

B5G/6G kommunikációs csatorna torlódásának elemzése mesterséges intelligenciával

Artificial Intelligence Based Analysis of the B5G/6G Communication Channel Congestion

Dr. GÁL Zoltán¹, TALBI Djamila²

¹Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, 4028 Debrecen, Kassai út 26., gal.zoltan@inf.unideb.hu,
²Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, 4028 Debrecen, Kassai út 26., talbi.djamila@inf.unideb.hu

Abstract

Pico-cell based very high-speed wireless communication technologies require new medium access control mechanisms to provide top efficiency in the control plane. Beyond 5G and 6G wireless services are studied currently with synthetic data generated with special simulators. In this paper we used ns-3 TeraSim tool to evaluate upload communication cases from mobile terminals to unique base station in different population and topology scenarios during 10 ms simulated time interval. Fractal properties of the congested channel access were extracted with wavelet method in different simulation cases. Classification of them belonging to different communication cases were executed with recurrent neural network. The methodology utilized in this research work performs stable and unstable phases of the new IEEE pre-standard mechanism called Adaptive Directional Antenna Protocol for THz.

Keywords: B5G, 6G, artificial intelligence, machine learning, ADAPT medium access control mechanism.

Kivonat

A következő generációs, pikocella méretű nagysebességű vezeték nélküli kommunikációs technológiák a hagyományostól eltérő közeghozzáférési és vezérlési mechanizmust feltételeznek a vezérlő síkban működő folyamatok hatékonyságának további növelése érdekében. A B5G, illetve 6G vezeték nélküli szolgáltatásokat jelenleg speciális szimulátorok által előállított adatok segítségével elemzik. Jelen dolgozatban ns-3 TeraSim eszköz segítségével mobilterminálok egyetlen közös bázisállomáshoz történő adatfeltöltési folyamatait vizsgáltuk 10 ms-os szimulált időtartamban. Torlódásos helyzetben a rádiós csatorna hozzáférés fraktál tulajdonságait wavelet módszerrel nyertük ki, majd visszacsatolásos neurális hálózat segítségével osztályoztuk a különböző kommunikációs eseteket. Az alkalmazott módszer az IEEE szabványosítási folyamatában lévő ADAPT mechanizmus stabil, illetve instabil fázisainak hatékony beazonosítására képes.

Kulcsszavak: B5G, 6G, mesterséges intelligencia, gépi tanulás, ADAPT csatorna hozzáférési mechanizmus.

1. BEVEZETÉS

Az 5G-t követő B5G (Beyond 5G), illetve 6G rádiós technológiák az újszerű kihívások miatt intenzíven kutatott témakörnek számítanak. A rádiós jeleknek THz frekvenciatartományban való küldése közben a gázok molekuláinak természetes hőmozgása miatt jelentős mértékben megnő a csillapítás. Ennek egyik fő okozója a vízmolekulák jelenléte, ami az útvonali veszteséget (path loss) erőteljesen megemeli, korlátozva ezáltal a továbbítási rátát, valamint az áthidalható fizikai távolságot. Erre bevált megoldásként szolgál az irányított antennák használata, ami által néhány méteres távolságon e nagyfrekvenciás jelek elfogadható minőségben jutnak el a csatornára kapcsolódó célba [1]. A későbbiekben kifejlesztésre kerülő hálózatok másik komoly kihívását az energiafogyasztás hatékony szabályozása jelenti. Ennek kezelésére jelentős számú tudományos és műszaki dolgozat vállalkozott, amelyek többségében a köd- (Fog Computing), illetve az MEC (Mobil Edge Computing), mobil végpont szintű feldolgozás körvonalazódik legelőnyösebb megoldásként [2].

