

5. ábra. Az első Európában gyártott nagy teljesítményű távközlési műholdat – az Airbus által épített Eutelsat 172B-t – 2017 júniusában bocsátották fel, és jelenleg is Föld körüli pályán áll (Forrás: Airbus / az Airbus Helicopters engedélyével)

Dr. Gulyás Attila PhD*

Az 5. generációs telekommunikációs hálózatok fejlesztési irányai **II. rész**

Az ötödik generációs vezeték és vezeték nélküli hálózatok fejlesztésének kezdeti időszakában tartunk, így a szerző szerint indokolt a Nemzetközi Távközlési Egyesület Infokommunikációs Szakcsoportjának ajánlásaiban megfogalmazott hálózati paraméterek elérését lehetővé tevő műszaki eljárások vizsgálata arra az esetre is előkészítve, amikor a műholdas szegmensből érkező jelsorozat feldolgozása is sorra kerül. A szerző tanulmánya első részében bemutatta az 5. generációs hálózatok úrszegmensre történő kiterjesztésének egyes követelményeit, majd rövid fogalmi áttekintést adott a témában, a legfontosabb definíciókkal ismertette meg az olvasókat. A tanulmány második részében a hullámterjedés és a jelfeldolgozás többösszetevős egyenletrendszeréből kiemelve, az elektromágneses jelterjedésben megjelenő Doppler-hatást vizsgálja annak érdekében, hogy rámutasson a multipath terjedés és a jelkéleltetési időkből származó anomáliákra.

A DOPPLER-HATÁS BEMUTATÁSA

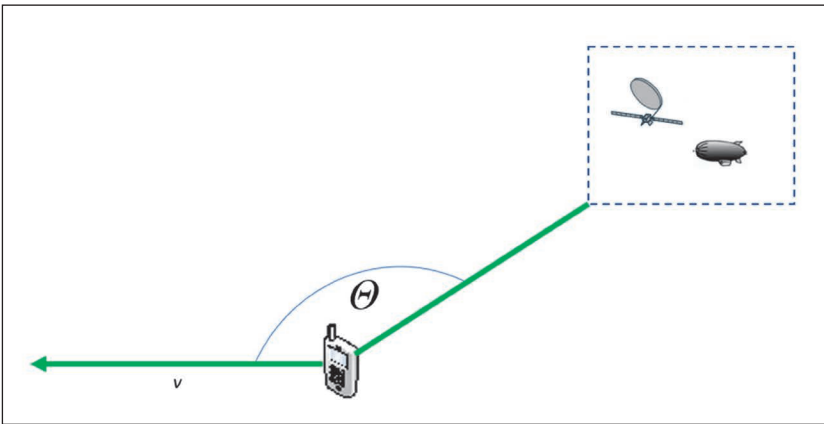
Már általános iskolai tanulmányaink során is átfogó ismereteket szereztünk a hozzánk közeledő vagy tőlünk távolodó, azaz a mozgó tárgyak, járművek által keltett hanghullámok (frekvenciakomponensek) emberi fül számára történő érzékeléséről. *Christian Doppler*⁴¹ 1841-ben jegyezte le a

később róla elnevezett jelenséget, érzékelve egy adott személy felé közeledő közlekedési eszköz által keltett hang hangmagasságának eltérését, majd mellettünk elhaladva a hangmagasság újbóli változását. Műszaki megközelítésben egy közeledő sugárzó forrás esetén a vevő mérőpontján a frekvenciaérték növekszik (a hullámhossz csökken), míg a sugárzó adó távolodása a vevő mérőpontjában frekvencia-csökkenést (hullámhossz-növekedést) eredményez [44][45][46][47].

