel rendelkeznek. A rádiós tartományban a privát 5G hálózatok spektrumrugalmasságot, több Gbps-os csúcsadatsebességet, rendkívül alacsony késleltetést, rendkívül nagy megbízhatóságot és masszív csatlakoztathatóságot biztosítanak. Rendszerszinten a vertikális hálózati szelektálás, a privát peremszámítás és a jobb biztonság elengedhetetlen a valóban elszigetelt privát 5G hálózatok megvalósításához. Azt is meg kell jegyezni, hogy a privát 5G hálózat a nyilvános 5G hálózatok számos előnyét magába foglalja, és ami fontos, jelentős számú kihívást egyszerűsít, például az interferenciakezelést. Összefoglalva, az 5G technológiát újr felhasználva a magán 5G-hálózatokat a következők jellemzik:

- *Gyakorlatilag állandó elérhetőség:* A kommunikációs szolgáltatás rendelkezésre állását úgy határozzuk meg, mint annak az időnek a százalékos értékét, amikor a végponttól végpontig (E2E) tartó kommunikációs szolgáltatást a megállapodás szerinti szolgáltatásminőségnek (QoS) megfelelően nyújtják, osztva azzal az idővel, amíg a rendszer várhatóan egy adott területen a specifikációnak megfelelően nyújtja az E2E szolgáltatást. A magán 5G hálózatokban a kritikus értékektől (pl. 99,999999%) a szerényebb értékekig (pl. 99,9%) terjed, a felhasználási esetektől függően [18].
- *Rendkívül nagy megbízhatóság:* A megbízhatóság a kommunikációs szolgáltatás azon képességére utal, hogy adott időintervallumban, adott körülmények között képes az előírt módon teljesíteni. Különösen az ipari automatizálás esetében a vezeték nélküli IoT- és IIoT-rendszereknek ultra-magas szintű megbízhatóságra van szükségük ahhoz, hogy a szükséges feladatokat bizonyos korlátok között sikeresen végre tudják hajtani, mint a vezetékes rendszerek esetében.
- *Ultraalacsony késleltetés:* Az ultraalacsony késleltetés a hálózat azon képességét jelenti, hogy lehetővé tegye a rendkívül kritikus alkalmazások számára, amelyeknek a csomagátvitel során kevesebb mint egy milliszekundumos E2E késleltetést kell biztosítaniuk. Ez nagy jelentőséggel bír az ipari automatizálás szempontjából, és új utat nyit a biztonságos ember-robot interakció előtt, például az ember és az automata járművek között egy gyárban. Az 5G-ben a késleltetés minimalizálása érdekében az uplink és a downlink átviteli folyamatok minden egyes lépését e késleltetési követelmény figyelembevételével tervezték újra. Ezen a vonalon az 5G New Radio (NR) új numerológiát, kevesebb engedélyezett újraküldést, edge computingot és hatékony ütemezési algoritmusokat alkalmaz.
- *Hatalmas eszközsűrűség nagy átvezetőképességgel:* A privát 5G hálózatok számos vertikális alkalmazása számos heterogén helyhez kötött, ad-hoc és mobil eszköz, például érzékelők, működtetők, programozható logikai vezérlők, mobil robotok, kamerák, valamint a kiterjesztett valósághoz (AR) és a virtuális valósághoz (VR) kapcsolódó eszközök kiszolgálását igényli majd, hogy csak néhányat említsünk. Az üzenetek bizonyos időn belüli sikeres kézbesítésének támogatásához például masszív összeköttetésre van szükség. A nagy

sebességű és nagy pontosságú gépi feladatok elvégzéséhez, a megszakítás nélküli, zökkenőmentes multimédiás szolgáltatásokhoz és a mobil eszközök közötti hatékony együttműködéshez több Gbps csúcsadatsebességet támogató masszív összeköttetésre lesz szükség.

- *Magas biztonság:* A privát 5G hálózatok hálózati elszigetelést, adatvédelmet és eszköz/felhasználó hitelesítést alkalmazhatnak.

a kritikus eszközök védelme érdekében. Ennek előnye, hogy a vállalkozások vagy az üzemeltető szervezetek adatszuverenitást szereznek, és az érzékeny adatokat helyben tartják. A nyilvános hálózatokon keresztüli biztonságos átvitel kritikus fontosságú lesz a katonai és számos ipari alkalmazás esetében.

Az említett natív 5G funkciók mellett, amelyek a nyilvános 5G hálózatokban is megtalálhatók, a magán 5G hálózatok egyedi jellemzői a következők:

- *Testreszabott, kiszámítható QoS*: A teljesítménymutatók (pl. az áteresztőképesség, a késleltetés és a csomagvesztési arány) jobban szabályozhatók a privát 5G-hálózatokban. Emellett a különböző vertikális szolgáltatások rendszerteljesítménye és erőforrás-felhasználása a helyi statisztikák alapján a hálózaton belüli egyedi követelményekhez igazítható. Bár a magán 5G hálózatok viszonylag függetlenek a nyilvános 5G hálózatoktól, egyes felhasználási esetekben szükség lehet a nem nyilvános és nyilvános 5G hálózatokon keresztül történő vállalkozási kommunikációra. Például szolgáltatásfolytonosságra van szükség, amikor egy mentőautó a magán 5G hálózat által kiszolgált gyárból a nyilvános 5G hálózat által kiszolgált külső területre mozog. Ugyanez kell, hogy legyen a helyzet a zökkenőmentes videoszolgáltatások esetében is.
- *Konzisztens gépi tanulási (ML) modellek*: A nyilvános hálózatokkal ellentétben, ahol a felhasználók és a forgatókönyvek nagy statisztikai eltéréseket mutathatnak, a magán 5G hálózatok olyan szereplőket és viselkedéseket fognak mutatni, amelyek statisztikailag konzisztensek. Részletesebben kifejtve, a különböző privát ipari beállítások bizonyos strukturális hasonlósággal fognak rendelkezni, amelyek többfeladatos tanulással kezelhetők. Erre példa lehet a meta-tanulás alkalmazása: a helyi működés optimalizálásához más ipari beállítások adataira támaszkodva, de azt a helyi körülmények egyediségéhez igazítva. Ezt mutatta be a közelmúltban megjelent [19] cikk, ahol a több ipari beállításon keresztül történő meta-tanulás a vezeték nélküli csatorna blokkolásainak előrejelzésére szolgál. Bár az elosztott ML nem kizárólag a magánhálózatok számára releváns, a különböző tulajdonosokkal rendelkező és az adatvédelem megőrzésére törekvő magán 5G-hálózatok halmaza példaértékű eset az adatvédelmet megőrző elosztott tanulási sémák használatára. Ezen túlmenően, a kevésbé változó alkalmazási igény miatt az erőforrások elosztására egy sekély mesterséges intelligencia (AI) használható, amely ML-t vagy megerősítő tanulást (RL) alkalmaz. Ha a hálózati környezetek között nagy a tartományeltolódás, akkor a tartományadaptáció [20] használható.

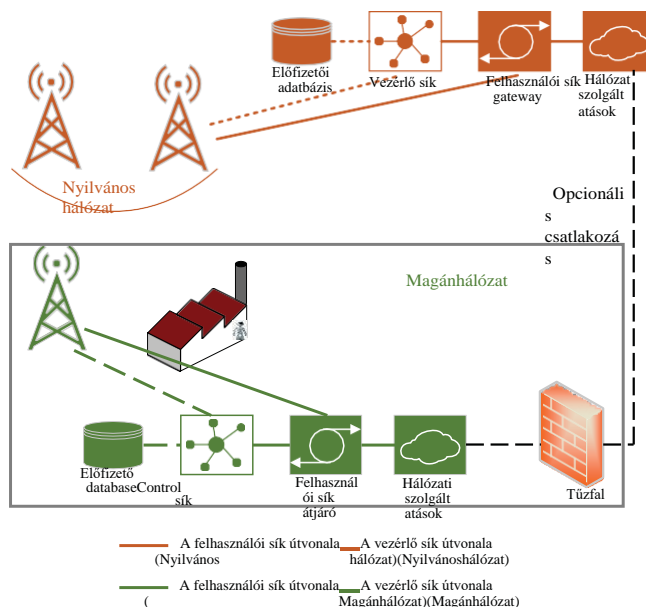
A magán 5G hálózatok forradalmi céljait és az ebből fakadó előnyöket új architektúrák és technológiák teszik lehetővé. A [21]-ben a 3GPP elemzett néhány olyan felhasználási esetet, amelyek a privát 5G hálózatokra támaszkodnak. Az ilyen elemzés alapján a 3GPP két alapvető architektúrát javasolt a magán 5G hálózatokhoz, nevezetesen az önálló és a nyilvános hálózatba integrált paradigmákat. A [18]-ban az 5G Alliance for Connected Industries and Automation további három telepítési lehetőséget határozott meg a nyilvános hálózatba integrált privát 5G-hálózatokra vonatkozóan. Az ilyen új architektúrák mellett a magán 5G-hálózatok kulcsfontosságú fejlesztései és technológiai közé tartozik a spektrumgazdálkodás, az URLLC, az időérzékeny hálózatokkal (TSN) való integráció, a vertikális hálózati szeletelés, az interferenciakezelés, a lokalizáció és a nyomkövetés, valamint a magán szélső számítások. Előnyeik ellenére a privát 5G vezeték nélküli hálózatok számos kihívást is jelentenek. E felmérés célja, hogy első áttekintést nyújtson az ilyen kihívásokról, valamint a magán 5G hálózatok legújabb eredményeiről és előrehaladásáról. Különösen a II. szakasz ismerteti a magán 5G hálózatok alapkoncepcióját és felépítését. A III. szakasz a hálózat megvalósítási kérdéseit mutatja be. A IV. szakaszban a legfontosabb kulcsfontosságú alatechnológiákat elemezzük. Az V. és VI. szakasz a legfontosabb felhasználási eseteket és a valós

demonstrációk. Végül a VII. szakasz az új kihívásokat és a jövőbeli kutatási irányokat tárgyalja. A VIII. szakaszban a következtetéseket vonjuk le.

II. ALAPKONCEPCIÓ ÉS FELÉPÍTÉS

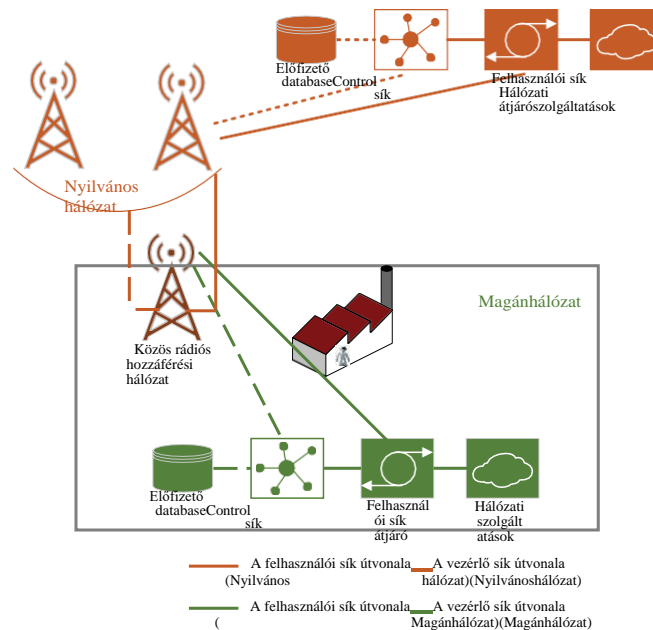
A privát 5G hálózatot általában kizárólag egyetlen szervezet, jellemzően egy ipari vállalkozás számára tervezik. A meghatározott telephelyen (pl. üzem és campus) belül a privát 5G hálózat hálózati szolgáltatásokat kínál az eszközöknek (pl. mobil robotok, önvezető járművek és különböző érzékelők). A magán 5G hálózatok kiépítése során számos tényezőt kell figyelembe venni, többek között a spektrumot, a tulajdonosokat és az üzemeltetőket, valamint a magán- és a nyilvános hálózatüzemeltetők közötti bizalmi szintet. Emellett figyelembe kell venni a megoldási komponensek elérhetőségét és a gazdasági megvalósíthatóságot is. A 3GPP 5G R16 [21] szerint, amely az 5G-t az iparági terjeszkedésbe hajtja, a magán 5G hálózatoknak két alapvető formája van, azaz az önálló telepítés és a nyilvános hálózatba integrált telepítés. amelyek a következőkben áttekintésre kerülnek. Megjegyezzük azt is, hogy az Open Radio Access Network (O-RAN) Alliance nemrégiben bevezette az O-RAN koncepciót, amely nyílt interfészek, nyílt hardver és nyílt forráskód elfogadásával költséghatékony és agilis RAN-t szervezhet. Ez a keretrendszer így maximalizálni tudja a közös-az-önálló hardver és a kereskedői szilícium használatát a magánhálózat telepítési költségeinek minimalizálása érdekében. Ezenkívül biztosítja a szabványosított interfészek használatát egy többgyártói hálózatban [22], és ennek eredményeképpen az O-RAN értékes javaslat lehet kis, testre szabott, egyetlen gyártótól független privát 5G-hálózatok kiépítésére.

A. Önálló telepítés



1. ábra. Telepítés izolált hálózatként. (Adaptálva [18])

Ebben a forgatókönyvben a magán 5G hálózatot elszigetelt és független rendszerként telepítik, nyilvános hálózattól való függés nélkül, amelyet önálló, nem nyilvános hálózatnak is neveznek. Amint az 1. ábrán látható, az összes hálózat



2. ábra. Telepítés megosztott RAN-nal. (Adaptálva [18])

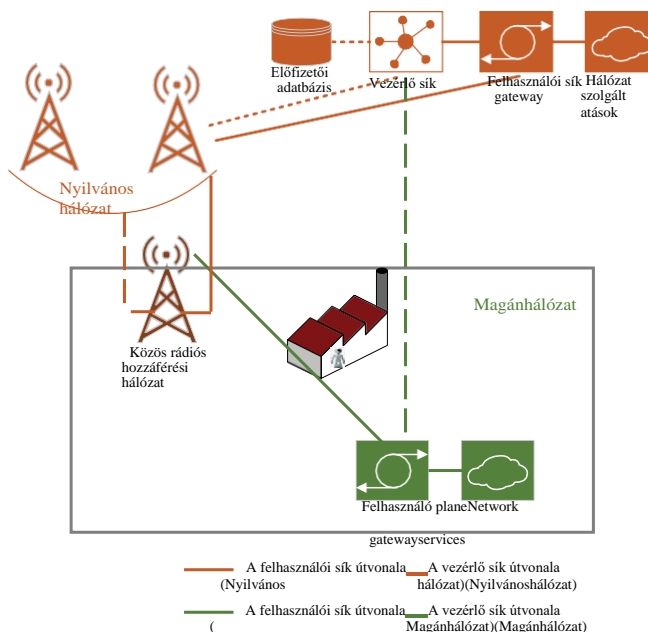
az önálló, nem nyilvános hálózat funkciói a meghatározott régiók logikai peremén belülré korlátozódnak. A szerzők a [23]-ban három olyan ténytet soroltak fel, amelyek nyilvánvalóvá teszik az önálló magán 5G-hálózat és a nyilvános megfelelője közötti függetlenséget. Az első az, hogy a magán 5G hálózat a nyilvános hálózatától teljesen független egyedi azonosítót használ, a második pedig az, hogy a magán 5G hálózatához általában magánspektrumot rendelnek. Az utolsó pedig az, hogy az 5G rendszer teljes kiépítése (beleértve a RAN-t és a törzshálózatot) a magán 5G hálózat logikai határán belül létezik.

Bár egy önálló privát 5G hálózat önállóan is működhet, a magánhálózat eszközeinek néha még mindig szükségük van a nyilvános hálózati szolgáltatások elérésére. Ennek az igénynek a kielégítésére a magán- és a nyilvános hálózatok között opcionálisan tűzfalon keresztül lehet kapcsolatot létesíteni.

B. Közhálózat integrált telepítése

Ebben a forgatókönyvben egy magán 5G hálózatot telepítenek egy nyilvános hálózat támogatásával. A magán- és a nyilvános hálózatok fizikailag nincsenek elszigetelve. Következésképpen az önálló telepítéshez képest ez a telepítés alacsonyabb testreszabhatósággal, önellenőrzéssel és biztonsággal rendelkezik. Az integráció szintjétől függően a nem nyilvános 5G-hálózatok e típusa három további esetre osztható [18].

