

AI-alapú szemantikus adaptív adatátviteli mechanizmus kivitelezése és elemzése

Implementation and analysis of an AI-based semantic adaptive data communication mechanism

¹TÓTH Bence, ²SZÁVA Gréta, ³Dr. GÁL Zoltán

^{1, 2, 3} Debreceni Egyetem Informatikai Kar
4028 Debrecen, Kassai út 26., Magyarország, <http://www.inf.unideb.hu>,
email: ¹t.bence-04@mailbox.unideb.hu, ²szvgrt2004@mailbox.unideb.hu, ³gal.zoltan@inf.unideb.com

Abstract

This paper presents an embedded, concept-based semantic communication system built on ESP32 microcontrollers. The primary goal is to tackle channel noise and errors in resource-constrained environments. Our approach combines multilevel semantic coding and PAM4 modulation with a neural network that performs denoising. By continuously monitoring the channel condition, the receiver automatically adjusts transmission levels to instantaneous conditions using adaptive acknowledgments.

Keywords: Semantic communication, concept-based error correction, neural network, ESP32, dynamic link adaptation, edge computing

Kivonat

Ez a tanulmány egy beágyazott, ESP32-mikrokontrollerekre épülő, fogalomalapú szemantikus kommunikációs rendszert mutat be. A munka fő célja a zajos csatornák okozta hibák hatékony kivédése szűkös erőforrású környezetben. A javasolt megoldás többszintű szemantikai kódolást és PAM4-modulációt kapcsol össze egy zajszűrő neurális hálózat segítségével. A vevő a csatorna állapotát folyamatosan figyelve, adaptív nyugtákkal automatikusan igazítja az átviteli szinteket a pillanatnyi viszonyokhoz.

Kulcsszavak: szemantikus kommunikáció, fogalomalapú hibajavítás, neurális hálózat, ESP32, adaptív nyugtázás, peremhálózati számítás

1. BEVEZETŐ

A modern távközlési és IoT-rendszerek széles körű elterjedésével az adatmennyiség és a hálózati lefedettség iránti igény minden korábbinál magasabb szintre emelkedett [1]. A peremhálózati eszközök adatforgalmának többsége jellemzően korlátozott sáv szélességű, instabil és zajos csatornákon áramlik. A klasszikus Shannon-féle információelméletre [2] épülő távközlési architektúrák elsősorban a bitek, szimbólumok vagy karakterek hibátlan átvitelére törekednek. Bár léteznek rendkívül hatékony hibajavítást lehetővé tevő algoritmusok, mint például a Reed-Solomon kódolás, alkalmazhatóságuknak szigorú előfeltételei vannak. Szignifikáns matematikai és átviteli többletterhelés (overhead) árán csak akkor működnek igazán jól, ha egyetlen átviteli egységben vagy keretben jelentős mennyiségű strukturált adat található.

Az olyan szűkös erőforrású beágyazott rendszereknél, mint a népszerű ESP32 mikrokontrollerek, ezek az elvárások ritkán teljesülnek. A kisméretű csomagok, a fizikai korlátok és a környezeti zaj miatt a megszokott hibajavító eljárások túlterhelik a hálózatot és a processzort, miközben már egyetlen hibás bit is a teljes csomag eldobását eredményezi. Ez a probléma alapvető szemléletváltást igényel. A szigorú bitszintű pontosság helyett a jelentéstartalom védelmére kell helyezni a hangsúlyt, amit egy olyan intelligens ellenőrzési mechanizmussal lehet elérni, amely bitpontosság hiányában is garantálja az adat helyességét. Ezen kihívásokra választ nyújt a szemantikus kommunikációs paradigma. Ahelyett, hogy a rendszer a bináris mintázat hibátlan rekonstrukciójára törekedne, a továbbítani kívánt információ nyelvi és fogalmi jelentéstartalmát tekinti elsődlegesnek.

Az alábbi kutatás egy beágyazott, ESP32 mikrokontrollerekre implementált, AI-alapú szemantikus adaptív adatátviteli mechanizmust mutat be. A javasolt architektúra ötvözi a többszintű szemantikai kódolást

és a PAM4-modulációt (Pulse Amplitude Modulation) egy beépített neurális hálózattal, amely a fizikai rétegből származó zaj szűréséért felel. A rendszer a természetes nyelvek adaptív redundanciáját veszi alapul. A továbbítási formátumot szinonim kódszavakkal és dinamikus kódolási szintekkel igazítja a csatorna EWMA-alapú pillanatnyi minőségére [3]. Ezzel a megközelítéssel a kommunikáció extrém magas zajarány mellett is robusztus és megbízható maradhat.