A 6G előírásoknak megfelelően az IP (Internet Protocol) réteg funkcióit újra kell tervezni, ami által a csomagok továbbá nem klasszikus datagramként továbbítódnak a rendszerben, hanem az alkalmazások

előzetesen szerződnek a szolgáltatói eszközparkkal az adatelemek késleltetési idejére, a csomagvesztés mértékére, valamint a továbbítás közbeni követésre vonatkozóan. Ezáltal az új IP technológia az ipari szintű gép-gép kommunikáció számára a nagyon kis késleltetést, illetve a nagy pontosságú KPI (Key Performance Indicators) indikátorokat képes elérhetővé tenni. A gépi tanulás alkalmazásával ma még olyan hihetetlennek tűnő szolgálatok képesek stabilan működni, mint az önvezető autózás és a hangasszisztencia. Ezekre ugyanakkor jellemző, hogy akár soha feldolgozásra nem kerülő, jelentős mennyiségű állapotadatot képesek előállítani. A gépi tanulást ilyen esetben az alkalmazás réteg számára szükséges menedzsment rétegek, gerinc szolgáltatások, rádiós bázisállomások és eszközök szintjén kell alkalmazni. A következő generációs kommunikációs megoldások számára manapság körvonalazódik a THz frekvenciatartomány használata a multiplexelési technikákkal összekapcsolva.

Jelen dolgozat felépítése a továbbiakban a következő: a második fejezetben a kapcsolódó kutatásokat foglaljuk össze. A harmadik fejezetben a szimuláció módszertanát ismertetjük, valamint tárgyaljuk a szintetikus adatok kinyerésének módszerét. A nagyfrekvenciás állapotadatok elemzését a negyedik fejezetben részletezzük. A végén összefoglaljuk a dolgozatban bemutatott munka lényegét és további kutatási lehetőségeket fogalmazunk meg a cím szerinti tudományos témakörrel kapcsolatban.

2. A KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS MUNKA SZEMLÉLTETÉSE

A 6G és THz vezeték nélküli kommunikációs csatornák kialakítása jelenleg komoly erőfeszítések mentén zajlik. A soron következő tíz évben lényeges előrelépések várhatók a QoS (Quality of Service) szolgálatok, az új IP architektúra és az ezekhez tartozó új üzleti modellek területén [2]. Az ns-3 kiegészítéseként fejlesztett TeraSim szoftver az extrém nagy, azaz THz frekvenciasávban működő csatornák működését hivatott szimulálni [1]. A gépi tanulás (ML – Machine Learning) jelentős segítséget nyújt a következő generációs technikákkal szemben támasztott elvárások kielégítésében azáltal, hogy a matematikai egyenletekkel formálisan le nem írható rendszereket különböző gépi szinteken teszi kezelhetővé [3].

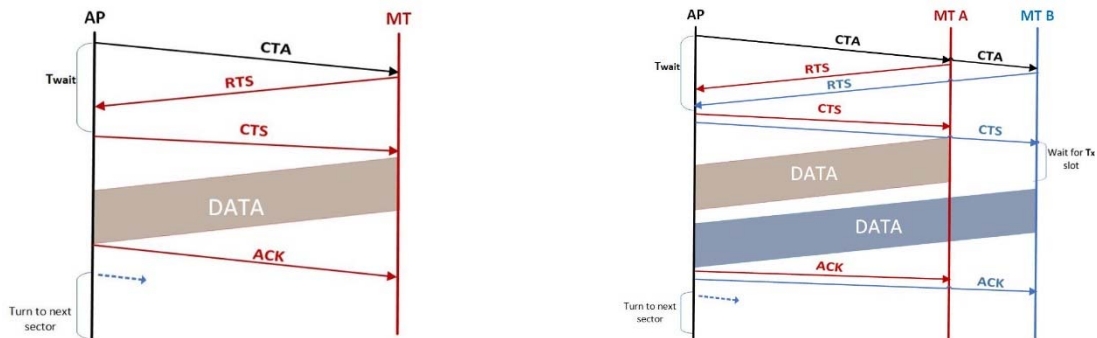
A THz tartományban tervezett adatkapcsolati szintű rádiós kerettovábbítás a fogadó csomópont általi kezdeményezés esetén erőteljes szinkronizálási funkciót biztosít a kommunikáló entitások között [4]. Ennek az ötletnek egy továbbfejlesztett változata az IEEE 802.15.3d MAC (Medium Access Control) mechanizmus, amely THz tartományban központosított architektúra mellett adaptív irányított antennát használva a vízszintes síkot egyenlő nagyságú szektorokra bontja szét és a rádiós keret elküldését háromutas kézfogás módszerével valósítja meg. Ez a fizikai síkban két üzemmóddal rendelkezik: i) THz egyetlen vivő szerinti (THz-SC PHY), illetve ii) THz on-off kapcsolás (THz-OOK PHY). Előbbi a nagysebességű adatátvitel, utóbbi az alacsonyabb és ezáltal olcsóbb átviteli rátájú, THz alatti sávban működő eszközök által használatos [6].

