



GULYÁS ATTILA*

PILÓTA NÉLKÜLI PLATFORMOK ADATÁTVITELI MEGOLDÁSAI

ÖSSZEFOGLALÁS: Tudományos közlemények sokasága készül a pilóta nélküli légi járművek (UAV) és a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek (UAS), hálózatok és eszközök bemutatása, műszaki-technikai paramétereik leírása céljából. Talán kevesebb a nyilvános információ az átviteli frekvencia-tartományokról és az adatátviteli csatornák alkalmazott modulációiról. E tudományos közleményben a szerző bemutatja a drónok polgári és katonai frekvenciatartomány-felhasználását, és az alkalmazott modulációs eljárásokat.

KULCSSZAVAK: UAS, UAV, digitális moduláció, nagysebességű adatátvitel

ABSTRACT: A large number of scientific publications have been prepared to present UAVs and UAS networks and equipment to describe their technical parameters. Perhaps less information is shared on the transmission frequency ranges and the modulations of the data transmission channels used. In this scientific essay I intend to present the civil and military frequency range usage of drones and the modulation techniques used for data (video) intercom.

KEYWORDS: UAS, UAV, digital modulation, high-bandwidth data exchange

BEVEZETÉS

A pilóta nélküli légi járművek (Unmanned Air Vehicle – UAV), a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek (Unmanned Air Systems – UAS) és ezen rendszerekből alkotott hálózatok az elmúlt években komoly műsza-

ki fejlesztéseken mentek keresztül, és további jelentős fejlődés előtt állnak. Az UAV-eket, vagy drónokat a műszaki terminológiában pilóta nélküli légi platformoknak is nevezik. A forgalomba helyezett drónok száma robbanásszerűen növekszik, csak az elmúlt évtizedben, éves bontásban is több millió eszközt gyártottak. A légi eszközök köre egyre bővül a néhány gramm tömegű mikrodrónoktól kezdve a nagyobb szárnyfeszítávolságú, akár repülőgép méretű légi járművekig. Az egykor csak katonai műveletekre tervezett légi eszközöket, a drónokat ma már egyre szélesebb körben használják polgári és a katonai alkalmazásokban is. Ugyanakkor – figyelembe véve a fejlődés ütemét, az érintettek számát és a dróntechnológia által kínált, kijelenthetően közel korlátlan lehetőségeket – nem kétséges, hogy a pilóta nélküli légi eszközök alapvetően meg fogják változtatni a légi hadviselést, a harctámogatás jellegét. A Nemzetközi Távközlési Egyesület rádió szekciója (International Telecommunications Union¹ – Radio Communications Sector – ITU-R) jelentése alapján az UAS-ek fejlődése világszerte, fókuszáltnan az Egyesült Királyság területére töretlenül tűnik a 2020-as évek közepén is. [1]

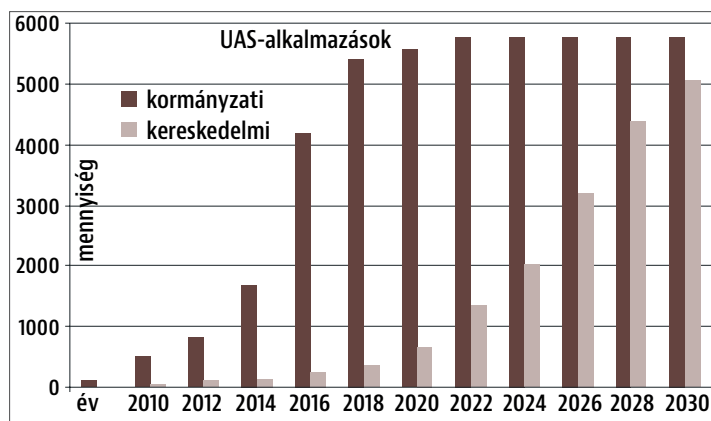
A UAS polgári és katonai alkalmazásairól számos tudományos közlemény született, több évtizedes kutatói múlttal rendelkező szakemberek a Nemzeti Közszolgálati Egyetem tanszékeiről, az Óbudai Egyeterről és más intézményekből, valamint polgári szerveződések kutatóinak a tollából megannyi szakmai, tudományos közlemény jelent meg, és azok fejlesztése, a kutatások dokumentálása folyamatos. [2][3][4][5][6]

* Ezredes, PhD, Csoportfőnök, Híradó, Informatikai és Információvédelmi Csoportfőnökség, Honvéd Vezérkar. ORCID: 0000-0001-5774-5757

1 Az ENSZ mellett működő szakosított szervezet, amelynek feladata a nemzetközi távközlési együttműködés elősegítése.

[7][8] E tudományos közlemény célja az UAS adatátviteli hálózatainak, frekvencia-felhasználásainak, azaz felosztásának és az alkalmazott modulációs módjainak a bemutatása, így e fenti hivatkozások áttekintése lehetőséget biztosít az olvasónak, hogy az UAV/UAS fogalmakat elhelyezze a hétköznapi élet polgári és katonai alkalmazásaiban.

