

Konnektivitási megoldások fizikai MI-hez a mobilhálózat peremén – A forgalomirányítási megközelítések összehasonlító elemzése

KOVÁCS BENEDEK, DESZTICS ARMAND, PAPP ZSÓFIA

Ericsson Magyarország, Budapest, Magyarország

A fizikai MI megjelenése — autonóm robotok, drónok és járművek, amelyek a fizikai világban működnek — ultraalacsony késleltetésű számítási infrastruktúrát igényel a mobilhálózat peremén. Bár az 5G specifikációk több forgalomirányítási mechanizmust is definiálnak a felhasználói síkú adatok peremszámítási erőforrások felé terelésére, ezen mechanizmusok közötti választásnak mélyreható következményei vannak a késleltetés, a skálázhatóság és a szolgáltatás-folytonosság szempontjából mobilitás esetén. Ez a cikk két fő, 3GPP által definiált megközelítés összehasonlító elemzését mutatja be a mobilhálózati peremszámítás területén: az Uplink Classifier (ULCL) és a Multiple PDU Sessions megoldásokat. Hét technikai dimenzió szisztematikus értékelésén keresztül — adatútvonal-hatékonyság, titkosított forgalom kezelése, konfigurációs komplexitás, életciklus-csatolás, QoS-differenciálás, mobilitási hatás és UE-bevonás — bemutatjuk, hogy a Multiple PDU Sessions alapvetően jobb architektúrát biztosít a fizikai MI munkaterhelések számára. Egy háromrétegű átadás-együttműködési modellt javasolunk, amely a konnektivitási (SSC módok), szállítási (QUIC kapcsolatmigráció) és alkalmazási (kontextusáthelyezés) réteget fogja át az észlelt session-kimaradás csökkentése érdekében. Az architektúrát 3GPP Network Exposure és helymeghatározási szolgáltatások egészítik ki, amelyek térbeli tudatossággal rendelkező perem-alkalmazásokat tesznek lehetővé. A javasolt megközelítést egy autonóm robotkutya-demonstráción keresztül validáljuk, amely valós idejű YOLO-alapú objektumfelismerést alkalmaz a hálózat peremén, 33 ms alatti következtetési késleltetést érve el három független PDU session-ön keresztül, differenciált QoS-sel.

Kulcsszavak: 5G, peremszámítás, fizikai MI, ULCL, Multiple PDU Sessions, QUIC, session-folytonosság, hálózati pozicionálás

I. Bevezetés

A fizikai mesterséges intelligencia paradigmaváltást jelent az autonóm rendszerek fizikai világgal való interakciójában. A felhőalapú MI-vel ellentétben, amely centralizált adatközpontokban dolgozza fel az adatokat, a fizikai MI megtestesült ágenseken keresztül működik – raktárakban navigáló négylábú robotok, városi folyosókon áthaladó szállító drónok, kereszteződésekben koordináló autonóm járművek –, amelyeknek ezredmásodperces döntési ciklusokon belül kell érzékelniük, következtetniük és cselekedniük [1]. Ezek az ágensek folyamatos szenzor-adatfolyamokat generálnak (kamerák, LiDAR, IMU-k), amelyek valós idejű feldolgozást igényelnek, olyan késleltetéssel, ami összeegyeztethetetlen a hagyományos felhő-architektúrákkal, ahol a centralizált szerverekhez való oda-vissza idő jellemzően meghaladja a 20–50 ms-t [2].

A mobilhálózati peremszámítás ezt az alapvető korlátot kezeli azáltal, hogy a számítási erőforrásokat a rádiós hozzáférési hálózathoz vagy annak közelében helyezi el, egyetlen hálózati ugrásra csökkentve az adatutazást a felhasználói berendezés (UE) és az alkalmazáserver között. A 3GPP 5G rendszerarchitektúra, amelyet a TS 23.501 [3] specifikál, natív támogatást nyújt a peremszámításhoz olyan mechanizmusokon keresztül, amelyek lehetővé teszik az operátorok számára, hogy felhasználói síkú funkciókat (UPF-eket) telepítsenek a hozzáférési hálózat közelében, és a kiválasztott forgalmat helyi adathálózatok (DN-ek) felé tereljék. Ez az operátori peremszámítási modell a meglévő mobilhálózati infrastruktúrát használja – hitelesítés, mobilitáskezelés, QoS-érvényesítés és díjszabás – ahelyett, hogy párhuzamos overlay rendszereket igényelne.

A fizikai MI konnektivitási kihívása azonban túlmutat a számítási kapacitás peremre helyezésén. Két egyformán kritikus problémát kell egyidejűleg megoldani: (1) forgalomirányítás – hogyan tereljük a UE forgalmának megfelelő részhalmozát a legközelebbi peremtelephelyhez, miközben a fennmaradó forgalom eléri a centralizált szolgáltatásokat; és (2) session-folytonosság – hogyan tartjuk fenn a peremszámítási session-t, miközben az autonóm ágens cellák között mozog, esetleg elhagyva az egyik peremtelepítés szolgáltatási területét és belépve egy másikba.

A 3GPP specifikációk két fő mechanizmust definiálnak a forgalom peremszámítási erőforrások felé terelésére. Az első, az Uplink Classifier (ULCL), egy elágazó felhasználói síkú funkciót (UPF) iktat be az adatútvonalba, amely forgalmi leírók alapján osztályozza a csomagokat, és az egyező folyamatok helyi adathálózat (DN) felé

irányítja, míg a fennmaradó forgalmat a központi horgony UPF felé továbbítja [3]. A második, a Multiple PDU Sessions, felhasználói berendezés (UE) útvonal-választási szabályzatot (URSP) alkalmaz, hogy külön PDU session-öket hozzon létre a perem- és felhőforgalom számára, mindegyiket független session-kezeléssel, QoS-profilokkal és mobilitási jellemzőkkel [4].

Bár mindkét megközelítés eléri a peremforgalom-irányítás alapvető célját, architektúráis következményeik jelentősen eltérnek a fizikai MI igényes követelményei mellett. Ez a cikk amellett érvel – részletes technikai bizonyítékokkal –, hogy a Multiple PDU Sessions alapvetően jobb architektúrát biztosít a fizikai MI peremszámításhoz. A főlény minden releváns dimenzióban megnyilvánul: adatútvonal-hatékonyság, kompatibilitás modern titkosított protollokkal, üzemeltetési skálázhatóság, hibaizoláció, QoS-differenciálás, mobilitáskezelés és alkalmazás-adaptálhatóság.

A forgalomirányításon túl a session-folytonossági kihívást egy háromrétegű átadás-együtműködési modellel kezeljük. A konnektivitási réteg (SSC Mode 2 session-migráció), a hálózati/szállítási réteg (QUIC kapcsolat-migráció az RFC 9000 [5] szerint) és az alkalmazási réteg (proaktív kontextus-áthelyezés) koordinált működésével bemutatjuk, hogy az észlelt szolgáltatás-kimaradás peremátmenetek során a szekvenciális legrosszabb eset szerinti körülbelül 4,6 másodpercről 1 másodperc alá csökkenthető párhuzamosított végrehajtással.

