

Nagy Imre

Megakonstellációk

Napjainkban több mint 20 000 mesterséges eredetű objektum és törmelék kering a Föld körül. Ez a szám hamarosan sokszorosára fog nőni a megakonstellációk kiépülésével. Jelen cikkben ennek a hatásait vizsgáljuk. Áttekintjük a megakonstellációk főbb jellemzőit, majd megismerkedünk néhány jelentősebb rendszerrel, és bemutatjuk a rendszerekkel kapcsolatos főbb aggodalmakat. Megállapítjuk, hogy a jelenlegi nemzetközi szabályozási környezet nem megfelelő, mielőbbi felülvizsgálatra szorul. Az űrbéli tevékenységre vonatkozó szabályok aktualizálása az egyes államok mellett a szektor szereplőinek is alapvető érdeke.

Kulcsszavak: műholdak, űrinternet, földmegfigyelés, megakonstellációk

1. Bevezetés

Az első mesterséges hold 1957. október 4-én állt Föld körüli pályára, amelyet azóta sok ezer további űreszköz követett. A CelesTrak adatai szerint 2021. március 28-ai állapot szerint 4126 aktív mesterséges objektum kering bolygónk körül, valamint 22 642 mesterséges eredetű törmelék, azaz űrszemét [25]. Ezek a számok azonban eltörpülnek a világűr hasznosításának napjainkban kezdődő új korszakában pályára kerülő műholdak száma mellett.

Az új korszak 2016-ban vette kezdetét, amikor elkezdődött a minden korábbinál több tagot számláló műholdrendszerek kiépítése [22]. Ezeknek a rendszereknek a tervezése már sok éve elkezdődött, és az elképzelésekről évek óta cikkezett a napi sajtó is, ám ennek ellenére az első indítások nagy felzúdulást váltottak ki elsősorban a csillagász közösségben. A szóban forgó megakonstellációk vagy – az Almár Iván által javasolt magyar elnevezéssel – műholdseregek elsősorban távközlési célokra készülnek, ám akadnak olyanok is, amelyeket távérzékelési területre terveznek.

A következő fejezetekben áttekintjük a műholdseregek általános jellemzőit, majd sorra vesszük a már ismert, konkrét rendszerek fontosabb adatait. Végezetül áttekintjük az új típusú rendszerek várható hatásait.

2. Klasszikus műholdrendszerek

A 2016-os esztendő előtt a legnagyobb műholdrendszer a 66 mesterséges holdat számláló távközlési célú Iridium volt [24]. Ezenkívül említést érdemel még a hasonló célú Globalstar, valamint a helymeghatározáshoz használt műholdas rendszerek. Az egyes rendszereket olyan

mesterséges holdak alkotják, amelyek teljesen azonos felépítésűek (kivével a kínai BeiDou rendszer, amelyet két eltérő típus alkot). Ez természetes következménye annak, hogy teljesen azonos feladatot kell ellátnia a rendszer minden tagjának. Azt lehet mondani, hogy ezek a mesterséges holdak lényegében kis darabszámú sorozatokban készülnek.

A fenti, globális szolgáltatásokat nyújtó műholdrendszerek mellett vannak olyan szolgáltatók, amelyeknek a flottája jelentős számú, ám lényegében egyedi űreszközökből épül fel. Ilyen szervezetek például az Intelsat és az Eutelsat, amelyek hozzávetőlegesen 40–60 aktív mesterséges holddal rendelkeznek [19], [21]. Bár ezek az űreszközök egyedi szerkezetek, ám a költségek csökkentése végett a mesterséges hold alapját képező úgynevezett buszt (váz, napelemek, hajtóművek, irányítórendszer stb.) több megrendelő, esetleg jelentősen eltérő célú műholdjához is felhasználják a gyártók.

A hagyományos űreszközök tömege jellemzően a pár száz kilogrammtól ~5 t-ig terjed. A pályamagasságok a több száz kilométeres tartománytól a geostacionárius pálya magasságáig terjedő tartományba esnek. Az alacsonyabb pályákra általában az elektromágneses spektrum különböző tartományaiban működő távérzékelő mesterséges holdak kerülnek, mert így lehet a legjobb felbontást elérni. Az Egyenlítő felett, 35 786 km magasan húzódó geostacionárius pályára leginkább távközlési műholdak kerülnek. A két pálya közötti különbség, hogy míg az előbbi elérése viszonylag egyszerű és olcsó, addig az utóbbi bonyolult manővereket igényel, és drága. A geostacionárius pálya ára azonban megtérül például egy távközlési mesterséges hold esetében, mert a földi egységek az égboltnak mindig ugyanarra a pontjára kell nézzenek, ami egyszerűbb és így olcsóbb szerkezetet eredményez.

Néhány fontosabb „hagyományos” rendszer adatait mutatja az 1. táblázat.

1. táblázat
Néhány nagyobb műholdrendszer főbb adatai [24]

Üzemeltető	Név	Műholdak száma	Pályamagasság [km]	Üzembe helyezés
Iridium Communication Inc.	Iridium	66	780	1998
Globalstar Inc.	Globalstar	48	1400	2000
CNSA	BeiDou	30	21 150 és 35 786	2018
USSF	NAVSTAR	24	20 180	1993
Roscosmos	GLONASS	24	19 130	1995
GSA, ESA	Galileo	24	23 222	2018

3. Műholdseregek általános jellemzői

A műholdseregek legfontosabb jellemzője, hogy tagjainak a száma sokszorosa minden korábbi műholdrendszernek. Míg korábban a legtöbb tagot számláló rendszerben 66 műhold teljesít szolgálatot egyszerre, addig a kiépítés alatt álló rendszerek közül a kisebbek is 100 feletti tagot számlálnak, a legnagyobb pedig jelenleg közel 12 000 egységre rendelkezik engedéllyel¹ [8].