Mivel megannyi tudományos közlemény kerül – akár naponta, hetente – publikálásra e területen, elsősorban ázsiai (kínai és az indiai egyetemek) kutatói jóvoltából, így azokat csupán citálni lehetséges, feldolgozni és értelmezni azonban szinte lehetetlen küldetés. Ebben a tanulmányban a fókusz az UAS-hálózat adatcseréjére korlátozom, bemutatva a polgári és a katonai frekvenciatartomány használatát, valamint a nagysebességű adatátvitel lehetővé tevő speciális modulációs módokat, amelyek lehetővé teszik az UAV–UAV, valamint az UAV és a földi irányító elemek (Ground Stations – GS) közötti, nagysebességű (elsősorban kép/video) adatátvitelt.



1. ÁBRA. Az UAS műveleti alkalmazások fejlődése [1; 50. o.]

AZ UAS-FREKVENCIA FELHASZNÁLÁSA

Általánosságban kijelenthető, hogy a polgári kereskedelemben forgalmazott, az üzleti – és benne a szórakozási/szórakoztatási – céllal alkalmazott drónok frekvencia-felhasználására jellemző, hogy a frekvenciakiosztásuk a 2,4 GHz és az 5,8 GHz tartományokhoz közeli sáv tartományokra korlátozódik, átlagolva 4,6–29,4 (de legfeljebb 34) MHz sáv szélesség (műholdas átvitel esetén legfeljebb 56 MHz mellett). [9] Ugyanakkor az UAS-ek kereskedelmi forgalomba helyezése esetében a mindenkor nemzeti szabályozók figyelembevétele vitális. Hazánkban a Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság (NMHH), valamint a Védelmi és Rendészeti Frekvenciagazdálkodási Igazgatóság (VRFGI) rendelkezik a frekvenciatartományok felett. [10]

Katonai vonatkozásban, a hatályos jogszabályok (7/2015. NMHH rendelet a nemzeti frekvenciafelosztásról, valamint a frekvenciasávok felhasználási szabályairól – NFFF) és a műveleti szabályok (Operations Security – OPSEC) alapján, a tervezhető frekvenciasávok az alábbiak:

- 2100–5000 MHz között:
 - 2200–2245 MHz (katonai mozgó rendszerek, harmonizált katonai sáv),
 - 2370–2400 MHz (katonai mozgó rendszerek, harmonizált katonai sáv),
- 5600–5900 MHz között:
 - Tervezés alatt. Egyelőre nincs katonai mozgó rendszerekre kijelölt sáv, így a teljes sávban nem megengedett a légi mozgó rendszer üzemeltetése.

Az 1. táblázat feldolgozásával betekintést nyerünk a katonai UAS-ek hazai, szabályozott frekvenciahasználatába, a táblázatban szereplő adatok harmonizálnak a NATO (North Atlantic Treaty Organization) és az Európai Unió (EU) vonatkozó jogszabályaival.

1. TÁBLÁZAT. A katonai mozgó rendszerek frekvenciasávjai [11]

Frekvenciasáv [MHz]	A katonai mozgó rendszerek fajtái	Hatótávolság [km] (a meghatározott lefedettségű terület sugara)
335,4–380	(harmonizált katonai sáv)	általánosságban, max. 4
1350–1400	(harmonizált katonai sáv)	általánosságban, max. 10
1670–1675	(nem harmonizált katonai sáv)	általánosságban, max. 5
2200–2245, 2370–2400	(harmonizált katonai sávok)	általánosságban, max. 100
1350–1400	(harmonizált katonai sáv)	általánosságban, MH gyakorlóterekre korlátozott
100–2500 / 5600–5900	(harmonizált katonai sáv / tervezés alatt)	általánosságban, max. 5/7/15/60
4835–4950	(harmonizált katonai sáv)	általánosságban, max. 20

A NATO CaP3 SpA CaT (Civil/Military Spectrum Capability Panel Spectrum Analysis Capability Team – Polgári/katonai spektrum képességpanel, spektrumelemző képességcsoport) munkacsoport felmérte a NATO-tagországokban működő katonai célú pilóta nélküli légi jármű-rendszerek (UAS) által használt frekvenciákat. A nemzeti válaszok alapján összesített eredményeket a NATO CaP3 2021. április 12–14. között megrendezett katonai értekezletén ismertették. A kérdőíveket kitöltő NATO-tagállamok az alábbi válaszokat fogalmazták meg (2. táblázat):

2. TÁBLÁZAT. A NATO-országok által üzemeltetett katonai mozgó rendszerek (UAS-ek) frekvenciasávjai [12]

Frekvenciasáv [MHz]	UAS-t üzemben tartó / üzemeltető tagországok [db]
1350–1400	12
2200–2245	16
4400–5000	14

Az 1350–1390 MHz és a 2200–2290 MHz közötti sávok felhasználásának tervezésekor célszerű annak a szempontnak a figyelembevétele, hogy azok – a kedvező hullámterjedési viszonyok miatt – a földi mozgó szolgálat keretében is alkalmasak távirányítású eszközök működtetésére.

Az [11] alapján, az 1350–1390 MHz frekvenciatartományban a nem polgári célú felhasználók számára csak az 1350–1375 MHz frekvenciasávban van lehetőség mozgó rendszerek elsődleges jelleggel történő üzemeltetésére. Ugyanakkor a sávban a rádiólokáció-szolgáltatás is elsődleges jelleggel engedélyezett a polgári és nem polgári felhasználók számára (együttes sáv). A 4835–4950 MHz frekvenciatartomány NATO-harmonizált sáv, a másodlagos jelleggel működő rádiócsillagászati alkalmazások kivételével, egyelőre kizárólag katonai használatú. A 4400–4825 MHz és 4835–4950 MHz sávokban felhasználható részsávokat, a sávhasználati feltételeket és frekvenciagazdálkodási követelményeket az NMHH külön megállapodásokban szabályozza partner szervezeteivel.