1) *Megosztott RAN*: Amint a 2. ábrán látható, ebben az esetben a magán és a nyilvános 5G hálózatok megosztják a RAN egy részét, míg a többi hálózati funkció továbbra is elkülönül, és a nem nyilvános 5G hálózatok minden adatáramlása a helyi területre korlátozódik. Az egyszerűség kedvéért a 2. ábrán a meghatározott telephelyen csak egyetlen BS van a megosztott RAN-hez, azonban további, kizárólag a magánhálózati felhasználók számára fenntartott BS-ek is konfigurálhatók. Megjegyzendő, hogy az ilyen telepítéseket a 3GPP specifikációkban [24] már szereplő RAN-megosztási koncepciókkal lehet lehetővé tenni.



3. ábra. Telepítés megosztott RAN és vezérlősíkkal. (Adaptálva [18])

2) *Megosztott RAN és vezérlősík:* A fenti esethez hasonlóan a nem nyilvános 5G hálózat megosztja a RAN egy részét a nyilvános hálózattal. Ezenkívül a hálózatvezérlési feladatokat mindig a nyilvános hálózat végzi. A magánhálózat összes forgalmi áramlása azonban továbbra is a meghatározott területeken belül marad. Ez a megközelítés a 3. ábrán látható, és a vertikális hálózati szeletelés [25] alkalmazásával valósítható meg, amely logikailag független hálózatok létrehozására szolgál ugyanazon fizikai infrastruktúrán keresztül. A nem nyilvános és a nyilvános hálózatok különböző szeletazonosítókkal rendelkeznek. A nem nyilvános hálózatban lévő eszközök ugyanis a nyilvános hálózat előfizetői, amelyek közvetlenül a nyilvános hálózathoz és a kapcsolódó szolgáltatásokhoz tudnak csatlakozni.

3) *Házigazdája a Public Network:* Ebben az esetben a magánhálózatot teljes egészében a nyilvános hálózat üzemelteti. A forgalom mind a nyilvános, mind a magánrészből a meghatározott telephelyen kívülre kerül. Amint a 4. ábrán látható, a nem nyilvános hálózat minden adatáramlását a megosztott RAN-on keresztül a nyilvános hálózatra irányítják. A két rész azonban teljesen különböző hálózatok részeinek tekinthető, hogy biztosítsa a két rész elszigeteltségét és függetlenségét. E forgatókönyv megvalósításához kihasználható a hálózati funkciók virtualizálása (általános) felhőkörnyezetben, például a vertikális hálózati szeletelés.

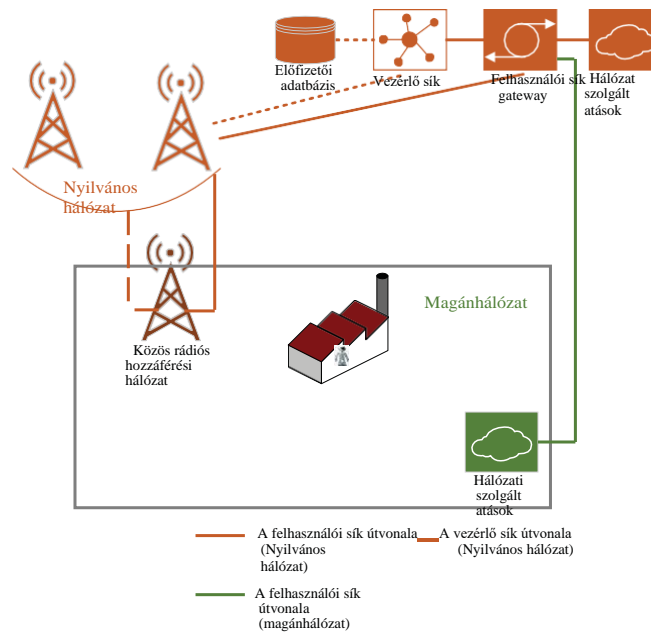
III.

TELEPÍTÉSI ÉS VÉGREHAJTÁSI DÖNTÉSEK ÉS KÉRDÉSEK

Ebben a szakaszban a magán 5G-hálózatok néhány végrehajtási kérdését tárgyaljuk.

A. Spectrum lehetőségek

Nyilvánvaló, hogy a magán 5G hálózatok kiépítése a spektrum rendelkezésre állásától függ. A nem nyilvános hálózatok számára három spektrumlehetőség áll rendelkezésre [26].



4. ábra. Telepítés egy nyilvános hálózatban. (Adaptálva [18])

1) *Engedélyezett spektrum:* A magán 5G-hálózatok számára engedélyezett spektrumot a mobilhálózat-üzemeltetőktől lehet beszerezni, azaz a mobilhálózat-üzemeltető a saját tulajdonában lévő frekvenciasávok egy dedikált részét magánhasználatra különíti el. Ez a klasszikus spektrumengedélyezési modell folytatása, és különböző üzleti modellek alkalmazhatók.

2) *Dedikált privát spektrum:* A dedikált magánfrekvenciát a szabályozó hatóságtól kapják. A kisebb interferencia miatt a dedikált magánspektrummal működő nem nyilvános 5G hálózatok nagy teljesítménybiztonságot nyújtanak. Ezen túlmenően ez a dedikált modell lehetővé teszi a magán 5G-hálózatoknak a nyilvános mobilhálózat-üzemeltetőktől független üzemeltetését. Ezért számos piacon vizsgálják. A német kormány például a 3,7-3,8 GHz-es frekvenciasávban 100 MHz-es sávot foglalt le ipari felhasználásra. A japán kormány a 4,5 GHz-es sávban 200 MHz sáv szélességet, a 28,2 GHz-28,3 GHz-es sávban pedig 900 MHz sáv szélességet osztott ki a vállalatok számára, lehetővé téve számukra, hogy saját 5G infrastruktúrát építsenek ki. Az Egyesült Államokban a Szövetségi Kommunikációs Bizottság (FCC) engedélyezi a 3,5 GHz-es Citizen Broadband Radio Service (CBRS) használatát magánhálózatok számára, egy olyan spektrummegosztási technika alkalmazásával, amely nem zavarja az ilyen sávokat már használó vagy a közeli sávokat használó többi felhasználót. Hasonlóképpen, Kínában a 3,3-3,4 GHz-es sávot beltéri felhasználási célokra lehet használni, míg az engedélyezett 5,925-7,125 GHz-es sávot az iparágaknak szánják [27].

3) *Engedély nélküli spektrum:* Az engedély nélküli spektrum lehetővé teszi a magánhálózatok gyors terjedését, mivel a spektrum ingyenes. Az aszinkron és a szinkronizált megosztott spektrum az 5G számára javasolt két fő spektrummegosztási mód az engedély nélküli spektrumban, például a 2,4 GHz-es, az 5 GHz-es és a nemrég engedélyezett 6 GHz-es sávban [28].

Az aszinkron megosztott spektrumot olyan privát 5G-hálózatokban lehet használni, amelyek nem igényelnek URLLC-t, és a médiumhoz való hozzáférést a listen-before-talk megosztási protokollok szabályozzák. A szinkronizált megosztott spektrum ehelyett megbízhatóbb teljesítményt tesz lehetővé, mint az aszinkron modell,

IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING,
főként az együttes telepítésekben, és használata ajánlott a nem nyilvános hálózatokban, amelyek fokozott URLLC-t¹⁴
igényelnek. Az engedély nélküli spektrumrendszerek azonban aggodalomra adnak okot egyesek számára.

II. TÁBLÁZAT

A MAGÁN 5G HÁLÓZATOK KIÉPÍTÉSI ÉS SPEKTRUMVÁLASZTÁSI LEHETŐSÉGEI†.

	Dedikált privát spektrum	Engedélyezett spektrum	Engedély nélküli spektrum
Stand-alone‡	-magas szintű testreszabhatóság -fizikailag teljesen elszigetelt -magas önkontroll -nagyon magas költségek	-	-
Megosztott RAN	-magas szintű testreszabhatóság -logikailag teljesen elszigetelt -mérsékelt önkontroll -magas költségek	-mérsékelt testreszabás -mérsékelt elszigeteltség -mérsékelt önkontroll -mérsékelt költségek	-
Megosztott RAN és vezérlősík	-	-alacsony testreszabhatóság -alacsony izoláció -alacsony önkontroll -alacsony költségek	-
A nyilvános hálózat által üzemeltetett	-	-alacsony testreszabhatóság -nem fizikai elszigetelés -alacsony önkontroll -nagyon alacsony költségek	-

† A II. táblázat a magánhálózat dedikált magánfrekvenciás spektrumának működési modelljétől függően a következőképpen foglalható össze. Az önálló modell a teljes fizikai elszigeteltségnek köszönhetően nagyfokú testreszabhatóságot tesz lehetővé. Így a pontos önellenőrzés elvileg lehetséges, de nagyon magas költségekkel jár. A megosztott RAN-modell a teljes logikai elszigeteltségnek köszönhetően nagyfokú testreszabást tesz lehetővé. A különálló modellel ellentétben mérsékelt szintű önellenőrzés lehetséges, alacsonyabb költségek mellett. Engedélyezett spektrummal a megosztott RAN a mérsékelt testreszabhatóságnak köszönhetően mérsékelt költségeket eredményezhet a dedikált magánspektrummal összehasonlítva. A megosztott RAN és vezérlő sík modell esetében a licencelt spektrum alacsony testreszabást tesz lehetővé, így alacsony költségek mellett korlátozza az alacsony önellenőrzést. Különösen akkor, ha a licencelt spektrumot a nyilvános hálózat hosztolja, az alacsony testreszabhatóság miatt csak alacsony önellenőrzés lehetséges. Ez azonban az alacsony telepítési költségek előnyeivel jár.

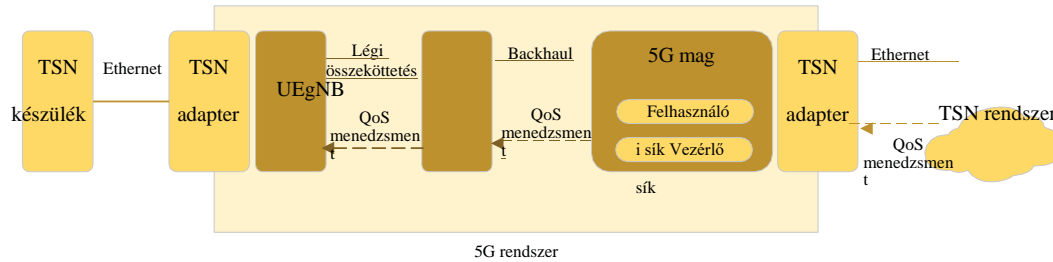
‡ Különleges esetben egy önálló hálózat ugyanolyan testreszabott lehet, mint egy megosztott RAN telepítés. Ez a táblázat azonban azt feltételezi, hogy az önálló hálózat esetében a RAN telepítése nem testreszabott.

iparágak külső zavarás és rosszindulatú zavarás miatt, ami a szolgáltatás megszakadását eredményezheti. Megjegyzendő, hogy a rosszindulatú zavarás az engedélyezett spektrumban is problémás. Gazdasági előnyeit azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni.

Emlékezzünk ezen a ponton arra, hogy mivel négy telepítési megközelítés és három spektrumválasztási lehetőség létezik, a magán 5G-hálózatok elvileg tizenkét különböző formában valósíthatók meg, amint azt a II. táblázat mutatja. Különösen a II. táblázatban az öt legjellemzőbb hálózati formát hasonlítjuk össze a testreszabhatóság, az elszigeteltség, az önellenőrzés és a költségek szempontjából.

B. Integráció a TSN-nel

A TSN kifejezés, amely az IEEE 802.1 munkacsoport egyik munkacsoportjának nevéből származik [29], olyan technológiák és szabványok összességére utal, amelyek célja a "garantált adatátvitel korlátozott késleltetéssel, alacsony késleltetési ingadozással és rendkívül alacsony veszteséggel" [30]. A TSN-t eredetileg az Ethernet szabvány alapján javasolták. Azonban a vezeték



5. ábra. Az 5G és a TSN rendszerek integrációja. (Adaptálva [10])

az összekapcsolhatóság egyre kevésbé felel meg az Ipar 4.0 trendjének a mobilitás és a rugalmasság tekintetében, amint azt a bevezetőben említettük. A [31]-ben a szerzők olyan vezeték nélküli TSN-t vizsgáltak, amely központi vezérlőt alkalmaz az IEEE 1588-alapú időszinkronizálás biztosítására, valamint a 802.1Qbv-alapú időérzékeny ütemezést a késleltetési és megbízhatósági követelmény kezelésére. A fizikai réteget a 802.11ax szabvány határozta meg. A TSN integrálása a privát 5G-vel ígéretes megoldás a determinisztikus kommunikáció biztosítására a valós idejű ipari alkalmazások számára [32], [33].

A TSN-ben a szorosan időszinkronizált csomópontok támogatása érdekében az IEEE 802.11AS [34], az IEEE 1588 [35] egy részhalmaza gyors idő- és frekvencia-szinkronizációs mechanizmusokat biztosít a nagymester csomópont és a végpontok órája között. Megjegyzendő, hogy mivel az 5G új szolgáltatásokat nyújt (pl. nagy pontosságú helymeghatározási szolgáltatásokat) és új technológiákat használ (pl. új architektúrák a backhaul és fronthaul számára, vivőaggregáció, koordinált többpontos (CoMP), interferenciamérés), amelyek nagyon pontos időszinkronizálást igényelnek, ezért a TSN szinkronizálás további előnyeit élvezheti.

Fontos, hogy a 3GPP R16 elkezdte meghatározni az 5G és a TSN rendszerek integrációját [36]. Amint az 5. ábrán látható, az 5G rendszer logikai TSN-hídként integrálódik a TSN-hálózatba. A TSN-fordítók felelősek az 5G rendszer és az eszközzoldal, valamint az 5G rendszer és a hálózati oldal közötti együttműködésért. A fordítók a TSN-konfigurációkat az 5G QoS keretrendszerhez is hozzárendelik. Ily módon az 5G rendszerfunkciók a TSN-egységek tekintetében fekete dobozként működnek, és nem szükséges, hogy a TSN-vezérlők olyan protokollokat támogassanak, amelyek a külső TSN-rendszer részét képezik.

Az 5G-TSN integrációval kapcsolatos munka még korai szakaszban van, és a hatékony megoldásokat erősen ösztönzik. Például azon megfigyelés által motiválva, hogy az 5G rendszerhíd erősen befolyásolja az integrációt, a szerzők a [37]-ben számszerűsítették az 5G rendszerhíd késleltetését egy zárt hurkú vezérlőalkalmazás esetében. Különösen, mivel a magán 5G hálózatok képesek a törzshálózatot helyben telepíteni, a törzshálózatban lévő adatok jelentősen csökkentett késleltetést tapasztalhatnak.

C. Üzemeltetés és irányítás

Egy magán 5G hálózat esetében meg kell határozni, hogy ki üzemelteti és kezeli a hálózat mely részét. Az üzemeltetés és irányítás elsősorban a magánhálózat valós idejű felügyeletét foglalja magában, valamint azt, hogy az üzemeltetési vezetőnek mekkora ellenőrzési és szabadsági jogköre van [18]. Például a kritikus alkalmazások forgalmi QoS-ét a biztonsági irányítás érdekében lehet nyomon követni. Kezelhető a magánhálózat üzemeltetésének irányításának és szabadságának mértéke, például a dedikált, nem nyilvános hálózati funkciók létrehozásának,

Két működési és irányítási modell létezik: az elszigetelt és az integrált [38]. Az elszigetelt üzemeltetési modell esetében a nem nyilvános hálózat üzemeltetése és kezelése független más hálózatokétól. A tulajdonos közvetlenül is üzemeltetheti a hálózatot, vagy kiszervezheti az üzemeltetést egy harmadik félnek. Az integrált üzemeltetési modell esetében a nem nyilvános hálózatot egy külső hálózattal (pl. nyilvános mobilhálózat-üzemeltetővel) együtt üzemeltetik és kezelik. Érdemes megjegyezni, hogy az üzemeltetési és telepítési modellek nagymértékben egymástól függetlenül is megvalósíthatók. Ez azt jelenti, hogy egy önálló, nem nyilvános hálózat is üzemeltethető és kezelhető az elszigetelt modellben.