A dolgozat további felépítése a következő: a második szakaszban áttekintjük a témakörhöz kapcsolódó technológiai és ipari megvalósításokat. A harmadik fejezet bemutatja a saját implementációjú fizikai és adatkapcsolati mechanizmusok koncepcióját, valamint megvalósítási módszereit.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalomban számos elméleti megközelítés foglalkozik a jelentésalapú adatátvitellel. A [4]-es forrásban szereplő szerzők átfogó keretrendszert vázolnak fel a szemantikus kommunikációra, kiemelve a jelentésalapú reprezentáció szerepét a sávszélesség optimalizálásában. Ezt egészíti ki az [5]-ös tanulmány, amely játékelméleti modell segítségével elemzi a zajos csatornákon keresztüli átvitelt, különös tekintettel a szimbólumok távolságára és a dekódolás során használt kontextusra.

Weaver klasszikus munkája [10] a kommunikáció technikai, szemantikai és hatásossági szintjét különíti el; ez a felosztás a jelentés és a kiváltott hatás kérdését a puszta szimbólumátvitel fölé helyezi. Strinati és Barbarossa [11] ezt a gondolatot a 6G-rendszerekre viszik tovább, és amellett érvelnek, hogy a hálózatoknak az átvitt adatok mennyisége helyett a cél teljesítéséhez szükséges releváns információt kell előtérbe helyezniük.

A mélytanulási alapon működő kódolási és dekódolási eljárások széles körben elterjedtek a hálózati kommunikáció és a csatornazaj kezelésének területén [6]. A [7]-es tanulmányban a szerzők a beszédjelekhez kialakított szemantikus kommunikációs rendszert mutatják be, amely a beszédben lévő jelentéstartalmat emeli ki és továbbítja, ezzel nagymértékben csökkenti a szükséges sávszélességet. A [8]-as cikkben bevezetett CDDM (Channel Denoising Diffusion Models) keretrendszer mélytanulási modellek segítségével csökkenti a vezeték nélküli csatornák zaját a szemantikus kódolással, növelve az átvitel pontosságát zajos csatorna mellett is. Továbbá a [9] -es cikk a mélytanuláson alapuló szemantikus rendszerek alapjait fekteti le szöveges adatokra. Megmutatja, hogy a jelentésalapú forrás- és csatornakódolás lényegesen hatékonyabb átvitelt tesz lehetővé a hagyományos megközelítésekhez képest alacsony jel-zaj arány esetén.

Az O'Shea és Hoydis által javasolt autoenkóderes modell [12] a teljes kommunikációs láncot egyetlen, végponttól végpontig tanulható rendszerként kezeli, így az adó és a vevő paraméterei közös célfüggvény szerint optimalizálhatók. Bourtsoulatze és szerzőtársai DeepJSCC-eljárása [13] azt mutatja, hogy a mély közös forrás- és csatornakódolás alacsony jel-zaj aránynál és változó csatornakörülmények között is fokozatos teljesítményromlást biztosít, elkerülve a hagyományos digitális rendszerek teljesítményének hirtelen romlását.

Az adaptív fizikai réteg klasszikus eredménye Goldsmith és Chua változó sebességű és teljesítményű MQAM-eljárása [14], amely a modulációs rendet és az adóteljesítményt a csatornaállapothoz igazítja. Ez az alapelv közvetlen elméleti párhuzamot mutat a jelen dolgozat EWMA-alapú szintváltásával és csatornaminőséghez igazodó kódszóválasztásával.

3. ALKALMAZOTT MÓDSZERTAN ÉS KIVITELEZÉSI TAPASZTALATOK

Ez a fejezet az adatátvitel és kódolási folyamat teljes életciklusát mutatja be a fizikai csatornán keresztül, a küldéstől a dekódolásig. Részletezi a szóalapú reprezentációt, a szinonimák használatát és a szemantikus kódkönyv strukturált felépítését. Kitér az átvitelt visszajelző nyugtázási mechanizmusokra, valamint az adatátvitel technikai módjára is.

3.1. Szóalapú reprezentáció és szinonimák

A klasszikus távközlési rendszerek karakter- vagy bitalapú kódolása rendkívül érzékeny a csatornazajra: a legkisebb bittorzulás is információvesztéshez vezethet. Az általunk javasolt mechanizmus ezzel szemben fogalomalapú reprezentációt alkalmaz, ahol az elemi átviteli egység nem egy karakter, hanem egy teljes jelentéssel bíró fogalom. A rendszer a hagyományos sávszélességigényes redundancia helyett a természetes nyelvek adaptív tulajdonságát alkalmazza az adatátvitelben. Egy adott fogalomhoz több eltérő bitmintával rendelkező kódszó tartozik, amelyek szinonimákként működnek. Ezek a kódszavak jelentéstartalmukban azonosak, de eltérő szintet képviselnek. Ha a csatornazaj miatt egy adott kódszó átvitele megghiúsul vagy torzul, a rendszer

nem a hibás bitminta újraküldésével terheli a hálózatot, hanem egy szinonim kódszóra vált. Ez a dinamikus, jelentésalapú helyettesítés garantálja a magas csatornazajjal szembeni ellenállóképességet, valamint a kiemelkedő hibatűrést.