A polgári és a katonai frekvenciasávok rövid bemutatását követően térjünk rá az adatátvitelhez szükséges adatkapcsolati módok, modulációs eljárások vizsgálatára. Az alkalmazott frekvenciasáv-tartományok ismerete vitális az adatkapcsolati távolságok tervezésekor, hiszen a fizika törvényei az elektromágneses hullámter-

jedésre adottak, és jelentősen behatárolják (korlátozzák) mind az adatátviteli távolságot, mind a rendelkezésre álló sávszélességet, bitsűrűséget is.

AZ UAS-EK JÖVŐBELI MODULÁCIÓS ELJÁRÁSAINAK TERVEZÉSI SZEMPONTJAI

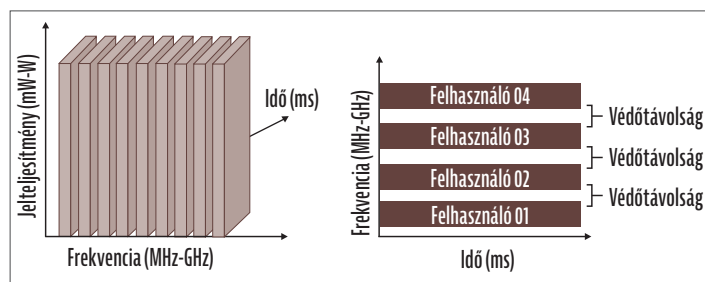
Világosnak tűnik, hogy mint a föld-föld rádióforgalmi rendszerek esetében, az UAV-k és az UAS-ek információátvitelében is megjelenik a szórt spektrumú adatkapcsolat és/vagy a frekvenciaugratásos műszaki eljárás is. Általánosságban kijelenthető, hogy mindkét alkalmazás jelentősen képes javítani az adatátviteli rendszer zavarvédeltségét más rendszerekkel szemben, illetve nagyban csökkenteni annak valószínűségét, hogy más polgári vagy katonai földi, vagy UAS-rendszerek működésében zavart okoznának.

Jelentős követelmény, hogy a polgári 5G rendszerekhez hasonlóan (5th Generation Systems/Services – 5GS²), a földi egység és a pilóta nélküli eszköz föld–levegő–föld (Ground-Air-Ground – GAG), vagy föld–levegő–levegő–föld (Ground-Air-Air-Ground – GAAG) közötti adatátvitel nagy áteresztő képességű (szélessávú), alacsony késleltetésű (Ultra Reliable Low Latency Channel – uRLLC), nagy képességű, akár 4K minőségű video-adatátvitelt tegyen lehetővé. Az 5GS hálózati követelmények részletezéséhez a legautentikusabb források a Nemzetközi Távközlési Egyesület Infokommunikációs Szakcsoportjának (ITU-R) hálózatspecifikáció-összefoglalói, amelyeket a nemzetközi telekommunikációs fejlesztések irányának kijelölése érdekében fogalmaztak meg (IMT-A és IMT-2020³), kutatási-fejlesztési célokra létrehozott polgári vállalkozásokkal támogatva (például a 3rd Generation Partnership Project – 3GPP). [13][14]. Az IMT-2020 ajánlásban megfogalmazott, az 5GS hármass követelményrendszere az alábbiak szerint foglalható össze: a vezeték nélküli rendszer jelátviteli sebességének és sávszélesség-növelésének (enhanced Mobile Broad Band – eMBB) a lehetővé tétele, M2M/IoT hálózatok kiemelt támogatása (massive Machine Type Communications – mMTC), valamint rövid jelkésleltetési intervallumok (uRLLC) tervezése. [15] Ezeket a rendszerparamétereket célszerű kiterjeszteni tehát az UAS-re is.

Ugyanakkor az UAS-ek, légi platformokként érzékenyek a fel szálló tömegre, és a korlátozottan rendelkezésre álló energiaforrásokra (tápkapcsolatok), így kompromisszumot kell kötni a nagy átviteli adatsebességet garantáló, fejlett modulációs eljárások megnövekedő energiaigénye (teljesítményfelvétel) és az egyszerű üzemeltetési/repülési magasság, valamint a repülési és adattovábbítási üzemidő között. Az optimumra törekvés elve alapján azt kell vizsgálni, mely modulációs eljárás implementálható az UAS-ek korlátozottan rendelkezésre álló erőforrásaihoz. Az egyik ilyen megoldás lehet a frekvenciaosztásos multiplexelés tervezése, figyelembevétele.

Az 5GS által is alkalmazott frekvenciaosztásos (Frequency Division Multiple Access – FDMA) adatátviteli rendszerek alapelve, hogy a teljes rendelkezésre álló sávszélességet diszkrét részekre (szegmensekre) osztja szét, és minden egyes felhasználóhoz/azonosított adatcsatornához egy-egy dedikált szegmenst rendel. (2. ábra) Más megközelítésben, minden felhasználó számára dedikált frekvenciaszegmenst jelölnek ki, védőtávolságok fenntartásával. Az adás- és vételi frekvenciák elkülönülnek.