A javasolt architektúrát egy autonóm robotkutya-demonstráción keresztül validáljuk, amely egy Unitree Go2 négylábú platformot alkalmaz 5G kapcsolattal. A robot 1080p videót streamel egy perem MI-szervernek, amely valós idejű YOLO objektumfelismerést végez, három független PDU session-nel, amelyek differenciált konnektivitást biztosítanak a perem-következtetéshez, WiFi hotspot felhasználói konnektivitáshoz és felhőszolgáltatásokhoz. Ez a demonstráció megerősíti, hogy a Multiple PDU Sessions architektúra biztosítja azt az izolációt, QoS-differenciálást és mobilitási tulajdonságokat, amelyeket a fizikai MI munkaterhelések igényelnek.

A cikk további felépítése a következő. A II. fejezet mutatja be az ULCL és a Multiple PDU Sessions részletes összehasonlító elemzését, valamint a háromrétegű átadás-együtműködési modellt. A III. fejezet a hálózati kitettségi és helymeghatározási szolgáltatásokat ismerteti, amelyek térbeli tudatossággal rendelkező perem-alkalmazásokat tesznek lehetővé. A IV. fejezet a robotkutya-validációt mutatja be. Az V. fejezet az eredményekkel és jövőbeli irányokkal zárja a cikket.

II. Konnektivitás a peremszámításhoz

A. Forgalomirányítási megközelítések – ULCL vs. Multiple PDU Sessions

A 3GPP 5G rendszerarchitektúra a helyi adathálózatok felé irányuló forgalomirányítást a mobilhálózati peremszámítás egyik alapvető eszközeként definiálja. Két architektúráisan eltérő megközelítés – az Uplink Classifier (ULCL) és a Multiple PDU Sessions – alapvetően különböző tervezési filozófiákat képvisel. Az ULCL megközelítés a hálózati adatútvonalba helyezi az intelligenciát, míg a Multiple PDU Sessions megközelítés az útválasztási döntést a UE-re delegálja. Ez a fejezet mindkét mechanizmust megvizsgálja, és szisztematikus összehasonlítást mutat be, amely bizonyítja a Multiple PDU Sessions fölényét a fizikai MI munkaterhelések számára.

Uplink Classifier (ULCL).

Az ULCL mechanizmus, amelyet a 3GPP TS 23.501 5.6.4. pont [3] definiál, egy elágazó UPF-et (UPF-CL, azaz osztályozó) iktat be a felhasználói síkú adatútvonalba a hozzáférési hálózat és a PDU session horgony UPF (PSA) között. Az SMF csomagosztályozási szabályokkal konfigurálja az UPF-CL-t – IP 5-ösökön, domain neveken vagy alkalmazás-azonosítókra alapuló csomagfelismerési szabályok –, amelyek meghatározzák, mely uplink csomagok kerülnek átirányításra a perem DN-t kiszolgáló helyi UPF-hez, és melyek haladnak to-

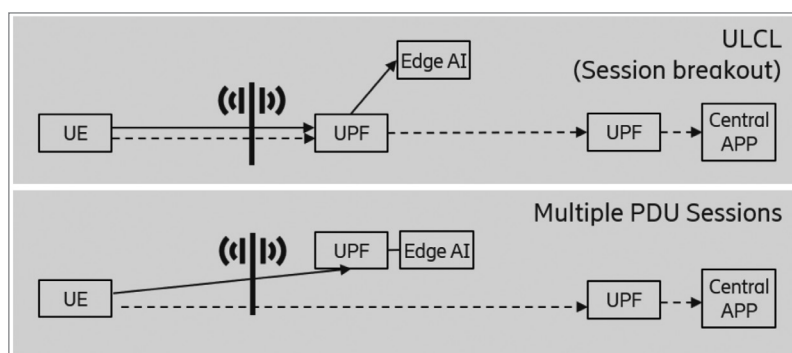
vább az eredeti útvonalon a PSA UPF felé a központi DN irányába. A helyi DN-ből érkező downlink forgalom az UPF-CL-en keresztül kerül visszainjektálásra a UE felé. Az egész mechanizmus egyetlen PDU session-on belül, a UE számára transzparens módon működik.

Multiple PDU Sessions.

A Multiple PDU Sessions megközelítés, amelyet a TS 23.503 [6] által definiált UE útvonal-választási szabályzat (URSP) szabályok és a TS 23.548 [4] peremszámítási fejlesztései tesznek lehetővé, külön PDU session-öket hoz létre a különböző adathálózatok felé irányuló forgalom számára. A UE URSP szabályokat kap (PCF-en vagy előkonfiguráción keresztül), amelyek alkalmazás-leírókat – OS alkalmazás-azonosító, IP-leíró, domain-leíró vagy DNN által azonosítva – képeznek le specifikus útvonal-választási leírókra, amelyek meghatározzák a DNN-t és session-paramétereiket. Minden eredményül kapott PDU session-nek saját UPF-je, IP-címe, QoS-profilja és session- és szolgáltatás-folytonossági (SSC) módja van. A forgalomelválasztás a UE protokollveremében történik, még a rádiós interfészre lépés előtt, hálózaton belüli osztályozás nélkül.

Összehasonlító elemzés.

Az alábbi szisztematikus összehasonlítás mindkét megközelítést hét, a fizikai MI peremszámítás szempontjából kritikus dimenzió mentén értékeli. Mindkét megközelítés architektúráját az 1. ábra illusztrálja.



1. ábra – Architektúra-összehasonlítás: az ULCL (Session Breakout) egy osztályozó UPF-et iktat be az adatútvonalba egyetlen PDU session-on belül; a Multiple PDU Sessions (Multiple PDU Session) a forgalmat a UE-nél választja szét független session-ökre, közvetlen útvonalakkal a perem és a felhő felé, alacsony késleltetést biztosítva.

1) Adatútvonal-hatékonyság és késleltetés.

Az ULCL architektúra eredendően egy további UPF-ugrást vezet be a felhasználói síkú adatútvonalba. Minden uplink csomag – függetlenül attól, hogy a peremre vagy a felhőbe irányul – át kell haladnia az UPF-CL-en osztályozás céljából. Ez a további feldolgozó elem késleltetést ad hozzá, amely minden csomaggal kumulálódik. Az UPF-továbbítási teljesítmény publikált mérései alapján [7] minden UPF-ugrás körülbelül 0,5–2 ms feldolgozási és továbbítási késleltetést jelent

a megvalósítástól (hardvergyorsított vs. szoftveralapú) és a terhelési viszonyoktól függően. Az architektúrától függően minden UPF további késleltetést vezet be, és bár ez nem feltétlenül jelent problémát a peremforgalom számára, felesleges késleltetést okozhat a központi helyszínek felé. Továbbá a kapacitástervezés nehezebb lesz, mivel a perem UPF-et úgy kell méretezni, hogy a helyi és a központ felé irányuló forgalmat is kiszolgálja. Ezzel szemben a Multiple PDU Sessions megközelítés közvetlen útvonalat biztosít minden forgalom

számára, dedikált UPF-kapacitásokkal. A perem PDU session UPF-je az egyetlen felhasználói síkú funkció az útvonalon, teljes egészében kiküszöbölve a hálózaton belüli osztályozási többletterhelést.

2) Titkosított forgalom kezelése.

