

Dr. Gulyás Attila\*

# Ötödik generációs vezetékes, és vezeték nélküli hálózatok egyes modulációs megoldásai **II. rész**

A tanulmány célja, hogy jobban feldolgozhatóvá váljanak az 5G hálózatok alapját képező modulációs megoldások a magas adatsebesség, a nagyobb sáv szélesség és az optimalizált teljesítményfelvétel biztosítására. A sorozat 1. részében a szerző bemutatta a hálózatok evolúcióját, és áttekintette az IMT-2020 ajánlásokat perspektivikusan kielégítő, egyes modulációs módokat.

## ALKALMAZANDÓ MODULÁCIÓS ELJÁRÁSOK A RENDSZERKÖVETELMÉNYEK KIELÉGÍTÉSÉRE

A QAM-eljárás keretében az információátvitelre a vivők/ alvivők fázisát és amplitúdóját változtatjuk, azaz a csatornában továbbítandó jelet szinuszos taggal szorozzuk fel. A komplex számok síkján e fázis- és amplitúdószorzás tehát komplex (valós és imaginárius összetevőjű) számot eredményez, amely – egy lehetséges ábrázolásmód szerint – a konstellációs diagramban mutatható be (4. ábra).

Az egyszerűbb témafeldolgozás érdekében, a 4. ábra bal oldalán tanulmányozható 4QAM (más megnevezésben QPSK) a QAM különleges változata, ahol amplitúdó-változás nincs, ugyanakkor a jel négyféle fázisállapottal jellemezhető (45-135-225-315 fokos fázisok), azaz a hasznos jelünk egy-egy fázisváltása 2-2 bit információt továbbíthat [24].

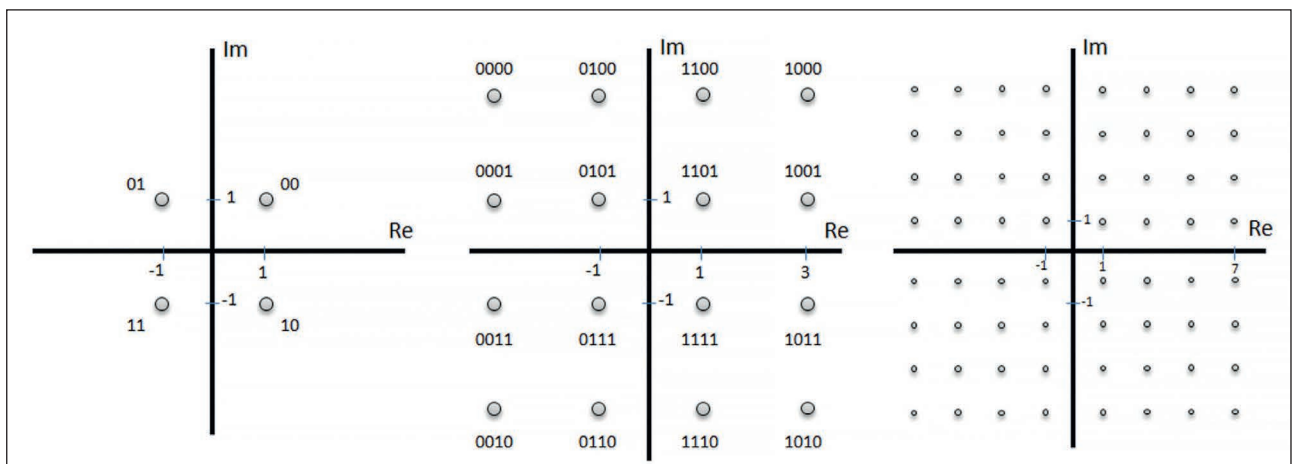
A magasabb adatátviteli sebesség eléréséhez komplexebb QAM indokolt, ugyanakkor a QAM helyes választásakor figyelembe kell venni a modulációs komplexitásból származtatható adatátviteli zavarokat is. Ezzel együtt is,

vélhetően a QAM lehet az ortogonális modulációs eljárások alkalmazása esetében az a modulációs eljárás, amely perspektivikusan megvalósíthatja az IMT-2020 ajánlásokban rögzített rendszerparamétereket a követelmények vonatkozásában. [25][26]. Az átviteli sebesség és a komplex modulációs mód összefüggése az 1. táblázatba rendezett összefüggések alapján tanulmányozható.