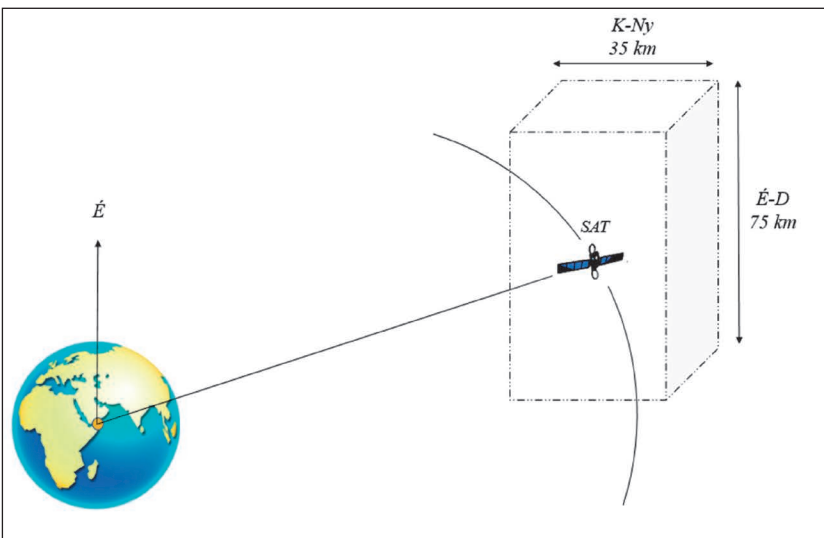
Ezen meghatározásokat átültetve vizsgált hálózatunkra, Doppler-hatásnak/-változásnak (*Doppler shift*) nevezzük a SAP elemek, a földfelszíni elemek (UE, GW, gNB) közötti, a meghatározott, állandó adófrekvencia-értéktől a vevőben mérhető eltérést, a frekvenciaváltozást. Ennek oka, hogy az úrszegmens elemei és a földfelszíni elemek, vagy akár mindkettő változó ritmusban (frekvenciával), mozgásban van. Ezen elmozdulások esetében folyamatosan (aperiodikusan) változó frekvenciaértékek mérhetők a berendezések vevőegységeiben. Ezeket az aperiodikus frekvenciaváltozásokat összefoglaló néven Doppler-frekvenciaváltozásnak (*Doppler Variation Rate DVR*) nevezzük [48].

Hálózatelemzési oldalról egyutas (*one way propagation*) terjedésnek a GW-SAP-UE (*Transparent payload*), vagy SAP-UE (*Regenerative payload*) közötti adatátvitelt tekintjük, ezekben a relációkban értelmezzük a jelváltozást. Kétutas (*round trip prop*) terjedésnek nevezi a szakirodalom a GW-SAP-UE—SAP-GW közötti adatátvitelt (*Transparent*

* Ezredes, Infokommunikációs főnök, NATO Közép-európai Hadosztály-parancsnokság, Székesfehérvár. ORCID: 0000-0001-5774-5757



6. ábra. Szögérték változása SAP és UE között, mozgás közben (A szerző szerkesztése a [65, pp. 26–27.] alapján)



7. ábra. A GEO pályaelmozdulása (A szerző szerkesztése a [65, p.29.] alapján)

payload), vagy a SAP-UE – SAP közötti átvitel (*Regenerative payload*). A későbbi számítások érdekében újra hangsúlyozandó, hogy a minimális eleváció a földfelszíni GW és SAP között 5° , a legkisebb rálátási szög SAP-UE között 10° . Belátható tehát, akár egyutas, akár többutas terjedést vizsgálunk, a Doppler shift és a jel DVR értéke többszörözős egyenletrendszerek alapján számítható [49]. Ennek oka, hogy egyrészt nem biztosíthatjuk, hogy a felhasználó (UE) statikus marad, másrészt a MEO/LEO/UAS/HAPS esetében mindenkor számítani kell az aperiodikus elmozdulásukból, az előzetesen csak soktényezős differenciálegyenletekkel számolható, a helyváltoztatásukból (horizontális és vertikális értelemben egyaránt) adódó DVR-re.

Ahhoz, hogy a SAP által érzékelt (földfelszínről kibocsájtott) elektromágneses impulzussorozat frekvenciáját a vételi helyen meghatározzuk, figyelembe véve a jelsorozat által megadni tervezett távolságot (út), máris számolnunk kell a Doppler shift-el. Ennek – földfelszíni és az űrszögemből érkező adás-vétel esetén – az általános számítási módja alapján (1. egyenlet) [65, p. 27]:

$$\Delta f = f_0 v \cos \frac{\theta}{c} \quad (1)$$

ahol f_0 a névleges adófrekvencia, v az UE mozgási sebessége, θ pedig a sebességvektor szögértéke UE és SAP között. A 6. ábra egyszerűsíti a megértést.

Δf értéke negatív előjellel értelmezhető, ha az adó- és a vevőegység távolodnak egymástól, míg pozitív az előjel, ha a hálózatsugárzók és vevőegységek közelítenek. Ezen frekvenciaváltozások alakulása, aperiodikussága adja a DVR értékét. Tehát a vételi pontokon a jelfeldolgozás magában foglalja mind a Doppler shift, mint a DVR számítási feladatait. Ezen értékek jó közelítéssel számíthatók ki a SAP helyzete, és az UE-k mozgásegyenleteinek az ismeretében.