IV. KULCSFONTOSSÁGÚ ALAPTECHNOLÓGIÁK

Ebben a szakaszban a privát 5G hálózatok néhány kulcsfontosságú alaptechnológiáját tárgyaljuk, beleértve a csatornamérést és -modellezést, az URLLC-t, a hálózati szeletelést, az interferenciakezelést, valamint a lokalizációt és a nyomkövetést.

A. URLLC

A privát 5G hálózatok várhatóan URLLC-t biztosítanak, és akár 10^{-9} csomaghibaarányt is elérhetnek. Meg kell jegyezni, hogy ennek a megbízhatósági számnak csak akkor van értelme, és csak akkor lehet kiszámítani, ha egy olyan statisztikai modellhez kapcsolódik, amely felett az URLLC rendszer működik [39]. Általában a statisztikai modell és a paraméterek kapcsolódó valószínűségi eloszlása ismeretlen, és azt az URLLC rendszernek kell megtanulnia. Különösen a szerzők a

[39] kimutatta, hogy a csatorna bizonytalansága nagyban befolyásolja az URLLC rendszert a nagy megbízhatóság garantálásában. A nagy megbízhatóság garantálásának alapvető statisztikai problémáján kívül az URLLC egy sor különböző lehetővé tevő tényezőre épül: [40]-[42].

1) *Rövid átviteli időintervallum:* Ha kevesebb ortogonális frekvenciaosztásos multiplexelési (OFDM) szimbólumot alkalmazunk átviteli időintervallumonként (TTI), és az OFDM-szimbólumokat szélesebb hordozótávolsággal rövidítjük, csökken a késleltetés. Ebben az irányban és az LTE-vel összehasonlítva, ahol minden TTI - a minimálisan ütemezhető egység - 14 OFDM-szimbólumból áll és 1 ms-ig tart, az 5G NR bevezeti a mini-slot koncepciót, amely 2/4/7 OFDM-szimbólumból állhat, és akár 0,125 ms-os TTI-ket is lehetővé tesz [43]-[45]. Ezenkívül csökken az adott megbízhatóság eléréséhez szükséges késleltetés, mivel rövidebb TTI-vel kevesebb időre van szükség ahhoz, hogy elegendő hibrid automatikus ismétlés-kérés (HARQ) újraküldés legyen a megbízhatósági cél eléréséhez. Megjegyzendő, hogy az egyhordozós átvitel szintén ígéretes megoldás az URLLC számára [46], figyelembe véve, hogy az OFDM csúcs-átlagteljesítmény arány és a sávon kívüli sugárzás ronthatja a rendszer teljesítményt, ami végül negatívan hat az URLLC-re.

2) *Térbeli sokféleség:* A térbeli sokféleséget kihasználó technikákról úgy vélik, hogy egyszerre képesek alacsony késleltetési időt és nagy megbízhatóságot biztosítani [47]. A térbeli diverzitás jellemzően többantennás adás és vétel alkalmazásával valósul meg. Az adódiverzitás esetében több antenna ugyanazt az adatot különböző csatornákon keresztül továbbítja, miközben a vételi diverzitás esetében több antenna ugyanazon jel különböző másolatait fogadja különböző csatornákon. Jelentették, hogy az URLLC eszközöknek legalább 2×2 antennával kell rendelkezniük [42]. Emellett a térbeli diverzitás az elosztott antennák közötti együttműködéssel is elérhető, mint például a CoMP-ben, anélkül, hogy nagy fizikai

antennacsoportok [33]. A rugalmas térbeli szabadságfokok elérése, valamint a hálózat spektrális hatékonyságának és lefedtségének növelése érdekében az elosztott antennarendszerek (DAS) a magánhálózatokban is ígéretesek [48], [49], a beltéri kommunikációs rendszerekben való felhasználás kiterjesztéseként [50], [51]. Amikor minden egyes antenna BS-ként működik, a

A DAS CoMP-rendszerként működik. A CoMP fő előnye, hogy támogatja a több BS-ről egyidejűleg egy vagy több felhasználóhoz történő kommunikációt egy teljes kommunikációs régióban, az ebből adódó jelteljesítmény növelésével és a cellák közötti interferencia csökkentésével.

3) *Grant-mentes és nem-ortogonális többszörös hozzáférés (NOMA)*: A késedelem két fő forrása a támogatás megszerzése és a véletlen hozzáférés. A támogatásalapú rádió-hozzáférés esetén, amikor egy felhasználónak adatot kell továbbítania, ütemezési kérelmet (SR) kell küldenie egy SR-érvényes fizikai felhordó vezérlőcsatornán keresztül, ami némi időt vesz igénybe. Az ütemezési és engedélyezési folyamatok követelménye nélkül a támogatás nélküli technikák a késleltetés szempontjából jobbnak bizonyultak a támogatásalapú átvitelnél [52]. Másrészt az ortogonális többszörös hozzáférés (OMA) technikák esetében a versengésen alapuló véletlen hozzáférés súlyos ütközésekhez és nagy késleltetésekhez vezethet, különösen a nagyszámú felhasználó esetében. A NOMA képes lehet csökkenteni a késleltetést teljesítmény- vagy kódterület-multiplaxelással, és bizonyos forgatókönyvek esetében több felhasználót támogathat, mint a hagyományos OMA, támogatásmentes módon [53].

4) *BS Sűrítés*: A BS sűrítése többféleképpen járul hozzá az URLLC-hez. Először is, a BS-felhasználó társítási távolság csökken a BS-sűrűség növekedésével. A rövidebb társítási távolság kisebb terjedési veszteséget és nagyobb kívánt jelteljesítményt jelent, ami növeli a jel-zaj arányt vagy a jel-zavar plusz zaj arányt, ha a cellák közötti interferenciát megfelelően kezelik. A hálózat sűrűsödése lehetővé teszi az erőforrások újrafelhasználását is, így növelve az egy felhasználóra jutó erőforrások elosztását. Ez az erőforrás-növekedés közvetlenül felhasználható a késleltetés csökkentésére, vagy alternatívaként a megbízhatóság növelésére, ha az interferenciát elviselhető szinten tartják. Végül, a sűrű hálózati elrendezésekben a BS-ek valószínűleg kevés vagy egyáltalán nem is társított felhasználóval rendelkeznek a lefedettségükön belül. Az ilyen felhasználó nélküli BS-ek kihasználhatók arra, hogy a szomszédos BS-ekkel együttműködve további társításokat biztosítsanak az URLLC felhasználók számára.

5) *Eszköz-eszköz (D2D) kommunikáció*: A D2D-kommunikáció lehetővé teszi, hogy a fizikailag közel lévő eszközök közvetlenül kommunikáljanak egymással egy úgynevezett oldalirányú kapcsolaton keresztül, ahelyett, hogy a fel- és lefelé irányuló kapcsolat topológiáját követnék [54]. A D2D-kommunikáció a hagyományos uplink-downlink kommunikációval összehasonlítva rövidebb összeköttetési távolságokat és kevesebb ugrást jelent. Ezért a D2D-kommunikációban nagy lehetőségek rejlenek az alacsony késleltetés és a nagy megbízhatóság biztosítására, különösen az NR V2X-tartomány új fejlesztései révén.

B. Hálózati szeletelés

A II. szakaszban tárgyaltak szerint a hálózati szeletelés kulcsfontosságú alatechnológia a nyilvános hálózatba integrált magán 5G hálózatok kiépítéséhez. A hálózatszeletelés a "hálózaton belüli hálózat" biztosításának eszközére utal, amely a fizikai hálózatot több logikai hálózatra, azaz hálózati szeletekre osztja, amelyek mindegyike úgy van specializálva, hogy egy adott felhasználási esethez meghatározott hálózati képességeket és jellemzőket biztosítson [55], [56]. A hálózati funkciók virtualizálása és a szoftveresen definiált hálózatépítés a hálózati szeletelés két alapvető alatechnológiája. A hálózati szeletelési architektúrák három rétegből állnak, nevezetesen az infrastruktúra rétegből, a hálózati szeletpéldány rétegből és a szolgáltatáspéldány rétegből. A hálózati szelet életciklusa négy fázisból áll: előkészítés, üzembe helyezés, üzemeltetés és leszerelés. Az 5G hálózati szeleteléssel kapcsolatos legújabb felmérésekért lásd [57]-[59].

A megosztott hálózati infrastruktúrát testre szabó hálózati szeletelés [60] alkalmazható az intelligens közlekedés, az intelligens otthonok, az intelligens hálózat, az ipar 4.0 stb. területén. A szerzők például a [61]-ben azt javasolták,

hogy a levegő-föld integrált járműhálózatot virtuálisan háromféle szeletre osszák fel, azaz nagyfelbontású térkép a navigációs szeletekhez, fájla

közös érdekű szeletek és igény szerinti átviteli szeletek, hogy kezelni lehessen a forgalom és az erőforrások heterogenitása által okozott nagyfokú kezelési komplexitást.

Meg kell jegyezni, hogy a hálózati szeleteléssel kapcsolatos legtöbb tanulmány a hagyományos nyilvános hálózatokra összpontosított, míg a magán 5G-hálózatban történő szeletelésre kevés hangsúlyt fektettek. A [62]-ben a szerzők egy tartományokon átívelő hálózati szeletelési megoldást mutattak be szigorú és rugalmas QoS-követelményekkel rendelkező ipari alkalmazásokhoz. A szerzők a [63]-ban egy olyan hálózati szeletelés-kezelési technikát mutattak be, amely a hálózati szeletelés megvalósítására, összehangolására és kezelésére használható egy privát 5G hálózat különböző telepítéseiben. A hálózat fizikai elszigeteltségének és a különböző tartományok közötti interferencia elkerülésének garantálása érdekében a hálózati erőforrásokat időosztásos többszörös hozzáférés (TDMA) módszerrel osztják ki a [60]. A [56]-ban a szerzők az átjárószintű RAN-szeletelést javasolták. A privát 5G hálózatok ugyanis várhatóan több vertikális ágazatot szolgálnak ki, eltérő szolgáltatási igényekkel. Így a vertikális hálózati szeletelés alkalmazása a privát 5G hálózatokban jelentős jelentőséggel bír majd [56]. A hálózati szeleteléssel a forgalom E2E módon szegregálható. A hálózati szeletelés a számítási, tárolási és hálózati erőforrások elkülönítésére is képes. Így a nem nyilvános 5G hálózat fizikai infrastruktúrája garantáltan hatékonyan osztható meg a különböző alkalmazások között.

Gyakorlati példaként meg kell jegyezni, hogy a hierarchikus RAN intelligencia vezérlő (RIC), amelyet az O-RAN, egy felhő-natív szoftver vezetett be, mesterséges intelligencia képességeket tartalmaz a rádióerőforrás-kezelési műveletek [64], például a rádiókapcsolat-kezelés, a mobilitás-kezelés és a belépés-szabályozás adaptálására, így a magánhálózat tulajdonosa könnyen felszeletelheti a hálózatot igényei szerint.

C. *Private Edge Computing*

Az Edge Computing szintén hatékony alaptechnológia a privát 5G hálózatok számára. A hagyományos felhőalapú számítástechnikával összehasonlítva az edge computing egy decentralizált számítási paradigma, amelyben a hálózat széle képes számításgényes feladatok elvégzésére és adatok tömegének tárolására [65]. A felhasználói berendezések és az edge-kiszolgálók közelsége miatt az edge computing fokozhatja a helyismeretet, javíthatja a magánélet biztonságát, tehermentesítheti a felhő tárolását, csökkentheti az energiafogyasztást és lerövidítheti a válaszidőt [66]. Meg kell jegyezni, hogy az edge computing és a cloud computing együttműködhet egymással. Konkrétan, a nagy számítási és tárolási képességek alapján a felhőalapú számítástechnika nem valós idejű nagy adatokat dolgoz fel, míg az edge computing valós idejű feladatokat hajt végre és valós idejű döntéseket hoz. Így a több végberendezés által generált adatok valós idejű elemzése is lehetséges [67].

Általánosságban az edge computing referenciaarchitektúrája három rétegre osztható, nevezetesen eszközrétegre, edge rétegre és felhőalkalmazási rétegre [68]. Az eszközréteg különböző gépeket, érzékelőket és műszereket tartalmaz, amelyek a generált adatokat továbbítják a peremrétegnek, és utasításokat kapnak a peremrétegtől. A peremréteg feldolgozza az eszközrétegtől származó adatokat, és továbbíthatja az adatokat a felhőalkalmazási rétegnek további feldolgozásra. Fontos, hogy a peremréteg időérzékeny szolgáltatásokat nyújt. A felhőalkalmazási réteg tömeges adatokat kap és dolgoz fel a peremrétegtől, majd nem valós idejű döntéseket hoz.

A privát edge computing tovább növeli a edge computing előnyeit azáltal, hogy biztonságos és privát szolgáltatásokat nyújt a helyi igények és hálózati beállítások számára. Ez azt jelenti, hogy agilis tartalomelosztást és RAN-tudatosságot biztosít.

tartalomoptimalizálás, amely a helyi statisztikákra támaszkodik. A helyi statisztikákra támaszkodva könnyen létrehozható a tárgyak virtuális környezete (VEoT) [69], amely egyesíti az IoT-t és az AR-t. Lehetővé teszi továbbá a feltörekvő mesterséges intelligencia integrálását az interaktív felügyelet, az ellenőrzés, a dinamikus vezeték nélküli környezethez való hatékony alkalmazkodás és a rendelkezésre álló erőforrások optimalizálása érdekében. Továbbá, a kollaboratív és elosztott AI kombinálása a privát széleken keresztül, a privát szélek nagyszabású adaptációja ígéretes a nagyméretű privát hálózatokban, amelyek lefedik a tartományok közötti összeköttetést [70]. Így a privát perem megkönnyíti az elosztott AI-t és a felhőfeldolgozást az 5G privát hálózatokban az alkalmazásprogramozási interfészekon (API-kon) keresztül. A hagyományos központosított felhőalapú számítástechnikával ellentétben a privát peremet elosztott módon telepítik, így csökkentheti annak lehetőségét, hogy egyetlen támadás tönkretegy az egész hálózatot. Így a privát perem kulcsszerepet játszik a helyi terület és az érzékeny információk digitális támadásoktól való védelmében [71].

D. Interferencia kezelés

Ipari környezetben a vezérlők és a működtetők közötti többszörös jelátvitel zavarja egymást, ami negatívan befolyásolja a megbízhatóságot és a késleltetést. Ezért az interferenciakezelés nagyon fontos a magán 5G hálózatok számára. Ebben az alfejezetben négy interferenciakezelési technikát tárgyalunk az IIoT-ben.

1) *Többszörös hozzáférés:* A többszörös hozzáférés az egyik fontos interferenciakezelési technika, amely megakadályozza, hogy bizonyos rádióerőforrásokat több csomópont/felhasználó újra felhasználjon. A többszörös hozzáféréshez determinisztikus és véletlenszerű megközelítéseket is találhatunk. Az idő-, frekvencia-, kód- és térbeli többszörös hozzáférés négy tipikus determinisztikus többszörös hozzáférési technika, amelyekben a különböző felhasználóknak különböző idő-, frekvencia-, kód- és térbeli erőforrásokat osztanak ki versengésmentes módon. Ezzel szemben a véletlenszerű alapú többszörös hozzáférési rendszerek olyan versengésen alapuló csatornáhozáférési rendszerek, amelyekben a csomópontoknak egymással versengeniük kell a vezeték nélküli csatornáért, hogy adatokat küldhessenek. Az ALOHA és a CSMA két népszerű véletlenszerű többszörös hozzáférési séma. Az újraküldések miatti sorbanállási késedelem elkerülésére és a csomagok érkezési késedelmének csökkentésére a [72] a nem-ortogonális HARQ-t javasolta.