1. táblázat. Az adatátviteli sebesség és az alkalmazott modulációs módok áttekintése (A szerző szerkesztése a [27] alapján)

modulációs mód	biték száma	bit/ szimbólum	példa
ON-OFF keying (ASK)	$2^1$	1	0
QPSK	$2^2$	2	01
16QAM	$2^3$	4	0101
32QAM	$2^4$	5	01010
64QAM	$2^5$	6	010101
128QAM	$2^6$	7	0101010
256QAM	$2^7$	8	01010101
512QAM	$2^8$	9	010101010
1024QAM	$2^9$	10	0101010101

4. ábra QAM konstellációs diagramjai (A szerző szerkesztése a [23] alapján)



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



A modulációs eljárásokat vizsgálva, [28][29] általános-ságban kijelenthető, hogy magasabb szintű moduláció alkalmazásával – azonos csatornaparaméterek mellett – nő a csatorna kihasználási szintje, ezzel együtt az adatátviteli sebesség is növelhető [30].

Visszatérve a modulációs megoldások vizsgálatához, az OFDM alapsávi időfüggvényét ( $u_{as}$ ) a következő összefüggéssel írhatjuk fel ( $A_k + jB_k$  – komplex digitális moduláció a  $k$ -adik adatblokkban,  $e^{j2\pi f_k t}$  – vivőhullám):

$$u_{as}(t) = (A_k + jB_k) \cdot e^{j2\pi f_k t} \quad (6)$$

Az információ továbbításának az átviteli csatornához történő alakítása az alvivők amplitúdó- és fázismodulációjával valósulhat meg. Ennek időfüggvénye [31]:

$$z_{as} = \sum_{n=0}^{N-1} \{a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t)\} \quad (7)$$

Az  $u_{as}$  alapsávi jel előállításához  $N$  darab alvivő frekvencia szükséges, a teljes modulált időfüggvény a külön-külön, de azonos időben modulált alvivők függvényösszege.

A modulációs rendszer fizikai kialakításának, elsősorban a végerősítő megépítése szempontjából újabb kihívást jelent a csúcstényező értékének, dinamikájának határokon belül tartása, amely az OFDM-jelsorozat egyik jellemző értéke. A csúcstényező (PAPR) értéke a jel átlagteljesítménye és a legnagyobb pillanatnyi teljesítményértékének logaritmusos értéke [32]:

$$PARS = 10 \log_{10} \left( \frac{x_{nmax}^2}{\sum_n (x_n)^2} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

A csúcstényező értéke is függ a vivők számától, nagyobb vivőszám esetén a csúcstényező értéke átléphet egy olyan kritikus értéket, amely a végerősítő fizikai kialakításának szab határt. Az áramköri fizikai kialakítás folyamán ezért csúcstényező-csökkentő eljárásokat alkalmaznak.

Az OFDM-jelátvitel előnyei között felsorolhatjuk, hogy a részcsatornák ortogonalitása és a védőtávok a csatornainterferenciát jelentősen csökkentik, a részcsatornák tekintetében egyszerűbb a csatorna kiegyenlítése, a Fourier-eljárás változatai csökkentik a számítási műveletek számát, az átvivendő EM-frekvenciaspektrum hatékony továbbítása megvalósítható a részspektrumok átlapolásával. Hátrányai, hogy az amplitúdó-eloszlás nagy dinamikájú, nagy csúcstényező értékű, továbbá kiemelt fontosságú a vivőfrekvenciák pontossága mind az adó-, mind a vevőoldal tekintetében<sup>44</sup>. Figyelemmel kell lenni továbbá a vivő (csatorna) szinkronizáció és a csatorna kiegyenlítés követelményeire is.

A többvivős rendszerek területén tehát az OFDM bizonyul az alapvető eljárásnak. Referencia-eljárásként kezelve tehát azt kell vizsgálni, hogy a csatornaáthallás<sup>45</sup> (szivárgás) jelentős redukciója, a csúcstényező csökkentésének az igénye hogyan illeszthető a magas adatsebesség fenntartásához, illetve további növeléséhez úgy, hogy a modulációt megvalósító rendszer komplexitása alacsony szinten maradjon. Több adatátviteli eljárás létezik ezen paraméterek finomhangolására, amelyek többé-kevésbé az OFDM egyfajta kiegészítésére épülnek – az eljárás továbbfejlesztésének tekinthetők – annak érdekében, hogy a rendszerkövetelmények megvalósulhassanak.