Az UPF-CL csomagfelismerési szabályai – amelyek cél IP-címek, portszámok és esetleg domain nevek (SNIP) vizsgálatára támaszkodnak – egyre hatástalanabbá válnak a titkosítás terjedésével. Az IP-alapú szabályok működőképesekek maradnak, de nem tudnak különbséget tenni az azonos IP-n hosztolt szolgáltatások között (ami gyakori tartalomszolgáltató hálózatoknál és felhőtelepítésekénél). A Multiple PDU Sessions megközelítés teljes egészében megkerüli ezt a problémát. A URSP szabályok a UE-nél az alkalmazásréteg-leírók (OS alkalmazás-azonosító, kapcsolati képességek) alapján illesztik a forgalmat, még a csomagok kialakítása és titkosítása előtt. A UE operációs rendszere tudja, melyik alkalmazás generálja a forgalmat, és a megfelelő PDU sessionhez irányítja, bármilyen hálózaton belüli vizsgálat nélkül. Ez a kialakítás eredendően jövőbiztos a fejlődő titkosítási szabványokkal szemben.

3) Konfigurációs komplexitás és üzemeltetési skálázhatóság.

Az ULCL megköveteli, hogy az SMF UE-nként és szolgáltatásonként konfigurálja a csomagfelismerési szabályokat az UPF-CL-en. Amikor egy UE csatlakozik egy peremtelepítés által kiszolgált cellához, az SMF-nek be kell illesztenie az UPF-CL-t az adatútvonalba, és az adott peremhelyszínen elérhető szolgáltatásoknak megfelelő osztályozási szabályokat kell létrehozni. Az üzemeltetési komplexitás $O(N_{\text{felhasználók}} \times N_{\text{szolgáltatások}} \times N_{\text{peremtelephelyek}})$ arányban skálázódik, mivel minden kombináció potenciálisan egyedi szabálykonfigurációt igényel, különösen amikor a szolgáltatások átfedő IP-tartományokkal rendelkeznek, vagy amikor a peremszolgáltatási portfólió telephelyenként változik. A Multiple PDU Sessions esetében a URSP szabályok előfizetői osztályonként kerülnek kiosztásra. Új peremszolgáltatás hozzáadásához DNN definiálása és URSP sablonok frissítése szükséges, nem az összes UPF-CL példány osztályozási szabályainak módosítása.

4) Életciklus-csatolás és hibaizoláció.

Az ULCL architektúrában az UPF-CL és a PSA UPF ugyanazon PDU session-on belül létezik. Közös session-kontextust osztanak meg, amelyet egyetlen SMF-példány kezel. Ez a csatolás azt jelenti, hogy az UPF-CL meghibásodása vagy újraindítása – legyen az szoftverfrissítés, skálázási esemény vagy hiba – megzavarja a teljes PDU session-t, egyidejűleg érint-

ve mind a perem-, mind a felhő felé irányuló forgalmat. Hasonlóképpen, az osztályozási szabályok módosítása (peremszolgáltatások hozzáadása vagy eltávolítása) N4 session-módosítási eljárásokat igényel, amelyek átmenetileg befolyásolják a továbbítási állapotot. A Multiple PDU Sessions esetében minden session teljesen független életciklussal rendelkezik. A perem PDU session felszabadítható és újra létrehozható (ahogy az SSC Mode 2 átmenetek során történik) a felhő PDU session bármilyen befolyásolása nélkül. A fizikai MI számára ez az izoláció kritikus – egy robot felhőalapú flottamenedzsment-kapcsolatát nem szabad megzavarnia a peremszámítási session-átmeneteknek.

5) QoS-differenciálás.

A fizikai MI munkaterhelések több, alapvetően különböző QoS-követelményekkel rendelkező forgalmi folyamot foglalnak magukban: valós idejű videó az érzékeléshez (alacsony késleltetés, garantált sávszélesség), pozicionálási lekérdezések (alacsony késleltetés, alacsony sávszélesség) és felhőszinkronizáció (best effort, magas sávszélesség-tolerancia). Mind az ULCL, mind a Multiple PDU Sessions szabványos 5QI értékeken keresztül biztosítja a QoS-t, azonban az ULCL esetében az elágaztatott folyamatokhoz további, folyamatonkénti QoS-szabály konfiguráció szükséges, ami tovább növeli a fent tárgyalt üzemeltetési komplexitást. A Multiple PDU Sessions natív QoS-differenciálást biztosít magán az architektúrán keresztül. Minden PDU session saját alapértelmezett QoS-folyammal (5QI) és engedélyezett QoS-paraméterekkel jön létre: a perem MI session használhatja az 5QI=7-et (valós idejű videó, 100 ms PDB, 10^{-3} PER), míg a WiFi hotspot session az 5QI=9-et (best effort).

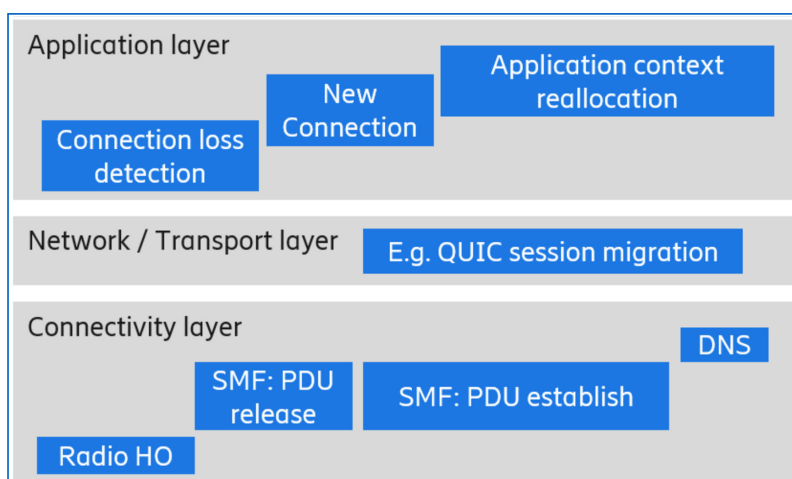
6) Mobilitási hatás.

Amikor egy fizikai MI ágens cellák között mozog – potenciálisan peremtelepítés-határokat átlépve – az ULCL architektúra jelentős újrakonfigurálási kihívásokkal néz szembe. A teljes ULCL lánc (UPF-CL beiktatási pont, osztályozási szabályok, helyi UPF-kiválasztás) a UE hálózaton belüli topológiai pozíciójához kötődik. Egy peremtelepítés-határt átlépő cellaváltás megköveteli az SMF-től, hogy: (a) távolítsa el a jelenlegi UPF-CL-t és helyi UPF-et az adatútvonalból, (b) iktasson be új UPF-CL-t a célperemtelepítésnek megfelelő helyre, (c) konfiguráljon új osztályozási szabályokat, és (d) potenciálisan frissítse a PSA UPF útválasztását. Ezek az N4 session-módosítási eljárások több szignalizációs cserét igényelnek az SMF, a régi UPF-CL, az új UPF-CL és a helyi UPF-ek között – mindezt egyetlen PDU session-on belül, amelynek a nem peremforgalom számára végig fenn kell tartania a folytonosságot. A Multiple PDU Sessions esetében a mobilitáskezelés természetes mó-

don dekompozálódik. Minden SSC mód használható a követelmények alapján, pl. az SSC mode 1 ajánlható, ha az átadások túl gyakoriak, az SSC mode 2 (amelyet a Multiple PDU Sessions-höz javasolunk) optimalizálható a kimaradás minimalizálására az alacsony komplexitás megtartása mellett, és az SSC mode 3 is implementálható szükség esetén. A rádiós hozzáférési hálózat átadási eljárása és az alkalmazási kontextus újraelosztási eljárása azonos marad, függetlenül a forgalomirányítási mechanizmustól – csak a maghálózati szignalizáció különbözik.

