

Dr. Gulyás Attila*

Ötödik generációs vezetékes, és vezeték nélküli hálózatok egyes modulációs megoldásai

I. rész

BEVEZETÉS

Az információs technológiai fejlődés a XXI. század második évtizedében is töretlennek mondható. Műszaki tekintetben a hálózati összetevők – jelkibocsátó (adó) – hang- és adatátviteli közeg (csatorna) – jelfogadó (vevő) – együttesen biztosítják a jelátvitel folyamatosságát, időbeliségét és zavarvédeltségét, az előzetesen meghatározott, valamint a hálózati minőségi követelményeknek¹ történő megfelelést [1]. A XXI. században az infokommunikációs mobilitás hangsúlyosan jelenik meg a társadalom minden funkcionális alrendszerének (infokommunikációs infrastruktúráinak) életében, ugyanakkor – a hálózat nyújtotta szolgáltatások elemzéseinek eredményeként² – általánosnak mondható az igény a kis méretű (és kis energiafelhasználású), egyszerűen telepíthető és hordozható híradástechnikai eszközök (beleértve az ember-gép és a gép-gép kapcsolatokat) üzemeltetésére az ipari és gazdasági fejlesztések területén is. [2]

A fentiek következtében növekvő érdeklődés és fókuszált figyelem tapasztalható a vezeték nélküli (mobil) alkalmazások területére is, amelyek az egyének és csoportok szolgálati (munka) célú feladatrendszerén túl, a magánjellegű kapcsolattartást is biztosítják (közösségi média, kép- és videómegosztó portálok a multimédiás tartalomszolgáltatás elősegítésére, felhőalapú adattárolás és megosztás). Hangsúlyosak az ipari, a gazdasági és a kereskedelmi célú adatátviteli rendszerek, továbbá a védelmi (rend- és honvédelmi) célokra fejlesztett hálózatok is. A felhasználók jelenlős igényszinttel állnak elő a megbízhatóan üzemelő, nagy adatátviteli kapacitású rendszerek fejlesztése területén.

Ezen hálózati alkalmazásokon belül a mobil hálózati (célás) rendszerek fejlesztése – többek között a társadalmi, az üzleti és a gazdasági szempontok előtérbe kerülése miatt – hívott életre innovatív műszaki megoldásokat, amelyek szabványosított formában immár lehetővé teszik az alacsony késleltetési idővel tervezhető, több száz gigabites sávszélességű adatátviteli rendszerek tervezését, üzemeltetését/felügyeletét és folyamatos karbantartását. [3]

A korszerű műszaki megoldások fejlesztési folyamatai magas szinten elégíthetik ki az igényt a hang alapú analóg és digitális információátvitelről a multimédiás forrásátvitelre történő áttérésre. Ugyanakkor le kell szögeznünk, hogy műszaki tekintetben, a digitális jelfolyamátvitel szempontjából közömbös annak vizsgálata, hogy a „mintavétel – kvantálás – kódolás – átviteli csatornára történő optimalizálás” folyamatának a szempontjából pontosan mi az információ (hang alapú vagy kép, mozgókép, egyszerű vagy komplex áramkörvezérelt jelzésrendszer stb.), amelyet továbbítani szeretnénk. A kulcsfeladat tehát, hogy nagy mennyiségű adatbitet kell a minimális (szabványértéken belüli) késleltetéssel, rögzített tűréshatáron belüli adatvisszaállítással (azaz a vételi oldalon a megfelelő szintű reprodukcióval) továbbítani, amely folyamat együttesen biztosítja a szolgáltatás-minőség³ magas szintjét.

Mint közismert, a rádiótelefon-berendezések, ipari jelfogók, szenzorok és a működésüket lehetővé tévő hálózati elemek/összetevők igény- és szolgáltatás alapon szerveződött folyamatos fejlődése során eljutottunk az ötödik generációs adatátviteli/hálózati rendszerekhez (a továbbiakban: 5GS⁴), amelyet alapvetően az Internet Protokoll (IP) szabvány⁵ [4] alapján szerveződött vegyes hálózatok összekapcsolása, illesztése, üzeme és felügyelete jellemez.

Az 5GS technológia tanulmányozása még a műszaki területen jártas szakembereknek is kihívást jelenthet, hiszen az évekkel ezelőtti előjelzéseket követően 2020-ra csupán néhány európai nagyvárosban indult meg annak kísérleti kialakítása és tesztüzeme, ugyanakkor a szabványosítás lépései lemaradnak az egyes kereskedelmi vállalkozások beruházásaitól. Figyelemfelkeltő lehet továbbá, hogy jelentős szakirodalmi kutatást követően sem található olyan műszaki előrelépés, amely irányt mutathatna az 5GS katonai alkalmazására akár nemzeti, akár nemzetközi viszonylatban.