Az FDMA előnyei között sorolják fel a stabilan rendelkezésre álló bitrátát és a relatíve hosszabb szimbólumidőket, a hatékonyan



2. ÁBRA. FDMA-csatornakiosztás (A szerző szerkesztése [16] alapján)

használható/csökkentett szimbólumközi interferenciákat, a könnyű blokkémaalapú kialakítást és az egyszerűbb csatornaszinkronizációt, valamint a szimbólumkeretek (framing) megvalósítását. Ugyanakkor az FDMA csak kismértékben különbözik más analóg moduláció-kialakítástól, bár azoknál jobb jel-interferencia elnyomással, valamint jel-zaj viszonytal rendelkezik. A bitráta kötött és a frekvenciák közötti védőtávolságok (guard bands) csökkentik a felhasználható teljes sávszélességet. A fizikai blokkéma-kialakításnál a keskenysávú szűrőáramkörök tervezése és kialakítása alapkövetelmény, ugyanakkor ez növeli az áramkörök bekerülési költségeit. [17]

A teljesség igénye nélküli elemzést végrehajtva, az FDMA két megvalósítási lehetősége (technológiája) a szimpla vivőcsatornás, többszörös multiplexálás és a több vivőcsatornás, többszörös multiplexálás, amelynek egy különleges megvalósítása az ortogonális frekvenciaosztás. A következőkben – hangsúlyozottan a teljesség igénye nélkül – a már citált, az 5GS rendszerben alkalmazott ortogonális frekvenciaosztású többszörös, multiplexálást (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM), valamint a szimpla vivőcsatornás, frekvenciaosztásos, többszörös multiplexálást (Single Carrier Frequency Division Multiple Access – SC FDMA) mutatom be, illetve hasonlítom össze.

ORTOGONÁLIS FREKVENCIAOSZTÁSÚ TÖBBSZÖRÖS MULTIPLEXÁLÁS

Az OFDM az egyik leggyakrabban alkalmazott többvivős modulációs eljárás, amely alapját képezi az LTE-A (3GPP Long Term Evolution – Advanced) és az IEEE 802.11 szabványcsalád egyes átviteltechnikai megoldásainak. Az OFDM alapfogolata, hogy a nagy adatsebességű adatfolyamnak a rádiócsatornán történő átvitele megvalósulhat az adatfolyam több, kisebb sebességű adatcsatornára történő bontásával, és azok vivőfrekvenciáinak egyedi, a többi vivőtől független, ortogonális, egyidejű digitális modulációjával. [18][19]

A szimbólumok csatornaátvitele megvalósulhat időosztásban (separation in time: IEEE 802.11 a/g/d), idő és frekvenciaosztásban (separation in time and frequency: IEEE 802.16 d/e, 802.20) és kódosztással (separation in codes: MC-CDMA – Multi-Carrier Code Division Multiple Access).

Ezen eljárásokkal a rádiócsatornában terjedő vivők átviteléhez tartozó szimbólumidők ugyan az eredeti többszöröse lesznek, ugyanakkor a részcsatornák átvitele ellenállóbbá válik a hullámterjedésből eredő időintervallum-eltolás, valamint a csatornazajokkal szemben. A rádiócsatornában továbbítandó digitális/analog függvények a vételi helyre (vevőantenna) nem, csak közvetlen, de közvetett módon (többszörös visszaverődés, reflexió elve) is eljutnak, ezért a vett szimbólumok közötti interferenciával számolni kell. Ha a csatornák közötti

2 Az ITU-R, az IEEE 802.11 és a 3GPP szabvány- (ajánlás) családban rögzített rendszerparaméterek alapján összeállított, a vezetékes és a vezeték nélküli hálózatokat tartalmazó, azokat integráló adatátviteli rendszer(ek).

3 IMT-A: International Mobile Telecommunications – Advanced (4G LTE-A) és IMT-2020 (5G).

legnagyobb időkülönbség t_{max} , a továbbított adatok szimbólum ideje T_r , a szimbólumok interferenciájának (Inter Symbol Interference – ISI) értékét az alábbiak szerint kapjuk [20]:

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

Az N csatornás többvívós 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 [21]:

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

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

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

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

A több vivő modulációja és demodulációja végrehajtható diszkrét Fourier-transzformációval (Discrete Fourier-transformation – DFT) [22], gyors Fourier-transzformációval (Fast Fourier-transformation – FFT), illetve annak inverz műveletével (Inverse Fast Fourier-transformation – IFFT). Ebben az esetben egy függvény (f_t) N darab frekvenciámin-tával (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:

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

A jelfeldolgozás során követni kell a Shannon/Nyquist 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 mintákat venni (Δt – mintavételi idő, B – sávzélesség):

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

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 figyelemmel követni a frekvenciaértékeket. Ez az a frekvenciaérték, amelynek meghatározása kiemelten fontos a későbbi hibamentes adatjel-visszaállítás érdekében (Inverse Discrete Fourier Transformation – IDFT).