Az OFDM-jel spektrális sűrűsége a vivők számának a függvénye, ugyanakkor a vivőszámot sem növelhetjük a végtelenségig, hiszen az jelentősen befolyásolja a csúcstényező értékét és komoly számítási kihívásokat támaszt az FFT-műveletek területén. Újabb tényező az adó- és a

vevőoldali oszcillátorok közötti frekvencia-eltérés (offset), amelynek valószínűsége  $N$  számú vivővel kalkulálva  $N$ -szerez, így szabványértékeken belül tartása alapkövetelmény. Összességében kijelenthető, hogy a magas szintű rendszerkövetelmények csakis úgy elégíthetők ki, hogy – az átviteli rendszer funkcióinak, feladatrendszerének ismeretében – észszerű kompromisszumokat kötünk az egyik, vagy a másik rendszerparaméter előnyére, illetve kárára. A továbbiakban vizsgáljunk meg néhány, már létező műszaki eljárást.

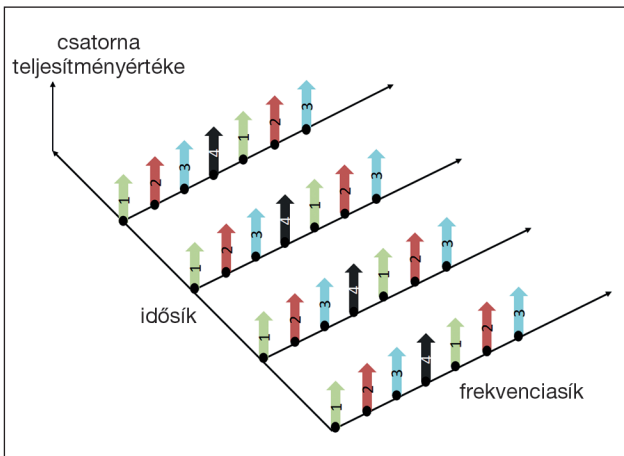
A szűrőbankalapú többvivős FBMC<sup>46</sup> esetében a komplex formában rendelkezésre álló szimbólumokat köztes frekvenciaértékre súlyozzák külön erre a célra tervezett szűrőbankokkal. Az így kialakított  $M$ -szerez frekvencia-kiterjesztés  $M$  számú FFT-műveletet igényel. A szűrőbankok alkalmazása miatt az FBMC spektrális tulajdonságai – az OFDM-el összevetve – javulnak, a csatornaáthallás értéke csökken, a leképezések (frekvenciaértékre súlyozás) miatt a szimbólumok időben hosszabbak, spektrumban keskenyebbek lesznek. A komplex alapsávi jelek valós és képzetes részének szétválasztásával, Offset-QAM moduláció alkalmazásával az adatsebesség értéke fenntartható, ugyanakkor a szimbólumok átlapolódása tervezhetővé válik a vevőben, amint az átlapolódó szimbólumokhoz a komplex alapsávi jel hol valós, hol képzetes részét keverjük. Ugyanakkor figyelemmel kell lenni a nagyszámú FFT/IFFT-műveletek számítási igényére, amelynek csökkentése vagy legalább a meghatározott értéken tartása polifázisú szűrőbank rendszer alkalmazásával valósítható meg [33].

Az állandó keretű OFDM (CE-OFDM<sup>47</sup>) alkalmazását tervezve elsősorban a csúcstényező alacsonyabb értéken történő tartására összpontosíthatunk. Ebben az esetben a szimbólumok mellé azok konjugált párjaikat rendezzük oly módon, hogy az IFFT-kimenetre a valós jel kerüljön kicsatolásra. Az így előállított valós jel – súlyozó tényezővel való szorzást követően, ez úton a szimbólumok fázisértékét befolyásolva – folytonos fázismodulációt (CPM<sup>48</sup>) alakít ki. A konjugált szimbólumpárok alkalmazása miatt az adatsebesség feleződik [34].

Többvivős kódosztású átvitel esetében (MC-CDMA) a komplex szimbólumok alvivőkre ültetve kerülnek továbbításra külön erre a célra tervezett kódtábla használatával, amikor az alvivők szintén átlapolódnak, azonban a vevőoldalon a kódtábla ismeretében viszonylag kevés számítási alkalmazásával szétválaszthatók. Ez az átviteli, modulációs eljárás egyfajta kombinációja az OFDM és a CDMA<sup>49</sup> átvitelnek [35].