A tudományos közlemény első részében röviden ismertetjük az 5GS-el szemben támasztott követelményeket, majd megvizsgáljuk a rendelkezésre álló, nagy sebességű adatátvitelt lehetővé tévő, egyes modulációs módokat.

ÖSSZEFOGLALÁS: Az ötödik generációs vezetékes, és vezeték nélküli hálózatok fejlesztésének tervezési időszakában indokolt megvizsgálni az IMT-2020 ajánlásaiban megfogalmazott hálózati paraméterek elérését lehetővé tévő modulációs eljárásokat. A tanulmány a jelenlegi szabványok és ajánlások alapján egyes QAM eljárásokat tekinti a műszaki vizsgálatok alapjának. Célja, hogy jobban feldolgozhatóvá váljanak az 5G hálózatok alapját képező modulációs megoldások a magas adatsebesség, a nagyobb sávszélesség és az optimalizált teljesítményfelvétel biztosítására.

KULCSSZAVAK: IMT-2020, 5GN, QAM

ABSTRACT: In the advent of the development of fifth-generation wired and wireless networks, it is important examining the achievement of the network parameters set out in the IMT-2020 recommendations, enabling modulation procedures for a comprehensive network approach. This paper examines a couple of existing QAM procedures run by current standards and recommendations to begin the modulation solutions plannable, underlying the 5G networks be able to ensure high data rates, higher bandwidth, and optimized power consumption.

KEY WORDS: IMT-2020, 5GN, QAM

* Ezredes, infokommunikációs főnök, Közép-európai Hadosztály Parancsnokság Székesfehérvár. ORCID: 0000-0001-5774-5757



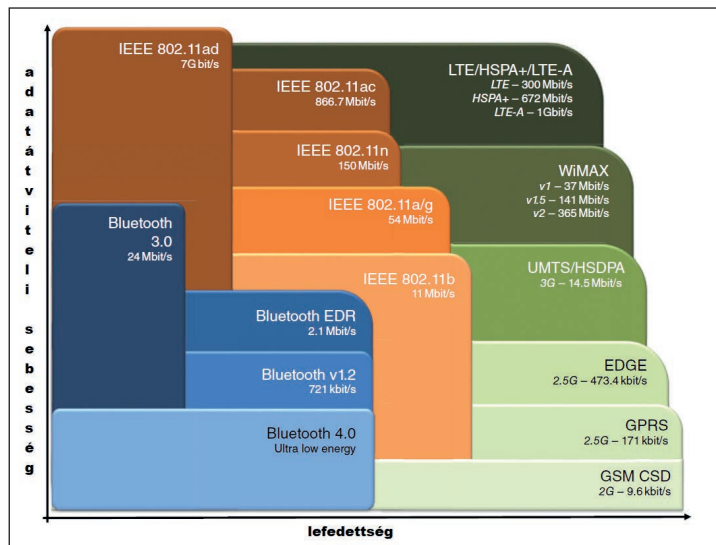
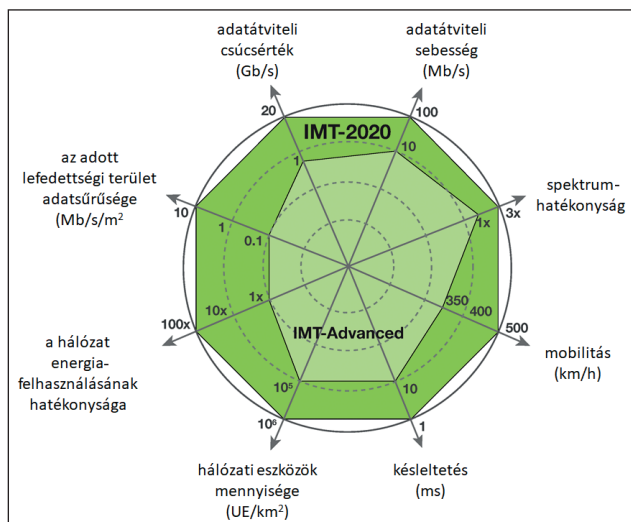
A HÁLÓZATOK EVOLÚCIÓJA

A vezetékes és a vezeték nélküli infokommunikációs rendszerek⁶ fejlődését több kutató is feldolgozta, [5] ezért eltekintünk a műszaki innovációk részletes ismertetésétől, hiszen célunk az 5GS hálózati alkalmazások vizsgálata az átviteli modulációk és csatornakialakítások szempontjából.