2) *Szórt spektrum:* A szórt spektrum, amely jellemzően a közvetlen szekvencia (DSSS) és a frekvenciaugrásos szórt spektrum (FHSS), használható az interferencia leküzdésére. A DSSS az átvitt jelet szélesebb sávzélességűvé teszi, mint az információs sávzélesség. A vevőkészülékben történő szórás csökkentés után az információs sávzélesség helyreáll, miközben az interferencia jelentősen csökken. A DSSS az alacsony-közepes keskeny sávú interferencia leküzdésére az előnyben részesített megoldás. Ezzel szemben az FHSS frekvenciaugrással csökkenti a más átvittel való ütközés valószínűségét, és a súlyos interferencia környezetekben előnyben részesül. A szórt spektrumhoz hasonlóan az UWB-kommunikáció széles sávzélességen keresztül közvetíti az információt anélkül, hogy interferálna az ugyanabban a frekvenciasávban zajló hagyományos keskeny sávú átvittel.

3) *Átviteli teljesítményszabályozás:* Az adóteljesítmény-szabályozás az adóteljesítmény dinamikus beállítását jelenti az energiafogyasztás csökkentése, a társ csatornai interferencia kezelése és a spektrális hatékonyság növelése érdekében, miközben biztosítja a sikeres kommunikációt és az adott QoS fenntartását. Az adóteljesítmény-szabályozást a széles sávú kódosztásos többszörös hozzáférésben fogadták el, és az ipari vezeték nélküli szabványok is tartalmazzák [73]. A [74]-ben egy adaptív többcsatornás átviteli teljesítményszabályozási algoritmust javasoltak ipari vezeték nélküli hálózatokhoz. A [75]-ben a szerzők hatékony adaptív teljesítményszabályozást javasoltak az

elsődleges és másodlagos hálózatok közötti kölcsönös interferencia elkerülésére a kognitív rádióalapú IIoT-ben.

4) *RF-vezérelt intelligens fényvisszaverő felület*: Az intelligens fényvisszaverő felület (IRS) [76], [77] nagyszámú kis méretű, olcsó és passzív elemből áll. Az IRS-ek a következő előnyökkel rendelkeznek: Az IRS-ek nem erősítik fel a jeleket, és nem vezetnek be zajt, amikor visszaverik azokat; az IRS-ek intelligens módon felszerelhetők meglévő infrastruktúrára, például falakra és intelligens épületekre; az IRS-ek átkonfigurálhatók, hogy alkalmazkodjanak a környezet változásaihoz; és az IRS-ek közel látótávolságú (LoS) kommunikációs kapcsolatot biztosítanak. Az IRS [76] elsődleges funkciói az átirányítás (fénytörés és visszaverődés), amely teljesen egyéni irányba irányít, ami általánosítja a meglévő Snell-törvényt; a sugárfelosztás, amely a hullámot több irányba irányítja párhuzamosan; a hullámelnyelés, amely minimalizálja a visszavert és megtörött teljesítményt a becsapódó hullám esetében; és a hullámfront-fókuszálás, amely az IRS-t lencseként működteti, hogy az elektromágneses hullámot egy adott pontra fókuszálja. A fényvisszaverő elemek fázistolódásának vezérlésével a visszaverődő jelek fázisa dinamikusan szabályozható, hogy lefedje a mobil adót, a vevőt és a céltárgyat. Ezenkívül a fenti négy funkció hatékony kombinálásával az interferencia csökkenthető a kívánt helyen.

E. Lokalizáció és nyomkövetés

A magán 5G hálózatok számos olyan alkalmazása, amely a digitális és a fizikai világ közötti interakciót valós idejű helyzetfelismeréssel jár, például az automatizált irányított járművek (AGV-k), az ipari autonóm mobil robotok, az egészségügy, a nagymértékben magával ragadó VR és AR, az eszközkövetés és az ember-gép interfészek (HMI) nagymértékben támaszkodnak a pontos és időszerű helyinformációkra [77]. Megjegyzendő, hogy mivel a helybecslés statisztikai jelfeldolgozáson alapuló méréseken alapul, a magánhálózat által biztosított helyi statisztikák alapvető szerepet játszanak a tárgyak lokalizációjában és követésében.

A hagyományos globális navigációs műholdrendszerek (GNSS) alig nyújtanak pontos helymeghatározást, különösen beltéri ipari környezetben [78]. Ezért az RF-alapú lokalizáció a privát 5G-hálózatok kulcsfontosságú tulajdonsága. Ezenkívül az 5G NR számos olyan jellemzővel rendelkezik, mint például a több antenna és a széles sáv szélesség használata, amelyek lehetővé teszik a pontos helymeghatározást. Az alapvető RF-alapú helymeghatározási technikák a következőkbe sorolhatók:

1) *Trilateráció*: A mobil eszköz térbeli helyének meghatározása a terminál és több, térben elkülönített, ismert BS közötti többszörös távolságmérés segítségével történik. A mérések lehetnek érkezési idő (ToA), érkezési időkülönbség (TDoA) és vett jelerősség. A [79] szerzői a ToA alapú lokalizációt vizsgálták 5G ultrasűrű hálózatokban, véletlenszerűen elosztott csomópontokkal, és három helybecslőt javasoltak a távolságmérések és a csomópontok eloszlásának felhasználásával. A [80]-ban a szerzők számos ipari vonatkozású telepítési szempontot tárgyaltak, amelyek befolyásolják a ToA alapú megközelítések helymeghatározási pontosságát, és ismertették a negatív hatásuk csökkentésére szolgáló technikákat.

2) *Háromszögelés*: Ebben a módszerben az érkezési szög (AoA) vagy az érkezési irány (DoA) alapján becsüljük meg a pozíciót, az ismert BS-ekből háromszögeket alkotva a ponthoz. A [81]-ben először az eszköz és több átvitel-vételi pont (TRP) közötti látóirányú útvonal azimutális AoA értékét becsülik és követik. A több TRP-nél végzett AoA-bebecsléseket ezután egy peremfelhőbe töltik be, hogy időszerű pozícióinformációt kapjanak, például egy kiterjesztett Kálmán-szűrő alapú megközelítéssel.

3) *Jelenetelemzés*: Előzetesen egy ujjenyomat-adatbázist állítanak össze, amelyek mindegyike egy adott helyszínhez kapcsolódik. A helymeghatározás az élő adatok és az előzetes ujjenyomatok összevetésével valósul meg. A [82]-ben a szerzők kidolgoztak

egy pilóta nélküli légi jármű (UAV) és egy földi robot közötti kooperatív lokalizáció megoldása. Az UAV először egy sűrű háromdimenziós környezet kiszámításával éri el az önlokalizációt. A sűrű térképet leegyszerűsíti 2,5 dimenziós térképpé, amelyet továbbít a földi robotnak együttműködés céljából. A 2,5 dimenziós térkép alapján a földi robot a panorámakép és a 2,5 dimenziós térkép összehangolásán keresztül becsüli meg a pózát.

4) *Hibrid*: Az előző lokalizációs technikák kombinálhatók az általános teljesítmény növelése érdekében. A Például a [83] című tanulmányban egy Bayes-féle augmentációs technikát javasoltak az IIoT-alkalmazások UWB-lokalizációjához, amely TDoA- és AoA-mérésekkel is működhet.

Az említett technikákon kívül a Wi-Fi alapú beltéri lokalizáció a fizikai rétegből származó csatornaállapot-információt (CSI) [84] vagy a MAC-rétegből származó RSSI (received signal strength indicator) méréseket [85] használhatja. Így a fejlettebb Wi-Fi szabványokkal finomabb szemcseméretű CSI mérések és RSSI mérések lesznek elérhetőek, ami végül javítani fogja a magánhálózat lokalizációs és követési képességét. A magánhálózat különösen profitálni fog az RF-vezérelt IRS-ből, mivel az egy további LoS-útvonalat biztosíthat.

[77] a többutas útvonalakban gazdag helyi területeken, például gyárakban mozgó objektumokra.

F. A fehér dobozos hardver szoftverezése és szabványosítása

Az O-RAN Alliance [22] 9 technikai munkacsoportot hozott létre, amelyek a nyílt és intelligens RAN-ok új szabványain dolgoznak. Különösen a 7. munkacsoport, amely jelenleg fehér doboz munkacsoportként is működik, felelős a nagy teljesítményű, spektrális és energiahatékony fehér doboz BS teljes hardver-referenciatervezéséért. A munkacsoport eddig számos specifikációt tett közzé, többek között az O-RAN telepítési forgatókönyveket és a fehérdobozos hardver bázisállomás-osztályokat. Az O-RAN Alliance létrehozta továbbá az O-RAN Software Community-t, amely az O-RAN által támogatott és finanszírozott Linux Foundation projekt, és amelynek feladata az O-RAN specifikációk nyílt forráskódú implementációjának irányítása. Ez a projekt konkrétan olyan megoldások létrehozását célozza, amelyek felhasználhatók az O-RAN fejlesztésének és bevezetésének egységesítésére és felgyorsítására. Ily módon könnyen megvalósíthatók a gyártómentes, magánhálózat-tulajdonos-központú és rugalmas erőforrás-kezelési megoldások, amelyek az E2E 5G előnyeiket biztosítják a helyi területen.

V. HASZNÁLATI ESETEK

A privát 5G hálózatok biztonságos, gyors és könnyen kezelhető hálózatok, amelyek megbízható hang- vagy adatszolgáltatásokat nyújthatnak épületeken belül vagy távoli területeken. Ezek a hálózatok számos felhasználási esetet támogathatnak különböző ágazatokban.

A. Gyártás

A gyártási vertikumban a legszélesebb a felhasználási esetek köre [86]. Ebben az alfejezetben néhány példát tárgyalunk a gyártás felhasználási eseteire, amelyeket a privát 5G hálózatok tesznek lehetővé.

1) *Gyártási vonal rugalmassága*: A gyártósorok rugalmassága nagymértékben javítható a privát 5G hálózatokkal. A gyártósorok különböző vezérlőrendszereket és terepi eszközöket (érzékelők, működtetők, robotika stb.) tartalmaznak, amelyek között szigorú összeköttetésre van szükség. Bár használhatók vezetékes hálózatok, például Ethernet, ezek telepítése és átkonfigurálása nagyon nehéz és költséges. Bizonyos esetekben a vezetékes hálózatépítés még kivitelezhetetlen is. A privát 5G hálózatok új lehetőségeket kínálnak a gyártósorok számára. Az 5G privát hálózatok használatával a gyártósorok gyorsan átkonfigurálhatók az új termékek szállítása érdekében.

2) *Gépek közötti kommunikáció:* A privát 5G hálózatok lehetővé teszik a hatékony és megbízható gép-gép kommunikációt. A nagy megbízhatóságnak és az ultraalacsony késleltetésnek köszönhetően a gyártóüzemben szétszórtan elhelyezkedő, összekapcsolt gépek és érzékelők együttműködve végezhetnek termelési feladatokat, és bonyolult folyamatokat futtathatnak a közös cél elérése érdekében.

3) *AGV-k:* AGV-k létfontosságú szerepet játszanak a gyártósorokon, a raktárakban és a feladási területeken. A privát 5G által kínált rendkívül nagy és megbízható sávszélességgel a nagy teljesítményű kép- és videoprocesszorokkal párosított valós idejű érzékelők felszerelhetők az AGV-kre, és támogathatók általuk. Így az AGV-k funkcionalitása, hatékonysága és rendelkezésre állása jelentősen javítható.

4) *Összekapcsolt munkavállalók:* A gépezemeltetésért, a minőségellenőrzésért és a létesítmény karbantartásáért felelős dolgozók nagy sávszélességgel csatlakoztathatók az egész gyártási campuson. Az ilyen összekapcsolhatóság által támogatott új alkalmazások közé tartozik a papírmentes műhely, a személyes biztonság felügyelete és a dolgozók helyének nyomon követése. Az AR/VR fejlett felhasználási esetek a gyártásban, amelyek célja a munkák gyorsabb, pontosabb és biztonságosabb befejezése. Az AR/VR segítségével ráadásul sok új dolgozót lehet egyszerre és biztonságosan betanítani a valós világ helyett virtuális formában, így csökkentve a képzési költségeket. A VR-ben és az AR-ben azonban manapság gyakran vezetékcsatlakozásokat használnak, ami egyes gyártási helyszíneken potenciálisan veszélyes lehet. A privát 5G új lehetőségeket kínál az AR és a VR élményének javítására [87]. Az 5G modemekre támaszkodva az AR/VR-eszközök képesek néhány eszközön belüli feldolgozást hosztolni, és a nehezebb számítási feladatokat a helyhez kötött hálózatban található peremszámítógépekre elosztani. Ez lehetővé teszi a kifinomultabb és fotorealisztikusabb grafikát, amelyet egyes gyártóüzemek igényelnek.

5) *Végponttól végpontig tartó logisztika:* Az 5G lehetővé teszi az intelligens logisztikát. A késztermékek, alkatrészecskék, szerelvények és készletek a gyártóüzemekben, a bemeneti/kimeneti ellátási láncokban és a raktárakban alacsony költségű nyomkövető eszközökkel felszerelhetők. Az IoT és az IIoT technológiák használatával a raktározás, az elosztás és a körforgás feldolgozása során a hely, az állapot és a környezet kiaknázható az intelligens döntéstámogató rendszerek számára a logisztikai szolgáltatási szint javítása, valamint a logisztikai költségek és az erőforrás-felhasználás csökkentése érdekében. Ezenkívül a nyilvános és nem nyilvános 5G hálózatok közötti zökkenőmentes együttműködés elérhetősége hozzájárul a nemzeti, sőt a nemzetközi logisztikához.

6) *Több ügyfelet kiszolgáló létesítmények:* A hálózati szelektálásnak köszönhetően a privát 5G lehetővé teszi a több ügyfelet kiszolgáló létesítményeket, amelyek az ügyfeleknek "privát" alhálózatokat biztosítanak, amelyeket egy közös 5G infrastruktúrából szállítanak. A termelési és raktározási létesítmények számára előnyös ez a felhasználási eset.

B. Bányák

A bányák jellemzően távoli területeken találhatóak, és a bányászok gyakran a föld alatt dolgoznak, ahol a nyilvános mobilhálózatok nem mindig állnak rendelkezésre. Megbízható kommunikációra van azonban szükség a föld alatt és a földön egyaránt. A világ különböző bányáiban már telepítettek magán LTE-t [88], [89]. A bányászati műveletek nagyobb biztonsággal és automatizálással történő elvégzése érdekében szükség van a magán 5G technológiák alkalmazására a bányákban. Másrészt a földalatti bányákban uralkodó munkakörülmények jelentős biztonsági kockázatot jelentenek a bányászok számára. A privát 5G hálózatok lehetővé teszik a hatékony kommunikációt a felszíni és a földalatti bányák között. Ezen túlmenően a nem nyilvános 5G-re épülő vezeték nélküli érzékelőhálózatok a bányákban a munkakörnyezet megfigyelésére, a bányakatasztrófa-jelzések érzékelésére

figyelmeztetés. Ha bányabaleset történik, a bányavállalatok a vezeték nélküli érzékelőhálózatokon keresztül gyorsan és pontosan meg tudják határozni a föld alatti bányászok helyzetét, megkönnyítve ezzel a mentést.

C. Kikötők

A jövőbeli kikötők a berendezések leállása, a be- és kirakodáshoz szükséges zsúfolt kikötői udvarok, a munkavállalók biztonsága és a környezeti hatások tekintetében kihívásokkal néznek szembe. A magán 5G-képes intelligens kikötők várhatóan ígéretes megoldások lesznek [90]. A következőkben négy olyan felhasználási esetet mutatunk be, amelyek az intelligens kikötői technológiák legelőnyösebb alkalmazásai.

1) *Távvezérelt és automatizált daruk:* A hajóról partra történő be- és kirakodásra a hajó és a dokk között, míg a konténereket a terminálok a portáldaruk rakják egymásra. A magán 5G lehetővé teszi a távvezérlést és automatizálást nagy pontossággal és jó manőverezhetőséggel ezeknek a daruknak.

2) *AGV-k:* Az AGV-k intelligens 3D érzékelők segítségével rendszeresen járőröznek a kikötőben, hogy az összes kikötői anyagot kezeljék, csökkentsék az energiafelhasználást.

költségek, és csökkenti a balesetek kockázatát.

3) *Állapotfigyelés:* Az állapotfigyelő rendszerek úgy állíthatók be, hogy a hibákat még azok bekövetkezése előtt észleljék, csökkentsék a nem tervezett állásidőt, és maximalizálják az eszközök termelékenységét. Emellett a gyártási láncban lévő IIoT-eszközök élettartamának előrejelzésével javíthatja a termelékenységet azáltal, hogy csökkenti a hibás eszközök cseréjének idejét.