A jelvisszaállítást támogatja a felkeverést megelőzően az időtartománybeli mintákba vegyítendő ciklikus előtag (Cyclic Prefix – CP), 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 során természetesen megjelenik az alapsávnak megfelelően az alsó és a felső oldalsáv is. 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 modulációs eljárásokat vizsgálva [23][24] általánosságban kijelenthető, hogy magasabb szintű moduláció alkalmazásával – azonos csatornaparaméterek mellett – nő a csatorna kihasználási szintje, ezzel együtt az adatátviteli sebesség növelhető. [25]

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 fázis modulációjával valósulhat meg. Ennek időfüggvénye [26]:

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

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-jel-sorozat egyik jellemző értéke. A csúcstényező (Peak to Average Power Ratio – PAPR) értéke a jel átlagteljesítménye, és a legnagyobb pillanatnyi teljesítményértékének logaritmusos értéke [27][28]:

$$PAPR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2} \right) \quad n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (8)$$

A csúcstényező értéke is függ a vivők számától, nagyobb vivőszám esetén a csúcstényező átléphet egy olyan kritikus értéket, amely a végerősítő fizikai kialakításának szab határt. Az áramköri fizikai kialakítás folyamán ezért csúcstényező-csökkentő eljárásokat alkalmaznak. [29]

Az OFDM-jelátvitel előnyei között felsorolhatjuk, hogy a részcsatornák ortogonalitása és a védőtávok a csatornainterferenciát jelentősen csökkentik, a részcsatornák esetében 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 vevő oldalon⁴. Figyelemmel kell lenni továbbá a vivő- (csatorna) szinkronizáció és a csatornaki egyenlítés követelményeire is. 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 komputációs 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 -szeres, így szabványértékeken, korlátokon belüli tartása alapkövetelmény.

Összességében kijelenthető, hogy a magas szintű rendszerkövetelmények csakis úgy elégíthetők ki, hogy – az átviteli rendszer

4 Az OFDM részcsatornák frekvenciái – általánosságban, számszerűen – a néhány száz és az ezer közötti mennyiség tartományba tehető. Itt a segédvivők egymástól való távolsága néhány száz kHz-től néhány kHz-ig terjedhet. E vivőtávolság meghatározása a csatornajellemzők függvénye, míg azok számának meghatározása a teljes sávzélesség függvényében történik. Az LTE-A esetében a segédvivők távolsága 15 kHz, azonban a számuk függ a sávzélességtől, így 10 MHz-es sávzélesség esetén az alvivők száma 600, míg 20 MHz-nél ez kétszereződik. [30]

funkcióinak, feladatrendszerének ismeretében – ésszerű kompromiszsumokat kötünk az egyik, vagy a másik rendszerparaméter előnyére, illetve kárára.

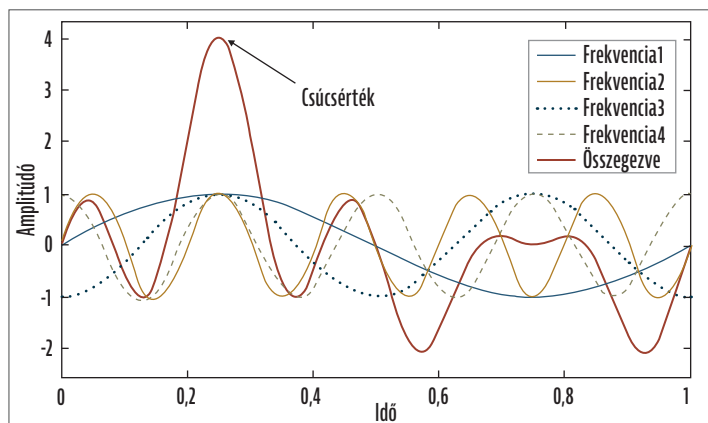
SZIMPLA VIVŐCSATORNÁS, FREKVENCIAOSZTÁSOS, TÖBBSZÖRÖS MULTIPLEXÁLÁS (SC FDMA)

Ahogy az OFDM esetében megismerhető, a jelszint átlagának optimális (normális/Gaussi-eloszlás [31]) fenntartásához elengedhetetlen a PAPR és az ISI (Inter Symbol Interference) értékének biztos szinten való tartása. A 3. ábrán az egyedi magas amplitúdószintből (kiugrás) kikövetkeztethető, hogy ennek mértéke jelentősen megváltoztatja a vételi oldal jelteljesítményének átlagát. Kutatótársaim 2015. évi tudományos közleményükben [32] rámutattak az N-szeres ortogonalitás kihívásaira és gyakorlati megoldásukban a szimpla vivőcsatornás multiplexálás, mint lehetséges hatékony, gyakorlati UAS-adatátviteli megoldás felé fordultak.

Ha a többvivős rendszerektől eltekintünk, kézenfekvő megoldás tehát az egyvivős hálózat frekvenciamodulációs vizsgálata, amely a modern, a negyedik generációs mobiltelefonía alapjául is szolgál (LTE-A).

Az SC FDMA az OFDMA egy speciális esete, amikor az idő domain adat-szimbólum-csoportjait diszkrét Fourier-transzformáció (DFT) alkalmazásával átkonvertáljuk a frekvencia domainbe, így készítjük elő a szimbólum-csoportot más szimbólumcsoportokkal történő ortogonális átvitelre. [33]

Tehát a felhasználók egyenként, különböző alvivőket használnak fel a frekvencia domainben. Az átviteli csatornán továbbított jel szimpla egyvivős a frekvencia domainben modulálva, így a PAPR-értéke viszonylagosan stabil, az ISI-értéke is jól szabályozható. A 3. ábrán szereplő, kimagasló amplitúdó – és az ezzel a magasabb átlagos teljesítményszintre utaló PAPR – nem, vagy kevésbé jellemző.