Maguk a műholdak a korábbiaknál sokkal kisebbek, tömegük jellemzően a 100–1000 kg közötti tartományba esik. Az alkalmazott pályák is részben rendhagyók, mert például

¹ Sajtóhírek szerint jelenleg engedélyeztetés alatt áll további 30 000 Starlink műhold, így a rendszer teljes kiépítése után közel 42 000 tagból fog állni. A OneWeb 2020-ban mintegy 48 000 pályára kért engedélyt, ám később ezt a kérelmet módosítva 6372-re csökkentette az igényt (egyelőre?).

az űrtávközlésben legelterjedtebb geostacionárius pályával szemben 2000 km vagy alacsonyabb felszín feletti pályákat (LEO) terveznek.

2. táblázat
Néhány tervezett, illetve kiépítés alatt álló megakonstelláció főbb adatai [a szerző szerkesztése]

Üzemeltető	Név	Műholdak száma	Pályamagasság [km]	Első indítás
SpaceX [8]	Starlink	11 943 (+30 000?)	550	2019
Samsung [11]	?	4600	<2000	?
Kuiper System (Amazon) [10]	Kuiper	3263	610	?
OneWeb [23]	OneWeb	648+1972 (+6372?)	1200	2019
Spire Global [9]	Lemur	872	385–650	?
Plante Labs[7]	Flock	600	>500	2014
Satelogic S. A. [22]	ŃuSat	300	500	2016
Swarm Tech. [6]	SpaceBEE	150	300–550	2018
Telesat [8]	Telesat	117	1248	?
Astro Digital [8]	?	100	475–625	?
HawkEye 360 [5]	HE360	80	575	?
Apple [18]	?	?	?	?

A korábbinál alacsonyabb pályáknak több előnye is van. Mindenekelőtt minél kisebb a pályamagasság, annál olcsóbb az űreszközt odajuttatni. Az üzemeltetés szempontjából is előnyös lehet, hiszen egy távérzékelő műhold egyszerűbb optikával is nagyobb felbontást tud elérni, mint magasabb pályáról komolyabb optikával. Telekommunikációs területen az előny kettős, mivel kisebb teljesítmény szükséges adott átviteli sebesség eléréséhez, miközben a késleltetés is alacsonyabb lehet.

Az előnyök mellett természetesen hátrányok is vannak:

- míg geostacionárius pályán három megfelelő helyzetű mesterséges holddal szinte globális lefedettség érhető el, addig alacsonyabb pályán nagyszámú műhold szükséges ugyanehhez;
- mivel nagyszámú mesterséges hold szükséges adott lefedettség eléréshez, megnő a zsúfoltság, és így az ütközésveszély a szóban forgó tartományban. (A problémával több szócikk is foglalkozik, például [12] és [13]);
- további hátrány, hogy alacsony, illetve nagyon alacsony pályákon (VLEO) a mesterséges holdak passzív élettartama hetekben mérhető a jelentős légköri fékeződés miatt, így a pályamagasság folyamatos korrekcióra szorul, amihez nagy mennyiségű hajtóanyag szükséges;
- különösen VLEO esetén kap jelentőséget az oxidáció. Ennek az az oka, hogy ezek a pályák a felső légkörnek a viszonylag sűrű rétegeibe esnek, ahol még számottevő mennyiségű molekuláris és atomos oxigén található. Ez elsősorban a napelemek fokozott degradálódása miatt jelent problémát;
- a két fentebbi pont következménye, hogy ezeknek a műholdaknak a tervezett élettartama 3–5 év körüli, szemben a geostacionárius műholdak ~15 évével;
- ha 200 kg/db tömeggel számolunk, akkor a közeljövőben tervezett ~50 000 mesterséges hold (lásd alább) össztömege hozzávetőlegesen 10 000 t. Ez azt jelenti, hogy a jelenleg rendszerben álló rakétákkal minimum több száz, vagy akár ezret is meghaladó számú indítás szükséges a rendszerek kiépítéséhez;

- a viszonylag rövid élettartam miatt évről évre nagyszámú mesterséges holdat kell pályára állítani, amihez évi ~200 rakéta indítására lesz szükség. A jelenlegi infrastruktúra mellett ez nehezen elképzelhető.

A hátrányból néha előny is válhat. A nagy mennyiségű műhold előállításának méretgazdaságossága miatt mérsékli az egy darabra jutó költségeket. Ez az árcsökkenő hatás részben kihat a kisebb darabszámban készülő űreszközök áraira is. A szükséges indítások száma először emeli ugyan a rakéták árát, ám hosszabb távon olyan műszaki megoldások is gazdaságossá válhatnak, amelyeknek a kifejlesztése sok pénzbe kerül, de a nagyszámú indítás mellett megtérülnek. Ezek hatására az egy indításra eső költségek már középtávon is jelentősen csökkenhetnek. Ilyen irányú fejlesztések lehetnek például a részben vagy teljesen többször felhasználható, illetve a jelenleg rendszerben állóknál nagyobb teljesítményű rakéták építése. Ezek mellett szóba jöhet új típusú hajtóművek kifejlesztése is.

Az indítási költségek mellett az energiaellátáshoz használatos napelemek árát is méréselheti a műholdseregek megjelenése. Jelenleg a világűrbeli használatra szánt napelemek ára hozzávetőlegesen 500 USD/W [2]. Ez a magas ár részben annak köszönhető, hogy csak viszonylag kis mennyiségben állítják elő ezeket a paneleket, és jelenleg ez az egyik legnagyobb akadálya az űrnaperóművek építésének [14]. A megakonstellációk kiépítésével felfutó napelemgyártás közelebb hozhatja a világűrbe telepített naperóművek megvalósulását, amennyiben jelentősen mérsékli a panelek árát.