B. Átadási réteg-együttműködés a session-kimaradás minimalizálásáért

Miután megállapítottuk, hogy a Multiple PDU Sessions az előnyben részesített forgalomirányítási mechanizmus, egy kritikus kihívás marad: a peremtelepítés-átmenet során a PDU session felszabadul és újra létrejön, ami konnektivitási megszakítást okoz. Ez a fejezet egy háromrétegű együttműködési modellt mutat be, amely demonstrálja, hogy a protokollvermen átívelő koordinált cselekvéssel az észlelt kimaradás több másodpercről egy másodperc alá csökkenthető. A modellt a 2. ábra illusztrálja.



2. ábra – Háromrétegű átadás-együttműködési modell, amely párhuzamos végrehajtást mutat a konnektivitási (SSC módok), szállítási (QUIC migráció) és alkalmazási (kontextus-áthelyezés) rétegeken keresztül. Szekvenciális végrehajtás esetén ~4,6 s kimaradás; párhuzamosított végrehajtás esetén <1 s érhető el. Hálózat által biztosított átadás-előrejelzés korai kontextus-újraelosztással és «make before break» mechanizmusokkal minden rétegen zökkenőmentes átadást eredményezhet.

Konnektivitási réteg.

A perem session-folytonosság alapja az egyes PDU session-ökhöz rendelt SSC mód. A központi/felhő session-ök esetében az SSC Mode 1 biztosítja, hogy a horgony UPF változatlan marad a UE mobilitásától függetlenül – ezek a session-ök nem tapasztalnak megszakítást peremátmenetek során. A peremre irányuló session-ök esetében az SSC Mode 2 (a TS 23.501 5.6.9.2. pont [3] definiálja) meghatározza, hogy amikor a hálózat megállapítja, hogy a jelenlegi UPF már nem tudja hatékonyan kiszolgálni a UE-t (pl. a UE elhagyta a peremtelepítés lefedettségi területét), a PDU session felszabadul, és a UE utasítást kap új PDU session létrehozására. Azonban ez a módszer kiterjeszthető az új session szükségességének korai jelzésével, önkényesen SSC mode 3 (make before break) mechanizmust implementálva. Az SSC mode 2 a 3GPP eljárás-időzítési elemzés alapján (TS 23.502 [8]) körülbelül 200–500 ms-t igényel a hálózati terheléstől és a megvalósítás hatékonyságától függően, ami a legtöbb esetben elhanyagolható (az alkalmazásrétegbeli kontextus-áthelyezés általában nagyobb kihívás). Azonban ez a 200–500 ms tovább csökkenthető «make before break» mechanizmusokkal és átadás-előrejelzésekkel, amely előre-

jelzést csak a hálózat tudja biztosítani az alkalmazás számára.

Hálózati/szállítási réteg.

A szállítási protokoll döntő szerepet játszik a konnektivitási réteg zavarának elfedésében az alkalmazás előtt. A QUIC (RFC 9000 [5]) natív kapcsolat-migrációs képességet biztosít: egy QUIC kapcsolatot kapcsolat-azonosító (Connection ID) azonosít az IP 4-es helyett, lehetővé téve a kapcsolat túlélését IP-cím változás esetén. Amikor a UE új IP-címet kap az újonnan létrehozott perem PDU sessionból, migrálhatja a meglévő QUIC kapcsolatot az új útvonalra úgy, hogy a létrehozott kapcsolat-azonosítóval küld csomagokat az új címről. A távoli végpont (az új perem alkalmazáserver-példány) útvonal-validálással (körülbelül 1 RTT) ellenőrzi az útvonalat, és új kézfogás nélkül folytatja az adatátvitelt. Ez «make-before-break» képességet jelent a szállítási rétegen: ha a UE rövid ideig fenntarthatja mind a régi, mind az új PDU session-t (az SSC Mode 2 átmeneti időszakban, ahol mindkettő pillanatnyilag együtt létezhet, SSC Mode 3-má alakulva), az útvonal-validálás az új session-ön befejeződhet a régi session teljes felszabadítása előtt.

Ezzel szemben a TCP-alapú alkalmazások az újra-létrehozás teljes költségével szembesülnek: 3-utas kézfogás (1 RTT), amelyet TLS 1.3 kézfogás követ (1 további RTT, vagy 0 a 0-RTT folytatással), összesen 50–150 ms az új szerver felé történő RTT-től függően. Továbbá a TCP kapcsolatok eredendően az IP 4-eshez kötöttek; egy cím változás visszavonhatatlanul megszünteti a kapcsolatot.

A többutas kiterjesztések – MP-TCP (RFC 8684 [9]) és a kialakulóban lévő MP-QUIC – még robusztusabb megközelítést kínálnak: a szállítási kapcsolat egyidejűleg fenntartja az alfolyamokat mind a régi, mind az új útvonalon az átmenet során. Az adatszolgáltatás bármelyik elérhető alfolyamon folytatódik, zökkenőmentes migrációt biztosítva a kettős útvonal-állapot fenntartásának költségén az átdatási ablakban.

Alkalmazási réteg.

Az alkalmazási rétegnek az állapot-migrációt kell kezelnie: a forrás peremtelepítésen lévő perem-alkalmazáspéldány session-specifikus állapotot tart (MI modell következtetési kontextus, követési állapot, puffert szensor-adatok), amelynek elérhetőnek kell lennie a cél peremtelepítésen. Az alkalmazási kontextus áthelyezés (ACR), ahogy a TS 23.548 [4] peremszámítási keretrendszere leírja, lehetővé teszi ezt a migrációt. A kritikus felismerés az időzítés: ha a peremplatform előzetes értesítést kap egy közelgő UE mobilitási eseményről (NEF feliratkozás UE mobilitási analitikára vagy AMF esemény-kitettségen keresztül), proaktívan megkezdheti a kontextus-migrációt, még a tényleges átdatás előtt. Kiszámítható mobilitási mintázatú fizikai MI ágensek esetében (meghatározott járőrútvonalat követő robot, térképezett úton haladó jármű) a következő peremtelepítés nagy biztonsággal meghatározható, lehetővé téve az alkalmazási állapot előtelepítését a céltelepítésen. A kontextus-migrációs késleltetés erősen függ az állapot méretétől: egy könnyű következtetési session (modellsúlyok előre telepítve, csak követési állapot migrálandó) mindössze 50–200 ms-t igényelhet, míg egy teljes alkalmazási kontextus-migráció 1–4 másodpercet vehet igénybe komplex állapotkezelő alkalmazások esetében.