A THz sávban jelentkező kihívásokat, valamint a prototípus megoldásokat különböző szinteken kezelik. Ezek a transceiver architektúrához ultra szélessávú, illetve többsávú antennákat használnak a Tb/s átviteli ráta teljesítéséhez. Az ultra szélessáv követelményei számára DAMC (Distance-Aware Multi-Carrier) néven új modulációt fejlesztettek ki a THz sávban [8]. Ez a távolság-, illetve frekvenciafüggő csatorna jellemzőket figyelembe véve a THz sávban rendelkezésre álló extrém nagy sáv szélességet adaptív módon használja fel.

Egy másik esetben a magas frekvenciájú sávok előállításához szilárd halmazállapotú heterodin fogadót fejlesztettek ki, amely a THz tartományban működik [9]. Vezeték nélküli SISO (Single Input Single Output), egyetlen be- és egyetlen kimenetelű kapcsolaton 100 Gb/s rátát értek el 20 m hatótávolságon [10]. Plazma nanoantenna-tömb segítségével dinamikus nyalábformázás javaslat is létezik a THz tartományban tervezett kommunikáció számára [11]. Kutatások speciális eredményei ismerhetők meg a magas frekvenciák esetén az átlagos jel, illetve SINR (signal-to-interference-plus-noise) arányra vonatkozóan is [12].

3. NAGYSEBESSÉGŰ RÁDIÓS CSATORNA SZIMULÁCIÓJA

A THz tartományban tervezett, IEEE 802.11.3d szabvány szerinti MAC kommunikációs mechanizmus fizikai rétegének funkcióit az [5] szerinti leírás taglalja elsőként. Ez a THz tartományban fellépő erőteljes útvonal veszteséget irányított antennapárral kezeli, amelyek a küldő és a fogadó csomópontnál egyaránt jelen vannak. Központosított architektúra üzemmód esetén az egyetlen bázisállomás (BS – Base Station) körül azonos sugarú, egyforma szektorok léteznek, amelyek mindegyikében a BS időosztásos módszerrel végzi el a rádiós keretek szükséges küldését, illetve fogadását. Az ADAPT (Adaptive Directional Antenna Protocol for THz) kommunikációs mechanizmus az 1. ábra szerinti háromutas kézfogást hatja végre minden egyes adatkeret elküldése során.



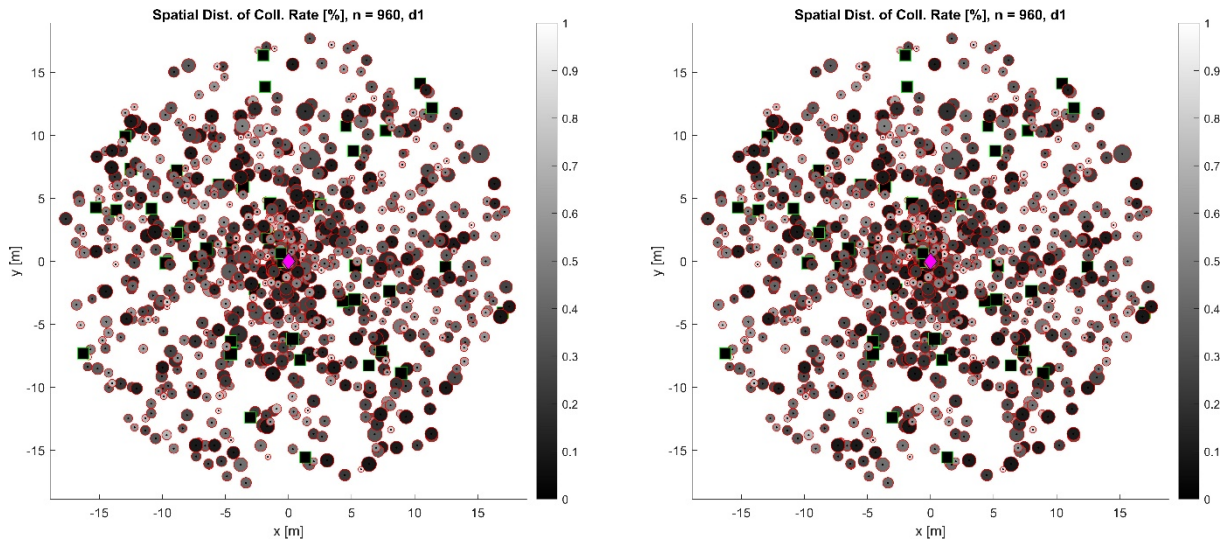
1. ábra. ADAPT háromutas kézfogás mechanizmusa. Egyetlen (bal), illetve két mobilterminál (jobb) közeghozzáférés kontroll jeleinek idődiagramja szektor szinten.