3.2. A szemantikus kódkönyv felépítése

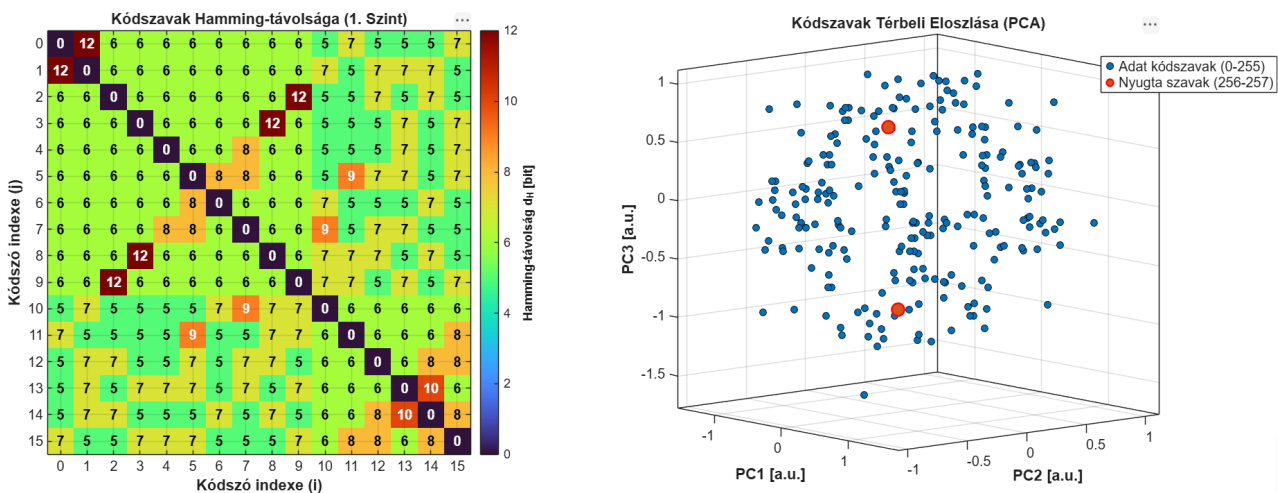
A rendszer egy előre definiált, a küldő és a fogadó oldal által egyaránt ismert kódkönyvet használ. A kódkönyv egy 258×5 -ös mátrix. Az első 256 sor az adatátviteli fogalmakat, az utolsó két sor pedig a nyugtázási funkciókat fed le, mindkét esetben 5-5 független reprezentációval. Az egyes kódszavak PAM4 szimbólumokból állnak. Az eljárásban szereplő négy alapszimbólumot (A, B, C, D) a bináris 00, 01, 10 és 11 értékekkel jelöljük. Mindegyik fogalomhoz tartozó kódszó teljesen egyedi bitmintával rendelkezik. A nyugtaszavak rövidebbek az adatszavaknál, ami lehetővé teszi a gyors fizikai detektálást és sávszélességet takarít meg.

Szintenkénti kódolási formátum

1. táblázat

Szint	Kódszavak formátuma	Nyugták formátuma
1. szint	8b $\rightarrow$ 12b kódolás; hossza 1,5 bájt (6 db PAM4 szimbólum)	hossza 8 bit (4 db PAM4 szimbólum)
2. szint	8b $\rightarrow$ 16b kódolás; hossza 2 bájt (8 db PAM4 szimbólum)	hossza 12 bit (6 db PAM4 szimbólum)
3. szint	8b $\rightarrow$ 24b kódolás; hossza 3 bájt (12 db PAM4 szimbólum)	hossza 16 bit (8 db PAM4 szimbólum)
4. szint	8b $\rightarrow$ 32b kódolás; hossza 4 bájt (16 db PAM4 szimbólum)	hossza 28 bit (14 db PAM4 szimbólum)
5. szint	8b $\rightarrow$ 32b kódolás; hossza 4 bájt (16 db PAM4 szimbólum)	hossza 32 bit (16 db PAM4 szimbólum)

A globálisan optimalizált kódkönyv garantálja a maximális Hamming-távolságot, ami biztosítja, hogy sem az adatátviteli fogalmak sem a nyugtaszavak nem téveszthetők össze egymással a dekódolás során. Emellett minden kódszó megfelel egy belső szabálynak is: a kódszavakon belül nem szerepelhet egymás után két azonos PAM4 szimbólum ($S_i \neq S_{i+1}$).