Mivel a műholdseregek alacsony, illetve nagyon alacsony pályákra kerülnek, a pályamódosításhoz célszerű ionhajtóműveket használni. Ezek ma már rendelkezésre állnak, ám a használatuk nem nevezhető széles körben elterjedtnek. A megakonstellációk jelentősen segíthetik a terjedésüket, amely csökkentheti az elterjedten alkalmazott mérgező hidrazin használatát. VLEO mesterséges holdak esetén tovább lehetne csökkenteni az űreszközök fedélzeti hajtóanyag-tartalmát, ha közönséges ionhajtóművek helyett légköri gázokkal táplált változatokat alkalmaznának. A szélessávúinternet-szolgáltató műholdseregek esetén jelentős előnye lenne ezeknek a hajtóműveknek, mert akár 200 km alatti pályamagasságok mellett is biztosítani tudnák a több éves üzemidőt. A pályamagasság csökkentésével csökkenthető lenne a késleltetés is, amely az ilyen típusú szolgáltatások esetén kulcsfontosságú paraméter. Bár jelenleg nem ismertek ilyen irányú kutatások a műholdseregek fejlesztői részéről, ám feltehető, hogy a kétségtelen előnyök miatt előbb-utóbb erre sor fog kerülni. Amennyiben az ilyen irányú munkák sikerre vezetnek, abból számos más terület is profitálhat (például a katonai, illetve a tudományos célú mesterséges holdak) [13].

4. Néhány műholdsereg bemutatása

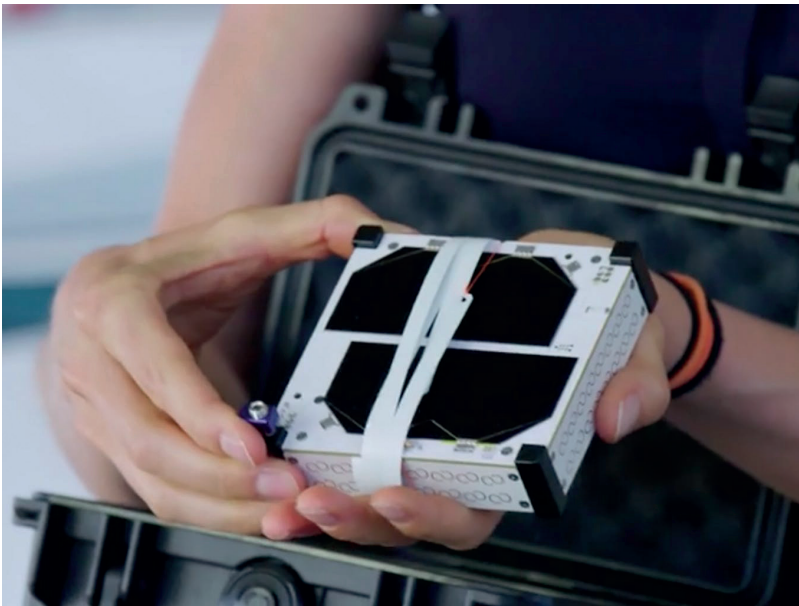
4.1. ÑuSat

Jelenleg több műholdsereg kiépítése is folyamatban van. Időrendben az első az argentin földmegfigyelő műholdrendszer, a ÑuSat. Az argentinai telephely, illetve az uruguayi gyártás, és hogy nem használnak az USA-ban készült alkatrészeket, lehetővé teszi az elkészült mesterséges holdak indításához akár a kedvező árú kínai rakéták használatát is. A rendszer első tagjának indítására 2016-ban került sor Kínából. A további indítások is főleg Kínából történtek,

de felmerült, hogy a SpaceX rakétáit is igénybe veszik. Egyelőre egy kivétel van, a hatodik mesterséges hold 2020 szeptemberében az ESA Vega rakétájával állt pályára. Maguk a műholdak 37 kg tömegűek, és 1 m felbontású hiperspektrális felvételeket tudnak készíteni a felszínről. A jelenleg kiépítés alatt álló Aleph-1 konstelláció az első szakaszban 90 mesterséges holdat fog tartalmazni, amelyek hetente fogják elkészíteni a Föld teljes felszínének a nagy felbontású fényképét az 500 km magasan húzódó poláris pályáról. A teljes kiépítés után a 300 mesterséges hold már napi rendszerességgel teszi meg majd ugyanezt. Több cég is hasonló flotta kiépítésén dolgozik (például Planet, BlackSky, ICEYE, Csilin-1).

4.2. Swarm – SpaceBEE

A második a megvalósulás útjára lépő műholdsereg üzemeltetője, a Swarm Technologies Inc. A cég SpaceBEE nevű műholdjai közül az első négy Indiából indult 2018-ban. A helyszín kiválasztása nem a szokványos szempontok alapján történt. Legfőbb indoka az volt, hogy az Amerikai Egyesült Államokban bejegyzett cég odahaza nem kapott engedélyt a mesterséges holdak pályára állításához. Ennek az volt az oka, hogy a hatóságok úgy ítélték meg, hogy túl kicsik az űreszközök, ami megnehezíti a földi radarok számára a mozgásuk követését. A Föld körüli pályán keringő monitorozhatatlan testek nagymértékben növelhetik az ütközések veszélyét a többi űreszköz számára, mivel a pályájukat nem lehet kellő biztonsággal előre jelezni. Az indiai start után az USA hatóságai 900 000 USD-s büntetést szabtak ki a Swarm Technologies Inc.-re [4].



1. ábra

Egy $10 \times 10 \times 2,8$ cm méretű SpaceBEE műhold a gyártó által közzétett fényképen [19]

Ez az eset rávilágít, hogy a mesterséges holdak engedélyeztetésének jelenlegi, nemzeti szintű szabályozása nem megfelelő. Szükséges lenne az engedélyezési irányelvek egységesítésére, elkerülendő a hasonló eseteket. Ellenkező esetben az árak várható csökkenése miatt jelentősen növekvő számú mesterséges hold kaotikus állapotokat idézhet elő Föld körüli pályán. Az átlátható és nemzetközileg egységes szabályozás nemcsak biztonsági kérdés, hanem az egész ágazat fejlődése szempontjából is fontos lenne.