A BS az antennák által sugárzott jelek irányát szektorról-szektorra váltogatja. Egy ilyen szektor szintű időszakban szektoron belüli események zajlanak. Adott szektoridőben először a mobilterminálokhoz eljuttatott, küldésre felhívó CTA (Call-To-Action) kontroll jelet küld a BS. Adatkeretet küldeni szándékozó csomópontok RTS (Request-To-Send) kontroll jellel válaszolnak. Szektoron belül, az összes potenciális forrástól származó RTS jel megérkezéséhez elegendő Twait időartam múlva a BS egy másik, CTS (Clear-To-Send) kontroll jellel értesíti a versengéses időszakban sikeres potenciális forrásokat arról, hogy melyik mikor küldheti adatkeretét. Mindegyik CTS tartalmazza a forrás mobilterminál adatkeret küldésének kezdetét és időtartamát. Ezáltal nincs adatkeretek esetén ütközésre lehetőség. Természetesen nem szabad megfelekedni a versengéses (CTA, illetve RTS-ek közötti) időszakban az RTS kontroll jelek esetleges ütközéséről. Ez kis csomópontszám esetén elhanyagolható valószínűséggel következik be, ám a populáció bizonyos sűrűségétől kezdve lassító hatásként jelenik meg a mobilterminálok adattovábbítása számára. Az RTS jelét ütköztető potenciális forrás csomópont sikertelenné válik és egy következő szektoridőben próbálkozik az újraküldéssel. Újabb sikertelen küldés adott mobilterminál esetén a kivárási időtartamának (backoff time) exponenciális növelését jelenti, ezáltal csökkentve az esetleges ütközésének valószínűségét. Minden sikeres adatküldést a BS egy újabb, ACK (Acknowledgement) kontroll jellel nyugtáz. Az összes további szektor esetén a felsorolt tevékenységek ismétlődnek, majd újabb körszintű ciklusok következnek.

Az elemzéshez az ns-3 bővítéseként ismeretes, a THz csatornák eseményeit kezelő TeraSim v2 szimulátort használtuk. A BS körüli, $R = 18$ m sugarú, kör alakú pikocellában két fajta topológia szerint helyeztük el a mobilterminálok. Az egyik a centralizált eloszlás (d1), ahol a mobilterminálok egységnyi területen a sugárral fordított arányos mennyiségben helyezkednek el, függetlenül és véletlenül a poláris koordináták szögétől. A másik az egyenletes eloszlás (d2), ahol a pikocella területén egyenletes, független eloszlás szerinti koordinátákban vannak a mobilterminálok. Mindkét eloszlás esetén 7 különböző populáció sűrűséggel dolgoztunk, amit a mobilterminálok számával szabályoztunk: $n = 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960$. A szektorok száma minden esetben rögzített 30. Az adatátviteli ráta 63 Gb/s.

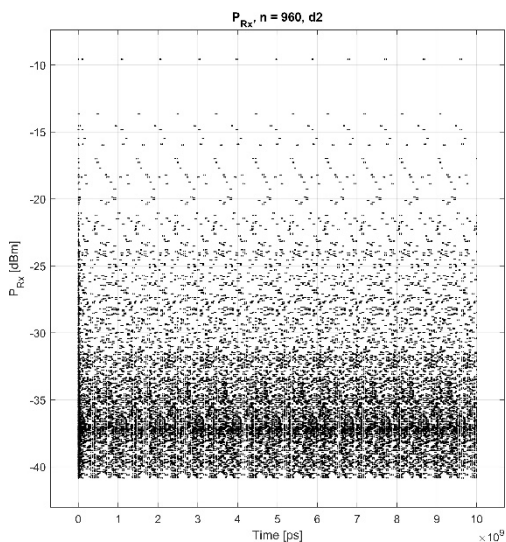
4. NAGYFREKVENCIÁS CSATORNA ÁLLAPOTADATAINAK ELEMZÉSE