Most vizsgáljuk meg azt, hogyan lehetséges az OFDM eljárás hatékonyságának a növelése az IMT-2020 ajánlásokban meghatározott adatátviteli sebesség elérése érdekében. Az egyik megoldás az IEEE 802.11 ax tervezéséhez már számításba vett, az IEEE 802.16d és 802.16e (WiMAX) szabványokban<sup>50</sup> már bevált ortogonális frekvenciaosztású többszintű hálózati hozzáférés (OFDMA<sup>51</sup>) alkalmazása lehet [36].

OFDMA-átvitel esetében a szimbólumcsoportok az idő és frekvencia spektrumban elválasztásra kerülnek, azaz az OFDMA-csoportosítás több, az OFDM-eljárással kialakított szimbólumcsoportot foglal magába. Az alvivők és az OFDM szimbólumperiódusok jól ábrázolhatók a koordináta-rendszer idő- és frekvenciasíkjaiban. Így a különböző felhasználók szimbólumcsoportjai különböző „ablakokat/réseket” tölthetnek fel: különböző alvivő csoportosítások továbbíthatják az OFDM-eljárással előállított szimbólumcsoportokat. Az 5. ábrán részleteiben követhető az eljárás, ahol színekódok és számozás jelöli a továbbítandó szimbólumcsoportok idő- és frekvencia szekvenciáit.



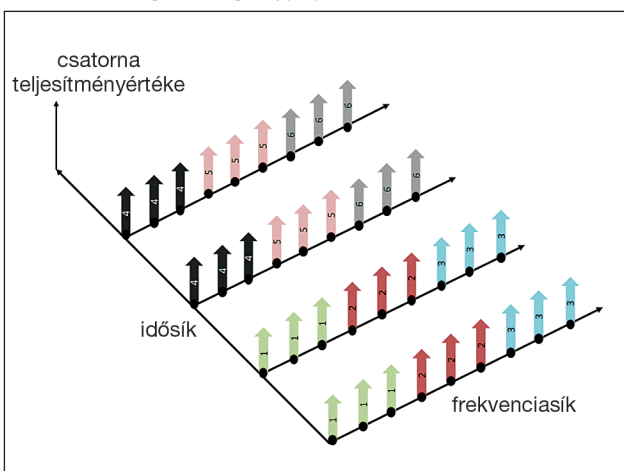
5. ábra. Általános idő- és frekvencia-alkotás OFDMA-esetén (A szerző szerkesztése a [40, 7. o.] alapján)

Az OFDM-csatornák eloszlása az állandó értékűnek tekintett alvivő-teljesítmény és a szabványos, a rögzített csatornatávolságok és azok transzponálási idejének függvényében biztosítja a szabványokban és ajánlásokban rögzített átviteli kapacitásokat. A gyakorlatban az alcsatornák (amelyek tehát jellemezhetők idő- és frekvenciaértékeikkel, valamint csatornateljesítményeik alapján is) a legkisebb azonosítható egységek az adatátvitel logikai megközelítéséből adódóan, azaz különböző módon csoportosított alvivőkből állnak. Ezek a csoportosítások alapvető fontossággal bírnak az OFDMA rendszerkialakítás szempontjából.

OFDMA alkalmazásakor OFDM-szimbólumokat integrálunk az alvivőkhöz rendelt idő- és a frekvenciatartományokban, azaz az egyes alvivők sorrendisége kötött az OFDMA idő- és frekvenciasávjában. A gyakorlati rendszerkialakításban a frekvencia síkban illusztrált, a színes nyilakkal jelzett szimbólumcsoportok nem csak direkt hozzárendeléssel kapcsolódhatnak az alvivők egyes csatornához, mivel a csatornában, alcsatornában a továbbított szimbólumcsoportokat keveréssel is előállíthatjuk. Egy adott alcsatorna magában foglalhatja több alvivő csoportosítását is. Műszaki megoldások tekintetében megkülönböztetünk két jellemző csoportosítási eljárást.

A szomszédos alvivők csoportosításának alkalmazása (ASM<sup>52</sup>) esetében (6. ábra) az egymással szomszédos, egymást követő alvivők azonos spektrális tulajdonságokat

6. ábra. OFDMA alhálózat kialakítása ASM esetében (A szerző szerkesztése a [40; 8. o.] alapján)



mutatnak, amelyre az alvivő-kijelölés esetében különös figyelmet kell fordítani.