Az ötödik generációs hálózati követelmények részletezéséhez a legautentikusabb források a Nemzetközi Távközlési Egyesület Infokommunikációs Szakcsoportjának (ITUER⁷) hálózatspecifikáció-összefoglalói, amelyeket a nemzetközi telekommunikációs fejlesztések irányának kijelölése érdekében fogalmaztak meg (IMT-A és IMT-2020⁸), kutatási-fejlesztési célokra létrehozott polgári vállalkozásokkal támogatva (például 3GPP⁹). [6][7]

Az 5GS-sel szemben támasztott követelményeket vizsgálva kitűnik, hogy azok felülről nem korlátozottak, azaz nem határozták meg pontosan a maximálisan elérhető adatátviteli sebesség/sávszélesség viszonyát, a jelkésleltetés időintervallumát. Csupán ajánlásokat fogalmaztak meg a jelenlegi (GSM/GPRS/EDGE/UMTS/LTE-A/IEEE802.11 szabványcsalád¹⁰) műszaki paramétereinek többszörözésére. Ezen tényből egyenesen következik az alkalmazott műszaki megoldások széles spektrumon belül megvalósítható, szabad kiválasztásának lehetősége (pl.: alkalmazott frekvenciák, modulációs módok és többfázisú antennák együttes alkalmazása), amelynek csak a fizikai és gazdasági/pénzügyi korlátok jelölhetik ki a határvonalát. Az ajánlások, az LTE-A hálózati paraméterekre támaszkodva az adatátviteli sebesség növelését a gyakorlatban mérhető 10–50 Mb/sec-ról néhányszor 10 Gb/sec értékre, a jelkésleltetés időintervallumot 70–50 ms-ról 10–1 ms-re (vagy annál kisebbre) vizionálják. A hálózati végfelhasználói eszközök (UE¹¹) számát az LTE-A hálózatokhoz képest – a felhasználói igények kielégítésére – százszorozni indokolt, azok akkumulátorkapacitásában, azaz az akkumulátorok üzemidejének hosszában legalább tízszeres javulást kell (javasolt) elérni. E fenti fejlesztések megvalósulásának alapját képezi a tárgyak internete¹² és a gép-gép¹³ összekapcsolások, a szenzorhálózatok integrációja, az okoseszközök (okosházak, önvezető/autonóm munkagépek, gépjárművek és funkcionális robotok) adatcsere-felgyorsításának is. Az 1. ábrán az IMT-2020 ajánlásoknak megfelelő 5GS rendszerparaméterek láthatók.

1. ábra. Az IMT-2020 hálózati paraméterek tervezése (A szerző szerkesztése a [8] alapján)



2. ábra. Vezeték nélküli adatátviteli technológiák grafikus ábrázolása (A szerző szerkesztése a [14] alapján)

Ugyanakkor az IMT-2020 felhívja a figyelmet az IEEE 802.11 [9] szabványcsalád, a Bluetooth és a WiMAX¹⁴, a ZigBee¹⁵ és a LoRaWAN¹⁶ [10][11][12] hálózatok integrációjára a helyi (LAN¹⁷) és a szélesebb körben értelmezett (WAN¹⁸) hálózatok által nyújtott adatátviteli szolgáltatások kihasználása érdekében. Erdemes említést tenni a 2021. február 9-én elfogadott IEEE 802.11 ax-2021 szabványról (ismert még, mint hatodik generációs WiFi szabvány – WiFi6), amely biztosítani képes az IMT-2020-ban meghatározott ajánlásoknak megfelelő adatátviteli sebességet, átviteli sávszélességet és jelkésleltetést, magasabb rendű amplitúdómodulációt (legalább 1024-szeres QAM¹⁹) és többszörözött frekvencia-újrafelhasználást alkalmazva. [13] A teljesség igénye nélkül, a 2. ábrán áttekinthetők a fontosabb, az 5GS által lefedni szükséges hálózatok, amelyek alaphálózatoknak tekintendők az IMT-2020-ban rögzített rendszerparaméterek eléréséhez.

Frekvenciafelhasználás és management szempontjából e megnövekedett hálózati igények határozottan indokolják a rendelkezésre álló véges rádiófrekvenciás spektrum elosztásának újratervelését. Szükséges integrálni a jelenlegi LTE-A és a korábbi vezeték nélküli hálózati szabványok által használt, elfoglalt frekvenciatartományok felhasználását új spektrumkomponensek elsődleges (inkumbens) vagy eseti (opportunistikus), de folyamat-megközelítés szempontjából koherens alkalmazásával. A frekvenciafelhasználás és az üzemmódválasztások területén is előtérbe kerülnek a kognitív berendezések, amelyek a hálózat(ok) folyamatos monitorozásával képesek a saját – ezen keresztül a hálózati – paraméterek folyamatos módosítására annak érdekében, hogy az adott hálózatra előírt QoS teljesülhessen. Ennek megfelelően az LTE-A fejlesztésekor és alkalmazásakor a már az 1980-as évek vége óta használatban lévő 900/1800/2100 MHz-es frekvenciatartományok (csatornák távolsága 1,4–20 MHz közötti) felhasználása kiegészül a 700 MHz, a 3,4–3,8 GHz, a 24,25–27,5 GHz és a 31,8–33,4 GHz (milliméteres) frekvenciatartományokon történő üzemmel is.