4) *UAV-k:* Az 5G által támogatott magán UAV-k többféleképpen is előnyösek a kikötő számára. Az UAV-k például dokumentumok szállítására [91], [92] használhatók a hajó és a part között, a kikötő biztonságának felügyeletére, valamint a hálózati lefedettség bővítésére [93], ahol az UAV-k átjátszó csomópontként működhetnek, hogy továbbítsák az információkat a nem működő területekre. Továbbá az UAV-k mint mobil szélső számítási eszközök (MEC) fontos szerepet játszhatnak a MEC-szolgáltatásokban [94], [95]. Mivel az UAV-hálózatok más meglévő magánhálózatokkal együtt tudnak működni, nagyon robusztusnak és stabilnak kell lennie a kis- és nagyszabású műveletekhez.

D. Repülőterek

A repülőtereken a magán 5G segíthet a járványveszélyek ellenőrzésében, a földi műveletek optimalizálásában és az utasok élményének javításában. Az 5G hálózatok segítségével megkönnyíthető a láz automatikus felismerése, az arcfelismerés és az utasok utazási adataihoz való hozzáférés a kritikus esetek felderítése érdekében. Az 5G hálózatok által felhatalmazott megelőző intézkedések közé tartozik a társadalmi távolság nyomon követése és az AGV-k alkalmazása a teljes fertőtlenítéshez. Mivel az 5G képes kezelni a földi műveletek folyamatainak szűk keresztmetszeteit, a pontosság és a működési kiválóság szempontjából is kritikus fontosságú digitális eszköz. Emellett az 5G a digitalizáció és az innováció új hullámát indítja el a repülőtereken, amelyek javítják az ügyfélélményt. Például az 5G és az AI-alapú beszállási technológiák felgyorsítják az utasfelvételt, a folyamatos biztonsági ellenőrzést, a poggyászkidást, a személyazonossági ellenőrzést stb. és ezzel lerövidítik az utasok várakozási idejét. Emellett a folyamatos biztonsági ellenőrzések alkalmazásával javítható az utasok biztonsága. Az 5G igénybevételel a mesterséges intelligenciával támogatott számítógépes látás azonnal azonosítani és tájékoztatni tudja az elveszett poggyász tulajdonosát, az utasokat gyorsan a megfelelő beszállókapuhoz irányíthatja, és a beszállás előtt felismerheti a kézipoggyászok kapacitásproblémáit.

A közműszolgáltatóknak biztonságos, rugalmas, megbízható és szélessávú vezeték nélküli kapcsolatra van szükségük ahhoz, hogy új alkalmazásokat telepíthessenek a hálózat biztonságának és megbízhatóságának javítására, az üzemeltetési költségek csökkentésére és az ügyfelek jobb bevonására. Smart

a fogyasztómérők, légkondicionálók, melegvízmelegítők stb. úgy csatlakoztathatók, hogy az ügyfelek valós idejű információkkal rendelkezzenek az energiefelhasználásról. A magán 5G hálózat használatával az áramszolgáltatók képalkotó eszközöket hordozó drónokat telepíthetnek a távvezetékek vizuális ellenőrzésére. A magán 5G-alapú mobilalkalmazásokkal, például a push-to-talk/video segítségével javítható a terepen dolgozók biztonsága és hatékonysága, különösen a távoli vidéki területeken, földalatti helyszíneken és alagutakban, ahol kereskedelmi hálózatok nem állnak rendelkezésre. Ezen túlmenően a közművek számára előnyös a kiberbiztonság, amelyet a magán 5G-hálózatok nyújthatnak, megvédve a kritikus infrastruktúrákat, például az elektromos hálózatot a rosszindulatú szereplőktől.

F. Vasút

Mind a földfelszíni, mind a földalatti vonatoknak kritikus kommunikációs szolgáltatásokra van szükségük a vonatok menetrendjéhez és a zökkenőmentes üzemeltetéshez. Például biztonságos, kritikus hangkommunikációra van szükség a mozdonyvezetők és a jelzőirányítók között. A vonatok utasai szintén megbízható és stabil hang/adatszolgáltatásokat várnak el. A vonatok azonban gyakran a föld alatt, alagutakban és távoli területeken közlekednek, és nem valószínű, hogy hozzáférnek a nyilvános hálózatokhoz. Ráadásul a nagysebességű vonatokra szigorúbb késleltetési követelmények vonatkoznak. A nagy rendelkezésre állással, nagy megbízhatósággal, alacsony késleltetéssel és testreszabott QoS-sel rendelkező privát 5G vonzó megoldást kínál a vasúti hálózatok számára.

G. Média

A médiaipar mind a gyártás, mind a terjesztés szempontjából profitál a privát 5G hálózatokból. A gyártási oldalon lehetővé válik a távoli gyártás. Valós idejű, többkamerás felvételek, beleértve a 4K ultra nagyfelbontású (HD) tartalmakat is, a hálózatokon keresztül küldhetők a gyártási létesítménybe, elkerülve a helyszínen lévő OB egységet. A különböző helyszíneken dolgozó több produkciós munkatárs távolról és együttműködve dolgozhat ugyanazon az élő tartalomon. Ezen túlmenően a privát 5G lehetővé teszi egy vezeték nélküli stúdió kialakítását, ahol az összes audio/video eszköz és berendezés 5G-n keresztül csatlakozik. A terjesztési oldalon az élő és nem élő HD-tartalmak 5G-n keresztül történő terjesztésével a fogyasztók számára a felhasználók több tartalmat nézhetnek jó minőségben és pufferelesség nélkül.

H. Egészségügy

A privát 5G többféleképpen fogja átalakítani az egészségügyi ellátást. Például képes megszabadulni a vezetékektől, és gyorsan és megbízhatóan továbbítani az orvosi képek nagy adatfájljait egy szakembernek felülvizsgálatra. A nagy sebességű 5G vezeték nélküli hálózat bővíti a telemedicina piacát. Az otthoni betegek és a kórházi orvosok 5G-képes videokonferenciákon keresztül tarthatnak konzultációkat. Az IoT-eszközök használatával a betegek fizikai jelei és állapota valós időben gyűjthető és továbbítható, ami megkönnyíti az orvosok gyors egészségügyi döntéseinek meghozatalát. Az egészségügyben a mesterséges intelligencia felhasználható a betegségek felismerésére és a kezelés meghatározására. A privát 5G hálózatok támogathatják a valós idejű gyors tanulást, amely nagy mennyiségű adatot igényel. Emellett az 5G-képes AR/VR lehetővé teszi, hogy az orvostanhallgatókat virtuális környezetben képezzék ki a sebészeti beavatkozások elvégzésére.

Ebben az alfejezetben bemutatunk néhány példát a magán 5G-hálózatok valós demonstrációira világszerte.

A. Az Ericsson sikertörténete a gyárakban

Az Ericsson 5G intelligens gyárat telepített a texasi Lewisville-ben, az Egyesült Államokban [96]. A gyárat a Világgazdasági Fórum az Ipar 4.0 úttörőjeként azonosította. A gyors és biztonságos 5G-kapcsolat használatával 25 különböző felhasználási esetet fejlesztettek ki. A tipikus felhasználási esetek közé tartozik az energiafigyelés és -kezelés, az AR a távoli támogatáshoz és a gépi tanuláson alapuló vizuális ellenőrzés. Az energiafigyelés és -menedzsment során az összes energiagépet nyomon követik, így lehetővé válik a valós idejű energiafogyasztási információk megszerzése és a készülékek be- és kikapcsolása. A távoli támogatásra szolgáló AR esetében a gyári karbantartó csapat virtuális útmutatást kaphat a világ minden tájáról érkező szakértőktől a berendezések hibaelhárításához és javításához. Az ML-alapú vizuális ellenőrzésben a nagy felbontású kamerák és ML-algoritmusok használatával nő az ellenőrzés pontossága és csökken a szükséges idő. A hagyományos gyárral összehasonlítva az 5G intelligens gyár, amelyben több mint 200 robot dolgozik, az egy alkalmazottra jutó teljesítmény 120%-os javulásával és a kézi anyagmozgatás 65%-os csökkenésével jellemezhető.

B. A Huawei sikertörténete a bányákban

A China Mobile, a Yangquan Coal Group és a Huawei sikeresen kiépítette Kína legalacsonyabb földalatti 5G hálózatát a Shanxi tartománybeli Xinyuan szénbányában [97]. A privát 5G hálózat 534 méter mélyen a föld alatt helyezkedik el, és több mint 1000 Mbps feltöltési sebességet ér el. Az 5G hálózat alapján 5G intelligens szénbányát indítottak, és három 5G-képes pilóta nélküli alkalmazást fejlesztettek ki az elektromechanikus kamrák, a szénbánya műveleteinek és az átfogó gépesített szénbányászati műveletek ellenőrzésére. Ezek az alkalmazások csökkentik a munkaintenzitást és javítják a munkavállalók biztonságát.

C. A Nokia sikertörténete a kikötőkben

A Nokia a hamburgi kikötői hatósággal (HPA) és a Deutsche Telekommal együttműködve sikeres 5G helyszíni kísérletet végzett a hamburgi kikötőben (Hamburg, Németország) [98]. Két egyantennás BS-t telepítettek 700 MHz-es vivővel, amelyek a közeli és a távoli adatközpontokhoz is kapcsolódnak. A szigorú és mérsékelt késleltetést igénylő felhasználói esetek a közeli, illetve a távoli adatközpontokra támaszkodnak. Az URLLC-t, a továbbfejlesztett mobil szélessávú (eMBB) és a masszív géptípusú kommunikációt (mMTC) ugyanaz az 5G rádiós infrastruktúra támogatja hálózati szelektálással. A közlekedési lámpák vezérlése az URLLC tipikus alkalmazása. A közlekedési lámpáknak a HPA irányítóközpontból történő távoli felügyeletével és vezérlésével a járművek gyorsan és biztonságosan átirányíthatók a kikötőn. Az eMBB segítségével az AR/VR elérhető a helyszíni mérnöki csapatok számára, így hozzáférhetnek a naprakész kulcsfontosságú információkhoz, például az építési tervekhez, és távoli szakértőkhöz fordulhatnak műszaki támogatásért. Az mMTC által lehetővé tett IoT-érzékelők a rögzített és mozgatható eszközökre vannak felszerelve a környezet, valamint az eszközök állapotának és egészségi állapotának folyamatos figyelemmel kísérése érdekében.

D. A Cisco sikertörténete a raktárban

Az Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma a Georgia állambeli Albanyban található tengerészgyalogsági logisztikai bázison a Cisco és más technológiai vállalatok technikai segítségével egy privát 5G vezeték nélküli hálózatot használva intelligens raktárt fejlesztett ki [99]. A magán 5G vezeték nélküli hálózat CBRS és

intelligens felhasználási esetek, többek között robotika, vonalkódolvasás, holografikus és AR/VR. Ezek az alkalmazások modernizálják a műveleteket, és növelik a hatékonyságot a tárolás, a készletellenőrzés, a karbantartás és az auditálás terén.

E. A Mitsubishi Electric Corporation sikertörténete a gyáratomizálásban

A Mitsubishi Electric Corporation ellenőrizte a helyi 5G BS-ek és a Mitsubishi Electric FA-termékei, például a HMI, a peremszámítógépek és a programozható vezérlők közötti vezeték nélküli átvitelt [100]. A demonstráció során a magánhálózat a japán kormány által kijelölt 28,2-28,3 GHz-es spektrumot használja. Felhasználási esetei közé tartozik a távoli üzemeltetés és karbantartási támogatás, valamint az AR/VR a munka hatékonyságának növelése érdekében.

F. Egyéb sikertörténetek

További sikeres bemutatókat találunk [56], [101] és [102]. Különösen az [56]-ban a szerzők sikeresen demonstrálták az 5G NR nem önálló üzemmódban (30 KHz-es hordozótávolság és 80 MHz-es sáv szélesség) történő működést az átjárószintű szelektálással a megosztott, engedélyezett frekvenciatartományban, 3,8-4,2 GHz-en.

Az ipari rendszerek általában olyan irányítási vezérlési technikákat igényelnek, amelyek kifinomult érzékelési és lokalizációs képességet követelnek meg. Így a szerzők a [101]-ben bemutatták a mobil platformok valós idejű, vezeték nélküli, zárt hurkú vezérlését az együttműködő robotikából és AGV-kből álló jövőbeli ipari rendszerekhez, amelyek árukat szállítanak egy raktárban vagy konténereket mozgatnak egy kikötői terminálon.

A [102]-ben a szerzők egy ultranagy sebességű beltéri kommunikációs hálózatot javasoltak, amely az optikai szál, a milliméteres hullám (mmWave) és az optikai vezeték nélküli kommunikáció új, kereszt spektrumú és kereszt közege spektrumát használja. Ez olyan alkalmazásokat támogathat, amelyek ultra nagy sebességű és alacsony késleltetési idejű kommunikációt igényelnek helyi területeken. Néhány lehetséges felhasználási eset közé tartoznak a kórházi orvosi kezelések ultra nagy felbontású képei és az intelligens gyártáshoz szükséges kooperatív robotika.

VII. LEHETSÉGES KIHÍVÁSOK ÉS JÖVŐBELI IRÁNYOK

A privát 5G hálózat még gyerekcipőben jár. A privát 5G hálózatok számára még mindig számos potenciális kihívás és nyitott probléma létezik, amelyek további tanulmányozást érdemelnek.

A. Csatorna mérés és modellezés

A vezeték nélküli csatorna jellemzőinek megértése kulcsfontosságú tényező az új vezeték nélküli hálózatok tervezése, telepítése és tesztelése előtt. Mivel a nem nyilvános 5G hálózatokat gyakran ipari területeken telepítik, ebben az alfejezetben az ipari környezetek csatornamérésére és modellezésére összpontosítunk.

A szerkezeti (pl. mennyezetmagasság) és környezeti (pl. felület anyaga) különbségek miatt az ipari csatornák viselkedése jelentősen eltér a szokásos beltéri környezetekben, például irodai vagy otthoni környezetben tapasztaltaktól [103], [104]. Fontos, hogy az üzemi vivőfrekvencia növekedésével a kisebb gépkatrészek az elektromágneses energia jó visszaverőiként viselkedhetnek. Így az útvesztés-exponensek akár kétszer is kisebbek lehetnek. Ezenkívül, mivel a mágneses mezők reflexiója, diffrakciója és szóródása hajlamos előfordulni, az ipari beltéri csatornák általában több útvonalban gazdag fading-csatornák [105], [106]. Továbbá, mivel a vezeték nélküli technológiák nem játszottak kritikus szerepet az ipari környezetben,

hagyományosan kevesebb figyelmet fordítottak a csatornák mérésére és modellezésére az ipari létesítményekben, mint a városi kültéri/ beltéri környezetben. A korlátozottan kapcsolódó munkák közé tartozik a [107], amely több ipari jellegű mérési forgatókönyvet vizsgált a 6 GHz alatti frekvenciatartományban, és jellemezte a nagy és kis skálájú paramétereket, valamint a vezeték nélküli csatornák késleltetési statisztikáit. Hasonlóképpen, a National Institute of Standards and Technology kiterjedt méréseket és értékeléseket végzett, amelyek a csatornastatisztikákat és a terjedési jellemzőket szolgáltatottak 2,25 GHz és 5,4 GHz frekvenciákon ipari helyszíneken [108]. A [109]-ben ipari robotok vezeték nélküli gép-gép közötti kommunikációját vizsgálták 5,85 GHz-en. A [110]-ben a szerzők egy nyers mérési adatsort tettek közzé, amely az idő- és frekvenciaváltozó csatornatompulást jellemzi 2,4 GHz-en egy ipari ciklikusan mozgó robotkar akadály jelenlétében. A szerzők a [111]-ben kampányt indítottak az mmWave-kommunikációhoz kapcsolódó ipari környezetben végzett csatornamérésekhez, és az IEEE 802.11 ad mmWave csatornamodelljének felhasználásával elemezték a csatornaparaméterek statisztikai tulajdonságait. A [112]-ben egy útvészesség és késleltetés szórás négyzetes középértékének becslési algoritmust javasoltak a szobai elektromágneses elméleten keresztül. A [113] és a [114] kiegészítésképpen bemutatta az ipari UWB-kommunikáció csatornamérésének eredményeit.