1. ábra. Kódszavak eloszlásának szemléltetése (kódkönyv részlet)

Mivel az adatszavak között időbeli szünet és egy teljes nyugtázási ciklus van, az adatok nem folytonos folyamból állnak. Ezért a fenti szimbólum-ismétlődési szabály kizárólag egyetlen kódszón belül kötelező, a szóhatárokon nem. A kódszavaknak 5 különböző kódolási szint szerint 5 formátuma létezik (lásd 1. táblázat).

A kódkönyv egy részletében az 1. kódolási szinthez tartozó szimbólumpárok közötti Hamming-távolságokat hőterkép formájában szemléltettük (lásd 1. ábra baloldala). Az átlón látható nullák a szimbólum önmagával való összehasonlítást jelzik. A hőterkép erre az átlóra szimmetrikus. Míg az eltérő kódszavak közötti minimális Hamming-távolság 5 bit. Az átlagos távolság 6 és 8 bit között mozog, de több kódszópár esetén a távolság eléri a 10 - 12 bites értéket is. Ez a mérték biztosítja, hogy a csatornazaj miatti bit-torzulások ellenére

a dekódolási szakaszban a kódszavak még nagy zajszint mellett is egyértelműen megkülönböztethetők maradjanak egymástól.

A kódkönyv 1. szinten lévő kódszavainak és nyugtaszavainak térbeli eloszlását a három legjelentősebb dimenzióban (PC1, PC2, PC3) főkomponensanalízis (PCA) segítségével szemléltetjük (lásd 1. ábra jobboldala). A diagram alapján megállapítható, hogy az adatszavak egyenletesen és széles tartományban töltik ki a teret, ami a szinonimakészlet jó megoszlását igazolja.

A nyugtaszavak a térben jól elkülönülő pozíciókat foglalnak el az adatszavakhoz képest. Ez garantálja, hogy a visszirányú nyugtázási funkciók a fizikai detektálás során nem téveszthetők össze.

3.3. Az adatátvitel módja

Az adatátvitel kódszóalapú nyugtázásos protokoll (stop-and-wait) szerint működik. A kódszó nem kerül semmilyen adatkeretbe, hanem a szimbólumai önmagukban kerülnek továbbításra, egyesével. A rendszer csak akkor küldi el a következő szót, ha a fogadófél már visszaigazolta az előző adat sikeres megérkezését. A visszaigazolás 3 fajtájú lehet, ebből kettőt a vevő generál: pozitív visszaigazolás (ACK) és negatív visszaigazolás (NACK). A harmadik visszaigazolási típus az időtúllépés, amely valamilyen hiba esetén léphet fel, például ha az elküldött adat vagy az adatot visszaigazoló nyugta elveszik.

A rendszer célja, hogy egy erős zajtűrő képességgel rendelkező intelligens mechanizmust hozzunk létre, ezért a fizikai csatorna jelentős zajforrásként jelenik meg. A megoldás nem épít az átvitt adatok bitszintű pontosságára. Az elküldendő inputadattól a rendszer 6 bitet vág ki, és ezt egy integritásellenőrzővel és egy azonosító bittel egészíti ki. Az integritásellenőrző bit a dekódolás után biztonsággal megállapítja, hogy a dekódolt adat megegyezik-e azzal, amit a küldő továbbított. Az azonosító bit a nyugtázási folyamatban kulcsszerepet játszik. A nyugtázás elmaradása vagy elvesztése miatt fellépő újraküldések során duplikált adatok keletkezhetnek; a vevő az azonosító bit segítségével kiszűri ezeket.

3.4. Fizikai csatorna

A fizikai csatornán PAM4-szimbólumok formájában kódoljuk a szavakat, ahol egyetlen kódszó több egymást követő szimbólumból áll. A csatorna két működési állapotban létezhet: alacsonyabb és magasabb felbontású állapotban. A kódszó továbbításakor alacsonyabb felbontású állapotban üzemel és PAM4-szimbólumokat továbbít. Az átvitelmentes időszakokban a csatornán egy magasabb felbontású, de továbbra is diszkrét szintekből álló szabályos hullámjel van jelen.

A csatorna meghajtása egy 8 bites DAC (digitális-analóg átalakító) segítségével történik, ezért a teljesen folytonos jel nem valósítható meg. Az alacsony felbontású módban a szimbólumok továbbítási sebessége is lehetőséget kínál a zaj elleni védekezésre. A vételi oldalon egy ADC folyamatosan mintavételezi a csatornát és egy szűrőalgoritmus segítségével rekonstruálja a beérkező kódszót, majd továbbadja a feldolgozónak dekódolásra.