A jelkésleltetés hardveroldali támogatásának szempontjából, a felhasználói igények növekedésével a sávszélességet jelentős mértékben szükséges fejleszteni és az előjelzések alapján többszöröződő felhasználói eszközök azonos cellában történő megjelenése miatt, indokolt a speciális antenna-rendszerek telepítése, valamint fejlett modulációs eljárások kidolgozása. A nagy sávszélességigény kielégítésére – többek között – többfázisú antennák (MU-MIMO²⁰), analóg-

digitális átalakítók (ADC²¹) és fázismodulációs eljárások alkalmazhatók.

Belátható, hogy az IMT-2020 ajánlások alapján tervezett, és teszttel jellel már kialakított hálózatok egyrészt integrálják a meglévő vezeték és vezeték nélküli hálózatok átviteli képességeit, ugyanakkor a kiaknázható újabb frekvenciartományok, a modulációs eljárások evolúciója, az ezeket hatékonyan támogatni képes hardver- és szoftverelemek kialakítása új – a régi és az újabb hálózatok integrációjából származó – hibrid hálózatot eredményez. Ennek a fejlesztése jelentős anyagi és tudományos befektetést kíván annak érdekében, hogy az ajánlásokban meghatározott műszaki paraméterek teljesülhessenek. A továbbiakban a megnövekedett követelményeket perspektivikusan kielégítő modulációs módokat vizsgáljuk.

AZ IMT-2020 AJÁNLÁSOKAT PERSPEKTIVIKUSAN KIELÉGÍTŐ, EGYES MODULÁCIÓS MÓDOK ÁTTEKINTÉSE

Ahogy az IMT-2020 ajánlásban megfogalmazásra kerül, az 5GS hármass követelményrendszere az alábbiak szerint foglalható össze:

- a vezeték nélküli rendszer jelátviteli sebességének és sáv szélesség-növelésének (eMBB²²) a lehetővé tétele,
- M2M/IoT hálózatok kiemelt támogatása (mMTC²³),
- rövid jelkésleltetési intervallumok (urLLC²⁴) tervezése.

Vizsgáljuk meg, hogyan elégíthetőek ki ezen követelmények. [15]

Az elektromágneses (EM) spektrum hatékonyabb felhasználása érdekében elsősorban a modulációs eljárás helyes megválasztása (jel/impulzus alakjának a megfelelő szűrőáramkörökkel történő körültekintő tervezése) követeli a legnagyobb figyelmet. Ugyanakkor az impulzusokat elválasztó, a frekvencia- és időtartományban is meghatározható sávok (elválasztó területek) csökkenthetik az EM spektrum optimális felhasználását. Ahogy a gyakorlati tapasztalatok megmutatják (LTE-A), az EM spektrum optimális felhasználását támogathatja a többfázisú antennák üzeme, ugyanakkor figyelemmel kell lenni a magasabb szintű modulációk alkalmazásából egyenesen következő rendszerkomplexitás növekedésére, amelynek ésszerű korlátok között tartása műszaki alapkövetelmény a tervezőmérnökök számára. A körültekintő jelforma-kialakítás, a rövidebb adattovábbítási időkeretek (TTI²⁵) támogatják az alacsony jelkésleltetési időintervallumokra (1 ms) való törekvést. Magas megbízhatóságú adatátvitel, kitételként az 5GS esetében, a bithibák számának a minimalizálásában jelenik meg (BER és BLER²⁶), amely szorosan kapcsolódik a jelkésleltetési időintervallum leszorításához, hiszen a kisebb arányban megjelenő bittévesztés jelentősen felgyorsítja a jelfeldolgozást a vételi oldalon.

Nem kevésbé hangsúlyos az aszinkron hálózati képesség fokozott támogatási igénye sem, elsősorban az M2M és IoT adatszinkronizáció területein (mMTC). A tapasztalatok alapján a szinkronizált kapcsolatokhoz szükséges csatornaparaméterek biztosítása csökkentheti a hálózat spektrális hatékonyságát. Ugyanakkor az ipari szenzorok, valamint az egyéb gép-gép és a gép-ember közötti aperiodikus adatátvitel rövid időtartományon vizsgálva akár jelentős interferenciához is vezethet. Tehát a meghatározott frekvenciartományokban a frekvencia multiplexhez használt hullámformák optimális megválasztása csökkentheti a csatornák szinkronizálási igényét. A perspektivikusan alkalmazni kívánt hullámformák tekintetében a komputációs komplexitás²⁷ kérdéskörével is érdemes foglalkoznunk. A kialakítás és visszaalakítás kritikus mutatója azok szá-

mítási, előállítási bonyolultsága, amely az adó és a vevő által elvégzendő műveletek számából és összetettségéből adódik össze. A költség- és energiahatékony hálózattervezés, a későbbi üzemeltetés tekintetében tehát különleges szűrőalgoritmusok, az interferenciát csökkentő eljárások programozásának mérlegelésére kényszeríti a hálózattervezőket, hiszen egyensúlyt kell találni az ajánlásban rögzített hálózati paraméterek biztosítása, valamint a rendszer egyszerűbben történő kialakítása és üzemeltetése között. Az energiahatékonyság kérdéséhez szorosan kapcsolódik még a hírközlő csatornán átvitt információ, a spektrális jelalakok átlagos és a csúcsteljesítményeinek (logaritmus) viszonya (PAPR²⁸). Alacsony PAPR-érték szükséges mind az adó, mind a vevőoldali erősítők hatékony működtetéséhez, hiszen ezek a hálózati részalkotóelemek rendelkeznek – többek között – a legnagyobb energiaszükséglettel.