Maga a rendszer alacsony átviteli sebességű internetelérést biztosít az úgynevezett IoT- (*internet of things*) területen. Az üzemeltető okosautók, lakott területektől távol működő mérőállomások stb. adatainak a továbbítására ajánlja a szolgáltatásait. A jelenleg engedélyezett 150 mesterséges hold 300 és 550 km közötti magasságú pályákra kerül. Méretük mindössze $2,8 \times 10 \times 10$ cm (1. ábra).

4.3. OneWeb

A 2019-es esztendő két műholdereget hozott. A kettő közül a kisebb visszhangot a brit OneWeb váltotta ki. A SpaceBEE-hez hasonlóan ennek a rendszernek a tagjait is műholdas internetszolgáltatásra tervezték. A teljes rendszer az első fázisban 648 mesterséges holdat fog tartalmazni. A továbbiakban, ha lesznek megrendelők, ez szám 1972-vel növekedhet. A 150 kg tömegű mesterséges holdak 1200 km magasan húzódó poláris pályára kerülnek, és 50 Mbit/s sebességű internet-hozzáférést ígérnek. Az űreszközöket az Airbus Defence and Space készíti. A pályára állításhoz Szozuz rakétákat használnak.

A OneWeb kapcsán sor került egy olyan eseményre, amelynek a bekövetkeztétől a műholderegek kritikusai tartanak: 2020-ban csődbe menekült az üzemeltető. A csődeljárás gyorsan lezárult, mert a brit kormány úgy ítélte meg, hogy Nagy-Britannia számára stratégiai fontosságú ez a rendszer, ezért részben felvásárolta a céget. A szerencsés kimenetel ellenére jogosan merül fel a kérdés, hogy mi történik egy, a Föld körül keringő műholdseraggal egy esetleges sikertelen csődeljárást követően? A kérdésre jelenleg nincs megnyugtató válasz. A korábban említett, az engedélyeztetések körüli visszasságokhoz hasonlóan itt is nemzetközi szinten összehangolt szabályozásra lenne szükség, hiszen az esetleg irányítás nélkül maradó nagyszámú mesterséges hold is globális veszélyforrássá válhat.

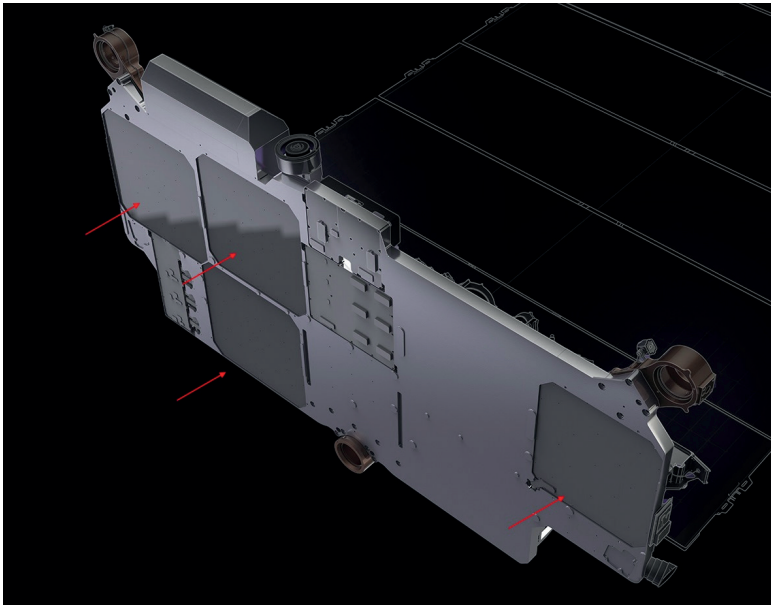
A csődeljárás sikeres lezárását követően a cég folytatta a megkezdett munkát. Ennek részeként elindította a következő generációs rendszer mesterséges holdjaihoz használni kívánt pályákra az engedélyeztetési eljárást, összesen 47 844-re. Később ezt a számot jelentősen, 6372-re csökkentették [23]. Az okok között a felelősségteljes magatartást említették, amely szükséges az űrtevékenység hosszú távú fenntarthatóságához, azonban feltehetően a költséghatékony működés biztosítása is jelentős szerepet játszhatott.

A rendszer kapcsán nemzetbiztonsági aggodalmak is felmerültek Oroszország részéről mondván, hogy kémkedésre is használható. Erre hivatkozva az orosz hatóságok megtagadták a OneWeb által kért frekvenciák használati engedélyének megadását. Ennek ellenére, mint azt korábban említettük, a rendszert alkotó mesterséges holdakat orosz rakétákkal állítják pályára. Az eset kapcsán nem szabad elfeledkezni arról sem, hogy olyan időszakban került sor az elutasításra, amikor Oroszország és a Nyugat kapcsolata a hidegháború óta nem látott mélységbe zuhant.

4.4. Starlink

A Starlink, bár időrendben nem az első, de mindenképpen a legnagyobb visszhangot kiváltó rendszer. Ez némileg meglepő annak tükrében, hogy a rendszer üzemeltetője, a Space Exploration Technologies Corporation (elterjedt rövidítéssel SpaceX), már évekkal korábban nyilvánosságra hozta a tervezett rendszer főbb paramétereit. Így nehéz lenne azt mondani, hogy meglepetést okozott a 2019-es esztendőben pályára állított első adag mesterséges hold. Talán a műholdak tervezett nagy száma miatt kételkedtek benne többen is, hogy valóban megvalósul-e ez a rendszer a közeljövőben. Az első néhány rakomány mesterséges hold indítása után jött még csak az igazán megdöbbentő hír, miszerint a már engedélyezett közel 12 000 űreszköz még csak a kezdet. A rendszer üzemeltetője ugyanis kérelmet nyújtott be további 30 000 műhold pályára állítására. Utóbbi szám nagyságát talán az érzékelteti a legjobban, hogy napjainkban hozzátétőlegesen 22 000 legalább pár centiméteres test pályáját követik a földi radarrendszerek. Ezek nagy többsége törmelék, azaz űrszemét. Vagyis, ha minden a cég elképzelései szerint alakul, hamarosan több aktív mesterséges hold kering majd a Föld körül, mint űrszemét. A műholdseregeket leszámítva jelenleg mintegy 2000 működő mesterséges hold kering bolygónk körül.