Párhuzamosítás

A kulcs a kimaradás minimalizálásához. A kritikus architektúrális felismerés az, hogy ennek a három rétegnek nem kell szekvenciálisan végrehajtódnia. Naiv szekvenciális végrehajtás esetén (legrosszabb eset):

- Rádiós átdatás: ~50 ms
- SSC Mode 2 PDU session újra-létrehozás: ~200 ms
- DNS-feloldás az új peremtelepítéshez: ~100 ms
- TCP/TLS újra-létrehozás: ~100 ms

- Alkalmazási kontextus áthelyezés: ~4000 ms (nagy állapot)
- Összesen: ~4,6 másodperc

Megfelelő párhuzamosítással, proaktív mobilitás-előrejelzés által lehetővé téve:

- Az alkalmazási kontextus előzetes migrációja megkezdődik a rádiós átdatás előtt (kitettségen keresztüli mobilitás-előrejelzés által kiváltva)
- Az DNS-feloldás a cél peremtelepítéshez előre megtörténik az előrejelzett pálya alapján
- A QUIC kapcsolat-migráció azonnal megtörténik az új PDU session létrehozásakor (1 RTT útvonal-validálás)
- A rádiós átdatás és PDU session-létrehozás végrehajtódik, miközben a kontextus-migráció a háttérben befejeződik

A párhuzamosított idősor átfedi a domináns késleltetési hozzájárulást (kontextus-áthelyezés) a megelőző lépésekkel, csökkentve az észlelt kimaradást – azt az időt, amely alatt az alkalmazás nem tud adatot küldeni vagy fogadni a perem útvonalon – a PDU session újra-létrehozási idejére plusz a QUIC útvonal-validálásra: körülbelül $200\text{ ms} + 50\text{ ms} = 250\text{ ms}$ egy jól előkészített forgatókönyvben, és potenciálisan 100 ms alatt, ha rövid kettős konnektivitás (make-before-break session-szinten) érhető el a régi és új PDU session-élettartamok átfedésével.

III. Network Exposure és helymeghatározási szolgáltatások

A. Exposure keretrendszer a fizikai MI számára

A hálózat peremén működő fizikai MI ágenseknek többre van szükségük pusztán konnektivitásnál – hálózati kontextusra van szükségük ahhoz, hogy megalapozott döntéseket hozhassanak működésükről. Egy robot, amely peremtelepítés-határhoz közeledik, profitál abból, ha a közelgő átdatásról annak bekövetkezése előtt értesül. Egy drón, amely útvonalát módosítja, megelőzően kérhet magasabb QoS-t zsúfolt cellába lépéskor. Egy autonóm jármű, amely közeli járművekkel koordinál, nagyobb pontossággal és alacsonyabb késleltetéssel kell ismerje azok pozícióját, mint amit a jármű-jármű kommunikáció önmagában biztosítani tud.

A 3GPP Network Exposure Function (NEF), amelyet a TS 29.522 [10] specifikál, szabványosított API-keretrendszerrel biztosít, amelyen keresztül külső alkalmazásfunkciók (AF-ek) hozzáférhetnek a hálózati képességekhez és feliratkozhatnak hálózati eseményekre. Ugyanakkor várható, hogy ez az architektúra egy rugalmasabb, MI-

MI kommunikációt lehetővé tevő exposure-architektúra felé fejlődik a 6G-ben. Peremszámítási forgatókönyvek esetében a NEF a következő, fizikai MI szempontjából kritikus képességeket teszi lehetővé:

UE mobilitási esemény-feliratkozás.

Egy AF (a perem alkalmazásplatform) mobilitási eseményekre iratkozik fel adott UE-kre vonatkozóan az Nnef_EventExposure szolgáltatáson keresztül. A hálózat értesíti az AF-et, amikor egy UE belép vagy elhagy egy meghatározott földrajzi területet, cellát vált, vagy mobilitási analitika alapján cellaváltás várható. Ez a proaktív értesítés váltja ki a II.B fejezetben leírt alkalmazásrétegbeli kontextus előzetes migrációját – enélkül az alkalmazás csak az átadás után tud reagálni, kizárva a kimaradást minimalizáló párhuzamosítást.

Helymeghatározási jelentés.

Az AF periodikus vagy eseményvezérelt helymeghatározási jelentéseket kér az érintett UE-k számára. Egy fizikai MI flottamenedzsment alkalmazás számára ez folyamatos helyzetudatosságot biztosít minden ágens pozíciójáról anélkül, hogy minden ágensnek önjelentést kellene tennie (ami rádiós erőforrásokat fogyaszt és késleltetést ad hozzá).

QoS-monitorozás és értesítés.

Az AF értesítésekre iratkozik fel, amikor egy adott UE QoS-e meghatározott küszöbértékek alá csökken. Ez lehetővé teszi a perem-alkalmazás adaptációját: ha egy robot videó uplink-jének garantált sávszélessége nem tartó fenn (cellaszűfoltosság vagy lefedettség perem miatt), az alkalmazás proaktívan csökkentheti a videófelbontást, könnyebb detekciós modellre válthat, vagy csökkentheti a robot sebességét a biztonságos működés fenntartásához a rendelkezésre álló sávszélességen belül.

Analitika-kitettség.

A Hálózati Adatanalitikai Funkció (NWDAF) analitikái, amelyeket a NEF-en keresztül tesznek elérhetővé, a hálózati viselkedés előrejelzéseit biztosítják: várható UE-pálya, célcellák terhelési előrejelzései és anomália-detekció. Ezek az előrejelzési képességek különösen értékesek a fizikai MI mozgástervezéséhez, ahol a tervezett útvonal mentén várható hálózati feltételek ismerete lehetővé teszi az ágens számára, hogy útvonalát a konnektivitási minőség fenntartása érdekében módosítsa.

B. Hálózati helymeghatározás GMLC-n és LMF-en keresztül

A pozicionálás alapvető képesség a fizikai MI számára. Bár az autonóm ágensek jellemzően fedélzeti loka-

lizációs rendszereket hordoznak (GNSS, IMU, vizuális odometria), ezeknek a rendszereknek ismert meghibásodási módjaik vannak: a GNSS beltérben nem elérhető, az IMU sodródást halmaz fel, és a vizuális odometria jellemzőszegény környezetben hibázik. A hálózatalapú pozicionálás független, infrastruktúra-alapú pozícióforrást biztosít, amely képes kiegészíteni és keresztvalidálni a fedélzeti szenzorokat.

Az 5G pozicionálási architektúra (TS 23.273 [11]) két kulcsfunkciót tartalmaz:

Helymeghatározás-kezelő funkció (LMF).

Az LMF a gNB-n és UE-n keresztül gyűjtött rádiós mérésekből számítja ki a UE pozícióját. Többféle pozicionálási módszer támogatott, mindegyik különböző pontossági és telepítési jellemzőkkel:

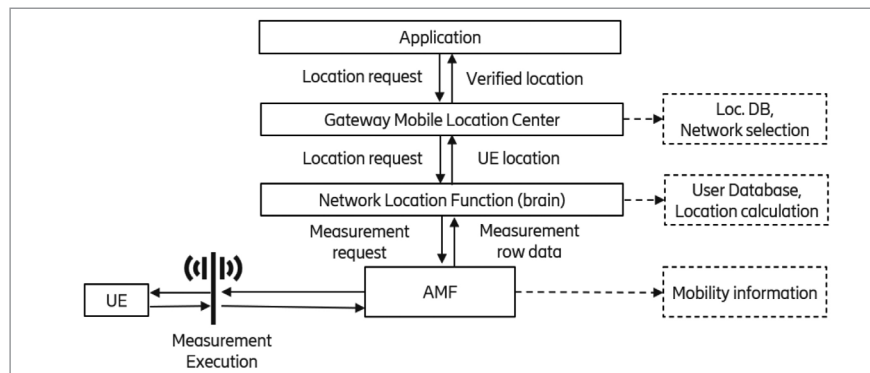
- DL-TDOA (Downlink érkezési időkülönbség): A UE méri az időkülönbségeket a több gNB-ről érkező pozicionálási referenciajel (PRS) között. FR2 (mmWave) telepítéseknél a széles sávszélesség révén méteres alatti pontosság érhető el sűrű városi környezetben.
- Multi-RTT (Többszörös oda-vissza idő): A UE és több gNB méréseit kombinálja a pozíció trilaterációval történő számításához. FR1-gyel 1–3 m pontosságot biztosít, és FR2-vel jelentősen javul.
- UL-AoA (Uplink érkezési szög): A gNB antennasor-feldolgozással becsüli a UE irányát. Leghatékonyabb FR2-ben telepített masszív MIMO antennasorokkal.
- Továbbfejlesztett Cell-ID (E-CID): A szolgáltató cella azonosítóját kombinálja időzítés-előleg és jelmérésekkel durva pozicionáláshoz (10–50 m), minimális infrastruktúra-igénnyel.