A vezeték nélküli hálózatok fejlődésének folyamatosságából következően – a továbblépés érdekében – szükséges kijelölni, mi az a már létező, üzemelő infokommunikációs hálózat, amelyre, mint referenciarendszerre támaszkodhatunk az 5GS tervezésekor. [16] Szakmai berkekben általános az a vélekedés, hogy a LTE-A (IMT-A) és az IEEE 802.11 szabványrendszer ismert és bevált hálózati hardver és szoftver elemeit, valamint hálózatüzemeltetési eljárásrendjét célszerű az alapvető kiindulópontnak tekinteni. A továbbiakban tehát – a teljesség igénye nélkül – elsőként az OFDM-eljárást mutatjuk be annak érdekében, hogy a további modulációs eljárások vizsgálatokor kiindulópontként felhasználjuk.

ORTOGONÁLIS FREKVENCIAOSZTÁSI TÖBBSZÖRÖS MULTIPLEXÁLÁS (OFDM²⁹)

Az OFDM az egyik leggyakrabban alkalmazott többvívős modulációs eljárás, amely alapját képezi az LTE-A és az IEEE 802.11 szabványcsalád egyes átviteltechnikai megoldásainak. Induktív módszerrel³⁰ feldolgozva a témát a bit-alapú információ rádiófrekvenciás csatornán történő átvitelére, a legegyszerűbb megoldás lehet a bitek egyesével, egymás után történő továbbítása az adott frekvencián (csatornán): továbbítom az 1 bitnyi információt, rendszer-specifikációtól függően várok a fogadó visszajelzésére az átviteli sikerességéről (szinkron üzemmódban), majd ennek függvényében újra küldöm az adott bitet, vagy folytatom a kisugárzást/továbbítást a következő bittel. Mindezt addig folytatom, amíg a bitekre bontott információ teljes mennyiségében átvitelre (és visszaigazolásra) kerül. Kiváló példa lehet az ilyen adatátvitelre az amplitúdó-billentyűzés (ASK³¹) gyakorlati megvalósítása.

Fejlettebb eljárás a biteknek előre definiált paraméterek alapján történő csoportosítását követő továbbítása. Az így kialakított bitcsoportokat és a szimbólumokat az adott csatornán egymást követően továbbítjuk. Példa erre az adatátviteli eljárásrendre a kvadratúra fázisbillentyűzés (QPSK³²) és a kvadratúra amplitúdó-moduláció (QAM³³). Ezek szolgáltatják az alapját az OFDM-nek, amelynek alkalmazásakor a szimbólumokat, szimbólumcsoportokat többszörös átviteli csatornán (alcsatornán), közel azonos időben továbbítják.

Részleteiben bemutatva, az OFDM alapfogolata, hogy a nagy adatsebességű adatfolyamnak a rádiócsatornán történő átvitele megvalósulhat az adatfolyam több, kisebb sebességű adatcsatornára való bontásával, és azok vivőfrekvenciáinak egyedi, a többi vivőtől független, ortogonális, egyidejű digitális modulációjával. [17][18] A szimbólumok csatornaátvitele megvalósulhat időosztásban



(separation in time: IEEE 802.11 a/g/d), idő és frekvencia-osztásban (separation in time and frequency: IEEE 802.16 d/e, 802.20), valamint kódsztással (separation in codes: MC-CDMA³⁴). Ezekkel az eljárásokkal a rádiócsatornában terjedő vivők átviteléhez tartozó szimbólumidők ugyan az eredeti többszörösei lesznek, ugyanakkor a részcsatornák átvitele ellenállóbbá válik a hullámterjedésből eredő időintervallum-eltolással, valamint a csatornazajokkal szemben. A rádiócsatornában továbbítandó digitális/analóg függvények a vételi helyre (vevőantenna) nemcsak közvetlen, de közvetett módon (többszörös visszaverődés, reflexió elve) is eljutnak, ezért a vett szimbólumok közötti interferenciával számolni kell. Ha a csatornák közötti legnagyobb időkülönbség t_{\max} , a továbbított adatok szimbólum ideje T , a szimbólumok interferenciájának (ISI³⁵) értékét az alábbiak szerint kapjuk [19]:

$$|SI| = \frac{t_{\max}}{T} \quad (1)$$

Az N csatornás többvivős rendszer esetében egy részcsatorna adatátviteli sebessége (D_r) a teljes csatornasebesség, és a csatornák számának hányadosa. Ezt figyelembe véve a részcsatorna szimbólumideje (T_r) az alábbi összefüggéssel számolható [20]:

$$T_r = \frac{1}{D_r} \quad (2)$$

A matematikai helyettesítésekből következik, hogy a részcsatorna szimbólumideje az eredeti szimbólumidő N -szerese, azaz az ISI részcsatornára adódó értéke:

$$|SI_r| = \frac{t_{\max}}{T_r} = \frac{t_{\max}}{T \cdot N} \quad (3)$$

Ez az összefüggés rámutat arra, hogy a szimbólumközi interferencia N -ed részére csökkenésével és a részcsatornák számának helyes megválasztásával a többutas hullámterjedés kedvezőtlen hatásai jelentősen csökkenthetők. Az ISI értékének alacsony szinten tartása a vevőkészülék egyik kiemelt feladata. A vivőfrekvenciák átlagos száma akár több ezerig is terjedhet.

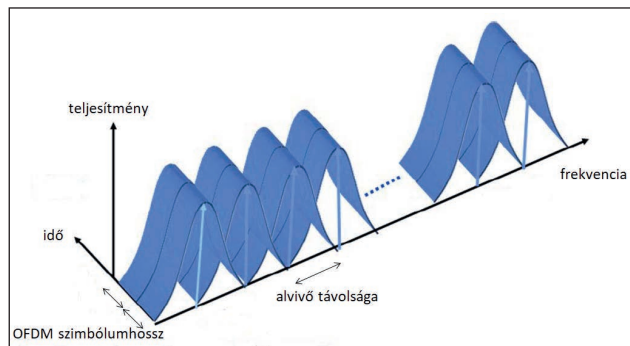
A több vivő modulációja és demodulációja végrehajtható diszkrét Fourier-transzformációval³⁶ (DFT³⁷) [21], gyors Fourier-transzformációval (FFT³⁸), illetve annak inverz műveletével (IFFT³⁹). Ebben az esetben egy függvény (f_r) N darab frekvenciamintával (f_m) is megadható, ahol $m = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Az f_m értékei komplex számok, amelyek Fourier-transzformáltja N számú frekvenciaértékeket ad. A diszkrét Fourier-transzformált matematikai alakja:

$$F_{(n)} = \sum_{m=0}^{N-1} f_r(k) e^{j \frac{2\pi mn}{N}} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4)$$

A jelfeldolgozás folyamán követni kell a Shannon/Nyquist⁴⁰ mintavételi szabályokat, azaz a mintavételi frekvenciának a legnagyobb alkalmazott frekvenciaérték kétszeresének kell lennie. A sávhatárolt jel egy szimbólumának T időtartama alatt T_{mv} gyakorisággal kell N darab mintát venni (Δt – mintavételi idő, B – sávzélesség):

$$\Delta t = \frac{1}{2} B = T_{mv} \quad (5)$$

Az idősorozathoz a frekvenciatartomány N darab ($N = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$) mintája tartozik. A nulladik elem az időfüggvény átlaga, az első elem az első harmonikus, a további frekvencia-összetevők az első harmonikus többszörösei (felharmonikusai). Így az adott sávzélesség-tartományban elhelyezkedő N tagú frekvenciasor szimmetrikusnak tekinthető, az N -edik minta a Nyquist-frekvencia. E szimmetrikus esetben, spektrális tekintetben elegendő az $N/2$ mintáig



3. ábra. OFDM-jelforma spektrális (idő-frekvencia) ábrázolása (A szerző szerkesztése a [22] alapján)

figyelemmel követni a frekvenciaértékeket. Ez az a frekvenciaérték, amelynek meghatározása kiemelten fontos a későbbi hibamentes adatjel-visszaállítás érdekében (IDFT⁴¹).

A jelvisszaállítást támogatja a felkeverést megelőzően az időtartománybeli mintákba vegyítendő ciklikus előtag (CP⁴²), amely többnyire a jelfolyam N számú mintájából és az utolsó mintának a jelalak elejére történő másolásával állítanak elő, amellyel a vevőoldali többutas áthallás jelentősen csökkenthető, illetve magas százalékos arányban kiküszöbölhető.

A mintavételezés folyamán természetesen megjelenik az alapsávnak megfelelően az alsó és a felső oldalsáv is. Ha a mintavételezési frekvenciánk kisebb, mint a mintafrekvencia értéke, alul-mintavételezésről beszélünk, ahol az alapsáv és a mintavételezési frekvencia alsó sávja átlapolódik⁴³. Az alapsávban zavarösszetevők jelennek meg, amelyek adatátviteli hibákat okoznak. Ennek kiküszöbölése az alkalmazott frekvenciaértékek helyes kiválasztásával, valamint a vevőoldali hibajavító eljárások alkalmazásával valósulhat meg. A 3. ábra segítséget nyújt az OFDM-jelforma háromdimenziós (idő–teljesítmény–frekvencia) spektrális térben történő feldolgozásához.