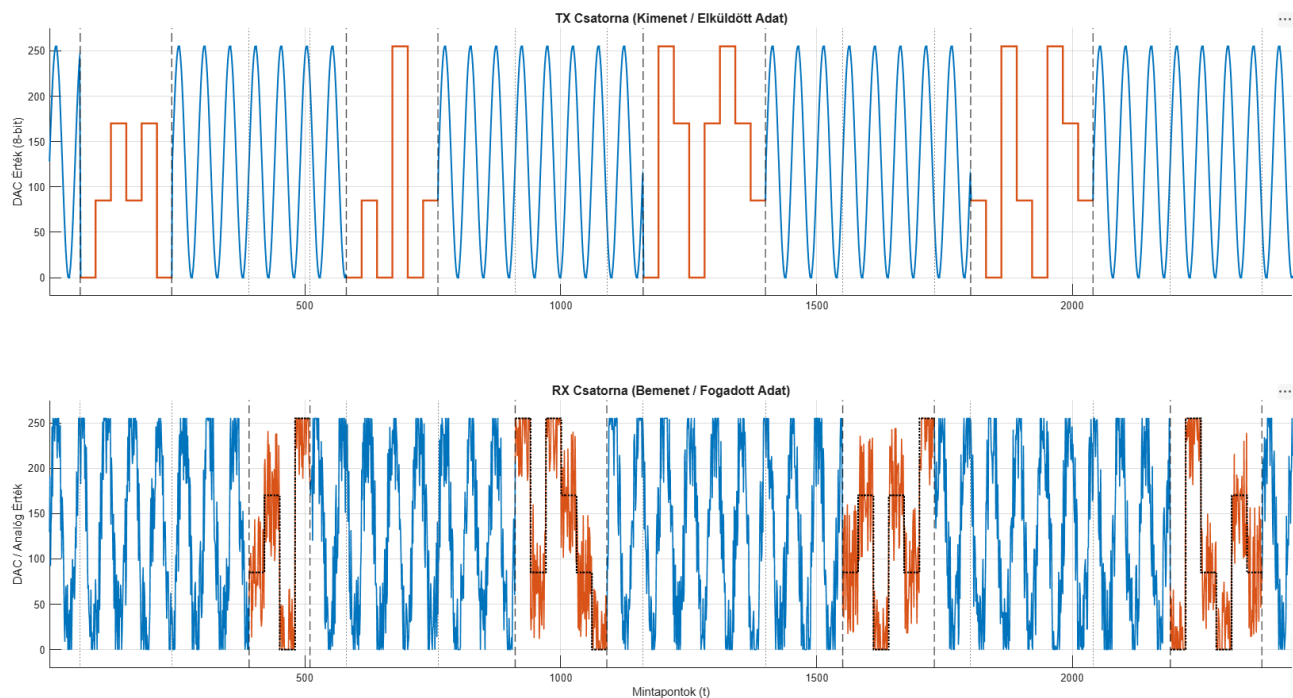
A 2. ábra a fizikai csatorna adó (TX) és vevőoldali (RX) jeleit illusztratív frekvenciaviszonyok mellett szemlélteti. A TX oldali grafikonon elkülönül az adatszimbólumok diszkrét PAM4-modulációja (narancssárga) és a szünetekben jelen lévő magasabb felbontású diszkrét szinuszjel (kék). Az RX oldalon egy szintetikus, extrém (~75%-os) csatornazajjal terhelt állapot látható, ahol a fekete szaggatott vonal jelöli az adóoldali referenciát. Az ábra a kommunikáció egy részletét mutatja be: az adó által küldött adat-kódszavak és a visszaérkező nyugtázási szimbólumok átvitelét.

3.5. Nyugtázás

A nyugtázásnak az átvitel sikerességének visszaigazolásánál több feladata is van. A kódkönyv 2 fogalmat tart fenn nyugtázási célra. Ez a két fogalom 10 nyugtázási kódszót jelent. Ezzel az 5-5 kódszóval megvalósítható, hogy a fogadó visszirányú adatot továbbítson a küldőnek. Az átvitel számára rendkívül fontos adat a csatornaminőséget leíró 0-1 közötti érték. Ez egy exponenciálisan súlyozott mozgóátlag (EWMA), amelybe a hibásan és hibátlanul átvitt kódszavak különböző súllyal számítanak bele. A mozgóátlaghoz tartoznak alsó- és felsőhatárértékek. Ha az átlag eléri az alsóhatárértéket, az átvitel egy alacsonyabb szintre lép. Ez hosszabb kódszavakat, magasabb redundanciát és esetleg lassabban továbbított szimbólumokat jelent. Hasonlóan a felsőhatárérték elérésekor: rövidebb szavak, kevesebb redundancia, esetleg gyorsabban továbbított szimbólumok. Szintlépés esetén a mérőszám középértékre áll vissza. Ez a metrika a vevő oldalán kerül kiszámításra, hiszen ott eldönthető egy átvitt kódszóról, hogy helyes volt-e vagy sem.