A Starlink műholdak pályára állítását a SpaceX saját Falcon 9 rakétájával oldják meg. Mivel a rakéta akár 15 t-t is fel tud juttatni alacsony Föld körüli pályára, egy indítás alkalmával 60 darab, egyenként 227 kg tömegű mesterséges holdat visz magával 550 km magasságba. (Ezt a számot érdemes összevetni a korábbi csúcstartó Iridium rendszerrel, amely összesen 66 tagból áll!) Az elsődleges pálya elérése után megkezdődik a műholdak kibocsátása. Az önálló sodott űreszközök ezt követően saját ionhajtóművük használatával érik el a tervezett pályájukat.



2. ábra

Egy Starlink műhold a SpaceX által közzétett képen [3]

A mesterséges holdak kibocsátása rendkívül látványos jelenség. Ennek három oka van. Egyrészt az, hogy alacsony pályán történik, másrészt, hogy a műholdak viszonylag nagyok, illetve magas a fényvisszaverő képességük. Alakjukat tekintve leginkább egy nagyon vékony (téglalapszerű) téglatestre hasonlítanak, amelyhez egy napelemszárny csatlakozik. A téglatest nagyobb felületű lapján négy antennát helyeztek el, amelyek mindig a felszín felé kell nézzenek. A kinyitott napelemszárny erre a síkra merőlegesen áll a felszínnel ellentétes oldalon. Az alakból következően a mesterséges hold méretéhez képest nagy a Föld felé néző felület, ami a Földről nézve az átlagosnál fényesebbé teszi a hasonló tömegű műholdakhoz képest (2. ábra).

Megfigyelhető a négy nagy méretű négyzet alakú antenna, és hogy mennyire fényes a borítása.

A rendszer sok kritikát kapott az általa okozott fényszennyezés miatt. Erre válaszul fényvisszaverődést csökkentő bevonattal, illetve árnyékolással látják el a rendszer újabb tagjait.

5. Internet a világűrben

A jelenleg ismert tervek, illetve a kiépítés alatt álló rendszerek között többségben vannak az internet-hozzáférést szolgáló műholdcsomagok. A távérzékelési feladatokat ellátó rendszerek esetén logikus választás az alacsony pálya és a nagyszámú mesterséges hold, hiszen így kisebb üresközeggel rövid idő alatt lehet a teljes felszínt végigfényképezni. Az internetszolgáltatás esetében nem ennyire magától értetődők az előnyök.

Egy geostacionárius pályán keringő mesterséges holdat használva az adatok továbbítására beleütközünk a késleltetés problémájába. A felszínről induló jelnek először el kell jutnia a műholdig, majd onnan vissza a vevőig, és ugyanezt az utat kell újra megtennie a válasznak is, szerencsére vákuumban, azaz a lehető legnagyobb sebességgel. Mivel a geostacionárius pálya az Egyenlítő felett 35 768 km magasan húzódik, ez földrajzi helyzettől függően több mint $4 \times 35\,768$ km utat jelent. Ehhez legalább 477 ms idő szükséges. Ezzel szemben egy alacsony pályán keringő mesterséges hold esetén ugyanez az út hozzátétőlegesen néhány század részére esik, és sokkal kevésbé függ a földrajzi helyzettől, ha a műholdak számát és pályáit optimálisan alakítják ki. Így a jel véges terjedési sebessége milliszekundumos nagyságrendben járul hozzá a teljes késleltetéshez.

A műholdas rendszerek előnye a földi hálózatokkal szemben, hogy míg a felszínen üveg-szálakban továbbítják az adatokat, a világűrben a műholdak között vákuum van. Amennyiben sikerül megoldani a műhold-műhold adatátvitelt, egy kellően alacsony pályájú műholdas rendszer a felszíni üveg-szálasnál is alacsonyabb késleltetést kínálhat. Ez bizonyos területeken előnyös lehet. Ilyenek például az úgynevezett nagy frekvenciás tőzsdei kereskedés, az online játékok stb. Számítások szerint ahhoz, hogy egy műholdas internetszolgáltatás a földi üveg-szálas rendszereknél alacsonyabb késleltetéssel működjön, 1557 km alatti magasságban húzódó pályákra van szükség [11].

Bár elméletileg a műholdas internet komoly előnyökkel rendelkezik a földi változattal szemben, a megvalósítás cseppet sem egyszerű. A felszínről egy irányban látszó, különböző magasságokban keringő mesterséges holdakról érkező jelek interferálhatnak, ami rontja a szolgáltatások minőségét. A probléma kezelhető a rendelkezésre álló erőforrások megfelelő menedzselésével, ám figyelembe kell venni például a felhasználói igényeket, ismerni kell

a műholdak pontos helyzetét, a légköri viszonyokat stb., ami rendkívül sok adat ismeretét és feldolgozását feltételezi. A Föld körül keringő mesterséges holdak irányítása, az esetleges ütközésközeli helyzetek megelőzése is komoly kihívást jelent a megakonstellációk üzemeltetése során. És nem utolsósorban az előfizetők számára szükséges földi egységek ára is meglehetősen magas lesz [15]. Jelenleg a Starlink esetében ismertek az árak. A csatlakozáshoz szükséges egységért 500 USD-t kérnek, amihez még hozzájön a havi 100 USD-s előfizetési díj. Becslések szerint a földi egység ára valójában közelebb lehet az 1500 USD-hoz. Szintén megoldandó optimalizációs probléma, hogy az előfizető és az elérni kívánt szerver között a jelek milyen úton haladjanak. Az optimalizáció során a rendszer és környezetének állapotát is figyelembe kell venni [15], [17].