Az OFDM ortogonális összetevőinek előállítását digitális jelfeldolgozó eljárások végzik el a szinuszos jelek valamely (amplitúdó, frekvencia, fázis) összetevőjének módosításával. A gyakorlatban a leginkább elterjedt műszaki megoldások a már hivatkozott ASK és a QAM, amelyek közül ez utóbbi a leginkább használatos.

(Folytatjuk)

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] NATO Science & Technology Organization. *Science & Technology Trends 2020-2040*, 2020. március, pp. 6–19.;
- [2] Haig Zsolt, *Információs műveletek a kibertérben*, Dialóg Campus Kiadó 2018 pp. 96–117.;
- [3] Károly Krisztián, „Automatizált erőkövetési képesség megvalósításának lehetőségei a Magyar Honvédség híradó-informatikai rendszerében” doktori (PhD) értekezés, (NKE KMDI, Budapest, 2019.): p. 229.;
- [4] Deering, S., és R. Hinden. „Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification”, 1998. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc2460> (Letöltés: 2020.3.12.);
- [5] Károly Krisztián, „A TETRA AVL szolgáltatás katonai alkalmazásának aspektusai,” *Honvédségi Szemle* 144. évfolyam 1. szám (2016.): pp. 130–143.;
- [6] ITU-R, *Recommendation ITU-R M.2021-3 (IMT-Advanced)* January 2018, pp. 4–23.;

- [7] ITU-R, *Recommendation ITU-R M.2021-4 (IMT-Advanced)* November 2019, pp. 16–23.,
- [8] ITU Radiocommunication Study Group, *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*, Document 5/BL/22-E, 21 July 2015, pp. 18–21.;
- [9] *IEEE 802.11, Wireless Local Area Network standards*, March 2020. Internet: <http://www.ieee802.org/11/#>, (Letöltve: 2020.1.12.);
- [10] Károly Krisztián, és András Németh. „The Possibilities of Supporting the Public Functions with Fleet and Force Tracking Systems”. *Academic and Applied Research in Military and Public* 18, sz. 3 (2019): 55–67. <https://doi.org/10.32565/aarms.2019.3.4>.;
- [11] Károly Krisztián. „Szenzorhálózatok adatainak integrálási lehetőségei a perspektivikus erőkövetési rendszerekbe, különös tekintettel az egyéni egészségügyi adatokra”. *Hadmérnök* 14, sz. 1 (2019. április 8.): 260–70. <https://doi.org/10.32567/hm.2019.1.21>.;
- [12] Károly, Krisztián. „LoRaWAN-technológia felhasználási lehetőségei a katonai alkalmazások tükrében”. *Hadmérnök* 14, sz. 3 (2019): 101–11. <https://doi.org/10.32567/hm.2019.3.9>.;
- [13] Mohammed, Dr Habeeb Ur Rahman. „QAM Is Rising: 1024QAM And Beyond”. *Microwaves & RF*, 2014. április 16. <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21845619/qam-is-rising-1024qam-and-beyond>. (Letöltve: 2020.2.13.);
- [14] Rodriguez, Jonathan, szerk. *Fundamentals of 5G Mobile Networks: Rodriguez/Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118867464>;
- [15] Demir, Ali Fatih, Mohamed Elkourdi, Mostafa Ibrahim, és Huseyin Arslan. „Waveform Design for 5G and Beyond”. In *5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management*, 51–76. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2018. <https://doi.org/10.1002/9781119333142.ch2>.;
- [16] Cinkler Tibor, Simon Csaba, Szabó Örs, Székely Sándor, Jakab Csaba, „5G hálózatok architektúrája.” *Híradástechnika* 71. évf. 2016, pp. 40–44.;
- [17] Sebestyén Ákos, „A DVB-T rádiófrekvenciás visszirányú megoldásainak bemutatása.” *Híradástechnika* 59. évf., sz. 7. (2004): p. 47.;
- [18] Dr. Pap László, „Az új mobil technológiák – az LTE és a kognitív rádió alkalmazások műszaki összefüggései, hatásai” Pro-M Zrt. előadás, 2014. október 26, slides 12–18.;
- [19] Kollár Zsolt, Varga Lajos, Horváth Péter, „Modern, többvívós rendszerek kognitív rádiós alkalmazásokban.” *Híradástechnika* 66. évf., sz. 3. (2011): pp. 74.;
- [20] Kollár, Zsolt, és Péter Horváth. „PAPR Reduction of FBMC by Clipping and Its Iterative Compensation”. *Journal of Computer Networks and Communications* 2012 (2012): 1–11. <https://doi.org/10.1155/2012/382736>;
- [21] Khalid: „An interactive guide to the Fourier Transform” <https://betterexplained.com/articles/an-interactive-guide-to-the-fourier-transform/> (Letöltve: 2021.10.2.);
- [22] Shrikant, Manikandan, Murugesapandian, „OFDMA: is it the multiple system of the future?” AU KBC Research Center Chennai India, p. 03.