A populáció sűrűségétől függően az ADAPT MAC mechanizmusa különböző képpen viselkedik. Alacsony populáció esetén az RTS kontroll jelek egyáltalán nem ütköztek, ám $n = 60$ mobiltermináltól kezdődően egyre több ütközés következett be. A terminálok $n \geq 120$ darabszáma esetén az ütközések gyakorisága jelentős mértékben megnőtt. A mobilterminálok topológiája ugyancsak befolyásolja a versengési időszakban bekövetkező ütközések intenzitását. A 2. ábra a mobilterminálok által elszenvedett ütközések gyakoriságát szemlélteti. A kör közepén a BS helyezkedik el. Adott pozícióban található golyó sugara egyenesen arányos a sikeresen küldött adatkeretek arányával. A golyó szürke árnyalata az ütközések intenzitásának mértéke. Minél sötétebb egy golyó, annál alacsonyabb az ütközési ráta. A fekete négyzetek ütközés nélküli csomópontok.

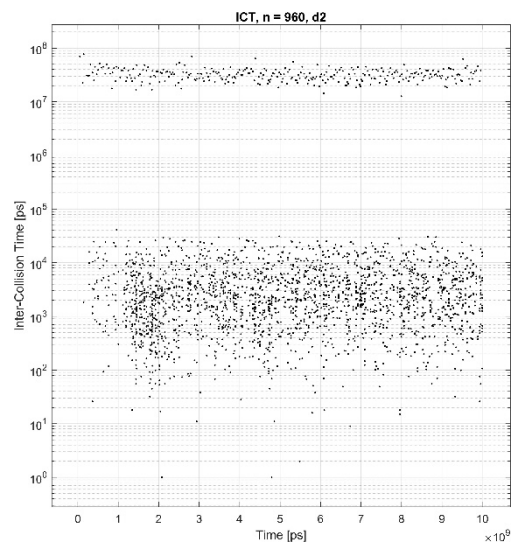


2. ábra. Nagy sűrűségű populáció ($n = 960$) esetén jelentkező ütközések intenzitása centralizált (bal), illetve egyenletes (jobb) topológiáknál.

Megfigyelhető, hogy a 2. ábra mindkét oldalán igaz, hogy a kisebb golyók világosabbak, vagyis magas ütközési ráta esetén alacsony átviteli ráta létezik és fordítva is. Habár d1, illetve d2 topológiák esetén a mobilterminálok síkbeli eloszlása eltérő, mégis fontos megjegyezni, hogy a poláris koordináták szöge mindkét esetben független, azonos, véletlen eloszlást követ. Így az ütközések intenzitása a poláris szögtől független és azonos eloszlású véletlen mennyiség. A BS-től számított távolság azonban jelentősen befolyásolja az ütközések gyakoriságát d1 topológia esetén. A fekete négyzetek által jelölt ütközés nélküli terminálok ugyancsak függetlenek a poláris szögtől, ám egyenletes síkbeli eloszlású topológia (d2) esetén az ütközés nélküli MT-k száma jelentősebb, mint d1 esetén. A szimulációk alapján azt találtuk, hogy az ütközések rátája közel lineárisan függ a populáció sűrűségétől és független az MT-k topológiájától.



3. ábra. A fogadó csomópontok elektromos teljesítményének fraktális függése az időtől.



4. ábra. Ütközések közötti időtartam klaszteres függése az időtől.

A fogadó csomópontok rádiós interfészén az elektromos teljesítmény időfüggése fraktál jelleget mutat (ld. 3. ábra). E vizuálisan észlelhető tulajdonság miatt az ADAPT mechanizmust wavelet alapú többfelbontásos (multiresolution) módszerrel elemeztük. Az időben egymás után közvetlenül bekövetkező ütközések közötti időtartam ICT (Inter-Collision Time) logaritmusos skálán történő megjelenítése két klaszter régiót tesz láthatóvá (ld. 4. ábra). E két klaszter centroidja a 10 ns, illetve 50 us. Az ICT kisebb értékeit a szektor szintű, míg a nagyobb értékeket a BS irányított antennájának síkbeli körbeforgási ciklusának periódusa okozza.