A Release 17 és Release 18 pozicionálási fejlesztéseket vezet be, beleértve az oldalsáv-pozicionálást (eszköz-eszköz távolságmérés), vivőfázis-méréseket centiméteres pontossággal, és csökkentett késleltetésű pozicionálást időkritikus alkalmazásokhoz [12].

Gateway Mobile Location Centre (GMLC).

A GMLC szolgál a helymeghatározási információk külső elérési pontjaként. Kezeli a magánélet-védelmi ellenőrzést (biztosítva, hogy a kérelmező entitás jogosult a UE pozíciójának lekérdezésére), koordinál az LMF-fel a pozíciószámításhoz, és szabványosított formátumban szolgáltatja az eredményt. A külső AF-ek a NEF Nnef_EventExposure szolgáltatásán keresztül érik el a helymeghatározási szolgáltatásokat, amely belső szolgáltatásalapú interfészekon keresztül közvetíti a kéréseket a GMLC felé.

Az architektúrát a 3. ábra illusztrálja.



3. ábra – Hálózati kiterjesztési és helymeghatározási architektúra. A UE rádiós méréseket biztosít LPP/ NRPPa protokollokon keresztül az LMF-nek, amely kiszámítja a pozíciót. A GMLC a NEF-en keresztül teszi elérhetővé a helymeghatározást külső AF-ek számára. A 4 lépéses folyamat: (1) AF feliratkozik a NEF-en keresztül, (2) NEF helymeghatározást kér a GMLC-től, (3) GMLC kiváltja az LMF számítását, (4) Pozíció kézbesítése az AF-nek

Relevancia a fizikai MI számára.

A NEF esemény-kiterjesztés és GMLC/LMF pozicionálás kombinációja két különálló használati esetet tesz lehetővé a fizikai MI számára:

A robot lekérdezi saját hálózathoz származtatott pozícióját a fedélzeti GNSS/IMU becslések keresztvalidálásához. Amikor az eltérések meghaladnak egy küszöbértéket (ami GNSS többutas terjedést vagy IMU-sodródást jelez), a robot megbízhat a hálózati pozícióban, vagy biztonságos állapotba léphet a feloldásig. Ez különösen értékes félbeltéri környezetekben (rakodódokkok, parkolóházak), ahol a GNSS megbízhatósága korlátozott.

Környezettudatosság. Engedélyezett flottamenedzsment API-kon keresztül a perem-alkalmazás lekérdezheti más hálózathoz csatlakoztatott entitások pozícióját a robot közelében – más robotok, UE-t hordozó munkavállalók vagy járművek –, hálózathoz származtatott helyzettudatossági réteget biztosítva, amely kiegészíti a fedélzeti érzékelést (amelyet a szenzor hatótávolsága és takarás korlátoz).

A pozicionálási pontosság jelenlegi telepítésekben körülbelül 3–5 métert ér el kültéren FR1-gyel, 1 méter alá javulva FR2 telepítésekkel és Release 17 fejlesztésekkel [13]. Sok fizikai MI alkalmazás számára (raktár-navigáció, campus-járőrözés, városi kézbesítés) ez a pontosság – a megoldás elérhetőségével és infrastruktúra-függetlenségével kombinálva – értékes kiegészítést jelent a fedélzeti szenzorokhoz.

IV. Validáció: Autonóm robotkutatya perem MI-vel

A. Demonstráció felépítése

A Multiple PDU Sessions architektúra fizikai MI peremszámításhoz történő validálásához egy proof-of-concept demonstrációt valósítottunk meg, amely autonóm

négylábú robotot alkalmaz 5G konnektivitással és perem-alapú MI-következtetéssel.

A platform egy Unitree Go2 négylábú robotot foglal magában, amely előre néző kamerával, IMU-val és 5G-képes kommunikációs modullal van felszerelve. A robot autonóm módon működik bel-/kültéri környezetben, élő 1080p videót streamelve 30 képkocka/másodperc sebességgel egy perem MI-szerverre, amely az operátori peremtelepítésen található. A peremszerver valós idejű objektumfelismerést végez YOLO26 modellel [14], amely személyek, székek és akadályok (forgalmi kúpok) felismerésére van betanítva a robot környezetében.

Egy biztonságkritikus funkció demonstrálja a valós idejű követelményeket: automatikus megállási mechanizmus lép működésbe, amikor egy detektált akadály befoglaló keretének területe meghalad egy előre meghatározott területi küszöbértéket (59 000 px²), veszélyes közelséget jelezve. Ez a funkció megköveteli, hogy a teljes érzékelési hurok – képkocka-rögzítés, hálózati átvitel, MI-következtetés és vezérlőparancs visszaküldése – időben befejeződjön a biztonságos reakció érdekében.

Egy telemetriai műszerfal biztosítja a rendszerteljesítmény valós idejű monitorozását: uplink/downlink sávszélesség, vezérlési hurok késleltetése, robot sebessége, detekciós eredmények és hálózati paraméterek. Ez a műszerezettség lehetővé teszi az architektúra teljesítményének pontos jellemzését működési körülmények között.

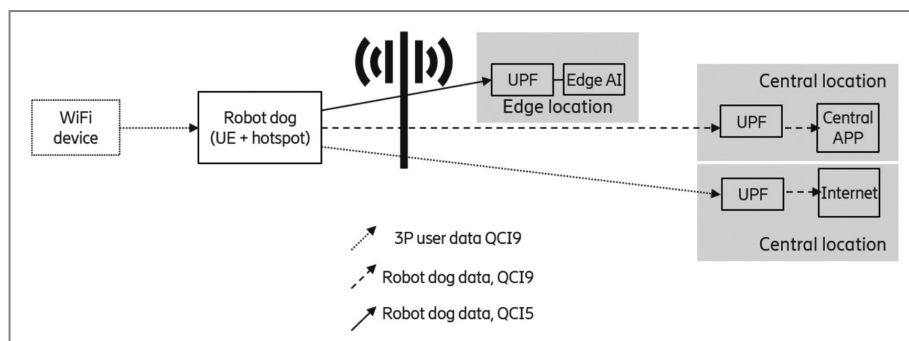
B. Architektúra-leképezés Multiple PDU Sessions-re

A demonstráció három egyidejű PDU session-t alkalmaz, mindegyik egy különálló fizikai MI funkciót szolgál ki megfelelő QoS-sel és session-folytonossági jellemzőkkel:

1. Peremhálózati PDU session – Perem MI-következtetés (DNN=edge-ai, SSC Mode 2, 5QI=7). Ez a session hordozza az elsődleges érzékelési hurkot: 1080p videó felkapcsolás a robot kamerájától a perem MI-szerverhez, és detekciós eredmények/vezérlőparancsok a lekapcsoláson. Az 5QI=7 garantált sávszélességű, alacsony késleltetésű erőforrástípust határoz meg 100 ms-os csomagkésleltetési költségvetéssel (PDB) és 10^{-3} -os csomaghibaaránnal – ez megfelelő a valós idejű videóhoz megbízhatóság követelményekkel. Az SSC Mode 2 biztosítja, hogy amikor a robot elhagyja a jelenlegi peremtelepítést, ez a session a legközelebbi elérhető peremre migrál, fenntartva az alacsony késleltetésű útvonalat az MI-következtetési erőforrásokhoz. A következtetési hurok cél végponttól végpontig késleltetése 33 ms alatt van.