E hatások tanulmányozásához célszerű azt az 5G NTN hálózatösszetevőt megvizsgálni, amely elméletben a leginkább statikusabb, pályaszámítások alapján együtt forog a Földdel. Ezek a GEO-műholdak. GEO esetében, ha mind a GEO-műholdat, mint a földfelszíni adó-vevőegységet statikusnak tekintjük, nem számolhatunk DVR-rel, hiszen – hangsúlyozottan elméletileg – mindkét hálózatelem (adó és vevő) stationárius. Ahogyan már a korábbi lábjegyzetben megjegyeztem, a GEO sem statikus, folyamatos mozgásban van saját tengelye és a Föld körüli – horizontális és vertikális – programozott pályaszögei (*trajectory*) tengelyvonalaiban, elsősorban a Nap és a Hold perturbációs hatásai, valamint a Föld gravitációs terének folyamatos változása miatt. A 7. ábrán a GEO-műholdak a valós fizikai hatások következtében történő mozgását mutatom be (sematikus, nem követve a valós geometriai és pályaméreteket).

Annak érdekében, hogy pontos számításokat kapjunk a későbbiekben, azt a kikötést kell tennünk, hogy a GEO-műhold – elmozdulásai során – az 5. ábrán bemutatott 35×75 km méretű területen mozog, amelyen belül a tengelypontok középvértékétől számítva az elmozdulás nem lépi túl a 6° -ot. A földfelszínen stationer módon telepített UE (V-SAT vagy kézi rádiótelefon, mozgás/elmozdulás nélkül) esetében a Doppler shift értéke 0,25 Hz az S-sávban és 2,4 Hz (20 GHz), valamint 4 Hz (30 GHz) a Ka-sávban [50]. Látható tehát, hogy a referenciaszámításokban a GEO-műholdaknak tulajdonított statikusság is viszonylagos, és a teljes, az 5G NTN-re vonatkoztatott hálózatszámítások értékénél ezen értékeket is figyelembe kell venni.

Földfelszínen mozgásban lévő UE és a GEO-műholdról érkező adatcsere, mint referencia szemléltetés esetén tételizzük fel, hogy az 5GN rádiótelefonunkkal a kezünkben egy gyorsvonaton ülünk, amely 500 km/h átlagos sebességgel közlekedik a Föld földrajzi hosszúsági⁴² (*longitude*) fok értékének mentén (É–D). Az 1-es képlet összetevőinek figyelembevételével a Doppler shift értéke az S-sávban (2 GHz-en) megközelítőleg 700 Hz, míg a Ka-sávban ~ 7 kHz (20 GHz-en) és ~ 10 kHz (30 GHz-en) [65 p.30.]. Belátható, hogy ez jelentős komputációs terhelést ró a mozgó rádiótelefon jelfeldolgozó egységére. Nagyobb UE mozgási sebesség esetén, például légi jármű fedélzetén üzemeltetett rádiótelefon-készülék adatátvitelével számolva ezen értékek duplikálására kell számítani. Általánosságban kijelenthető, hogy a Doppler shift értéke magasabb a



Adattábla		LEO01 (600 km)		LEO02 (1500 km)		MEO (10 000 km)		GEO-műhold 35 786 km	
Eleváció	Kapcsolat (Adó-vevő path)	Jelsorozat által megtett út (km)	Idő (ms)	Jelsorozat által megtett út (km)	Idő (ms)	Jelsorozat által megtett út (km)	Idő (ms)	Jelsorozat által megtett út (km)	Idő (ms)
UE 10°	SAP – UE	1932,24	6,440	3647,5	12,158	14 018,16	46,727	40 586	135,286
GW 5°	SAP – GW	2329,01	7,763	4101,6	13,672	14 539,4	48,464	41 126	137,088
90°	SAP – UE	600	2	1500	5	10 000	33,333	35 786	119,286

földfelszínen hosszanti (É–D irányú) mozgásban lévő UE jelfeldolgozásában mind az S-sávban, mind a Ka-sávban.