Az átvitel szintjét a küldő oldal dönti el azzal, hogy milyen fokozaton kódolja az elküldendő adatot. A vevő a kódolási kérelmet a nyugtaszavak kihasználásával jelezheti a küldőnek. A szabály a következő: pozitív nyugta esetében a nyugta kódolási szintje szerint kell kódolni a következő adatot. Ugyanez igaz a negatív

nyugta esetén is. Elveszett nyugta esetén (timeout) a küldőnek, ha lehetséges, automatikusan eggyel magasabb kódolási szinttel kell küldenie a következő adatot.



2. ábra. Fizikai csatorna vizualizáció (idealizált)

3.6. Kódolási folyamat

Az adatátvitel munkamenetek formájában zajlik, melyeket időszünet választ el. Ha a küldő egy meghatározott ideig nem küld adatot, a logikai munkamenet lezárul; a küldő és a fogadó is alaphelyzetbe áll. Ez nem érinti a csatorna minőségét és ezzel együtt a kódolási szintre vonatkozó mérőszámokat sem. A korreláció az XOR-logikai műveleten alapszik és a három szó között áll fenn. Az integritásellenőrző és a szekvenciaazonosító is egyetlen szóra vonatkozik. A munkamenet kezdetekor a két (korrelációhoz használt) 8 bites belső regisztert nullázzuk. Ezután minden egyes input szóra alkalmazzuk a következő algoritmust. A folyamat elején a rendszer kívág egy meghatározott 6 bites adategységet a bejövő adatfolyamból. Ez képi a továbbítani kívánt tényleges információt, a hasznos terhet. A küldő egy integritásbitet generál, amely a hasznos teherhez tartozó kódkönyvi kódszóban található nullák paritása alapján kerül kiszámításra. A duplikátumok kiszűrése érdekében a rendszer szekvenciaazonosító bitet alkalmaz.

Ez az érték minden egyes új adatsomagnál az ellenkezőjére változik, a munkamenet kezdetén pedig nulláról indul. Fontos tulajdonsága, hogy egy adott kódszó teljes küldési ciklusa alatt, még esetleges újraküldések esetén is, változatlan marad. Miután minden szükséges elem rendelkezésre áll, összeáll a nyers szimbólum. A rendszer az adat elejére illeszti a szekvencia-azonosítót, a végéhez pedig az integritásbitet, így egy nyolc bites összefüggő adategységet alkot. Ezt követően életbe lép a korrelációs kódolás. A rendszer az összeállított szimbólumot XOR művelettel láncolja össze az előző két küldési ciklusból megőrzött nyers szimbólummal. Az így kapott érték adja meg a végleges csatornaindexet, miközben a belső regiszterek is frissülnek. Az algoritmus utolsó lépéseként a kapott csatornaindex alapján a rendszer kikeresi a megfelelő kódszót a kódkönyvből, figyelembe véve az aktuálisan alkalmazott kódolási szintet. Végül ezt a kódszót küldi ki a kommunikációs csatornára, majd a küldő fél várakozó állapotba kerül, amíg meg nem érkezik a sikeres átvételről szóló visszaigazolás vagy a nyugta elveszettnek nyilvánul válaszdíó túllépés miatt.

3.7. Dekódolási folyamat

A dekódolási folyamat a zajos kódszót kapja meg bemeneteként, és feladata, hogy ebből visszaállítsa az eredeti 6 bites adatot. A vételi oldalon is meg kell jelenjen egy korrelációs dekódolás, amely ellenőrzi, hogy a beérkezett kódolatlan szavak valóban kapcsolatban állnak-e a szabályok szerint. Ehhez a rendszer két belső regisztert használ, amelyeket a munkamenet elején nullára állítunk. Szükségünk van egy segéd számlálóra is, amely megadja, hogy hány belső regiszter inicializálódott a munkamenet során. Ennek a különböző dekódolási eljárások prioritizálásában van szerepe; lehetséges értékei 0, 1, 2. A munkamenet elején beállítunk egy időzítőt,

amely lezárja a feladatot, amikor lejár. Fontos még inicializálni a szekvencia-nyilvántartó értéket 0-val, így a legelső szó *pid_1b* bitjének 0-val kell megegyeznie.