5.1. Műholdas mobilinternet?

A mobiltelefonok fejlődése egyes vélemények szerint elvezethet akár műholdas mobilinternet-hez is [9]. Ezzel kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy bár az 5G-s mobiltelefonok terjedésével egyre több olyan készülék lesz használatban, amely képes a mesterséges holdak által használt frekvenciatartományok használatára, ez önmagában még kevés ahhoz, hogy egy több száz kilométer távolságban keringő műholddal kommunikáljanak. Jelenleg a földi egységek mérete lényegesen meghaladja egy mobiltelefon méretét. El lehet készíteni az antennát ugyan kisebb méretben is, ám a méret csökkentése az átviteli sebesség rovására mehet. Ráadásul a telefonok mobilkészülék lévén erősen korlátozott akkumulátorkapacitással rendelkeznek. Amennyiben sikerülne jelentősen növelni a kapacitást, akkor sem növelhető korlátlanul a kommunikáció fogyasztási kerete, mert a véges hatásfok miatt disszipálódó hőtől a készülék kellemetlenül meleggé válna. Továbbá a mobiltelefonok térbeli helyzete használat közben közel sem ideális egy mesterséges holddal történő kommunikáció szempontjából. A problémákra részben megoldást jelenthet, ha nem ragaszkodunk a közel szimmetrikus adatátviteli sebességhez. Valós használati körülmények között általában a letöltési sebesség határozza meg leginkább a felhasználói élményt. Ha csökkentjük a feltöltési sebességet, akkor csökkenthető a készülék fogyasztása, viszont a kis méretű antenna miatt a műhold sugárzási teljesítményét kell jelentősen növelni, ami nagyobb és drágább űreszközöket tesz szükségessé. A problémák ellenére a nagyobb mobiltelefon-gyártók (például Samsung, Apple) valószínűleg foglalkoznak ilyen irányú fejlesztésekkel, noha nem várható, hogy ezek a fejlesztések tíz éven belül eredményre vezetnének. Ezek a fejlesztések valójában túlmutatnak a műholdas mobilinterneten, hiszen az 5G-s szabványú hálózatokon is van lehetőség hangalapú hívások továbbítására.

6. Aggodalmak

A műholdseregek kapcsán több aggály is felmerült. Mindenekelőtt a nagyszámú mesterséges hold fokozza az ütközések veszélyét. Egy ilyen baleset hatásai túlmutatnak az adott űreszközök pusztulásán, mivel a keletkező törmelék több száz éven át keringhet a Föld körül, állandó veszélyforrást jelentve az űreszközök számára. Az ütközések elkerüléséhez nagy teljesítményű földi követő hálózatra van szükség. Hiába azonban a kellően pontos pálya-előrejelzés, ha a mesterséges holdak irányítóközpontjai nem működnek megfelelően. A Starlink

44 jelű műhold 2019. szeptember 2-án kezdte veszélyesen megközelíteni az ESA Aeolus nevű műholdját. Ebben az esetben a Starlinknek kellett volna kitérő manővert végrehajtania, ám a SpaceX irányítóközpontjában a belső tájékoztatási rendszer hibájából a személyzet nem értesült a vészhelyzetről. Végül az ESA műholdja hajtott végre pályamódosítást a feltételezett ütközés előtt egy nappal.

A OneWeb már említett csődje, a Swarm Technologies illegális műholdindítása mellett a Satellogic esete is azt mutatja, hogy a jelenlegi egyezmények már nem felelnek meg a kor követelményeinek. Utóbbi két eset alapján megtörténhet, hogy ha egy cég számára nem engedélyezik a kívánt mesterséges hold pályára állítását egy országban, akkor egyszerűen áthelyezi a székhelyét egy olyan országba, amely feltehetően nem fog kifogást emelni. A Satellogic esetében a dél-amerikai székhelyre csak azért volt szükség, hogy olcsó kínai rakétákkal tudják megoldani a űsSat műholdak indítását, ám a módszer alkalmas lehet fontos szabályok megkerülésére is.

Elsősorban az internetszolgáltató rendszerekkel szemben merülnek fel biztonsági kérdések. Ezeknek a rendszereknek az előfizetői ugyanis meg tudják kerülni a tartózkodási helyük szerinti országok informatikai infrastruktúráját. Ez alighanem azoknak az országoknak a vezetését fogja leginkább zavarni, amelyek erősen kontrollálják, hogy az állampolgáraik milyen tartalmakhoz férhetnek hozzá. Feltehetően legalább részben ennek köszönhető, hogy Oroszország törvényben készül megtiltani a területén a külföldi üzemeltetésű műholdas internetszolgáltatások használatát.

A helyzetet csak bonyolítani fogja, ha megjelennek a műholdas mobilinternet-rendszerek, amelyek esetleg hangalapú hívások kezdeményezésére is alkalmasak lesznek. Ezek a szolgáltatások a jelenlegi földi szolgáltatóknak fognak fokozatosan növekvő konkurenciát állítani. Azok, akik előfizetnek egy ilyen szolgáltatásra, nem mellékesen kikerülhetnek a honi szabályozás alól, ami megnehezítheti például a bűnüldöző szervek számára a hívásadatokhoz történő hozzáférést.