Vizsgáljuk most meg, MEO/LEO műholdak általi lefedettségi tartományon belül milyen értékekkel értelmezhető a jel útja, a Doppler shift és a DVR. Példánkban a LEO01 1600 km, a LEO02 1500 km, míg a MEO 10 000 km földfelszíntől mért magasságban kerül telepítésre. A már ismertetett és elfogadott elevációs szögeket (UE 10°, GW 5°) figyelembe véve, az 5. táblázatban szereplő adatokkal lehet számolni.

Látható, hogy a rögzített elevációs szög mellett, a kiterjesztett átviteli út nagyban növeli a jelkésleltetés időintervallumát, amely – szélsőséges esetben – olyan magas is lehet, hogy jelentősen növeli az adatfeldolgozó processzorok komputációs idejét, beleértve a COMSEC-INFOSEC feltételeknek való magas szintű megfelelést is. Ugyanakkor az is nyilvánvaló, hogy – összehasonlítva a GEO-adatokkal (a táblázatban zölddel jelölve) – a MEO/LEO műholdokról érkező, illetve a műholdak által feldolgozott jelek késleltetési ideje kisebb, mint a geostacionárius pályára telepített eszközöknek.

Most vizsgáljuk meg, mely geometriai számítások szükségesek MEO/LEO műholdak esetében a Doppler shift és a DVR értékének a meghatározásához. A 8. ábra (amely szemantikusan, nem követi a Föld és a SAP röppálya valós geometriai arányait) bemutatja az alapkonstellációt, ezzel megkönnyítve a számításokat.

Az UE szintjén mérhető Doppler shift meghatározásához az alábbi mennyiségeket kell figyelembe venni. UE és a SAT között értelmezhető irányvektor az \vec{UESAT} , a SAT sebességvektora \vec{v} (v a sebessége), ezen vektorok által bezárt szög θ . A h a műhold földfelszíntől mért (eseti) ma-

gassága, R értékét a Föld sugara adja (~6372,797 km átlagos sugár), míg a kisugárzott (adó)frekvencia értéke F_c (Tx), c a fény, mint elektromágneses hullám sebessége. A keresett érték az F_d frekvencia (Doppler shift), amely az alábbi matematikai összefüggéssel számolható (2. egyenlet) [65, p.35.][51].

$$F_d = \frac{F_c}{c} v \cos \theta = \frac{F_c}{c} v \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos \beta}} \quad (2)$$

A megfelelő szögérték-számításhoz vezessük be az γ értékét, amely a fűldsugár és a műhold keringési magasság összegének valamint a fűldsugárnak a hányadosa, azaz az alábbi összefüggéssel értelmezhetjük (3. egyenlet) [65, p.35.][52].

$$\gamma = \frac{R+h}{R} \quad (3)$$

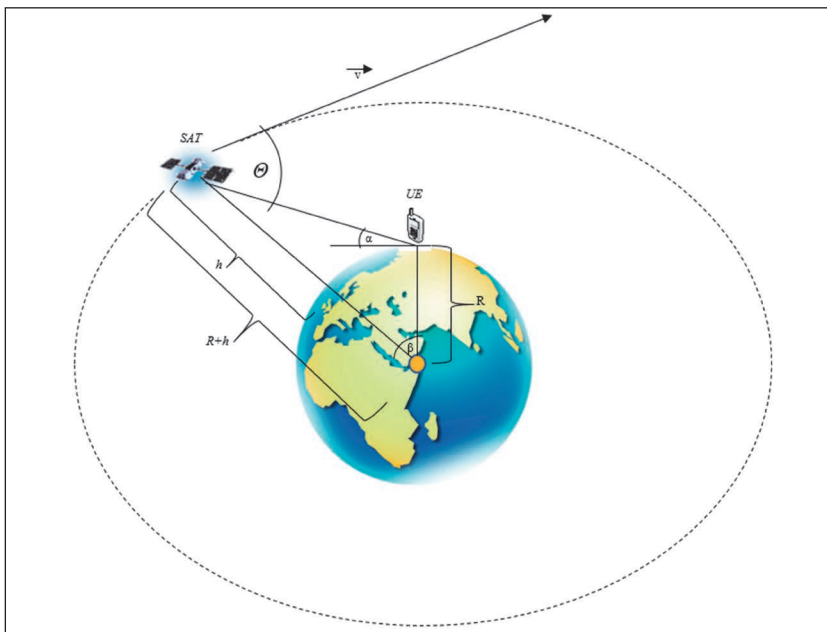
E matematikai számításokból nyilvánvalóvá válik, hogy a kézi terminál vételi helyén (UE) mérhető, az adófrekvenciától (F_c) való eltérést egyrészt a SAT adott időintervallumban értelmezhető geometriai helyzete, mozgási vektora és sebessége, másrészt az adófrekvencia terjedési úthossza, tehát ezen vektormennyiségek által bezárt szögek trigonometrikus számításai adják. A vizsgálatba vont műholdak átlagos sebessége LEO (600 km) esetén ~7,56 km/s, LEO (1500 km) esetén ~7,11 km/s, míg MEO (10 000 km) esetében ~4,93 km/s⁴³.