3. ÁBRA. A PAPR-csúcsérték bemutatása (A szerző szerkesztése [34][35] alapján)

A jobb alkalmazhatóság/érthetőség érdekében, az SC FDMA blokk-sémáját az alábbiak szerint mutatom be (4. ábra). [36]

A csatornán továbbítandó jelsorozat a modulátorra vezetjük, ahol az optimális moduláció megvalósul (pl.: Quadrature Amplitude Modulation – QAM). A soros-párhuzamos átalakítást a diszkrét Fourier-transzformáció (DFT) követi annak érdekében, hogy a szimbólumsorozat az idő domainből a frekvencia domainbe konvertálódjon át. Miután az alvivő hozzárendelése megtörténik, inverz DFT (IDFT) és párhuzamos-soros jelátalakítást követően, a CP-t beillesztjük a szimbólumsorozatba. Mielőtt a digitális-analóg konverzió megtörténne, jelformáló szűrőáramkörökön alakítjuk ki a jelszintet a tervezett jelspektrumhoz, valamint az átviteli közegehez illesztendően. Ezután – jelerősítést követően – az átviteli csatornában továbbítjuk az analóg jelsorozatunkat. Az analóg jel visszaalakítása és feldolgozásra történő előkészítése e fenti lépések

inverz folyamatként fogható fel. Az analóg és a digitális modulációkkal foglalkozó szakirodalomban az SC FDMA-t DFT OFDMA-ként találhatjuk meg vagy dolgozhatjuk fel. [37][38][39]

Összefoglalva, az SC FDMA az egycsatornás adóoldali moduláció miatt alacsonyabb PAPR-rel rendelkezik, a frekvenciaeltérések (*offset*) is kordában tarthatók az adó- és a vevőoldali oszcillátorok pontosabb szabályzásával, valamint – talán ez a legfontosabb szempont – alacsonyabb komplexitású műszaki kialakítás válik szükségessé, amely első-sorban a repülőplatformokon eldöntheti az alkalmazás használatát. [40]

ÖSSZEFOGLALÁS

Napjainkban a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek létjogosultsága megkérdőjelezhetetlen mind a polgári alkalmazásokban (geodézia, kép- és videó feldolgozás, szórakoztatóelektronikai fejlesztések, futárszolgáltatások), mind a megannyi lehetőséget kínáló katonai felhasználásban, amit az orosz-ukrán háború és legújabbban a palesztin-izraeli műveletek is megerősítenek.

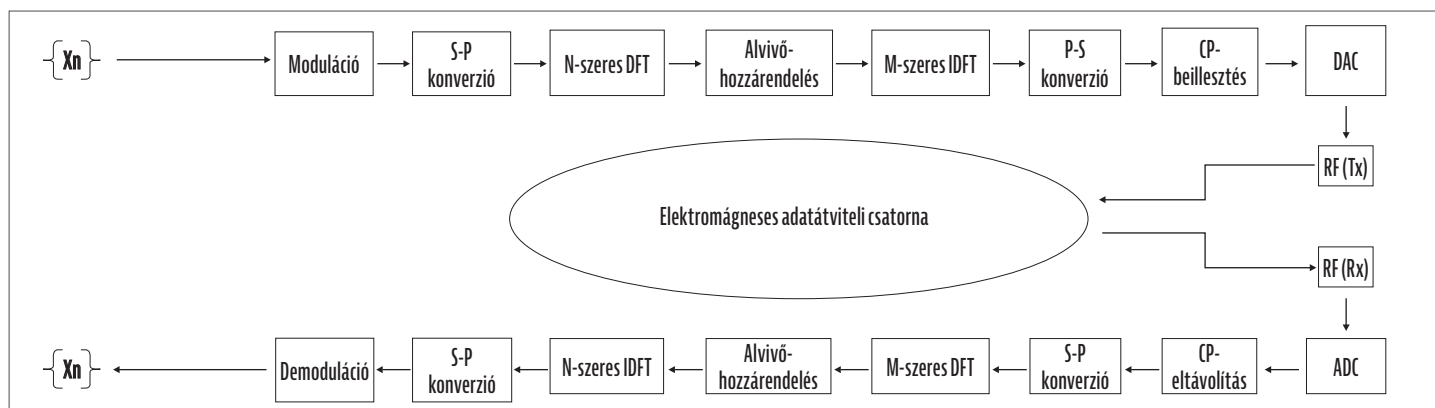
Annak érdekében, hogy az UAV- és UAS-hálózatok mind a repüléshez, mind az adatátvitelhez (hang- és kép-/videójel-átvitel) nélkülözhetetlen információkat továbbíthassák, szoros spektrumgazdálkodásra, valamint szabályozásra van szükség, amit mind NATO- és EU-, mind tagországi szinteken, így hazánkban is el kell végezni. A frekvenciaosztás területén folyamatos felügyelet szükséges, hogy a végesen rendelkezésre álló elektromágneses spektrumot helyesen és célravezetően aknázzuk ki.