Az így kialakított csoportosítás kielégíti az átviteli csatornára meghatározott, a kijelölt rendszerparaméter-elemek követelményeit, a csoportosított alvivők koherens egységet alkotnak (korrelálnak egymással). Alacsony marad az alvivő interferencia, hatékony statikus adó- és vevőkonstelláció alakítható ki, ugyanakkor hátrányos lehet a frekvenciák újrafelhasználásának hiánya, valamint jelentős sávszélességet használhat fel a csatornaminőség-információk többszörös továbbítása. Ha a csoportba szervezett (szomszédos) alvivők korrelálatlanok, megnő az esélye az átviteli sávszélesség túlerheltségének, mivel a fogadó terminál válaszkérései miatt újra kell küldeni megannyi szimbólumcsoportot. Ez a folyamat nem csak a sávszélességet emészt fel, de jelentős számítási terhelést is jelent mind az adó-, mind a vevőoldalon; így együtt járhat az átviteli rendszer teljesítmény-felvételek növelésével. Tehát ASM esetében az alcsatornák egymással határos alvivői kerülnek csoportosításra azzal a szándékkal, hogy az átvitel az alvivő frekvenciák és az alcsatornák pontos korrelációjával valósul meg. Az eljárás alapvetően arra tervezett, hogy számításba veszi az alvivő frekvenciák egyfajta koherenciáját, amely az alcsatorna paramétereinek (pl. spektrális eloszlás, zavarállóság, szabványos válaszdők) azonosságán alapulhat. Figyelemmel kell lenni, hogy amint a csoportosítás koherenciája elér egy előre meghatározott minimum értéket, a vevőoldali válaszszelekciók az átviteli csatornák jelentős leterheltségét eredményezik (*channel overloading*). Azaz az alcsatornák túltelítődése felemészti a rendelkezésre álló sávszélességet, amely akár az alcsatornák által felhasznált csatornateljesítmények jelentős növekedését eredményezheti. Ezen tényezők együttes változása a szimbólumátvitel jelentős romlásához vezethet.

A másik eljárás az alvivők csoportba rendezésére az opportunisztikus alvivő-csoportosítás (DSM<sup>53</sup>). Ebben az esetben az alvivőket egy e célra tervezett algoritmus alkalmazásával választjuk ki, és csoportosítjuk. Az így kialakított alcsatorna jelentős frekvencia-különbözőségekkel bír, amely jól kihasználható a csatornakódolás és átlapolódás esetében. DSM alkalmazásakor az IEEE 802. szabvány-család különböző verziói esetében *bit interleaving coded modulation* (BICM) tervezhető. A frekvenciaugratás és a DSM kombinált alkalmazása igazán előnyös lehet annak fényében, hogy így az előzetesen definiált alvivők és alcsatornák időspektrum-felhasználása nem konstans. Így az adatátvitel ellenállóbbá válik az átviteli csatornában folyamatosan jelenlévő csatornacillapítás (fading) és az offszet tekintetében. A DSM előnye az alcsatornák nyereségének összeadódása. Az alkalmazott frekvenciák újrahasználhatók, a csatornák interferenciája átlagolható és átfogó megoldásokkal csökkenthető, valamint MIMO antennarendszerekkel való kombinált alkalmazásakor mind a statikus, mind a mozgó adó-vevőpontok esetében is jól alkalmazható.

Az IEEE 802.16-2004 szabvány esetében a 20 MHz-es sávszélesség-tartományban legfeljebb 2048<sup>54</sup> alvivő szervezhető alhálózatokba. A 2. táblázat az alhálózatok alapvető fizikai paramétereit mutatja be.

Látható, hogy az átviteli sávszélesség bővítésével az alvivők száma növekedhet, ezzel az OFDM szimbólumidő is értékalapon csökken, amit – többek között – az alvivők távolságának és az átlagos szimbólumidők állandó értéken tartása tesz lehetővé. Az OFDM tehát felfogható egyfajta OFDM csatornanyalábolási eljárásnak, amely lehetővé teszi az IMT-2020 ajánlásban meghatározott átviteli adatsebesség megközelítését/elérését.



2. táblázat. OFDMA-paraméterek (A szerző szerkesztése a [37] alapján)

Alapparaméterek		Csatornaértékek				
sávszélesség (MHz)	BW	1,25	2,5	5	10	20
mintavételi frekvencia (MHz)	$F_s = \frac{8}{7}BW$	1,429	2,857	5,714	11,429	22,857
mintavételi idő (μs)	$T_s = 1/F_s$	0,7	0,35	0,175	0,088	0,044
FFT (alvivők) száma	N	128	256	521	1024	2048
alvivők távolsága (kHz)	$\Delta f = F_s/N$	11,16071429				
átlag szimbólumidő <sup>55</sup> (μs)	$T_b = 1/f$	89,6				
védőintervallum ideje (μs)	$T_g$	22,4	11,2	5,6	2,8	
OFDMA-szimbólumidő (μs)	$T_s = T_b + T_g$	112	100,8	95,2	92,4	