A műholdak mozgásegyenleteihez, pályadatainak számításaihoz tartozó iránymutatások megtalálhatók több forrásban is [53][54][55]. Ezek mélyreható bemutatását mellőzve megállapítható, hogy a Doppler shift értéke az üzemeltetési frekvencia (S-sáv vagy Ka-sáv) tartományokkal kalkulálva legfeljebb a ± 48 –225 kHz tartományba esik, míg a DVR értéke alacsonyabb az S-sávban sugárzó SAP-k esetében (6. táblázat).

Szoftverprogramozási feladat tehát, hogy az UE-k adó-vevő fokozatait a megfelelő érzékenységre tervezzék, szelektivitását növeljék annak érdekében, hogy tudják kezelni a különböző frekvenciasávokon továbbított jelsorozatokat adatfeldolgozási feladatait úgy, hogy a komputációs időintervallumokat a legkisebb értéken tartsák, figyelembe véve az úrszegmensben és az ionoszférában telepített berendezések adattovábbítási időintervallumait is.

Az S-sáv és a Ka-sáv frekvenciahasználata – jelazonosítás és feldolgozás, valamint komputációs tekintetben – kiegészül a földi telepítésű 5GN rendszerekből érkező információs csomagok feldolgozási igényével, hiszen az 5GN és

8. ábra. Geometriai áttekintés Doppler-komputációhoz (A szerző szerkesztése a [65, p.35.] alapján)



Frekvencia (GHz)	Doppler shift	DVR	SAP
2	± 48 kHz	-5,44 Hz/s	LEO01 (600 km)
20	± 480 kHz	-5,44 kHz/s	
30	± 720 kHz	-8160 Hz/s	
2	± 40 kHz	-180 Hz/s	LEO02 (1500 km)
20	± 400 kHz	-1800 Hz/s	
30	± 600 kHz	-2700 Hz/s	
2	± 15 kHz	-6 Hz/s	MEO (10 000 km)
20	± 150 kHz	-60 Hz/s	
30	± 225 kHz	-90 Hz/s	

az 5G NTN olyan hibrid hálózatot alkot, amelyen belül az adatérzékelésnek, adatfeldolgozásnak nagy mértékben automatizált folyamatnak kell lennie, figyelemmel az ITU-R ajánlásokban megadott időintervallumokra. Ezen követelményeket csak fázisvezérelt antennarendszerekkel, speciális, pontosan méretezett, fejlett modulációs-demodulációs képességgel rendelkező kéziterminálok képesek megvalósítani.

Katonai műveletben valós harctámogató értékkel bírhat katonai feladatra tervezett MEO/LEO, vagy – eseti jelleggel – UAS/HAPS-nak a műveleti terület feletti telepítése annak érdekében, hogy egy meghatározott terepszakasz 5GN lefedettsége biztosított legyen, és a katonai hálózatelérés ne legyen függő, elsősorban a polgári szolgáltatók által biztosított hálózatelemek rendelkezésre állásától.

Fókuszáltnak a legvalószínűbb katonai műszaki megoldásra, a katonai UAS/HAPS alkalmazásokra a pályamagasság-értéke (h) 8–50 km, stacionárius telepítésű, azaz a Föld egy adott pontjáról statikusnak látszik. A lefedettségi tartománya (legfeljebb 200 km) cellákra osztható és az UE-k elevációja (SAP és az UE közötti irányvektor (α), valamint a földfelszínre vonatkoztatott egyenes szögeltérése) minimum 5° , amely jóval kedvezőbb értékeket is felvehet, lévén az ionoszférikus platform (pl. ballon) az adott harctérület felett kerül telepítésre, valamint könnyen áttelepíthető. Természetesen e platformok stacionárius, rögzített helyét is érdemes megkérdőjelezni ugyanúgy, mint a GEO-műholdak esetében: feltételezzük hát, hogy egy adott zónában, adott pályáiban mégis van némi mozgási tartományuk. E tartományon belüli mozgási sebességüket számoljuk az átlagos 15 m/s értékkel.