2. PDU session más felhasználók számára – WiFi hotspot (DNN=hotspot, SSC Mode 1, 5QI=9). Ez a session internet-hozzáférést biztosít a helyi WiFi hotspotokhoz csatlakozó felhasználók számára. Ugyanakkor még ez az 5QI is eltérően állítható be specifikus használati esetekhez.

3. Robot admin PDU session – Felhőszolgáltatások (DNN=internet, SSC Mode 1, 5QI=9). Ez a session kezeli a nem késleltetés-kritikus felhő-konnektivitást: flottamenedzsment parancsok, MI-modell frissítések, telemetria-feltöltés offline elemzéshez, és hozzáférés felhőalapú következtetési szolgáltatásokhoz (pl. nagy nyelvi modellek komplex döntéshozatalhoz). Megjegyzendő, hogy a felhasználói forgalom (WiFi hotspot) és a vezérlési forgalom teljesen elkülönül, különböző horgony UPF-et használva, biztosítva az adatszuverenitást – ami ULCL használatával nem lenne lehetséges. Az architektúrát a 4. ábra illusztrálja.



4. ábra – A robotkutyá-demonstráció architektúrája, amely három független PDU session-t mutat differenciált DNN-nel, SSC móddal és 5QI-vel. Az 1. session (folytonos) késleltetés-kritikus videó szállít a perem MI-hez <33 ms következtetéssel; a 2. session (pontozott) WiFi hálózatot biztosít felhasználóknak; a 3. session (szaggatott) felhőszolgáltatásokhoz csatlakozik.

A demonstrációs architektúra négy olyan tulajdonságot mutat be, amelyet az ULCL megközelítés nem tud biztosítani:

Natív QoS-differenciálás: minden folyam pontosan a követelményeinek megfelelő QoS-profil kapja folyamonkénti szabálykonfiguráció nélkül. A videófolyam garantált sávszélességet kap (5QI=7), a WiFi hotspot (5QI=9), és a felhőforgalom best-effort szolgáltatást kap (5QI=9). ULCL esetében mindhárom folyam egyetlen PDU session-on belül létezne, további QoS-folyam létrehozási eljárásokat igényelve a differenciáláshoz – eljárásokat, amelyek rosszul skálázódnak a szolgáltatások számával.

Szelektív mobilitási hatás: csak az 1. session-t (perem MI) érintik a peremtelepítés-átmenetek. Amikor a robot új peremlefedetési területre mozog, a 2. és 3. session zavartalanul folytatódik. ULCL esetében egyetlen PDU session szolgálja ki az összes forgalmat; az UPF-CL lánc peremmobilitás miatti újrakonfigurálása potenciálisan minden folyamatot megzavar, beleértve a stabil felhő-konnektivitást.

Izolált kapcsolatok és adathálózatok: a robot egyidejűleg három különböző adathálózathoz fér hozzá (perem MI, pozicionálás, internet) három különböző kiszolgáló UPF-fel, amelyek optimálisan vannak elhelyezve a topológiában. Az ULCL egyetlen PDU sessionból tud forgalmat elágaztatni egy helyi DN felé – nem tud egyidejűleg különböző forgalmi részhalmazokat több különböző helyi szolgáltatáshoz irányítani különböző topológiai elhelyezéssel.

Hibaizoláció: ha a perem MI-szerver kimaradást tapasztal vagy a perem UPF meghibásodik, csak az 1. session-t érinti.

C. Eredmények és megfigyelések

A demonstráció validálja, hogy a Multiple PDU Sessions architektúra megfelel a fizikai MI valós idejű követelményeinek:

Következtetési késleltetés.

Az objektumfelismerési késleltetés – a képkocka-átvi-

teltől a detekciós eredmény fogadásáig mérve – következetesen 33 ms alatt marad végponttól végpontig. Ez megerősíti, hogy a dedikált perem PDU session által biztosított közvetlen adatútvonal (UE → gNB → UPF-Edge → EAS) eléri a 30 fps-es érzékelési hurokhoz szükséges késleltetési költségvetést. A közbenső osztályozó UPF hiánya hozzájárul ehhez az eredményhez – az ULCL által bevezetett további 1–4 ms a teljes 33 ms-os költségvetés jelentős hányadát képviseli.

Detekciós teljesítmény.

A YOLO26 modell a peremen megbízható detekciót ér el a célkategóriákban: személyeket 0,71–1,00 konfidencia-pontszámmal, székeket 0,45–0,77-tel, és forgalmi kúpokat következetes megbízhatósággal detektál. Ezek a konfidenciaszintek elegendőek az autonóm navigációs döntésekhez, és a valós idejű feldolgozás biztosítja, hogy a detekciós eredmények időben igazodnak a robot aktuális pozíciójához és környezeti állapotához.

Biztonsági funkció validációja.

Az automatikus megállási mechanizmus hatékonyan aktiválódik, amikor egy akadály befoglaló keretének területe meghaladja az beállított küszöbértéket, demonstrálva, hogy a perem-következtetési késleltetés kellően alacsony a biztonságkritikus reaktív viselkedésekhez. A robot következetesen megáll a küszöbérték-átlépés egyetlen érzékelési ciklusán belül, megerősítve, hogy az architektúra késleltetési jellemzői támogatják a fizikai biztonsági követelményeket.

Hálózati teljesítmény.

A telemetriai monitorozás stabil uplink sávszélességet a videostreameléshez és következetesen alacsony vezérlési késleltetést mutat a teljes demonstrációs időszakban. A független PDU session-ök nem mutatnak kereszt-interferenciát: az 1. session forgalmi mintázatai (löketszerű videó) nem befolyásolják a 2. session-t (periodikus pozicionálási lekérdezések) vagy a 3. session-t (alkalmi felhőszinkronizáció), megerősítve a Multiple PDU Sessions architektúra izolációs tulajdonságait.

V. Következtetések

Ez a cikk a forgalomirányítási megközelítések összehasonlító elemzését mutatta be a fizikai MI számára a mobilhálózat peremén, demonstrálva a Multiple PDU Sessions architektúrális fölényét az ULCL-lel szemben hét kritikus dimenzió mentén. Az elemzés feltárja, hogy az ULCL alapvető kialakítása – az osztályozási intelligencia adatútvonalba helyezése – eredendő korlátokat teremt a késleltetés (további UPF-ugrás), titkosított forgalom kezelése (hatástalan osztályozás), üzemeltetési komplexitás (UE-nkénti, folyamankénti szabályok), hibaizolá-

ció (csatolt életciklus), adatszuverenitás (felhasználói és üzemeltetési adatok feldolgozása ugyanazon UPF-en), QoS-differenciálás (egyetlen session korlátja), mobilitáskezelés (komplex lánc-újrakonfigurálás) és alkalmazás-adaptálhatóság (UE bevonásának hiánya) terén. A Multiple PDU Sessions ezeket a korlátokat alapvetően más architektúrális filozófiával oldja meg: forgalomelválasztás a forrásnál (UE) a hálózatbeli osztályozás helyett.