Mivel a rádiós cellában az interfészek elektromos teljesítménye a küldő és vevő berendezések közötti távolságtól függ, az ADAPT technológia MAC mechanizmusának 3. ábra szerinti fraktális tulajdonságát a forrás-cél csomópont párok közötti távolságok időbeni értékének wavelet alapú elemzésével végeztük. Mind a 14 szimuláció esetén véletlenszerűen 300 darab, $\delta^i = (\delta_1^i, \delta_2^i, \dots, \delta_{300}^i)$, $i = 1, 2, \dots, 14$ időben kompakt, azaz $\delta_j^i \in \mathbb{R}^{2000}$, 2000 darab egymás után elküldött keret távolság mintázatát figyeltük. A δ_j^i vektorok öt darab osztályba sorolása az 1. táblázat alapján történt, amelyet az ütközések intenzitásának populációtól való függése alapján rögzítettünk.

Cella szintű kommunikációs távolságok osztályba sorolása.

1. táblázat

| Topológia (d) | Mobilterminálok száma (n) | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------|----------|-------|-------|-------|---------|
| | 15 | 30 | 60 | 120 | 240 | 480 | 960 |
| 1 | C_1 | C_1 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 |
| 2 | C_1 | C_1 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 |
| Ütközések intenzitása | 0 | 0 | ~ 0 | > 0 | > 0 | > 0 | $\gg 0$ |

Minden egyes szekvencia vektort wavelet transzformációnak vetettünk alá, mivel e transzformáció független az olyan eltolástól, ahol az események időbeni csúsztatása nem befolyásolja a kimenetet. Ugyanakkor a deformációra is stabil, vagyis az idősorok vetemítése (warping) lehetővé teszi jellemző mintázatok beazonosítását, másszóval idő és skála dimenziókban jelentkező azonosítási feladat idő és frekvencia dimenziókban való megoldását. Mivel a wavelet transzformáció konvolúció műveletre épül, így a δ^i mátrixok wavelet transzformáltja az ADAPT technológia MAC mechanizmusának szintjén uralkodó hatásokat könnyebben megfigyelhetővé teszi. E jellemzőket hatékonyan képesek osztályozni a neurális hálózatok. Minden egyes $\delta_j^i \in \mathbb{R}^{2000}$ szekvencián végzett wavelet transzformáció egy-egy $f_j^i \in \mathbb{R}^{238}$ tulajdonság vektort állított elő, ami lényegesen rövidebb és tömörítve tartalmazza az eredeti δ_j^i vektor által hordozott tulajdonság információt.

LSTM (Long-Short Term Memory) típusú visszacsatolásos neurális hálózat segítségével ellenőriztük, hogy az 1. táblázat szerinti, különböző osztályokba sorolt szimulációs esetekből választott távolság vektorok wavelet transzformáltja biztonságosan osztályozható-e. Ehhez a 4200 darab, egyenként 238 elemű f_j^i szekvenciát 50%/25%/25% osztásban betanításra, validációra, illetve tesztelésre használtuk fel. Az LSTM neurális hálózat metaparaméterei a 2. táblázatban találhatóak. A neurális hálózat hat lépcsős a következők szerint: 1: Sequence; 2: LSTM; 3: Fully Connected; 4: Fully Connected; 5: Softmax; 6: Classification.

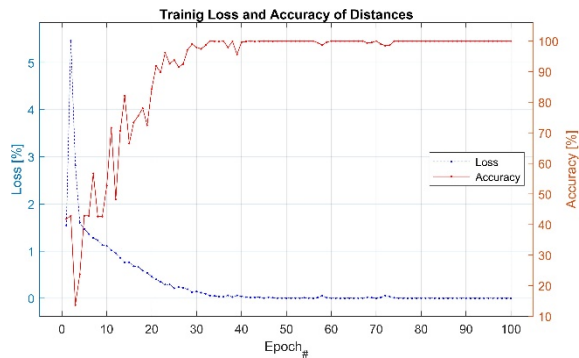
Az alkalmazott LSTM neurális hálózat metaparaméterei.