**ALKALMAZANDÓ MODULÁCIÓS ELJÁRÁSOK A RENDSZERKÖVETELMÉNYEK KIELÉGÍTÉSÉRE**

A fent bemutatott OFDM, és annak különböző verziói, valamint a csatornanyalábolással kialakított OFDMA lehetnek – holisztikus megközelítésben – azon modulációs eljárások, amelyek (már meglévő vagy tervezett) szabványosítása megvalósíthatja az IMT-2020 ajánlásban kitűzött célokat. Úgy vélem, hogy a bemutatott modulációs eljárások közül az adó- és a vevőoldali berendezéseknek autonóm módon, az átviteli csatorna folyamatos vizsgálatát és a konklúziót levonva, azaz kognitív módon kell kiválasztaniuk, alkalmazniuk, mérniük/vizsgálaniuk és automatikusan változtatniuk a kisugárzott információcsomagok modulációs eljárásait, a kisugárzási teljesítményt annak érdekében, hogy az előírtaknak megfelelő vételi jelszint, az adófokozat jelei kerüljenek a visszaállításra a vételi pontokon.

Mivel a vevőoldali berendezések (UE) is szoftvervezérelt eszközök, így – a hardverparaméterek rendelkezésre állása esetében – a hálózatfrissítésekkel szinkronizált UE-szoftverfrissítések adhatják meg a legnagyobb hatásfokkal működő, az egymással korreláló nódusokat a kialakítandó koherens vezeték nélküli adatátviteli rendszerekben. A hálózatkialakításnak fokozottan figyelemmel kell lennie a végponti felhasználók termináljainak a mozgásából adódó cellaváltásokra, a többnyire a környező műtárgyak és a máris zsúfolt EM-csatornáknak jelen lévő interferenciákra, azaz a csatornajellemzők változására, és azok szabványosított szintértékekre történő beállítására, illesztésére.

Úgy vélem, a jelen és a közeljövő technológiai fejlesztései alapvetően mozdulnak el a szoftverfejlesztések irányába az 5GS-ben megnyíló új frekvenciasávok optimális kihasználására, a frekvenciasávok cellás újrafelhasználására. Ugyanakkor az 5GS számára kijelölt frekvenciasávokban történő rádióforgalmazások magas követelményeket támasztanak mind a bázisállomások, mind az vevőoldali berendezések antennakialakításában és így innovatív megoldásokat igényelnek.

**ÖSSZEFOGLALÁS**

E rövidre szabott, az egyes modulációs/adatátviteli módokat bemutató információhalmazból jól körvonalazható, hogy az IMT-2020 ajánlásainak az OFDM valamelyik változata fog alapul szolgálni, az ajánláson túl – jelen ismereteink alapján – a későbbi szabványnak ezt a modulációs

megoldást kell alapeljárási tekintenie. Természetesen egy adott, az országos cellás hálózati lefedettség elérése céljából kialakítandó vezeték nélküli hálózatnak ötvöznie kell a városi környezet (MAN<sup>56</sup>) és a hézagosabb településkialakításhoz méretezett, azok lefedésére szolgáló hálózati szabványokat, amely nyilvánvalóan jelentős kihívásokat jelent már jelenleg is a hálózattervező mérnökök számára. Alapvetésként tekintek tehát a vezeték nélküli hálózatok evolúciójának átfogó megközelítésére és a már létező, valamint a fejlesztendő hálózatok és azok alapösszetevőinek a koherenciájára. Az IMT-2020 ajánlásban megfogalmazott műszaki paraméterek biztosítása csakis a már meglévő 3G, LTE-A rendszerparaméterek egyfajta további fejlesztésével alakíthatók ki.