B. A spektrum rugalmas és robusztus használata

A Wi-Fi és a cellás technológiák együttélése olyan téma, amely jelentős figyelmet kapott a szabályozó hatóságok, a gyártók, az üzemeltetők, a szolgáltatók és a kutatói közösség részéről. Az IEEE 802.11-ben használt CSMA-t széles körben elfogadták és specifikálták a cellás technológiák - például az LAA és az NR-U - csatornahozzáférési mechanizmusaként, bár néhány kisebb különbség még mindig fennáll. Az, hogy mindkét technológia ugyanazt a csatornahozzáférési módszert használja, nagymértékben lehetővé teszi az egymás mellett élést.

Amint azt korábban tárgyaltuk, egyes magán 5G hálózatok engedély nélküli spektrumot használhatnak, és ilyen esetekben, különösen ha több ilyen hálózat is ugyanazt az engedély nélküli sávot használja, a tömeges IoT-kapcsolat megvalósítása az ilyen engedély nélküli sávokon keresztül hatékony és megbízható spektrummegosztást és csatornahozzáférést igényel az IoT- és IIoT-eszközök között. A frekvenciamegosztás szerepe kulcsfontosságúvá vált a spektrumgazdálkodásban, mivel lehetővé teszi az új sávokhoz való hozzáférést, miközben védi azok működését és a már meglévő vagy több különböző, eltérő prioritású felhasználási esetek hozzáférési jogait. A kiszámítható és garantált QoS-szintek kielégítése az engedély nélküli spektrumban azonban kihívást jelentő probléma, és még mindig nem ismert, hogy az engedély nélküli spektrum milyen mértékben képes támogatni az URLLC-t. Ezért az URLLC képességek javításához olyan új frekvenciamegosztási és csatornahozzáférési rendszereket kell kialakítani, amelyek lehetővé teszik az 5 és 6 GHz-es frekvenciatartományban található nagyszámú engedély nélküli csatorna rugalmas és dinamikus használatát. Olyan rendszert képzelünk el, amelyben egy adott csomópont minden egyes átviteli lehetőségénél más csatornát választhat, így opportunista módon csökkentve a csatornához való hozzáférési időt. Az IEEE 802.11be többsávós/többszörös technikák ebbe az irányba fejlődnek. Ezen túlmenően az ilyen rendszereknek képesnek kell lenniük arra, hogy a szolgáltatási igényeknek megfelelően hozzáférjenek az engedélyezett spektrumhoz, és rangsorolják azt, amennyiben ilyen erőforrás rendelkezésre áll. Így a spektrummegosztás további spektrumlehetőségeket biztosít az innováció támogatásához és új felhasználási esetek lehetővé tételéhez a magánhálózatban, mint például a vezérlés, a rugalmas és megbízható, alacsony késleltetésű vezeték nélküli automatizálás, a kiterjedt IoT és IIoT, valamint a helyiségeken belüli biztonságos hálózat [56], [115].

C. Többsávós összevonás és többcsatornás műveletek

Egy vezeték nélküli rendszer csúcsadatsebességének és rendszerátviteli teljesítményének növelése érdekében olyan adó-vevőre van szükség, amely a nem engedélyezett és engedélyezett spektrumban rendelkezésre álló több sáv aggregálásával, korlátozott késleltetési idő korlátozása mellett jeleket küld és fogad egy magánhálózatba és onnan. A magánhálózatban az engedély nélküli és az engedélyezett spektrum által biztosított sávok esetleges korlátozott és nem folytonos sávjai miatt azonban új intelligens sávösszevonási sémákra van szükség. Ha sok különböző típusú eszköz van egyidejűleg csatlakoztatva, akkor a szomszédos eszközök interferenciája a teljesítményt rontó legfontosabb zavaró tényező. A nyilvános hálózatban különösen az eszközfüggő interferencia lesz az egyetlen károsító tényező. Ezért szükséges a jelfeldolgozással segített, eszközfüggő többcsatornás műveletek kifejlesztése a magánhálózat teljesítményének javítása érdekében, az interferenciából eredő hátrányok minimalizálásával [116]. A többsávós aggregáció és a többcsatornás műveletek megvalósítása során nem szabad kizárólag 5G és cellás rádióinterfészeket használni. Így a korlátozottan rendelkezésre álló spektrum miatt fontos kutatási téma a nem 5G-s, sőt a nem cellás rádióinterfészek magánhálózatokba történő integrálása is [115].

D. Kiberfenyegetések

Bár a név azt sugallhatja, hogy a privát 5G hálózatok "magánjellegűek" és így biztonságosak, továbbra is sebezhetőek a támadásokkal szemben. Ennek oka, hogy maga a vezeték nélküli kapcsolat az éterben van, és bárki számára elérhető a hatótávolságon belül. Mivel a privát 5G hálózatot általában a világ távoli és nehezen elérhető részein telepítik, és az lesz az egyetlen kapcsolattartási pont a külvilággal. Ebben az esetben jelentős a hackerek általi lehallgatás és félrevezetés kockázata. A man-in-the-middle támadás egy másik típusa a káros jelek küldésén keresztül történik, amelyek gyorsan lemeríthetik az eszközök akkumulátorait. Ezek a támadások súlyos, akár életveszélyes következményekkel járnak, különösen a küldetékritikus IoT- és IIoT-eszközökkel rendelkező hálózatok esetében. Emellett előfordulhat olyan mobilhálózat-térképezési támadás, amely a hálózathoz csatlakozó eszközök típusait a vezeték nélküli adatszimatoló eszközökkel a mobiljeleken keresztül küldött adatok azonosításával határozza meg. Ez lehetővé teszi a támadók számára, hogy hozzáférjenek a nem nyilvános hálózaton belüli eszközökre vonatkozó érzékeny információkhoz. Így a következő generációs hálózatokban a skálázhatóság, az ellenőrzés és az elszigetelés (SCION) lesz az egyik jelölt a megbízható forgalom biztosítására az összekapcsolt hálózati architektúrákban [70].

E. Fronthaul és Backhaul

A sikeres ipari IoT-üzemeltetéshez a magán 5G-hálózatoknak várhatóan nagyobb kapacitásra és URLLC-re lesz szükségük a hibátlan QoS biztosításához. Továbbá a magánhálózatokban sűrű heterogén hálózatok fognak kialakulni. Ezen követelmények teljesítéséhez és az új típusú hálózatok kezeléséhez a privát 5G hálózatok megvalósításához elengedhetetlen lesz egy rendkívül megbízható és rugalmas backhaul. E nagyfokú heterogenitás, a QoS-követelmények és a csomóponti sűrűség (AP-k és felhasználók) miatt a költséghatékony átvitel eléréséhez hatékony közös továbbítási/visszatérési és hozzáférési műveletekre van szükség [117]. A meglévő backhaul megoldások nem teljesen kidolgozottak, és magas költségekkel, megbízhatatlansággal vagy elégtelen sávszélességgel járnak [48]. A backhaul intelligens, adaptív és dinamikus integrációjának javítása, valamint a backhaul-hálózat heterogenitásának teljes körű kihasználása a felhasználói igények sokféleségének kielégítése

kihívás. Kiderült, hogy az előhívás olyan kulcsfontosságú elem, amely szigorú követelményeket támaszt a jövőbeli hálózatokkal szemben, de jelenleg kevés új interfészt fejlesztettek ki az előhívásra. Az újszerű előcsatlakozási kialakítás is megérdemli a kutatást.

F. Irányítás-központú rádióerőforrás-kiosztás

A privát 5G hálózatok célja, hogy kielégítsék az ipari műveletek, a közbiztonság és a kritikus infrastruktúra-csatlakozás kritikus vezeték nélküli kommunikációs igényeit. Ezen alkalmazások többsége inkább vezérlésközpontú, mint emberközpontú [17], [118]. Az emberközpontú alkalmazásokhoz tervezett hagyományos erőforrás-elosztási technikák nem feltétlenül alkalmasak a vezérlésközpontú funkciókhoz. Továbbá a hagyományos hálózatokban a fel- és lefelé irányuló erőforrás-kiosztást egymástól függetlenül kezelik, ami nem feltétlenül alkalmazható a vezérlésközpontú alkalmazások, például az ipari automatizálás esetében.

G. Adatmegosztás

A privát 5G hálózatokban az elosztott adatok tulajdonosainak meg kell osztaniuk adataikat az együttműködési feladatok végrehajtásához. Például a környezeti megfigyelés javítható a meghatározott helyiségekben elosztott több érzékelőtől származó adatok kombinálásával. Az adatmegosztás során azonban előfordulhat adatszivárgás, ami biztonsági és adatvédelmi problémákat eredményezhet. Kihívást jelent, hogyan lehet hatékonyan lehetővé tenni az adatmegosztást a magánélet védelme mellett. Az együttműködő feladatok műveleteire vonatkozó intelligencia biztosításához a hagyományos ML-technikák feltételezik, hogy az adatok a központi kiszolgálón rendelkezésre állnak. Azonban a tulajdonosok adatainak egy központi, harmadik fél szerverre történő, képzésre történő átvitele miatt fennáll az adatvédelem kiszivárgásának lehetősége. A magánélet kiszivárgásának csökkentésére az egyik ígéretes megoldásként az elosztott ML-megközelítések közül a föderált tanulás (FL) [119], [120] használható. Különösen a viselhető egészségügyi ellátáshoz alkalmazták az FL keretrendszerét a [121]. Az IIoT-ben az adatvédelemmel védett adatmegosztáshoz az FL-t a [122] alkalmazta. A differenciális adatvédelem [123] további integrálásával, amely megakadályozza, hogy a kiszolgáló azonosítsa, hogy ki az adott frissítés, az FL-be, fokozott adatvédelem érhető el.

H. Integrált érzékelés és kommunikáció

Mint már említettük, az intelligens ipar számos olyan irányítási vezérlési technikát igényel, amelyek a kommunikációs képességgel integrált kifinomult érzékelésre támaszkodnak [101]. Így az ipari magánhálózatok számára előnyös lesz az integrált érzékelés és kommunikáció (ISAC) [124], amely a különböző érzékelők sűrű telepítéséből adódó integrációs nyereséget, valamint a kiegyensúlyozott funkcionális teljesítményből és/vagy kölcsönös segítségnyújtásból adódó koordinációs nyereséget ér el. Az ISAC integrálásával nagyobb lefedettség, nagyobb megbízhatóság a meghibásodásokkal szemben, gyorsabb reagálás és pontosabb érzékelés érhető el. Az ISAC tipikus alkalmazásai különösen az olyan iparágakban találhatóak, amelyek a mindenütt jelenlévő IoT-eszközökre támaszkodnak a zárt hurkú vezérléshez szükséges útmutatáshoz, az autonóm járművekre a logisztikában, a viselhető elektronikára a HMI-hez, valamint a Wi-Fi-t a drónokhoz a nagyméretű raktárakban történő szállításhoz. Így az ISAC átlátható és hatékony integrálása az 5G hálózatokba és a Wi-Fi új verziójába nyitott probléma.

I. Eszközökösztéma és a köz- és magán-szféra folytonossága

Az 5G kezdeti kiépítési szakaszában az eszközök ökoszisztémája kihívást jelent a magán 5G számára. A

kereskedelmi forgalomban kapható 5G-eszközök választéka nem elég gazdag, bár most gyors fejlődésen mennek keresztül. A

a spektrumtámogatás kérdését is figyelembe kell venni az 5G eszközök esetében. A legtöbb bejelentett 5G-eszköz a 6 GHz alatti frekvenciasávokban működő szolgáltatásokat támogatja, míg a mmWave-spektrumot támogató eszközök száma kevesebb, és még kevesebb az mmWave- és a 6 GHz alatti sávokat egyaránt támogató eszköz. Az új, teljes mértékben 5G-s eszközök fejlesztéséhez szükséges egyes komponensek, például a chipkészletek bevezetése jelentős időt és tőkekiadásokat igényel. A privát 5G hálózatokban a mobilitás továbbra is kulcsfontosságú követelmény, ami azt jelenti, hogy a szolgáltatás folyamatossága fontos. A felhasználóknak szükségük lehet arra, hogy a magánhálózatokról a nyilvános hálózatokra és fordítva váltsanak. Az, hogy hogyan lehet folyamatos szolgáltatásokat nyújtani, miközben ezeken a tartományokon áthaladnak, kihívást jelent, ami számos figyelembe veendő tényezőt foglal magában, például a QoS-t, a biztonságot és az irányítást.

VIII. ZÁRÓ MEGJEGYZÉSEK

Az Ipar 4.0 fejlődésével a vállalatok, a közművek és a közszféra nagy érdeklődést mutat a privát 5G hálózatok telepítése iránt, hogy saját ipari alkalmazásait fejlesszék a kiváló működési hatékonyság és termelékenység elérése érdekében. A magán 5G hálózatok globális piaci mérete 2021 és 2028 között várhatóan 39,7%-os összetett éves növekedési ütemet mutat.

Ez a tanulmány áttekintette a magán 5G hálózatokkal kapcsolatos legújabb kutatásokat. Konkrétan először bemutattuk a privát 5G hálózatok alapkonceptióját és architektúráját, és megvitattunk számos végrehajtási kérdést. Ezután elemeztük a privát 5G hálózatok néhány kulcsfontosságú alaptermológiáját, és bemutattuk ipari felhasználási eseteiket és valós demonstrációikat. Végül azonosítottuk a lehetséges kihívásokat és a jövőbeli irányokat.

HIVATKOZÁSOK

- [1] M. Agiwal, A. Roy és N. Saxena, "Következő generációs 5G vezeték nélküli hálózatok: *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, Sep. 2016.
- [2] A. Gupta és R. K. Jha, "Az 5G hálózat felmérése: *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206-1232, Sep. 2015.
- [3] G. Fettweis és S. Alamouti, "5G: Személyes mobilinternet azon túl, amit a celluláris a telefóniával tett," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, pp. 140-145, Feb. 2014.
- [4] B. Bangerter, S. Talwar, R. Arefi és K. Stewart, "Networks and devices for the 5G era," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, pp. 90-96, Feb. 2014.
- [5] 3GPP, TR28.807, "Study on management aspects of non-public networks", 2019. október.
- [6] R. Ferrus és O. Sallent, "Extending the LTE/LTE-A business case: mission- and business-critical mobile broadband communications," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 47-55, 2014. szeptember.
- [7] S. Doga, A. Tusha, and H. Arslan, "NOMA with index modulation for uplink URLLC through grant-free access," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 13, no. 6, pp. 1249-1257, Oct. 2019.
- [8] S. Vitturi, C. Zunino és T. Sauter, "Ipari kommunikációs rendszerek és jövőbeli kihívásaik: *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 6, pp. 944-961, Jun. 2019.
- [9] L. D. Xu, W. He és S. Li, "Internet of Things in industries: *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 4, pp. 2233-2243, Nov. 2014.
- [10] G. Brown, "Private 5G mobile networks for industrial IoT", *Heavy Reading, White Paper, Qualcomm Inc.*, 2019.
- [11] J. Liao és X. Ou, "5G katonai alkalmazási forgatókönyvek és magánhálózati architektúrák", in *Proc. IEEE Int. Conf. Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, Dalian, Kína, 2020. augusztus, pp. 726-732.
- [12] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov és G. Bianchi, "A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 197-216, First quarter 2019.
- [13] D. Laselva *et al.*, "Unlicensed spectrum access in 3GPP," in *Spectrum sharing: Papadias: A következő határ a vezeték nélküli hálózatokban*, C. B. Papadias, T. Ratnarajah és D. Slock, szerk. Wiley, 2019.