Ez esetben a Doppler shift értéke az S-sávban ~100 Hz, míg ~1000–1500 Hz a Ka-sávban. Számítások alapján, a földfelszíni UE (pl. harcjármű mozgása az ionoszférikus platform lefedettségi celláiban) ± 185 Hz Doppler shiftet érzékelhet, míg a DVR értéke igen alacsony marad (0,0025 Hz/s) [56]. A terjedési időintervallumok tekintetében (5° elevációs szög és 200 km lefedettségi területtel számítva), ahol a földfelszíni UE és akár a GW is a lefedettségi tartományban üzemel, az egyutas terjedés idejét ~1,5 ms tehetjük. Belátható, hogy a katonai alkalmazásokban UAS/HAPS telepítése jelentős előnnyel jár a műveleti terület lefedettségére, jelfeldolgozásra, ezen keresztül a műveleti tempó felgyorsítására, megszerelve egy alacsonyabb szintű függést a földfelszíni szolgáltatók szolgáltatás-biztosításától, a polgári hálózatok rendelkezésre állásától.

ÖSSZEFOGLALÁS

A telekommunikációs technológiák robbanásszerű fejlődése, az ezzel alig-alig lépést tartó szabványosítás, szabályozás újszerű megoldásokat kényszerít ki a hálózatfejlesztő mérnökök és technikusok részéről. Ezen fejlődés igénye nemcsak az 5GN földi szegmensében produkál jelentős

mértékű műszaki előlépést, de – párhuzamosan az 5GN kiterjesztésének a szükségességével – egyre inkább megjelenik *state-of-the-art* technológiák szinte kizárólagos birtoklásában vezető szerepet betöltő, abban profitorientáltan érdekelt üzleti vállalkozások portfóliójában is. Polgári vállalkozások területén a 3GPP az élenjáró ezen újabb (földfelszín és az űrszegmenst, valamint az ionoszférát lefedő) szabályozást igénylő szakterületen, és megpróbálja átfogó módon megszerezni és szabályozni a GEO/MEO/LEO, az UAS/HAPS és UE egységek üzemmódjait mind a *transparent*, mind a *regenerative* üzemmódokban.

A globális szinten is mérvadó kereskedelmi vállalkozás előjelzései alapján [57] évtizedünk közepére – ezúttal kizárólag az okostelefonok, tabletek piacára fókuszálva – a 2020-ban a forgalomba helyezett és üzemeltetett mennyisegről kiindulva, darabszámokat tekintve 45%-os növekedés tervezhető elő. Átlagosan 21 Gb/hónap adatmennyiség forgalmazásával lehet tervezni, amely a 2018-ban az egy készülékre jutó adatforgalmazási mennyiség négyeszerese. Ezen okoseszközök adatforgalma generálja majd a teljes mobiladat-csere 95%-át, köszönhetően a *social networking/media* térnyerésének, ugyanakkor beleszámolhatjuk az *IoT* és *M2M* rendszerek adatforgalmának a dinamikus növekedését is. Ebből a nézőpontból vizsgálódva, a széles körű szolgáltatáselérés és az állandóan magas szolgáltatási minőség biztosítása (QoS) jelentős kihívásként jelentkezik a hálózattervezőknek, ezen a jelenleg még kevésbé szabályozott szakterületen is.

E tudományos közleményben – e fenti jövődőlés műszaki tartalmának a biztosítása érdekében de a teljesség igénye nélkül – célom volt bemutatni az 5G NTN hálózat jelen kialakítását és a rendszerparaméterek közül önkényesen kiválasztva, a Doppler shift, valamint a DVR értelmezését, hatásainak pontos feltérképezését annak érdekében, hogy katonai alkalmazások esetén legyen kiinduló ismeret-halmazunk ezen hatások mitigálására. Belátható, hogy a SAP és az UE paramétereinek (mozgási sebesség, telepítési magasság, eleváció, jelút, Doppler shift és DVR) ismeretében könnyedén számíthatók a rádióforgalmi rendszerek adatfolyamainak, jelsorozatainak alapösszetevői, ezen ismeretek birtokában pedig a hibrid hálózatunk bármely hardver vagy szoftver összetevője módosítható az üzemeltetők által, a nagyobb műveleti siker elérése érdekében.