2. táblázat

| Jellemző | Érték | Jellemző | Érték |
|-------------------------------|-------|-------------------|-------|
| Gradient Decay Factor | 0.90 | Solver | ADAM |
| Squared Gradient Decay Factor | 0.99 | Max Epochs | 100 |
| Initial Learn Rate | 0.02 | Mini Batch Size | 2100 |
| No. Hidden units at L2 | 100 | No. Classes at L3 | 100 |
| Gradient Threshold | 1 | No. Classes at L4 | 5 |

Az 5. ábra mennyiségileg mutatja a visszacsatolásos hálózat tanulási folyamatát. Úgy a konvergencia idő, mint a hiba lecsengése az epoch számmal exponenciálisan függvény szerint változik, ami jól igazolja e típusú neurális hálózat hatékonyságát. A 6. ábra a tesztalmazon végzett osztályozás megbízhatóságát mutatja. A legtöbb osztályozásnak nincs tévesztése, kivéve a C2 osztály elemeit, amelyet 0.1%-os, gyakorlatilag ugyancsak elhanyagolható mértékben a C5 osztályba kerültek besorolásra. A főátló mentén a C1 osztálytól eltekintve a többi esetén közel azonos százalékban vannak jelen az elemek, ami a véletlenszerű vektorok kiválogatását jól igazolja. C1 esetén a többi osztályhoz képest közel háromszoros besorolási arány az 1. táblázatban a C1 számosságának a többi osztályhoz képest létező háromszorosából adódik.

Fontos megjegyezni, hogy az elemzés során tapasztalt 99,9%-os megbízhatóság eredmény processzálása 46.86 másodperc tanulási és tesztelési időtartam alatt történt egy kissé erősebb asztali számítógépen, ami egyik fontos előnye a jelen dolgozatban bemutatott módszernek.



5. ábra. Az alkalmazott LSTM neurális hálózat tanulási és osztályozási habitusa

| True Class \ Predicted Class | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Total | |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|---------------|
| 1 | 469 44.7% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 100% | 100% 0.0% |
| 2 | 0 0.0% | 139 13.2% | 0 0.0% | 0 0.0% | 1 0.1% | 99.3% | 99.3% 0.7% |
| 3 | 0 0.0% | 0 0.0% | 149 14.2% | 0 0.0% | 0 0.0% | 100% | 100% 0.0% |
| 4 | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 157 15.0% | 0 0.0% | 100% | 100% 0.0% |
| 5 | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 0 0.0% | 135 12.9% | 100% | 100% 0.0% |
| Total | 100% | 100% | 100% | 100% | 99.3% | 99.9% | 99.9% 0.1% |

6. ábra. Az alkalmazott LSTM neurális hálózat osztályozás tévesztési mátrixa

Az ADAPT mechanizmusra így megállapított tulajdonságok a következők: i) $R = 18$ m sugarú kör által rögzített rádiós cellában $n = 60$ MT feletti populáció ($0,33/m^2$ sűrűség) esetén függetlenül a topológiától megjelenik a kommunikációs torlódás, kisebb populációnál nincs torlódás; ii) Torlódásos csatorna esetén a populáció növelésével nő a sikeresen küldött rádiós átvitel időtartama. Ez a függés mindkét topológia esetén hasonló és lineárisnál kisebb mértékű; iii) Az LSTM típusú visszacsatolásos neurális hálózat nagyon magas arányban képes beazonosítani a különböző osztályokhoz tartozó torlódási esemény sorozatokat [13].

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat az IEEE 802.15.ad, folyamatban lévő nagysebességű vezeték nélküli kommunikációs szabvány, illetve ADAPT technológia MAC mechanizmusát elemzi egyetlen pikocellán belül különböző populáció sűrűségek, illetve a mobilterminálok centralizált és egyenletes eloszlású topológia eseteiben. A nagysebességű, 63 Gb/s átviteli rátájú rendszer 10 ms időtartamig tartó kommunikációs folyamatát TeraSim kiterjesztésű ns-3 szoftver eszközzel szimuláltuk.

Bemutatásra került, hogy az MT-k számától függően jelen MAC mechanizmus időben egymástól eltérő intenzitású önhasonló és fraktál mintázatokat állít elő. A kommunikációs folyamat tulajdonságait wavelet transzformációval nyertük ki, ami a rádiós csatornán öt különböző osztályba sorolható közeghozzáférési eseménysorozatot különböztetett meg. Torlódásos esetben a jelzésrendszer ütközése miatt a rádiós adatkeretek küldéséhez szükséges időtartam a 10 ms-os skálán belül időben lineárisan nő.