A frekvencia-felhasználással, az UAV- és UAS-hálózatok csatorna-kiosztásával szorosan összefüggnek (pl. az antennák méretezése területén) az alkalmazható adatátviteli modulációs eljárásrendszerek, szimpla vagy többszörös vivőmodulációs eljárások, amelyek alkalmazása vitális a nagyfelbontású képtovábbítás igényének a kielégítésekor. Szem előtt kell tartani azonban a méret- és tömegviszonyokból adódó korlátokat is, amikor magasabb rendű modulációk alkalmazását tervezük föld-légi jármű, légi jármű-légi jármű relációkban; az akkumulátoros táplálás korlátai jelentősen befolyásolják a híradástechnikai tervezők lehetőségeit.

A UAV- és az UAS-hálózatok modulációs eljárásainak célszerűségéből meg kell egyeznie a mobiltelefoniai már megtervezett, kikísérletezett és bevált, a föld-föld közötti 4. és 5. generációs távközlési hálózatokra méretezett, a kölcsönösen összekapcsolt és illesztett távközlési (katonai szakkifejezéssel híradó, informatikai és információvédelmi) hálózatokban alkalmazott komplex modulációs eljárásokkal. Itt az azonosított mérnöki feladat, hogy e modulációs eljárások illeszthetőek legyenek az UAV- és UAS-hálózatok sajátosságaihoz (frekvenciahasználat – antennaméretezés, komplex integrált áramkörök – energiafelhasználás stb.).

A tudományos kutatások és a gyakorlati alkalmazások megmutatják, hogy az egyszerűbb, az alacsonyabb rendű modulációk hatékonyabban alkalmazhatók a kis/kisebb értékű, kis repülési magasságon üzemeltetett, néhány óráig az eseti légtérben műveleteket végrehajtó pilóta nélküli légi járművek esetében. A jelenleg túlnyomórészt alkalmazott frekvenciaosztásos multiplexing a híradástechnikai és az informatikai áramköri elemek újabb és újabb verzióinak a megjelenésével és a finommechanikai gyártástechnológia fejlődésével bizonyosan fejlődni fog a magasabb rendű modulációk irányába.

A 2022-2.1.1-NL-2022-00012 azonosító számú Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriuma projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL Nemzeti Laboratóriumok Létrehozása, Komplex Fejlesztése pályázati program finanszírozásában valósul meg. ■



4. ÁBRA. Az SC FDMA jelkialakítási bloksémája (A szerző szerkesztése [36; 28. o.] alapján)