E szegmens (műholdas és ionoszférikus) kutatása további erőfeszítéseket igényel, ugyanakkor a katonai alkalmazások közül – az infokommunikációs szakterületre fókuszálva, véleményem szerint – a leginkább inspiratív szakterület. Figyelemmel a NATO⁴⁴ bővítése és kapcsolódó ügynökségeinek dinamikus növekedésével megjelenő hálózati összekapcsolások igényére, a közös műveletek siker-letelményese a kölcsönösen összekapcsolt és illesztett, a kiterjesztett vezetés-irányítási hálózatok (C4ISR⁴⁵) folyamatos és átgondolt fejlesztése a műveleti helyzetkép (COP⁴⁶/NCOP⁴⁷) előállítására.

Katonai szempontokból vizsgálva a műszaki kihívásokat, a koherens telekommunikációs hálózatok hozzáféréseinek az igénye, valamint rendelkezésre állása a leginkább innovációigényes terület. Ennek kielégítése érdekében került tervezésre az 5G NTN, és ezen óriási műszaki kihíváshalmaz a leginkább ösztönző és – a polgári szegmensben – arányos a nagyobb üzleti sikerrel is (profitorientáció).

Miután a hidegháború lezárását követő időszakról, a polgári vállalkozások által tervezett és kialakított műszaki eljárások és eszközök térnyerését követően a katonai szakterület – a műszaki innováció területén – a háttérbe szorult, nyilvánvalónak tűnik a feladat: folyamatosan figyelemmel követni a műszaki startupok kutatás-fejlesztési irányait és



azt vizsgálni, hogy egy adott újítás milyen katonai előnnyel kecsegtet annak műveleti interpretációja esetében.

Úgy vélem, hogy az 5G NTN hálózatok további vizsgálata, a lehetséges katonai alkalmazások feltérképezése és illesztése a már meglévő, üzemelő hálózatelemekhez, a polgári-katonai vegyes vállalkozások létrehozása, az innovatív szemlélet megalapozása a katonai infokommunikációs hálózatok tervezése, kialakítása, üzemeltetése folyamán egy átfogóbb szolgáltatáscsomagot biztosító, magas rendelkezésre állású, fizikai és logikai rétegszinten egyaránt variálható (*scalability*), nagy ellenálló képességű (*resilient*), hibrid hálózatot eredményez, amelynek fejlesztése alapvető nemzeti érdekünk. Ezen hálózati kapcsolatok nemcsak a szárazföldi távközlési rendszerek üzemét, de a légierő nagy adatátviteli sebességű hálózatait is képesek támogatni (*remote tower initiatives*) [58][59][60][61][62].

Hálózat alapú megközelítést alkalmazva, ezen innovatív szemléletet meghonosítva a szervezeti kultúrában – nem kizárólagosan az infokommunikációs szakterületen – szélesebb lehetőséget biztosíthatunk a Magyarország Nemzeti Biztonsági Stratégiájában [63], valamint Magyarország Nemzeti Katonai Stratégiájában [64] meghatározott biztonsági és védelmi célok elérése érdekében.