A wavelet transzformáció segítségével kinyert tulajdonságok osztályozását LSTM típusú visszacsatolásos neurális hálózattal végeztük, ami közönséges asztali számítógépen 47 másodperc alatti időben végezte el a betanítási és tesztelési feladatot a jelentős mennyiségű adathalmazon. Az elemzési módszer hatékonyságát a processzáls gyorsasága és az eredmény 99,9%-os megbízhatósága igazolja.

Az ADAPT mechanizmussal kapcsolatosan további kutatási lehetőségek az adatátvitel irányára, valamint a roaming funkcióra fogalmazhatók meg. Nyitott kérdés jelenleg a pikocellán belüli mobilterminálok egyéb topológiában való elhelyezkedésének a közeghozzáférésre és az adatátviteli teljesítményre való hatása. Az elemzési módszerek közül a mesterséges intelligenciát feltételező úgy felügyelt, mint felügyeletlen tanítási módszerek alkalmazása aktuális témának számít.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezt a kutatást a QoS-HPC-IoT Laboratórium és a Debreceni Egyetem TKP2021-NKTA projektje támogatta. A TKP2021-NKTA-34 projektet a Magyarországi Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs alap támogatta a TKP2021-NKTA finanszírozási formának megfelelően.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Zahed Hossain, Qing Xia, Josep Miquel Jornet, "TeraSim: An ns-3 extension to simulate Terahertz-band communication networks", *Nano Communication Networks*, vol. 17, pp. 36-44, September 2018.
- [2] Taleb, T., Aguiar, R. L., Yahia, I. G. B., Chatras, B., Christensen, G., Chunduri, U., Clemm, A., Costa, X., Dong, L., Elmoghani, J., Yosuf, B., Foukas, X., Galis, A., Giordani, M., Gurtov, A., Hecker, A., Huang, C.-W., Jacquenet, C., Kellerer, W., Zorzi, M., "White Paper on 6G Networking", *6G Research Visions*, No. 6, June 2020.
- [3] Ali, S., Saad, W., & Steinbach, D., "White Paper on Machine Learning in 6G Wireless Communication Networks" [White paper], *6G Research Visions*, No.7, June 2020.
- [4] Q. Xia, Z. Hossain, M. Medley and J. M. Jornet, "A link-layer synchronization and medium access control protocol for terahertz-band communication networks," *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 1-7, Dec. 2015.
- [5] Morales, Daniel & Jornet, Josep, "ADAPT: An Adaptive Directional Antenna Protocol for medium access control in Terahertz communication networks," *Ad Hoc Networks*, vol.119, Mai 2021.
- [6] V. Petrov, T. Kurner and I. Hosako, "IEEE 802.15.3d: First Standardization Efforts for Sub-Terahertz Band Communications toward 6G," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 11, pp. 28-33, November 2020.
- [7] Ian F. Akyildiz, Josep Miquel Jornet, Chong Han, "Terahertz band: Next frontier for wireless communications," *Physical Communication*, Vol. 12, pp.16-32, February 2014.
- [8] C. Han and I. F. Akyildiz, "Distance-aware multi-carrier (DAMC) modulation in Terahertz Band communication," 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 5461-5467, 2014.
- [9] E. Schlecht et al., "Schottky Diode Based 1.2 THz Receivers Operating at Room-Temperature and Below for Planetary Atmospheric Sounding," in *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 4, no. 6, pp. 661-669, Nov. 2014.
- [10] S. Koenig et al., "Wireless sub-THz communication system with high data rate enabled by RF photonics and active MMIC technology," 2014 IEEE Photonics Conference, pp. 414-415, 2014.
- [11] A. Singh, M. Andreello, N. Thawdar and J. M. Jornet, "Design and Operation of a Graphene-Based Plasmonic Nano-Antenna Array for Communication in the Terahertz Band," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 9, pp. 2104-2117, Sept. 2020.
- [12] V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J. M. Jornet and Y. Koucheryavy, "Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems With Blocking and Directional Antennas," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1791-1808, March 2017.
- [13] Djamila Talbi, Mohamed Amine Korteby and Zoltan Gal: Neural Network Based Analysis of Terahertz Frequency Signal Propagation for B5G/6G Wireless Networks, *Proc. IEEE Information Technology and Data Science Conf.*, pp. 267-273, June 2022.