- [14] G. Naik, J. M. Park, J. Ashdown, and W. Lehr, "Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: Lehetőségek és kihívások," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153 027-153 056, 2020.
- [15] L. W. Ho, A. G. Rodriguez, L. Galati-Giordano, and D. ~~Li~~ "Next generation Wi-Fi mesh for indoor residential deployments," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, May 2020, pp. 1-5.
- [16] Z. Li, M. A. Uusitalo, H. Shariatmadari és B. Singh, "5G URLLC: *Int. Symposium on Wireless Commun. Systems (ISWCS)*, Lisszabon, Portugália, 2018. aug., pp. 1-6.
- [17] A. Aijaz, "Private 5G: Az ipari vezeték nélküli hálózatok jövője", *IEEE Ind. Electron. Mag.* , vol. 14, no. 4, pp. 136-145, 2020. december.
- [18] 5G Alliance for Connected Industries and Automation, "5G non-public networks for industrial scenarios, white paper," Jul. 2019.
- [19] A. E. Kalor, O. Simeone és P. Popovski, "Prediction of mmWave/THz link blockages through meta-learning and recurrent neural networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.* , Megjelenés alatt. doi: 10.1109/LWC.2021.3118269.
- [20] Y. Cui, F. Liu, X. Jing és J. Mu, "Transfer adaptation learning: A decade survey," *CoRR*, vol. abs/1903.04687, 2019. [Online].
Elérhető: <https://arxiv.org/abs/1903.04687>
- [21] 3GPP, TR22.804, "Műszaki specifikációs csoport szolgáltatásai és rendszeraspektusok; Tanulmány az automatizálási kommunikációról a vertikális tartományokban (16. kiadás)", 2018. december.
- [22] O-RAN Alliance, "O-RAN use cases and deployment scenarios, white paper", 2020. február.
- [23] J. Ordonez-Lucena, J. F. Chavarria, L. M. Contreras, and A. Pastor, "The use of 5G non-public networks to support Industry 4.0 scenarios," in *Proc. 2019 IEEE Conf. on Standards for Commun. and Netw. (CSCN)*, Granada, Spanyolország, Oct. 2019, pp. 1-7.
- [24] 3GPP, TS23.251, "Network sharing: Architecture and functional description." [Online] Elérhető: http://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/23_series/23.251/
- [25] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi és M. K. Marina, "Network slicing in 5G: Survey and challenges," *IEEE Commun. Mag.* , vol. 55, no. 5, pp. 94-100, 2017. május.
- [26] W. Y. Poe, J. Ordonez-Lucena és K. Mahmood, "Provisioning private 5G networks by means of network slicing: *Proc. 2020 IEEE Int. Conf. on Commun. Workshops (ICC WKSHPs)*, Dublin, Írország, jún. 2020, pp. 1-6.
- [27] M. Norin *et al.* , "5G spectrum for local industrial networks," Ericsson, Tech. Rep. 1-25, 2020.
- [28] Federal Communications Commission, "Unlicensed use of the 6 GHz band," Washington, DC, USA, Tech. Rep. Rep. ET Docket No. 18-295, 2020. [Online]. Elérhető: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-363490A1.pdf>.
- [29] Time-Sensitive Networking Task Group, Hozzáférés: 2018. december 5. [Online]. Elérhető: <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>.
- [30] D. Bruckner *et al.* , "An introduction to OPC UA TSN for industrial communication systems," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 6, pp. 1121-1131, Jun. 2019.
- [31] S. Kim *et al.* , "Demo/poster abstract: Enabling time-critical applications over next-generation 802.11 networks," in *Proc. IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, Honolulu, HI, Apr. 2018, pp. 1-2.
- [32] A. Neumann *et al.* , "Towards integration of industrial Ethernet with 5G mobile networks," in *Proc. 2018 IEEE Int. Workshop Factory Commun. Syst. (WFCS)*, Imperia, Olaszország, Jun. 2018, pp. 1-4.
- [33] M. Khoshnevisan *et al.* , "5G ipari hálózatok CoMP-vel az URLLC és időérzékeny hálózati architektúrához," *IEEE J. Sel. Areas Commun.* , vol. 37, no. 4, pp. 947-959, Apr. 2019.
- [34] H. Putnies, P. Danielis, E. Janchivnyambuu, and D. Timmermann, "A simulation model of IEEE 802.1AS gPTP for clock synchronization in OMNeT++," in *Proc. 2018 Int. OMNeT++ Community Summit*, Pisa, Italy, Sep. 2018, pp. 63-72.
- [35] M. Levesque és D. Tipper, "A survey of clock synchronization over packet-switched networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.* , vol. 18, no. 4, pp. 2926-2947, 2016 negyedik negyedéve.
- [36] 3GPP, "Study on enhancement of 5G system (5GS) for vertical and local area network (LAN) services (Release 16)", Tech. Rep. TR23.734, v16.2.0, 2019. jún. [Online]. Elérhető: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.734/.
- [37] A. Larranaga *et al.* , "Analysis of 5G-TSN integration to support industry 4.0," in *Proc. 2020 IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vienna, Austria, Sep. 2020, pp. 1111-1114.
- [38] A. Rostami, "Privát 5G hálózatok a vertikális iparágak számára: *5G World Forum (5GWF)*, Drezda, Németország, 2019. szeptember, pp. 433-439.
- [39] M. Angelichinoski, K. F. Trillingsgaard és P. Popovski, "A statistical learning approach to ultra-reliable low latency communication," *IEEE Trans. Commun.* , vol. 67, no. 7, pp. 5153-5166, Jul. 2019.
- [40] M. Bennis, M. Debbah és H. V. Poor, "Ultrabiztonságos és alacsony késleltetésű vezeték nélküli kommunikáció: *Proc. IEEE*, vol. 106, no. 10, pp. 1834-1853, Oct. 2018.

- [41] H. Chen *et al.*, "Ultra-megbízható, alacsony késleltetésű cellás hálózatok: *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, pp. 119-125, Dec. 2018.
- [42] G. Pocovi *et al.*, "Ultra-megbízható, alacsony késleltetésű kommunikáció elérése: *IEEE Netw.*, vol. 32, pp. 8-15, 2018. márc.-ápr.
- [43] 3GPP, "Study on latency reduction techniques for LTE," Tech. Rep. TR 36.881, 2016. május.
- [44] J. Sachs *et al.*, "5G radio network design for ultra-reliable low-latency communication," *IEEE Netw.*, vol. 32, pp. 24-31, 2018. márc.-ápr.
- [45] 3GPP, "IMT-2020 önértékelés: Ericsson, Tech. Rep. Tech. Rep. R1-1809278, 2018. november.
- [46] M. Razzaghpour *et al.*, "Single carrier transmission for URLLC with adaptive radio resource utilization," in *Proc. 2019 15th Int. Wireless Commun. & Mobile Computing Conf. (IWCMC)*, Tangier, Marokkó, Jun. 2019, pp. 26-30.
- [47] V. N. Swamy *et al.*, "Real-time cooperative communication for automation over wireless," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7168-7183, Nov. 2017.
- [48] K. J. Kim *et al.*, "Backhaul reliability analysis on cluster-based transmit diversity schemes in private networks," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf.*, Taipei, Tajvan, 2019. december, pp. 1-6.
- [49] --, "A cluster-based transmit diversity scheme for asynchronous joint transmissions in private networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Montreal, Kanada, Jun. 2021, pp. 1-6.
- [50] V. Nikolopoulos, M. Fiacco, S. Stavrou és S. R. Saunders, "Narrowband fading analysis of indoor distributed antenna systems," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 2, pp. 89-92, 2003.
- [51] Q. Wu, X. Ding, and A. Chen, "A broadband dipole antenna for multi-service indoor distributed antenna system (MS-IDAS)," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 839-842, 2015.
- [52] T. Jacobsen *et al.*, "System level analysis of uplink grant-free transmission for URLLC," in *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC WKSHPs)*, Singapore, Dec. 2017, pp. 1-6.
- [53] M. Mohammadkarimi, M. A. Raza és O. A. Dobre, "Signature-based nonorthogonal massive multiple access for future wireless networks: Uplink massive connectivity for machine-type communications," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 13, no. 4, pp. 40-50, 2018. december.
- [54] R. I. Ansari *et al.*, "5G D2D hálózatok: *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 3970-3984, Dec. 2018.
- [55] I. Afolabi *et al.*, "Hálózati szeletelés és softwarizáció: *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 2429-2453, 2018 harmadik negyedéve.
- [56] J. Thota és A. Aijaz, "Slicing-enabled private 4G/5G network for industrial wireless applications," in *Proc. Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, London, UK, Sep. 2020, pp. 1-3.
- [57] S. Wijethilaka és M. Liyanage, "Survey on network slicing for Internet of Things realization in 5G networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 2, pp. 957-994, Second quarter 2021.
- [58] F. Debbabi, R. Jmal, L. C. Fourati és A. Ksentini, "Algorithmics and modeling aspects of network slicing in 5G and beyonds network: *IEEE Access*, vol. 8, pp. 162 748-162 762, 2020.
- [59] M. Chahbar *et al.*, "A comprehensive survey on the E2E 5G network slicing model," *IEEE Trans. Netw. Service Manag.*, vol. 18, no. 1, pp. 49-62, Mar. 2021. március.
- [60] N. Huin *et al.*, "Hard-isolation for network slicing," in *Proc. IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, Paris, France, Apr. 2019, pp. 955-956.
- [61] S. Zhang *et al.*, "Air-ground integrated vehicular network slicing with content pushing and caching," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 9, pp. 2114-2127, Sep. 2018.
- [62] V. Theodorou, "Cross-domain network slicing for industrial applications," in *Eur. Conf. Netw. Commun. (EuCNC)*, Valencia, Spanyolország, Jun. 2018, pp. 209-213.
- [63] I. Badmus, M. Matinmikko-Blue és J. S. Walia, "Network slicing management technique for local 5G micro-operator deployments," in *16th Int. Symp. on Wireless Commun. Systems (ISWCS)*, Oulu, Finnország, 2019. február, pp. 697-702.
- [64] C. L. I, S. Kuklinsk és T. Chen, "A perspective of O-RAN integration with MEC, SON, and network slicing in the 5G era," *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 6, pp. 3-4, Nov./Dec. 2020.
- [65] N. Hassan, K. A. Yau és C. Wu, "Edge computing in 5G: A review," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127 276-127 289, 2019.
- [66] F. Fang és X. Wu, "A win-win mód: *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 6, pp. 3983-4003, Mar. 2021. március.

- [67] E. C. Strinati *et al.*, "Beyond 5G private networks: the 5G CONNI perspective," in *Proc. IEEE Globecom WKSHPs*, Taipei, Taiwan, Dec. 2020, pp. 1-6.
- [68] T. Qiu *et al.*, "Edge computing in industrial internet of things: *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 4, pp. 2462-2488, Fourth quarter 2020.
- [69] G. Koutitas *et al.*, "Demo/poster abstract: XReality research lab Augmented reality meets Internet of Things," in *Proc. IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, Honolulu, HI, Apr. 2018, pp. 1-2.
- [70] T. John *et al.*, "Linc: low-cost inter-domain connectivity for industrial systems," in *Proc. Annual conf. of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM): Poster and Demo Sessions*, Aug. 2021, pp. 68-70.
- [71] J. P. Tomá's, "Mi a szerepe az edge computingnak az 5G gyártásban?" Aug. 2021. [Online]. Elérhető: <https://enterpriseiotinsights.com/20210827/5g/what-role-edge-computing-5g-manufacturing>.
- [72] F. Nadeem, M. Shirvanimoghaddam, Y. Li, and B. Vucetic, "Non-orthogonal HARQ for delay sensitive applications," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Dublin, Írország, jún. 2020, pp. 1-6.
- [73] *Vezeték nélküli rendszerek az ipari automatizáláshoz: ANSI/ISA 100.11a-2011 szabvány*, 2011.
- [74] W. Ikram, S. Petersen, P. Orten és N. F. Thornhill, "Adaptive multi-channel transmission power control for industrial wireless instrumentation," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 2, pp. 978-990, May 2014.
- [75] T. Zheng, Y. Qin, H. Zhang és S. Kuo, "Adaptív teljesítményszabályozás a kölcsönös interferencia elkerülésére az ipari internet-of-thingsben." *China Communications*, vol. 13, no. Supplement 1, pp. 124-131, 2016.
- [76] A. E. Minovich *et al.*, "Functional and nonlinear optical metasurfaces: optikai metafelületek," *Laser Photonics Rev.*, pp. 1-19, 2015.
- [77] H. Wymeersch *et al.*, "Rádiólokalizáció és leképezés újakonfigurálható intelligens felületekkel: *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 52-61, 2020. december.
- [78] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. Lopez-Salcedo és G. Seco-Granados, "Survey of cellular mobile radio localization methods: Az 1G-től az 5G-ig," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 2, pp. 1124-1148, Second quarter 2018.
- [79] J. Huang, J. Liang, and S. Luo, "Method and analysis of TOA-based localization in 5G ultra-dense networks with randomly distributed nodes," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 174 986-175 002, 2019.
- [80] T. V. Haute, B. Verbeke, E. D. Poorter és I. Moerman, "Optimizing time-of-arrival localization solutions for challenging industrial environments," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 13, no. 3, pp. 1430-1439, Jun. 2017.
- [81] E. Y. Menta *et al.*, "On the Performance of AoA-based localization in 5G ultra-dense networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 33 870-33 880, 2019.
- [82] J. Zhang *et al.*, "Intelligent collaborative localization among air-ground robots for industrial environment perception," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 12, pp. 9673-9681, Dec. 2019.
- [83] L. Barbieri *et al.*, "UWB lokalizáció egy intelligens gyárban: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, pp. 1-18, 2021.
- [84] C. Chen *et al.*, "Centiméteres pontosságú beltéri lokalizáció elérése WiFi platformokon: *IEEE Internet Things J.*, vol. 4, pp. 122-134, Feb. 2017.
- [85] C. Liu *et al.*, "RSS-closzolás alapú passzív lokalizáció és alkalmazása érzékelőhálózatokban," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 4, pp. 2883-2895, Apr. 2016.
- [86] GSMA, "5G IoT privát és dedikált hálózatok az ipar 4.0 számára", Tech. Rep., 2020.
- [87] Y. Siriwardhana, P. Poramage, M. Ylianttila, and M. Liyanage, "Performance analysis of local 5G operator architectures for industrial internet," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 12, pp. 11 559-11 575, Dec. 2020.
- [88] TelstraandEricssondeployprivateLTEatQueenslandsilvermine, "Sep9,2019.[Online]. Elérhető: <https://enterpriseiotinsights.com/20190909/channels/news/telstra-andericsson-deploy-private-lte-at-queensland-silver-mine>.
- [89] "A bányászat digitális jövőjének bekapcsolása Lihirben". [Online]. Elérhető: <https://exchange.telstra.com.au/turning-on-the-digital-futureof-mining-at-lihir/>
- [90] M. Zhong *et al.*, "5G és IoT: A kommunikáció és a mérések új korszaka felé," *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 22, no. 6, pp. 18-26, Dec. 2019.
- [91] Y. Zeng, Q. Wu és R. Zhang, "Hozzáférés az égből: *IEEE*, vol. 107, no. 12, pp. 2327-2375, 2019. december.
- [92] Z. Ullah, F. Al-Turjman és L. Mostarda, "Cognition in UAV-aided 5G and beyond communications: *IEEE Trans. on Cogn. on Cogn. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 3, pp. 872-891, Sep. 2020.