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [44] „Doppler effektus”, Sulinet.hu <https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/termesztudomanyok/fizika/fizika-9-evfolyam/a-hang-interferenciaja-elhajlasi-a-doppler-effektus/a-doppler-effektus> (Letöltve: 2021.12.30.).
- [45] Dr. Szalai Béla: *Fizika*, Műszaki Könyvkiadó 1966, p. 371–374.;
- [46] Warbletoncouncil „Doppler-effektus: leírás, képletek, esetek, példák”, <https://hu.warbletoncouncil.org/efecto-doppler-9111> (Letöltve: 2021.12.30.);
- [47] Skolnik: „Doppler Frequency Shift”, *Handbook of Mems for Wireless and Mobile Applications*, 2013. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/doppler-frequency-shift> (Letöltve: 2021.12.30.);
- [48] Li, Zhao: „Radio environment map-based cognitive Doppler spread compensation algorithms for high-speed rail broadband mobile communications”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* December 2012 DOI: 10.1186/1687-1499-2012-263. p. 12-13. <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2012-263> (Letöltve: 2022.1.12.);
- [49] Aragón-Zavala, Sesena-Osorio, Castanón: „Doppler Shift in a Radiating Cable System intunnel Environments: A Theoretical Analysis”, *Wireless Personal Communications* (2020) DOI: 1007/s11277-019-06833-w October 2019. In: https://www.researchgate.net/publication/336598011_Doppler_Shift_in_a_Radiating_Cable_System_in_Tunnel_Environments_A_Theoretical_Analysis (Letöltve: 2022.2.2.);
- [50] 3GPP „Service Requirements for the 5G System”, document TS 22.261 Release 17 March 2020.;
- [51] Sato: „Derivation of longitudinal Doppler shift equation between two moving bodies in a reference frame at rest using the particle property of photons”, *Honda Electronics Co. Ltd.*, p.4.;
- [52] Matthew Schwartz. „Lecture 21, The Doppler effect”, (Harvard University Scholar EDU, p.2). <https://scholar.harvard.edu/files/schwartz/files/lecture21-doppler.pdf> (Letöltve: 2022.2.3.);
- [53] Yun Chao Hu et al., *Mobile edge computing: a key technology towards 5G*, (ETSI, Sophia Antipolis, France, White Paper) https://www.etsi.org/images/files/etsiwhitepapers/etsi_wp11_mec_a_key_technology_towards_5g.pdf (Letöltve: 2022.2.2.);
- [54] „Trajectories and orbits”, NASA <https://history.nasa.gov/conghand/traject.htm> (Letöltve: 2022.2.7.);
- [55] Samuel D.Conte, „The Computation of Satellite Orbit Trajectories” *Advances in Computers*, Vol. 3, 1962, P 1-76, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(08\)60617-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(08)60617-8), (Letöltve: 2022.2.7.);
- [56] Jun. Du, et.el, „Secure Satellite-Terrestrial Transmission Over Incumbent Terrestrial Networks via Cooperative Beamforming,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 7, pp. 1367-1382, July 2018, DOI: 10.1109/JSAC.2018.2824623;
- [57] Ericsson corporations, *Mobility Report 2021*, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/november-2021> (Letöltve: 2022.1.1.);
- [58] Palik Mátyás et al., *A repülésiirányítás alapjai*, (Budapest, Magyarország: Dialóg Campus Kiadó - Nordex Kft) 2018 p. 205.;
- [59] Somosi Vilmos, Vas Tímea, „A Magyar Honvédség légiforgalom-szervezési rendszere korszerűsítésének fő irányai”, *Repüléstudományi Közlemények* (1997) 2011, különszám pp. 1–11.;
- [60] Vas Tímea, Dr. Martin, Hromádka (szerk.), *Remote Tower Specifications in Deployable Airbases*, (EDIS Zilina University Publishers (2016) Zilina.), p. 137.;
- [61] Vas Tímea: „Műveleti repülőtér forgalmának irányítása virtuális felületeken”, *Hadmérnök* 2014/8 pp. 67–74.;
- [62] Vas Tímea: „The remote and mobile air traffic control tower and its possible application to the operational area”, *Journal of Defence Resources Management* 2014/2 pp. 147–152.;
- [63] 1163/2020 IV.21 Kormányhatározat), In: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A20H1163.KOR&xtreferer=00000001.txt> (Letöltve: 2022.2.5.);
- [64] 1393/2021 VI. 24 Kormányhatározat), In: <https://honvedelem.hu/hirek/nemzeti-katonai-strategia.html> (Letöltve: 2022.2.5.);
- [65] 3GPP Study on New Radio (NR) to Support Non Terrestrial Networks; document TR 38.811, Release 15.4.0 September 2020.

JEGYZETEK

- 41 Christian Doppler (1803–1853) osztrák fizikus. 1847–1849 között a Miskolci Egyetem jogelőd intézményében, a selmecebányai Bányászati és Erdészeti Akadémián a matematika, fizika és mechanika tanszék professzora volt.
- 42 Hosszúsági körök – meridiánok/délkörök, a két pólust (É-D) összekötő felületi görbék, félkörök.
- 43 A Föld forgási sebessége megközelítőleg 327 m/s a 45° hosszúsági fokon, és 464 m/s az Egyenlítőnél mérve.
- 44 NATO – North Atlantic Treaty Organization.
- 45 C4ISR – Command Control Communications Computer Intelligence Surveillance Reconnaissance.
- 46 COP – Common Operational Picture.
- 47 NCOP – NATO Common Operational Picture.