i) Inicializációs szakasz: Amikor elindul egy új munkamenet, a dekódolónak még nincs semmilyen korábbi adata, ezért az első kódszót azonnal átadja a neurális hálónak, ami visszaadja a hozzá tartozó indexet. Mivel a regiszterek még üresek, ez az index lesz maga a nyers szimbólum. A rendszer ellenőrzi a szekvencia-azonosítót és azt is, hogy az adat épségben megérkezett-e. Sikeres továbbítás esetén az adat kiadása és a memória frissítése következik. Hibás integritás esetén az algoritmus megszakítja a folyamatot és hibajelzést küld a feladónak. A második kódszónál hasonlóan jár el, de már fel tudja használni a korábban elmentett memóriát a korreláció kiszámításához. A szűrés és az ellenőrzés után, ha az adat érvényes, az is a kiadási fázisba lép.

ii) Normál működés: Miután lefutott a kezdeti szakasz, a dekódoló megpróbálja elkerülni a lassabb neurális hálózatot, hogy a feldolgozás minél gyorsabban történjen. Először összeveti a beérkező kódszó Hamming-távolságát a kódkönyvben lévő mintákkal és a legközelebbi esőt választja. Ha a hiba egy bizonyos határértéken belül van, a korábbi memóriaértékekből közvetlenül kiszámolja a nyers szimbólumot. Ha ez a becslés átmegy az ellenőrzéseken, az algoritmus folytatódik. Hiba esetén a rendszer automatikusan visszavált a biztonságosabb AI-alapú dekódolásra. A kódszót átadja a neurális hálónak, amely meghatározza az indexet, majd ebből a korreláció kiszámításával nyers szimbólumot állít elő. Ezt követően a rendszer ismét elvégzi a szűrést és az integritásellenőrzést. Ha az ellenőrzés sikeres, az adat továbblép a kiadási szakaszba. Hibás integritás esetén a dekódoló elveti a csomagot és negatív nyugtával értesíti a küldőt a hibáról.

iii) Frissítés és kiadás: Amint sikerül helyreállítani egy szimbólumot, a rendszer frissíti a belső regisztereit: a korábbi értékeket eltolja, és az új szimbólumot a következő ciklushoz elmenti. Ezzel párhuzamosan frissíti az inicializációs számlálót, a szekvencia-azonosító bitet pedig az ellentett állapotba állítja. Ezután a nyers szimbólumból kivágja a középső 6 bites hasznos adatot és továbbítja azt a fogadó részére. A munkamenet időzítője visszaáll a kezdeti állapotba. Végül az eredményről pozitív nyugtával tájékoztatjuk a küldőt.

Amennyiben a munkamenet kezdetén indított időzítő lejár, a rendszer visszaállítja az összes belső regisztert és számlálót az alapértelmezett kiinduló állapotba és felkészül az újabb munkamenet fogadására.

3.8. Neurális háló a dekódolásban

A rendszerhez két különböző modell készült. Az egyik a zajmentesítő (denoiser) hálózat. A modul feladata a 32 bites beérkező kódszó tisztítása a csatornazajtól, majd a korrigált adat 32 biten történő kiadása. A rövidebb kódszavakat a rendszer vezető nullákkal (padding) egészíti ki. Ennél a megoldásnál a puha egyezésen alapuló táblázatos kereső végzi el a tényleges dekódolást. A másik háló klasszifikációs funkciót lát el. Ez az architektúra egy 32 bites bemenetet 258 kimeneti értékre (osztályra) képez le. A modell közvetlenül a zajos kódszót kapja meg bemenetként, kimenetén pedig egy konfidenciaérték kíséretében megadja a kódszóhoz tartozó becsült fogalomindexet.

Ehhez a hálózathoz már nincs szükség külön dekódolóra. Mindkét hálózat egy másodlagos bemenetet is kap: az aktuális kódolási szintet, amely a kódszó hossza alapján kiszámítható a hálózat előtt. Ez az 5 kódolási szint miatt 3 bites bemenetként jelenik meg. Ennek segítségével a modell megtanulja, hogy az adott szinten az első meghatározott számú nulla csupán kiegészítés (padding), vagyis a pontosabb feldolgozás érdekében figyelmen kívül hagyható. A végleges rendszerbe az a modell épül be, amely nagyobb zajszint mellett is pontosabb helyreállításra képes. A két hálózat egyidejűleg nem lesz jelen a rendszerben. A kiválasztott modellt ONNX-formátumba konvertálva, INT8-as kvantálással és legfeljebb 75 000 paraméteres méretkorlát mellett fogja alkalmazni a rendszer.

4. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBI KUTATÁSI TERVEK

A dolgozatban bemutatott architektúra sikeresen ötvözi a fogalomalapú többszintű kódolást, a PAM4-modulációt, valamint az AI-alapú zajszűrést és klasszifikációt. A kifejlesztett, dinamikus kódolási szinteket és EWMA-alapú adaptív nyugtázást alkalmazó protokoll bizonyította, hogy a szigorú bitszintű pontosság elengedésével és a jelentéstartalom kiemelésével extrém módon zajos, erőforráskorlátozott fizikai csatornákon is robusztus adatátvitel érhető el. A Hamming-távolságra optimalizált szinonim kódkönyv és a könnyűsúlyú neurális hálózatok együttesen biztosítják az alacsony számítási és sávszélességi többletterhelést (overheadet) peremhálózati környezetben. A későbbiekben a protokoll valós idejű, skálázható továbbfejlesztésére fókuszál. Kiemelt cél a zajszűrő (denoiser) és a közvetlen klasszifikációs hálózati architektúrák teljesítményének összehasonlítása éles fizikai tesztpadon, a dekódolási pontosságot, a válaszidőt (latency) és az energiafogyasztást

mérve. További kutatási irányt jelent a statikus 258×5-ös kódkönyv dinamikus, kontextusfüggő frissíthetőségének kidolgozása, valamint az EWMA-alapú csatornabecsülés kiegészítése megerősítéses tanulási (Reinforcement Learning) algoritmusokkal a gyorsabb szintváltási reakcióidő elérése érdekében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A dolgozat a QoS-HPC-IoT Laboratórium támogatásával készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] J. Shehu Yalli, M. Hilmi Hasan and A. Abubakar Badawi, *Internet of Things (IoT): Origins, Embedded Technologies, Smart Applications, and Its Growth in the Last Decade*, In: IEEE Access, vol. 12, pp. 91357-91382, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3418995.
- [2] C. E. Shannon, *Communication in the Presence of Noise*, In: Proceedings of the IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, Jan. 1949, doi: 10.1109/JRPROC.1949.232969.
- [3] P. Chevillat, J. Jelitto, A. N. Barreto and H. L. Truong, *A dynamic link adaptation algorithm for IEEE 802.11 a wireless LANs*, In: IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC '03., Anchorage, AK, USA, 2003, pp. 1141-1145 vol.2, doi: 10.1109/ICC.2003.1204543.
- [4] Y. Shao, Q. Cao and D. Gündüz, *A Theory of Semantic Communication*, In: IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 23, no. 12, pp. 12211-12228, Dec. 2024, doi: 10.1109/TMC.2024.3406375.
- [5] Güler B., Yener A., Swami A. *The Semantic Communication Game*, In: IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2018, 4(4), 787-802.
- [6] C. Chaccour, W. Saad, M. Debbah, Z. Han and H. Vincent Poor, *Less Data, More Knowledge: Building Next-Generation Semantic Communication Networks*, In: IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 27, no. 1, pp. 37-76, Feb. 2025, doi: 10.1109/COMST.2024.3412852.
- [7] Z. Weng and Z. Qin, *Semantic Communication Systems for Speech Transmission*, In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 39, no. 8, pp. 2434-2444, Aug. 2021, doi: 10.1109/JSAC.2021.3087240.
- [8] T. Wu et al., *CDDM: Channel Denoising Diffusion Models for Wireless Semantic Communications*, In: IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 9, pp. 11168-11183, Sept. 2024, doi: 10.1109/TWC.2024.3379244.
- [9] Xie H., Qin Z., Li G. Y., Juang B. H. *Deep Learning Enabled Semantic Communication Systems*, In: IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69, 2663-2677.
- [10] W. Weaver, *Recent Contributions to the Mathematical Theory of Communication*, In: The Mathematical Theory of Communication, C. E. Shannon and W. Weaver, Urbana, IL, USA: University of Illinois Press, 1949, pp. 1-28.
- [11] E. C. Strinati and S. Barbarossa, *6G Networks: Beyond Shannon Towards Semantic and Goal-Oriented Communications*, In: Computer Networks, vol. 190, Art. no. 107930, May 2021, doi: 10.1016/j.comnet.2021.107930.
- [12] T. J. O'Shea and J. Hoydis *An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer*, In: IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, vol. 3, no. 4, pp. 563-575, Dec. 2017, doi: 10.1109/TCCN.2017.2758370.
- [13] E. Bourtsoulatzé, D. B. Kurka and D. Gündüz, *Deep Joint Source-Channel Coding for Wireless Image Transmission*, In: IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, vol. 5, no. 3, pp. 567-579, Sept. 2019, doi: 10.1109/TCCN.2019.2919300.
- [14] A. J. Goldsmith and S. G. Chua, *Variable-Rate Variable-Power MQAM for Fading Channels*, In: IEEE Transactions on Communications, vol. 45, no. 10, pp. 1218-1230, Oct. 1997, doi: 10.1109/26.634685.