A műholdas internetszolgáltató rendszerek mellett az egyre fejlődő távérzékelő mesterséges holdakból álló rendszerek is ébreszthetnek aggodalmat. Ezeknek a rendszereknek a képességeit korlátozzák ugyan a vonatkozó szabályok, azonban így is képesek katonai felhasználásra alkalmas adatokat szolgáltatni, különösen, ha kombinálják a különböző spektrumtartományokban végzett megfigyeléseket. Jó példa erre a 38north.org oldal által készített tanulmány, amelyben kereskedelmi alapon hozzáférhető adatokat dolgoztak fel. Az optikai és apertúraszintézises radarfelvételek kombinálásával sikerült követniük a jelenleg fejlesztés alatt álló észak-koreai Szinpo tengeralattjáró mozgását az álcázási kísérlet ellenére [1].

A nemzetközi szintű szabályozás modernizálása valójában leginkább a rendszerek üzemeltetőinek áll érdekében. Egy olyan jogi környezet ugyanis, amelyben az egyes nemzeti szintű szabályozások jelentősen eltérnek, a szabályok megkerülhetők, ami Föld körüli pályán kaotikus állapotokat eredményezhet. Egy ilyen helyzetben a megakonstellációk üzemeltetése kockázatosná válik, ami extra költségeket jelent.

A cégek mellett az államoknak is érdeke lenne a megállapodás, hiszen a tervezett több tízezer mesterséges hold mellett nincs realitása megsemmisítéssel fenyegetni. Ha lenne is hozzá katonai erő és képesség, a keletkező törmelék gyakorlatilag ellehetetlenítené a további űrtevékenységet, de legalábbis erősen korlátozná és kockázatosná tenné azt.

7. Összegzés

Napjainkban a világűr gazdasági hasznosítása új korszakának kezdeteit éljük. Míg korábban a legnagyobb mesterséges holdakból álló rendszerek sem mentek 66 tagnál feljebb, addig a jelenleg tervezés, fejlesztés, illetve kiépítés alatt álló rendszerek néhány száztól akár több tízezerig is elmennek. Ennek hatására drasztikusan fog növekedni a Föld körül keringő mesterséges égitestek száma. Míg korábban a pár centimétert meghaladó méretű törmelékekkel együtt hozzávetőlegesen 20 000 testet tartottak nyilván, a tervezett megakonstellációk között olyanok is vannak, amelyek az elképzelések szerint 40 000–50 000 mesterséges holdból fognak állni.

Míg korábban domináltak a geostacionárius pályára kerülő műholdak, az új érában az alacsony, illetve a nagyon alacsony pályák kerülnek túlsúlyba. Ezeket a pályamagasságokat könnyebb elérni, de jelentős lehet a légköri fékeződés hatása és a felső légkör atomos oxigénje által okozott korrózió is. Ez hatással van a mesterséges holdak tervezett élettartamára is, amely például a geostacionárius műholdak ~15 évével szemben mindössze ~5 év. A mesterséges holdak mérete is jelentősen eltér a korábbiaktól. Míg korábban 1–5 t tömeg volt a jellemző, a műholdseregek esetében ugyanez 250 kg vagy még kisebb. Több cég is egészen kicsi, *cubesat* méretű tagokból épít rendszert. A legkisebbek a SpaceBEE műholdak, amelyek mindössze $2,8 \times 10 \times 10$ cm méretűek.

A kis méret és a korábban elképzelhetetlenül nagy darabszám több problémát is felvet. Először is pályára kell állítani ezeket az űreszközöket, ami a kis tömeg mellett is a korábbiaknál lényegesen több, akár évi 200 rakétaindítást jelenthet. A viszonylag rövid élettartam miatt ez az ütem nemcsak a kiépítéshez szükséges, hanem a rendszer folyamatos üzemben tartásához is. A pályán lévő űreszközök mozgását folyamatosan követni kell, részben az ütközések megelőzése miatt, részben védelmi okokból. Ehhez megfelelő teljesítményű földi infrastruktúra is szükséges. Ha drasztikusan növekszik a föld körüli pálya zsúfoltsága, akkor a követő rendszer fejlesztése is elengedhetetlenné válik. A fejlesztések szükségességét csak fokozza, hogy a legkisebb műholdak mérete folyamatosan csökken.

További probléma, hogy a műholdak számának emelkedésével párhuzamosan várhatóan az űrszemét mennyisége is emelkedni fog. Már napjainkban is vannak a rendszerek tagjai között olyanok, amelyek irányíthatatlanná váltak. Szerencsére ezek alacsony pályán keringenek, így néhány hónap vagy év elteltével elégnak a légkör sűrűbb rétegeiben.

Jelenleg tisztázatlan kérdés, hogy mi történik egy megakonstellációval, ha az üzemeltetője csődbe megy. Hogy valós problémáról van szó, azt jelzi, hogy a OneWeb üzemeltetőjével ez megtörtént 2020-ban. Bár szerencsére a cég anyagi helyzetét sikerült gyorsan és megnyugtatóan rendezni, ez nem jelenti azt, hogy a következő csődeseményt is sikerül hasonló módon megoldani.

Biztonsági aggodalmak is felmerültek a megakonstellációk kapcsán. Egyelőre csak Oroszország helyezte kilátásba, hogy büntetni fogja a területén a külföldi műholdas internet szolgáltató rendszerek használatát. Az indoklás szerint ezek a rendszerek kémkedésre is használhatók lennének, illetve feltehetően katonai kommunikációs célokra is használni fogják. Várhatóan további országok is a tiltás útjára fognak lépni, ugyanis a műholdas internetszolgáltatás elméletileg lehetőséget nyújtana a felhasználó lakóhelyén érvényes internethasználati szabályok, tiltások, illetve a cenzúra megkerülésére.

Végezetül, a mesterséges holdak engedélyezésének jelenlegi rendszere is felülvizsgálatra szorul. Jelenleg, ha egy ország egy műhold indítását nem engedélyezi vagy korlátozná a működését, akkor az üzemeltető megteheti, hogy áthelyezi a székhelyét egy másik országba, amelynek a hatóságai nem emelnek kifogásokat. A helyzet rendezése fontos lenne, mert bár jelenleg nemzeti szinten szabályozott az engedélyezés, a hatások globálisak.