Értelmezésem szerint a további tudományos kutatásoknak alapvetően két irányban kell folyniuk. Egyrészt – rendszer szinten – a végfelhasználói terminálok, mint szoftvervezérelt kognitív adó-vevőkészülékek területén azt kell elérni, hogy az IMT-2020 ajánlás mielőbbi szabvánnyá lépjen elő, ezzel az ipari (gyártói) folyamatok kerülnek a nemzetközi szinteken is egységesítésre. Belátható, hogy mind az adó-, mind a vevőoldalon a korábbi vezeték nélküli hálózatok műszaki megoldásainak az ötvözése az újabb kihívásokkal jelentős hardver- és szoftverigényt támaszt. Ugyanakkor a szoftverfejlesztéseknek lépést kell tartaniuk a lecsökkentett komputációs, a lehető legkisebb energiateljesítményre optimalizált műszaki részlemek kialakításának igényével. Nem hanyagolható el az átviteli csatorna minősége sem, hiszen a digitális átállás [38][39] következtében megannyi, a korábban nemzeti és európai uniós törvényekben rögzített rádióforgalmi sávok, csatornák (frekvenciák) szabadultak fel az analóg átvitel terhelése alól, ami átgondolt spektrum-menedzsmentet követel meg. Ugyanakkor e frekvenciák cellán belüli felhasználása, újrafelhasználása jelentősen megnöveli a csatornainterferencia lehetőségét, amely ellen műszaki megoldásokkal kell védekezni. A mielőbbi szabványosított hálózatelemek és maga a vezeték nélküli hálózat kialakításának műszaki megoldásai megvalósíthatják a nemzetközi szinten is kölcsönösen összekapcsolt és illesztett vezeték nélküli, a cellás rendszerek koherens alkalmazását.

Másrészt a katonai jellegű kutatásoknak arra kell választ találniuk, hogyan lehetséges a nemzeti és a szövetségi kötelezettségeinkből fakadó hálózatfejlesztési igényeinket úgy összehangolni, hogy azzal megteremtjük a katonai alkalmazások optimális üzemeltetését legalább a válságreaktív műveletek szintjén. Ugyanakkor kitekintéssel kell

lennünk egy perspektivikus, több hadszínteres egyesített NATO-művelet eredményes végrehajtására, fel- és kihasználva a már üzemelő, a már kiépített vezeték nélküli rendszerek infrastruktúráját. A katonai hálózatok tekintetében jelentős mértékben merül fel az igény a minősített adatátvitel tervezésére és ezen minősített vezeték nélküli hálózatok üzemeltetésére, amely gondos odafigyelést, harmonizációt követel meg a nemzeti és a szövetségi rendszerekben tervezett hálózatelemekre, nem csak a hardver- és szoftver elemek vonatkozásában.

A továbbiakban tehát e kettős vizsgálati terület korrelációja hozhatja meg a kívánt eredményeket a katonai vezeték nélküli hálózatok tervezésének vonatkozásában. Mindkét terület további kutatást és – a műszaki eljárások kidolgozását követően – jelentős számú vizsgálati eljárás kidolgozását, végrehajtását igényli annak érdekében, hogy a későbbi, a kialakított katonai alhálózatunk a rendszer (műszaki) optimumán működjék.