JEGYZETEK

- 1 QoS – Quality of Service (Meghatározott minőségi követelmények).
- 2 SWOT elemzések – Strengths (erősségek) – Weaknesses (technológiai), Opportunities (üzleti) és Threats (gazdasági) elemzések lényegi elemei.
- 3 QoE – Quality of Experience (szolgáltatás érzékelése, tapasztalása).
- 4 5GS – 5th Generation Systems/Services. Az ITU-R, az IEEE 802.11 és a 3GPP szabvány (ajánlás) családban rögzített rendszerparaméterek alapján összeállított, a vezetőkes és a vezeték nélküli hálózatokat tartalmazó, azokat integráló adatátviteli rendszer(ek).
- 5 IPv6: RFC 2460.
- 6 Infokommunikációs rendszerek – katonai vonatkozásban a híradó, informatikai és információvédelmi rendszerek kifejezést alkalmazzuk.
- 7 ITU-R – International Telecommunications Union - Radio Communications Sector.
- 8 IMT-A – International Mobile Telecommunications – Advanced (4G LTE-A) és IMT-2020 (5G).
- 9 3GPP – 3rd Generation Partnership Project.
- 10 GSM – Global System for Mobile Telecommunications, GPRS – General Packet Radio Services, EDGE – Enhanced Data GSM Environment, UMTS – Universal Mobile Telecommunications Services, LTE-A – Long Term Evolution-Advanced 4G, IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- 11 UE – User Equipment (felhasználói eszköz).
- 12 IoT – Internet of Things (tárgyak internete).
- 13 M2M – Machine to Machine Interface (gép-gép összekapcsolások).
- 14 WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access.
- 15 ZigBee – alacsony teljesítményfelvételű, kis adatsebességet biztosító, korlátozott lefedettségű tartományra tervezett vezeték nélküli hálózati protokoll (IEEE 802.15.4).
- 16 LoRaWAN – Long Range Wide Area Network (nagy hatótávolságú és nagy kiterjedésű területeket lefedő hálózat).
- 17 LAN – Local Area Network (helyi hálózat).
- 18 WAN – Wide Area Network (nagy kiterjedésű területeket lefedő hálózat).
- 19 1024 QAM – 1024-state Quadrature Amplitude Modulation.
- 20 MU-MIMO – Massive Multi-user Multiple In Multiple Out.
- 21 ADC/DAC – Analog – Digital Converter / Digital – Analog Converter.
- 22 eMBB – enhanced Mobile Broad Band.
- 23 mMTC – massive Machine Type Communications.
- 24 uLLC – ultra-reliable Low Latency Communications.
- 25 TTI – Transmission Time Interval.
- 26 BER – Bit Error Rate, BLER – Block Error Rate.
- 27 Computational complexity.
- 28 PAPR – Peak-to-Power Ratio.
- 29 OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
- 30 Induktív eljárás a fogalommagyarázatban – bottom-up processes.
- 31 ASK – Amplitude Shift Keying.
- 32 QPSK – Quadrature Phase Shift Keying.
- 33 QAM – Quadrature Amplitude Modulation.
- 34 MC-CDMA – Multi-Carrier Code Division Multiple Access.
- 35 ISI – Inter Symbol Interference.
- 36 Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830) francia matematikus 1807-ben írt tanulmánya indította el az analitikai problémák trigonometrikus függvénysorokkal történő megoldásának kutatását. Fourier felfedezése szerint látszólag bonyolult periodikus függvényeket is fel lehet írni egyszerű szinusz- és koszinusz hullámok összegeként. (A szerk.)
- 37 DFT – Discrete Fourier-transformation (diszkrét Fourier transzformáció).
- 38 FFT – Fast Fourier-transformation (gyors Fourier transzformáció).
- 39 IFFT – Inverse Fast Fourier-transformation (inverz, gyors Fourier transzformáció).
- 40 A jelfeldolgozás területén alapvető fontosságú mintavételi tétel, amely kapcsolatot biztosít a folytonos idejű és a diszkrét idejű jelek között. Megfelelő feltételt állapít meg egy olyan mintavételi sebességhez, amely lehetővé teszi a minták diszkrét sorozatának véges sávszélességű, folytonos idejű jeléből származó összes információ rögzítését. (A szerk.)
- 41 IDFT – Inverse Discrete Fourier Transformation (inverz diszkrét Fourier-transzformáció).
- 42 CP – Cyclic Prefix (ciklikus előtag).
- 43 Átlapolódás – Aliasing.