HIVATKOZÁSOK

- [1] ITU-R M.2171 Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace, In: <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/snl/Documents/R-REP-M.2171-2009-PDF-E.pdf> <https://doi.org/10.22233/20412495.0124.1> (Letöltve: 2024.1.1.);
- [2] Palik M., Kiss B. A drónok katonai alkalmazása modern katonai műveletek során, Repüléstudományi Közlemények 35. évfolyam (2023) 1. szám pp. 115–130. <https://doi.org/10.32560/rk.2023.1.9>;
- [3] Makkai I. Drónok harca, Repüléstudományi Közlemények 27. évfolyam (2015) 1. szám pp. 61–72.;
- [4] Békési László. A pilóta nélküli légi járművekkel kapcsolatos alapismeretek, Repüléstudományi Közlemények 28. évfolyam (2016) 3. szám pp. 159–176.;
- [5] Krajnc Z. A drónok elleni stratégia és eljárások, Repüléstudományi Közlemények 30. évfolyam (2018) 3. szám pp. 139–148.;
- [6] Komjáthy L., Csengeri J. A távirányított és pilóta nélküli repülőrendszerek alkalmazási lehetőségei a felkelők elleni műveletek folyamán, Honvédségi Szemle 2017/6, pp. 81–92.;
- [7] Palik M. (szerk.) Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, 2013.;
- [8] Varga A. A drónok, mint a kockázatmentes hadviselés eszközei. Hadtudományi Szemle, 2013/2. pp. 44–58.;
- [9] Radio Division TEC: Communication aspects of Unmanned Aircraft System (UAS), study paper, In: <https://www.tec.gov.in/public/pdf/StudyPaper/UAV.pdf>; <https://doi.org/10.12968/nuwa.2023.12.29> (Letöltve: 2023.12.29.);
- [10] Balogh J. A nem-polgári célú frekvenciagazdálkodás az NMHH-ban, előadás, 2019. szeptember 04.;
- [11] 7/2015. (XI. 13.) NMHH rendelet a nemzeti frekvenciafelosztásról, valamint a frekvenciasávok felhasználási szabályairól (NFFF), 2. melléklet;
- [12] CaP3 SPA CaT munkacsoportülés jk. (Weboldal belépés csak regisztrált felhasználóknak), In: <https://nhqc3s.hq.nato.int/Default.aspx>;
- [13] ITU-R: Recommendation ITU-R M.2021-3 (IMT-Advanced) January 2018, pp. 4–23.;
- [14] ITU-R: Recommendation ITU-R M.2021-4 (IMT-Advanced) November 2019, pp. 16–23.;
- [15] Demir, F., Elkourdi, M., Ibrahim, M., Arslan, H. Waveform design for 5G and beyond, arXiv: 1902-05999v1, 15 February 2019, pp. 2–4.;
- [16] Garg, K., Wang C. Electrical engineering handbook 2005 pp. 1005–1006.;
- [17] Myung, G., Lim, J., Goodman, D.: Single carrier FDMA for uplink wireless transmission (2006), IEEE Vehicular Technology Magazine. 1 (3) pp. 30–38, <https://doi.org/10.1109/MVT.2006.307304>;
- [18] Sebestyén Á. A DVB-T rádiófrekvenciás visszirányú megoldásainak bemutatása, Híradástechnika LIX. évfolyam 2004/7, p. 47. ISSN 0018-2028.;
- [19] Pap L. Az új mobil technológiák – az LTE és a kognitív rádió alkalmazások műszaki összefüggései, hatásai, Pro-M Zrt. előadás, 2014. október 26, slides 12–18.;
- [20] Kollár Zs., Varga L., Horváth P. Modern, többvívós rendszerek kognitív rádiós alkalmazásokban, Híradástechnika LXVI. évfolyam 2011/3., pp. 74.;
- [21] Kollár Zs., Horváth P. PAPR reduction of FBMC by clipping and its iterative compensation, Journal of Computer Networks and Communications Hindawi Publishing Co. Volume 2012, pp. 12–13.; <https://doi.org/10.1155/2012/382736>;
- [22] Khalid. An interactive guide to the Fourier Transformation, In: <https://betterexplained.com/articles/an-interactive-guide-to-the-fourier-transform/> (Letöltve: 2024.1.1.);
- [23] Németh A., Károly K. Erőkövetés megvalósításának lehetőségei korszerű harcászati rádiórendszerek kommunikációs csatornáin, Honvédségi Szemle 145. évf. 4. szám (2017) pp. 120–131.;
- [24] Németh A., Károly K. Korszerű rövidhullámú harcászati rádióeszközök erőkövető rendszerekben való alkalmazhatóságának vizsgálata, HSz 144. évf. 6. szám (2016.) pp. 65–78.;
- [25] Károly K. Globális Műholdas Navigációs Rendszerek alkalmazási lehetőségei katonai és polgári célú flotta- és erőkövetési rendszerekben (1.), HSz 146. évf. 1. szám (2018.) pp. 83–97.;
- [26] Kollár Zs., Horváth P. Equalization of multicarrier cognitive radio transmission over multipath channel with large delay spreads, Infocommunications Journal Volume III No. 2. June 2011, pp. 45–46.;
- [27] Bölcskei H. MIMO-OFDM wireless systems: basics, perspectives and challenges, IEEE Wireless Communications August 2006, pp. 18–23.;
- [28] Vahidi, V., Saberinia, E. OFDM for payload communications of UAS: channel estimation and ICI mitigation, IET Journals 30 July 2017, pp. 2350–2352. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2017.0358>;
- [29] Sandhiyadevi, P., Subharathna, N. Reducing PAPR in OFDM System using Modified Iterative Algorithm in Partial Transmit Sequence Method, 2023 International Conference on Sustainable Communication Networks and Application (ICSCNA), Theni, India, 2023. pp. 743–748, <https://doi.org/10.1109/ICSCNA58489.2023.10370201>;
- [30] Mádi G. LTE uplink rádiós interfész szimulációs vizsgálata, Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos és Informatikai Kar, Híradástechnikai Tanszék 2009, p. 25.;
- [31] Eötvös Lóránt Tudományegyetem szakmai anyaga, In: <https://atomfizika.elte.hu/kornyifizlab/docs/mereskiertekeles.pdf>, <https://doi.org/10.22233/20412495.0124.1>;
- [32] Mikó Gy., Németh A. SC-FDM based communication system for UAV applications, 21 April 2015, International Conference Radioelektronika Pardubice Czech Republic In: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/7115433/proceeding?isnumber=7128969&sortType=vol-only-seq&refinementName=Author&refinements=Author:Gyula%20Mik%C3%B3>, <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2015.7129014> (Letöltve: 2024.1.1.);
- [33] Myung, H., Lim, J., Goodman, D. Peak-to-average Power Ratio of Single Carrier FDMA Signals with Pulse Shaping, Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) 2006, Sep. 2006. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2006.254407>;
- [34] Demir, A. F., Elkourdi, M., Ibrahim, M., Arslan, H. Waveform design for 5G and beyond, University of South Florida, Department of Electrical Engineering, Tampa, FL, USA, Istanbul Medipol University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Istanbul, Turkey, 2018. p. 05. <https://doi.org/10.1002/9781119333142>;
- [35] Rahmatallah, Y., Mohan, S. Peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems: a survey and taxonomy, IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 15, no. 4 2013, pp. 1567–1592. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.021313.00164>;
- [36] Atoev, S. An Efficient and Secure Communication Link for Unmanned Aerial Vehicle, MSC Thesis February 2019, Pukyong National University.;
- [37] Rumney, M. 3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA, Technical Report, Agilent Technologies, January 2008.;
- [38] Nigam, H., Patidar, K. Performance Evaluation of CFO in Single Carrier-FDMA, International Journal of Elect. Electron. Comp. Eng., Vol. 3, pp. 104–110, 2014.;
- [39] Girdhar, I., Singh, C., Kumar, A. Performance Analysis of DFT Spread OFDM Systems, International Journal of. Advan. Comp. Sci. Tech. Vol. 2, pp. 21–26, 2013.;
- [40] Myung, H. Introduction of SC FDMA, 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) 3-7 September 2007, Poznan Poland, p. 2145.