- [93] J. Ji, K. Zhu, D. Niyato és R. Wang, "Joint cache and trajectory optimization for secure UAV-relaying with underlaid D2D communications," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Dublin, Írország, 2020. jún., pp. 1-6.
- [94] W. Zhang *et al.*, "Levegő-föld integrált mobil peremhálózatok: *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125 998-126 018, 2020.
- [95] N. Cheng *et al.*, "Légtérbe integrált mobil szélső hálózatok: *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 8, pp. 26-32, Aug. 2018.
- [96] "Ericsson USA 5G Smart Factory." [Online]. Elérhető: <https://www.ericsson.com/en/about-us/company-facts/ericsson-worldwide/united-states/5g-smart-factory>.
- [97] "Kína első 5G intelligens szénbányája elindult Shanxi-ban." [Online]. Elérhető: http://en.sasac.gov.cn/2020/06/24/c_5145.htm.
- [98] "5G intelligens tengeri kikötő: Hamburgi hatóság." [Online]. Elérhető: <https://pf.content.nokia.com/t004f5-private-wireless-ports/use-case-5G-smart-sea-port>
- [99] "DODs 5G-alapú intelligens raktárhálózat indul," 2021. [Online]. Elérhető: <https://gcn.com/articles/2021/02/19/marines-5g-smart-warehouse.aspx>
- [100] MELCO, "Mitsubishi Electric begins demonstrating local 5G system in Japan," 2020. [Online]. Elérhető: <https://emea.mitsubishielectric.com/en/news/releases/global/2020/0518-a/index.html>.
- [101] A. Aijaz, A. Stanoev, and M. Sooriyabandara, "Demo Abstract: Toward real-time wireless control of mobile platforms for future industrial systems," in *Proc. IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, Paris, France, Apr. 2019, p. 993994.
- [102] P. T. Dat és társai, "Hibrid optikai vezeték nélküli-mmWave: *Proc. IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, Paris, France, Apr. 2019, pp. 1003-1004.
- [103] S.-D. Li *et al.*, "Csatornamérések és modellezés 6 GHz-en alagút környezetben az 5G vezeték nélküli rendszerek számára", *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2017, pp. 1-15, Jan. 2017.
- [104] Z. Kun *et al.*, "Channel measurement and characterization for industrial Internet of Things," in *Proc. 2019 IEEE Wireless Commun. and Netw. Conf. (WCNC)*, Marrakesh, Marokkó, Apr. 2019, pp. 1-5.
- [105] E. Tanghe *et al.*, "Az ipari beltéri csatorna: *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 7, pp. 2740-2751, Jul. 2008.
- [106] M. Cheffena, "Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 66-73, Feb. 2016.
- [107] M. Dungen *et al.*, "Channel measurement campaigns for wireless industrial automation," *at-Automatisierungstechnik*, vol. 67, no. 1, pp. 7-28, 2019.
- [108] R. Candell *et al.*, "Ipari vezeték nélküli rendszerek: NIST, Tech. Rep. Tech. Note (NIST TN)-1951, 2017.
- [109] B. Holfeld *et al.*, "Radio channel characterization at 5.85 GHz for wireless M2M communication of industrial robots," in *Proc. 2016 IEEE Wireless Commun. and Netw. Conf. (WCNC)*, Doha, Katar, 2016. ápr., pp. 1-7.
- [110] D. Block, N. H. Fliedner, D. Toews, and U. Meier, "Wireless channel measurement data sets for reproducible performance evaluation in industrial environments," in *Proc. 2015 IEEE 20th Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, Luxembourg, Luxembourg, Sep. 2015, pp. 1-4.
- [111] C. Cano, G. H. Sim, A. Asadi és X. Vilajosana, "A channel measurement campaign for mmWave communication in industrial settings" (Csatornamérési kampány mmWave-kommunikációhoz ipari környezetben). *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 299-315, Jan. 2021.
- [112] Y. Ai, J. B. Andersen, and M. Cheffena, "Path-loss prediction for an industrial indoor environment based on room electromagnetics," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 7, pp. 3664-3674, Jul. 2017.
- [113] J. Karedal *et al.*, "A measurement-based statistical model for industrial ultra-wideband channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 8, pp. 3028-3037, aug. 2007.
- [114] M. Razzaghpour *et al.*, "Short-range UWB wireless channel measurement in industrial environments," in *Proc. 2019 Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Barcelona, Spanyolország, Oct. 2019, pp. 1-6.
- [115] OFCOM, "Enabling wireless innovation through local licensing." [Online] Elérhető: https://www.ofcom.org.uk/data/assets/pdf_file/0033/157884/enabling-wireless-innovation-through-local-licensing.
- [116] P. Huang *et al.*, "Multi-link operation framework", Tech. Rep. IEEE 802.11-19/0733r1, 2019. július.
- [117] P.-H. Kuo és A. Mourad, "Millimeter wave for 5G mobile fronthaul and backhaul," in *Proc. European Conf. on Netw. and Commun. (EuCNC)*, Oulu, Finnország, Jun. 2017, pp. 1-5.
- [118] H. Ren *et al.*, "Resource allocation for secure URLLC in mission-critical IoT scenarios," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 9, pp. 5793-5807, Sep. 2020.

- [119] M. Chen *et al.* , "Communication-efficient federated learning," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* , vol. 118, no. 17, pp. 1-8, 2020.
- [120] M. Chen, H. V. Poor, W. Saad, and S. Cui, "Wireless communications for collaborative federated learning," *IEEE Commun. Mag.* , vol. 58, no. 12, pp. 48-54, Dec. 2020.
- [121] Y. Chen *et al.* , "FedHealth: *IEEE Intell. Syst.* , vol. 35, no. 4, pp. 83-93, Jul.-Aug. 2020.
- [122] Y. Lu *et al.* , "Blockchain and federated learning for privacy-preserved data sharing in industrial IoT," *IEEE Trans. Ind. Informat.* , vol. 16, no. 6, pp. 4177-4186, Jun. 2020.
- [123] C. Dwork, F. McSherry, K. Nissim, and A. Smith, "Calibrating noise to sensitivity in private data analysis," *Theory of Cryptography*, pp. 265-284, 2006.
- [124] Y. Cui, F. Liu, X. Jing és J. Mu, "Az érzékelés és a kommunikáció integrálása a mindenütt jelenlévő IoT számára: Alkalmazások, trendek és kihívások," *CoRR*, vol. abs/2104.11457, 2021. [Online]. Elérhető: <https://arxiv.org/abs/2104.11457>.



Miaowen Wen 2014-ben szerzett doktori fokozatot a Pekingi Egyetemen (Peking, Kína). 2012 és 2013 között a Princeton University (Princeton, NJ, USA) vendégkutató munkatársa volt. Jelenleg a Dél-kínai Technológiai Egyetem (Guangzhou, Kína) docense. Két könyvet és több mint 130 folyóiratban megjelent tanulmányt publikált. Kutatási érdeklődése a vezeték nélküli és molekuláris kommunikáció különböző témáira terjed ki. 2020-ban elnyerte az IEEE Asia-Pacific (AP) Outstanding Young Researcher Award díját, valamint az IEEE ITST12, az IEEE ITSC14, az IEEE ICNC16 és az IEEE ICCT19 négy legjobb tanulmány díját. Az IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS vendégszerkesztője volt (Special Issue on

Spatial Modulation for Emerging Wireless Systems) és az IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING (Special Issue on Index Modulation for Future Wireless Networks: A Signal Processing Perspective). Jelenleg az IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, az IEEE TRANSACTIONS ON MOLECULAR, BIOLOGICAL, AND MULTISCALE COMMUNICATIONS és az IEEE COMMUNICATIONS LETTERS szerkesztője, valamint az IEEE JOURNAL vendégszerkesztője.

OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING (Special Issue on Advanced Signal Processing for Local and Private 5G Networks).



Qiang Li 2020-ban szerzett doktori fokozatot a Dél-kínai Technológiai Egyetemen (Guangzhou, Kína). 2018 és 2019 között a Princeton University (Princeton, NJ, USA) vendéghallgatói kutatási munkatársa volt. 2020 óta a Jinan University (Guangzhou, Kína) oktatója. Jelenlegi kutatási területei közé tartozik az indexmoduláció és az újrakonfigurálható intelligens felületek. 2020-ban elnyerte a China Education Society of Electronics kiváló doktori disszertáció díját, 2019-ben pedig az IEEE International Conference on Communication Technology legjobb tanulmányának díját.



Kyeong Jin Kim 1991-ben a Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) M.S. fokozatát, majd 2000-ben a Santa Barbara-i Kaliforniai Egyetemen (USA, Santa Barbara, Kalifornia állam, USA) az elektromérnöki és számítástechnikai tudományok területén M.S. és Ph.D. fokozatot szerzett. 1991 és 1995 között a koreai Daewoo Electronics Ltd. Video Research Center kutatómérnöke volt. 1997-ben csatlakozott a Santa Barbara-i Kaliforniai Egyetem Adatátviteli és Hálózati Laboratóriumához. Diplomái megszerzése után 2005-től 2009-ig a Nokia Research Center és a Nokia Inc. (Dallas, TX, USA) vezető kutatómérnökeként dolgozott, ahol L1 Specialist volt. 2010 és 2011 között a koreai Inha Egyetem vendégkutatója volt. 2012 óta a Mitsubishi Electric vezető kutatási munkatársa.

Research Laboratories, Cambridge, MA, USA. Kutatásai közé tartozik az adó-vevő tervezése, az erőforrás-kezelés, az ütemezés a kooperatív vezeték nélküli kommunikációs rendszerben, a kooperatív spektrummegosztó rendszer, a fizikai réteg titoktartási rendszere, az eszköz-eszköz kommunikáció, a helyi és magán 5G hálózatok, valamint a mesterséges intelligencia alapú intelligens hálózati rendszerek.

Dr. Kim az IEEE COMMUNICATIONS LETTERS szerkesztőjeként, valamint az *IET Communications* Special Issue on Secure Physical Layer Communications vendégszerkesztőjeként dolgozott. A közelmúltban az IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS Special issue on Spatial Modulation for Emerging Wireless Systems (Térbeli moduláció az új vezeték nélküli rendszerek számára) című szakfolyóirat vezető vendégszerkesztője volt. Jelenleg az IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING Advanced Signal Processing for Local and Private 5G Networks vezető vendégszerkesztője és az IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS szerkesztője. A 2014-es IEEE-Chinacom, az IEEE ICC-2019 és az IEEE PES-GM 2020 legjobb tanulmányának díját kapta.



Octavia A. Dobre a Bukaresti Politehnica Egyetemen (korábban Bukaresti Műszaki Egyetem) szerzett diplomát 1991-ben, illetve 2000-ben doktorált. 2002 és 2005 között a New Jersey Institute of Technology (USA) és a Bukaresti Politehnica Egyetem munkatársa volt. 2005-ben csatlakozott a kanadai Memorial Egyetemhez, ahol jelenleg professzor és kutatási tanszékvezető. Vendégprofesszor volt a Massachusetts Institute of Technology, USA és a franciaországi Université de Bretagne Occidentale egyetemeken. Kutatási területei közé tartoznak az 5G-n túli technológiák, a vak jelazonosítási és paraméterbecslési technikák, valamint az optikai és víz alatti kommunikáció. Több mint 350 referált cikk szerzője és társszerzője ezeken a területeken. Dr. Dobre a következőkben szolgál

az IEEE OPEN JOURNAL OF THE COMMUNICATIONS SOCIETY főszerkesztője (EiC) és az IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS szerkesztője. Az IEEE COMMUNICATIONS LETTERS EiC-je volt, valamint különböző rangos folyóiratok és magazinok vezető szerkesztője, szerkesztője és vendégszerkesztője. Dr. Dobre számos konferencia szimpóziумainak általános elnöke, műszaki program társelnöke, oktatói társelnöke és műszaki társelnöke volt. Dr. Dobre a Royal Society és a Fulbright ösztöndíjasa volt. Számos konferencián, többek között az IEEE ICC, az IEEE Globecom és az IEEE WCNC konferenciákon elnyerte a legjobb tanulmány díját. Dr. Dobre a Kanadai Mérnöki Intézet és a Kanadai Mérnökakadémia tagja.



David I. Huawei Paris Research Center szakértője és műszaki vezetője, aki pályafutása nagy részét mind a cellás, mind a Wi-Fi hálózatok tanulmányozásának szentelte, ahol fő kutatási területe a hálózati teljesítményelemzés, mind az elméleti, mind a szimulációs alapú elemzés, a hálózattervezés és optimalizálás, valamint a technológia- és funkciófejlesztés.

David fő hozzájárulása a kis cellák és az ultrasűrű hálózatok megértéséhez kapcsolódik. Úttörő munkát végzett az energiahatékonyság, a cellás és a Wi-Fi együttműködés terén, valamint vizsgálta a többantennás képességeket és az ultra-megbízható, alacsony késleltetésű funkciókat a jövőbeli beltéri hálózatok számára. Davidet a Bell Labs Distinguished

2019-ben a személyzet tagja, 1 könyv szerzője a kis cellákról, és több mint 150 kutatási kéziratot publikált különböző kapcsolódó témákban. David 54 szabadalmi kérelmet nyújtott be, amelyek közül napjainkig több mint 25-öt ítéltek oda, és számos rangos díjat kapott. Az IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS egyik szerkesztője.



H. Vincent Poor a Princeton Egyetemen 1977-ben szerzett PhD fokozatot EECS szakon. 1977 és 1990 között az Illinois-i Egyetem Urbana-Champaign-i karának oktatója volt. 1990 óta a Princeton Egyetem tanára, ahol jelenleg a Michael Henry Strater egyetemi professzor. 2006 és 2016 között a Princetoni Műszaki és Alkalmazott Tudományok Iskolájának dékánja volt. Számos más egyetemen is vendégprofesszori kinevezést kapott, legutóbb a Berkeley-n és Cambridge-ben. Kutatási területe az információelmélet, a gépi tanulás és a hálózattudomány, valamint ezek alkalmazása a vezeték nélküli hálózatokban, az energiarendszerekben és a kapcsolódó területeken. E területeken megjelent publikációi között szerepel a hamarosan megjelenő *Machine Learning and Wireless Communications (Gépi tanulás és vezeték nélküli kommunikáció)* című könyv.

(Cambridge University Press, 2021).

Dr. Poor a Nemzeti Mérnöki Akadémia és a Nemzeti Tudományos Akadémia tagja, valamint a Kínai Tudományos Akadémia, a Royal Society és más nemzeti és nemzetközi akadémiák külföldi tagja. 2017-ben megkapta az IEEE Alexander Graham Bell-érmét.



Petar Popovski az Aalborg Egyetem professzora, ahol a Connectivity szekciót vezeti, valamint a Brémai Egyetem vendégprofesszora. Diplomáját és diplomáját a szkopjei Szent Cirill és Metód Egyetemen szerezte híradástechnika szakon, a doktori fokozatot pedig 2005-ben az Aalborg Egyetemen. Az IEEE tagja. Az ERC Consolidator Grant (2015), a Danish Elite Researcher Award (2016), az IEEE Fred W. Ellersick-díja (2016), az IEEE Stephen O. Rice-díja (2018), az IEEE Technical Committee on Smart Grid Communications Technical Achievement Award (2019), a Danish Telecommunication Prize (2020) és a Villum Investigator Grant (2021) díjazottja. Az IEEE Kommunikációs Társaság kormányzótanácsának (Board of Governors) nagy létszámú tagja,

Az IEEE Kommunikációelméleti Műszaki Bizottság és az IEEE TRANSACTIONS ON GREEN COMMUNICATIONS AND NETWORKING alelnöke. Jelenleg az IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS egyik területi szerkesztője, 2022-től pedig az IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS főszerkesztője. Prof. Popovski volt az IEEE SmartGridComm 2018 és az IEEE Communication Theory Workshop 2019 általános elnöke. Kutatási területe a vezeték nélküli kommunikáció és a kommunikációelmélet. Ő a szerzője a "Wireless Connectivity: An Intuitive and Fundamental Guide" című könyvnek szerzője, amely 2020-ban jelent meg a Wiley kiadónál.



Theodoros A. Tsiftsis 1993-ban a görögországi Szaloniki Arisztotelész Egyetem fizikából szerzett BSc diplomát, 1995-ben a Heriot-Watt Egyetem (Edinburgh, Egyesült Királyság) digitális rendszertechnika szakán MSc diplomát, 2000-ben az Athéni Közgazdasági Egyetem döntéstudományok szakán MSc diplomát, 2006-ban pedig a görögországi Pátrasz Egyetem villamosmérnöki szakán PhD fokozatot. A görögországi Thesszáliai Egyetemhez kapcsolódó Jinan Egyetem (Kína) professzora, valamint a kínai Shandong Jiaotong Egyetem tiszteletbeli professzora. Kutatási érdeklődése a kommunikációelmélet és a vezeték nélküli kommunikáció széles területére terjed ki, különös tekintettel az energiatakarékos kommunikációra, az intelligens felületekre, a rendkívül megbízható és alacsony késleltetésű kommunikációra, valamint a fizikai rétegre.

biztonság.

Dr. Tsiftsis az IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY és IEEE COMMUNICATIONS LETTERS. Jelenleg az IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS szerkesztője, valamint az IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING társszerkesztője. Prof. Tsiftsis-t az IEEE Vehicular Technology Society Distinguished Lecturer (IEEE VTS DL) 2018-as és 2020-as évfolyamának előadójává nevezték ki.