Felhasznált irodalom

- [1] 38 North, *SAR Imagery Reveals the Presence of Concealed Submarine at North Korea's Sinpo Naval Base*. 2020. január 3. Online: www.38north.org/2020/01/sinpo010320/
- [2] P. Beauchamp, R. Ewell, E. Brandon, R. Surampudi, *Solar Power and Energy Storage for Planetary Missions*. Lunar and Planetary Institute NASA Outer Planets Assessment Group Meeting, 2015. augusztus 24–26. Online: www.lpi.usra.edu/opag/meetings/aug2015/presentations/day-2/11_beauchamp.pdf
- [3] D. Coldewey, SpaceX reveals more Starlink info after launch of first 60 satellites. *TechCrunch*, 2019. május 24. Online: techcrunch.com/2019/05/24/spacex-reveals-more-starlink-info-after-launch-of-first-60-satellites/
- [4] FCC News Release, *FCC Reaches \$900,000 Settlement WITH Swarm for Unauthorized Satellite Launch*. é. n. Online: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-355578A1.pdf>
- [5] FCC Report, *Application for Earth Exploration Satellite Service Other by HawkEye 360, Inc.* 2020. december 18. Online: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20190102-00001>
- [6] FCC Report, *Application for Mobile Satellite Service by Swarm Technologies, Inc.* 2021. január 8. Online: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20181221-00094>
- [7] FCC Report, *Planet Labs 2017 Annual Report*. 2017. június 29. Online: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20130626-00087/1242054>
- [8] FCC Report, *Public Notice SAT01262*. 2017. augusztus 25. Online: <https://fcc.report/IBFS/Public-Notices/1265973>
- [9] FCC Report, *Public Notice SAT01363*. 2018. december 7. Online: https://licensing.fcc.gov/ibfsweb/ib.page.FetchPN?report_key=1588155
- [10] FCC Report, *Public Notice SAT01416*. 2019. szeptember 17. Online: <https://fcc.report/IBFS/Public-Notices/1926445>
- [11] F. Khan, *Mobile Internet from the Heavens*. *Arxiv*, é. n. Online: <https://arxiv.org/pdf/1508.02383.pdf>
- [12] S. Le May, S. Gehly, B. A. Carter, S. Flegel, „Space debris collision probability analysis for proposed global broadband constellations,” *Acta Astronautica*, 151. évf. pp. 445–455. 2018. Online: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.036>
- [13] Nagy Imre, „Légköri gázokkal táplált ionhajtóművek,” *Repüléstudományi Közlemények*, 31. évf. 1 sz. pp. 213–222. 2019. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2019.1.17>
- [14] Nagy Imre, „Naperőművek Föld körüli pályán,” *Repüléstudományi Közlemények*, 30. évf. 2 sz. pp. 67–73. 2018. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/4333/3540>

- [15] N. Reiland, A. J. Rosengren, R. Malhotra, C. Bombardelli, Assessing and Minimizing Collisions in Satellite Mega-Constellations. *Arxiv*, 2020. február 2. Online: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.010>
- [16] I. del Portillo, B. G. Cameron, E. F. Crawley, „A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband,” *Acta Astronautica*, 159. évf. pp. 123–135. 2019. Online: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.040>
- [17] Q. Chen, X. Chen, L. Yang, S. Wu, X. Tao, „A distributed congestion avoidance routing algorithm in mega-constellation network with multi-gateway,” *Acta Astronautica*, 162. évf. pp. 376–387. 2019. Online: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.05.051>
- [18] S. Ridwan, *Response to the Invitation to participate in the Open Consultation of the CWG-Internet on International internet-related public policy issues on harnessing new and emerging telecommunications/ICTs for sustainable development*. ITU Consultation October 2019. Online: www.itu.int/en/Lists/consultationOct2019/Attachments/38//cwg-internet-unep.pdf
- [19] S. Spangelo, Introducing Swarm: The World's Lowest-Cost Global Communications Network. *Swarm*, 2018. augusztus 30. Online: <https://swarm.space/introducing-swarm-the-worlds-lowest-cost-global-communications-network/>
- [20] Wikipedia the Free Encyclopedia, *Eutelsat*. Online: <https://en.wikipedia.org/wiki/Eutelsat>
- [21] Wikipedia the Free Encyclopedia, *Intelsat*. Online: <https://en.wikipedia.org/wiki/Intelsat>
- [22] Wikipedia the Free Encyclopedia, *NuSat*. Online: <https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%91uSat>
- [23] Wikipedia the Free Encyclopedia, *OneWeb satellite constellation*. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/OneWeb_satellite_constellation
- [24] Wikipedia the Free Encyclopedia, *Satellite constellation*. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_constellation
- [25] Wikipedia the Free Encyclopedia, *United States Space Surveillance Network*. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Space_Surveillance_Network

Mega-Constellations

Nowadays, more than 20,000 artificial objects and debris orbit around the Earth. This number will soon be multiplied because of the mega-constellations. In this article, we examine these effects. We give a review of the main characteristics of mega-constellations and then show some of the major systems and present the main concerns implied by them. We conclude that the current international regulatory environment is inadequate and needs to be reviewed as soon as possible. The updating of the rules on space activities is the fundamental interest of not only all countries but also the players of the sector.

Keywords: *satellites, satellite internet, remote sensing, mega-constellations*

<p>Dr. Nagy Imre, PhD adjunktus Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Természettudományi Tanszék</p> <p>nagy.imre@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0545-4381</p>	<p>Imre Nagy, PhD Assistant Professor University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Natural Sciences</p> <p>nagy.imre@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0545-4381</p>
---	--