## HIVATKOZÁSOK

- [23] Praveen Kumar Singya, Parvez Shaik, Nagendra Kumar, Vimal Bhatia, Mohamed-Slim Alouini, „A survey on design and performance of High-Order QAM constellations.” <https://arxiv.org/abs/2004.14708>, pp. 4–6.;
- [24] R. Keim, „Understanding Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Modulation” EETech Media LLC, 17 August 2016. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/quadrature-phase-shift-keying-qpsk-modulation/> (Letöltve: 2020.4.16.);
- [25] Mádi Gábor, „LTE uplink rádiós interfész szimulációs vizsgálata.” Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos és Informatikai Kar, Híradástechnikai Tanszék 2009, p. 25.;
- [26] Sheridam, Kocot, „Quadrature Amplitude Modulation, Optical Fiber Telecommunications” (6. edition) 2013 <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/quadrature-amplitude-modulation> (Letöltve: 2020.4.16.);
- [27] J. Houghton, „Calculating QAM bandwidths gains” *NeoPhotonics Review*, 12 December 2017, p.15.;
- [28] Németh András, Károly Krisztián, „Erőkövetés megvalósításának lehetőségei korszerű harcászati rádiórendszerek kommunikációs csatornáin.” *Honvédségi Szemle* 145. évf. 4. szám (2017): 120–131.;
- [29] Németh András, Károly Krisztián, „Korszerű rövidhullámú harcászati rádióeszközök erőkövető rendszerekben való alkalmazhatóságának vizsgálata.” *Honvédségi Szemle* 144. évf. 6. szám (2016.): 65–78.;
- [30] Károly Krisztián, „Globális Műholdas Navigációs Rendszerek alkalmazási lehetőségei katonai és polgári célú flotta- és erőkövetési rendszerekben (1.)” *Honvédségi Szemle* 146. évf. 1. szám (2018.): 83–97.;
- [31] Zs. Kollár, P. Horváth, „Equalization of multicarrier cognitive radio transmission over multipath channel with large delay spreads.” *Infocommunications Journal* 3, No. 2. (June 2011): pp. 45–46.;
- [32] H. Bölcskei, MIMO-OFDM wireless systems: basics, perspectives and challenges, *IEEE Wireless Communications* (August 2006), pp.18–23.;
- [33] Farhang-Boroujeny, Behrouz, és ChungHim (George) Yuen. „Cosine Modulated and Offset QAM Filter Bank Multicarrier Techniques: A Continuous-Time Prospect”. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2010, sz. 1 (2010. december): 165654. <https://doi.org/10.1155/2010/165654>;
- [34] Char-Dir Chung és Shih-Ming Cho. „Constant-envelope orthogonal frequency division multiplexing modulation”. In *Fifth Asia-Pacific Conference on ... and Fourth Optoelectronics and Communications Conference on Communications*, 629–32 köt.1. Beijing, China: IEEE, 1999. <https://doi.org/10.1109/APCC.1999.824966>;
- [35] Choi, Kim, „MC/MC-DS dual-mode adaptive multi-carrier code division multiple access (CDMA) apparatus and method thereof” Electronics and Telecommunications Research Institute US7349460B2 Patent, 25 March 2008. <https://patents.google.com/patent/US7349460B2/en> (Letöltve: 2020.2.1.);
- [36] „IEEE 802.16-2004 WiMAX” <http://www.ieee802.org/16/pubs/80216-2004.html>, (Letöltve: 2019.12.22.);
- [37] Rohde & Schwarz, „1MA96\_0E General information about the standard 802.16, Application Note for WiMAX” April 2020 p. 22.;
- [38] Rozgonyi Krisztina, „A digitális átállás folyamata és helyzete Magyarországon – régiós kitekintésben” Médiakutató online, 2012 április, [https://www.mediakutato.hu/cikk/2012\\_04\\_tel/06\\_digitalis\\_atallas\\_folyamata/](https://www.mediakutato.hu/cikk/2012_04_tel/06_digitalis_atallas_folyamata/) (Letöltve: 2020.5.10.);
- [39] Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság (NMHH), „Digitális átállás az otthoni telefonálásban” 2016. június 27, [http://nmhh.hu/cikk/171006/Digitalis\\_atallas\\_az\\_otthoni\\_telefonalasban](http://nmhh.hu/cikk/171006/Digitalis_atallas_az_otthoni_telefonalasban) (Letöltve: 2020.5.6.);
- [40] Shrikant, Manikandan, Murugesapandian, „OFDMA: is it he multiple system of the future?” AU KBC Research Center Chennai India.

## JEGYZETEK

- 44 Az OFDM részcsatornák frekvenciái – nagyságrendileg – néhány száz és ezer közötti mennyiségtartományba tehetők. Itt a segédvívök egymástól való távolsága néhány száz kHz-től néhány kHz-ig terjedhet. E vivőtávolság meghatározása a csatornajellemzők függvénye, míg azok számának meghatározása a teljes sáv szélesség függvényében történik. Az LTE-A esetében a segédvívök távolsága 15 kHz, azonban a számuk függ a sáv szélességtől, így 10 MHz-es sáv szélességnél az alvívök száma 600, míg 20 MHz-nél ez kétszereződik. [25]
- 45 Csatornaáthallás (szivárgás) – Adjacent Channel Leakage.
- 46 FBMC – Filter Bank Multicarrier.
- 47 CE-OFDM – Constant Envelope Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
- 48 CPM – Constant Phase Modulation.
- 49 A többvívös kódosztású átvitel lényege, hogy a szimbólumok alvívök segítségével kerülnek továbbításra szórt spektrumú (spread-spectrum multiple access) átvittel. A szimbólumok visszaalakítását a vevőoldalon a kódoláshoz alkalmazott pszeudorandom kódtábla ismerete teszi lehetővé (3G és GSM hálózatok alapszabványa).
- 50 Az IEEE 802.20 szabványú adatátvitel szintén OFDMA-t alkalmaz a csatornanyálalás megvalósítására (FLARION vállalkozás fejlesztése).
- 51 OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
- 52 ASM – Adjacent Subcarrier Method.
- 53 DSM – Diversity Subcarrier Method.
- 54 FFT size – Fast Fourier Transformation size.
- 55 Átlagos szimbólumidő az IEEE 802.16-2004 szabványban rögzített érték.
- 56 MAN – Metropolitan Area Network.