A háromrétegű átvadás-együttműködési modell demonstrálja, hogy a session-folytonosság nem kizárólag hálózati kérdés. Mindhárom SSC mód megfelelő alkalmazásával optimalizálni lehet a session-folytonosság és a komplexitás közötti egyensúlyt. A proaktív alkalmazási kontextusáthelyezés (amelyet a NEF mobilitási esemény-exposure tesz lehetővé) lehetővé teszi a domináns késleltetési komponens párhuzamos végrehajtását a megelőző lépésekkel. Az 1 másodperc alatti észlelt kimaradás – és potenciálisan 250 ms alatti jól előkészített forgatókönyvekben – elfogadható azon fizikai MI alkalmazások számára, amelyek egy-két érzékelési ciklust képesek pufferelni az átmenet során.

A GMLC/LMF-en keresztüli pozicionálás biztosítja a térbeli tudatossági képességeket, amelyek megkülönböztetik a fizikai MI-t a hagyományos mobil szélessávú szolgáltatásoktól. A fedélzeti lokalizáció keresztvalidálása, más hálózathoz csatlakoztatott entitások érzékelése és az előrejelzett mobilitási eseményekre való proaktív reagálás képessége átalakítja a peremszámítást: a passzív számítás-kiszervezési modellből aktív, hálózat-tudatos számítási paradigmává válik.

Az autonóm robotkutya-demonstráció validálja ezeket az architektúrális elveket konkrét eredményekkel: 33 ms alatti végponttól végpontig következtetési késleltetés valós idejű objektumfelismeréshez, tiszta QoS-differenciálás három független PDU session-ön keresztül, és teljes hibaizoláció a peremkritikus és felhőtolerens konnektivitási útvonalak között.

Hivatkozások

- [1] S. Levine, „Physical Intelligence and the Future of Robotics,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 2150–2160, Apr. 2023.
- [2] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, and K. B. Letaief, „A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2322–2358, Fourth Quarter 2017.
- [3] 3GPP, „System Architecture for the 5G System (5GS); Stage 2,” TS 23.501, v18.5.0, Mar. 2024.
- [4] 3GPP, „5G System Enhancements for Edge Computing; Stage 2,” TS 23.548, v18.4.0, Mar. 2024.

- [5] J. Iyengar and M. Thomson, „QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport,” *IETF, RFC 9000*, May 2021.
- [6] 3GPP, „Policy and Charging Control Framework for the 5G System (5GS); Stage 2,” TS 23.503, v18.5.0, Mar. 2024.
- [7] P. Emmerich, S. Gallenmüller, D. Raumer, F. Wohlfart, and G. Carle, „MoonGen: A Scriptable High-Speed Packet Generator,” in *Proc. IMC*, Tokyo, Japan, Oct. 2015, pp. 275–287.
- [8] 3GPP, „Procedures for the 5G System (5GS); Stage 2,” TS 23.502, v18.5.0, Mar. 2024.
- [9] A. Ford, C. Raiciu, M. Handley, O. Bonaventure, and C. Paasch, „TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses,” *IETF, RFC 8684*, Mar. 2020.
- [10] 3GPP, „5G System; Network Exposure Function Northbound APIs; Stage 3,” TS 29.522, v18.5.0, Mar. 2024.
- [11] 3GPP, „5G System (5GS) Location Services (LCS); Stage 2,” TS 23.273, v18.4.0, Mar. 2024.
- [12] 3GPP, „NR; NR Positioning Protocol (NRPPa),” TS 38.455, v18.2.0, Mar. 2024.
- [13] R. Keating, M. Säily, J. Hulkkonen, and J. Karjalainen, „Overview of Positioning in 5G New Radio,” in *Proc. IEEE ISWCS*, Oulu, Finland, Aug. 2019, pp. 1–5.
- [14] G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, „Ultralytics YOLOv8,” 2023. [Online]. Available: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- [15] Ericsson, „Edge Computing and Deployment Strategies for Communication Service Providers,” *Ericsson Technology Review*, vol. 2021, no. 6, pp. 2–15, Jun. 2021.
- [16] 5GAA, „Edge Computing for Advanced Automotive Communications,” *5GAA White Paper*, Dec. 2022.
- [17] P. Porambage, J. Okwuibe, M. Liyanage, M. Ylianttila, and T. Taleb, „Survey on Multi-Access Edge Computing for Internet of Things Realization,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2961–2991, Fourth Quarter 2018.
- [18] T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, „On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1657–1681, Third Quarter 2017.
- [19] J. Liu, J. Wan, Q. Wang, P. Deng, K. Zhou, and Y. Qiao, „A Survey on Position-Based Routing for Vehicular Ad Hoc Networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 62, no. 1, pp. 15–30, May 2016.
- [20] A. Filali, A. Abouaomar, S. Cherkaoui, A. Kobbane, and M. Guizani, „Multi-Access Edge Computing: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197017–197046, 2020.
- [21] 3GPP, „Architecture Enhancements for 5G System (5GS) to Support Network Data Analytics Services,” TS 23.288, v18.4.0, Mar. 2024.
- [22] Ericsson, „5G Core Network: Service-Based Architecture,” *Ericsson Technology Review*, vol. 2020, no. 10, pp. 2–12, Oct. 2020.
- [23] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, „Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, Mar. 2020.
- [24] 3GPP, „5G System; UE Route Selection Policy; Stage 2,” TS 24.526, v18.3.0, Mar. 2024.
- [25] H. Zhang, Y. Xiao, S. Bu, D. Niyato, F. R. Yu, and Z. Han, „Computing Resource Allocation in Three-Tier IoT Fog Networks: A Joint Optimization Approach Combining Stackelberg Game and Matching,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 5, pp. 1204–1215, Oct. 2017.

A szerzőkről



területei közé tartozik a fizikai MI, a hálózatalapú pozicionálás és a valós idejű perem-következtetési architektúrák. (e-mail: benedek.kovacs@ericsson.com)



zati rendszerek end-to-end átfogó szemlélete jellemzi, amely a rendszertervezéstől a prototípus-megvalósításon át a demonstrációs környezetek kialakításáig terjed. (e-mail: armand.desztics@ericsson.com)



lesztési területe az 5G és a jövőbeli 6G hálózatokhoz kapcsolódó pozicionálási technológiák. (e-mail: zsafia.papp@ericsson.com)

KOVÁCS BENEDEK

villamosmérnöki MSc diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) szerezte. Jelenleg az Ericsson Research budapesti kutatójaként dolgozik, munkája az 5G rendszer-architektúrára, a mobilhálózati peremszámításra és az autonóm rendszerek konnektivitási megoldásaira összpontosít. Kutatási

DESZTICS ARMAND

mérnök-informatikus MSc diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) szerezte. Jelenleg az Ericsson-nál 5G-Advanced és 6G innovációs és kutatási projektek integrációs és architektúrális feladatain dolgozik, többször meglévő vagy új ügyfelekkel együttműködésben. Munkáját a hálózati

PAPP ZSÓFIA

villamosmérnök MSc diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) Távközlési és Mesterséges Intelligencia Tanszékén szerezte 2021-ben. Jelenleg az Ericsson Magyarország kutató-mérnöke, ahol mobilhálózatalapú helymeghatározási rendszerek fejlesztésén dolgozik. Kutatási és fej-