

# Optikai sávú összeköttetések alkalmazása az űrtávközlésben

FARKASVÖLGYI ANDREA

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságatan Tanszék  
farkasvolgyi@mht.bme.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** exo-atmoszférikus terjedés, IOL, ISL, SPOT-4, ARTEMIS, OICETS, SILEX, OPALE, PASTEL, kereső-követő üzemmód

Az ESA (European Space Agency) közel két évtizedes kutatómunkája után, 2001. november 30-án létrejött az első sikeres exo-atmoszférikus optikai sávú adatátvitel a GEO pályás ARTEMIS műhold és a LEO pályán lévő SPOT-4 távérzékelő műhold között; a SILEX (Semiconductor Intersatellite Link Experiment) terminálok segítségével, 800 nm-es sávban, 2 Mbit/s forward és 50 Mbit/s return irányú kapacitással. Az átvitel minőségét  $10^6$ - $10^9$  bithibaarány jellemzi. A cikk áttekinti az optikai IOL (Inter Orbital Link) fejlődési állomásait, az elért eredményeket és vázolja a jövő lépéseit.

## 1. Bevezető

Az űrkutatás és műholdtechnika területén a nagy sáv-szélességű átvitelt biztosító optikai sávok alkalmazását hosszú ideig – 2001 végéig – kerülték. Sugárzott átvitel során, mind földi, mind műhold-kommunikáció esetén, az alkalmazott frekvenciasávok a mikrohullámú sávra, illetve középfrekvenciás sávokra korlátozódtak. A rendszerek fejlődésének és sáv-szélesség igényük radikális növekedésének eredményeként a 90-es évek végén kezdték alkalmazni a mikrohullámú sáv magasabb frekvencia tartományait, a Ku, Ka és V sávokat, azaz a 20, 30 és 60 GHz-es frekvenciákat. Ezzel egyidőben próbaméréseket végeztek ISL (Inter Satellite Link) rendszerrel a 800 nm-es hullámhosszú optikai tartományban is.

Számos ok játszott szerepet abban, hogy sugárzott átvitel során nem alkalmazták az optikai átvitelt. Az egyik legkomolyabb indok az optikai sávú nyaláb keskenysége volt. Ismert tény, hogy az alacsony frekvenciás (hosszú hullámhosszú) tartományokban alkalmazott antennák apertúra felülete a hullámhosszhoz képest optimális, vagyis az antenna által kisugárzott jel nyalábformája a szükséges mértékben „nyílik”. Ez köszönhető a megfelelő lesugárzott EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) értéknek – a definíció szerint:

$$EIRP = G_{adó} \cdot P_{adó},$$

melynek következtében alkalmazható a hullámhossznak megfelelő antenna méret. Az antenna felépítésétől függően az antennanyaláb nyalábmetszete (footprint) változtatható. Építhetünk olyan antennát, mely (például GEO műholdról) a földfelszín 42%-t sugározza be (globál nyaláb), illetve olyat is, mely ugyaninnen az Alföldet fedi le. Ha optikai sávban szeretnénk kommunikálni, tudni kell, hogy az optikai nyaláb a kis adóteljesítmény és nagy szakasztávolság miatt nem nyílik. Másképp megfogalmazva: túl nagy optikai lencsét kell alkalmazni (20-25 cm) a nagyon kicsi hullámhosszhoz képest (tipikusan: 800 nm). Ennek eredményeképpen a nyaláb nyílása minimális, néhány mikroradián. Nagy távolsá-

gokban ennél sokkal nagyobb relatív mozgása van az adó és vevő antennáknak, vagyis a vevő kimozdulása miatt megszakadhat az összeköttetés. Gondoljuk meg, hogy egy GEO pályás műhold egytized fokon belül mozog (ez egy nyolcvan kilométer élhosszúságú kockának felel meg), mely sokszorosa a lézernyaláb által befogott területnek. Az adó és vevő holdak relatív mozgásból származó összeköttetés-kiesés, a lokátoroknál alkalmazott kereső-követő üzemmóddal, kompenzálható.

Az IOL rendszer kiépítése előtt műholdtechnika területén egyedül tengeralattjáró-műhold összeköttetésnél alkalmaztak optikai sávú adatátvitelt. A tengeralattjárók tipikus kommunikációs sávja nagyon alacsony frekvenciájú átvitelre korlátozódik. Csupán a 100 Hz-nél alacsonyabb frekvenciájú elektromágneses jel alkalmas arra, hogy mélyebb vízrétegekbe is eljusson (a frekvencia növelésével a behatolási mélység exponenciálisan csökken). Problémát jelent, hogy így csak alacsony adatsebesség realizálható, valamint, hogy rövid üzenetek átvitele lehetséges, nincs folytonos adatkapcsolat. Megoldást jelent egy GEO pályás műhold-tengeralattjáró kommunikációs link alkalmazása, mely a látható fény kék-zöld tartományában, az úgynevezett blue-green optikai sávban üzemel. Ebben a kommunikációs sávban, a Jerlov-minimum környékén (~450 nm), a tengervíz csillapítása minimális.

A kommunikáció létrehozása során két probléma is felmerül. Egyrészt a Jerlov-minimumnál sem elhanyagolható a tengervíz csillapítása, másrészt a mélybe merülő tengeralattjáró igen keskeny célpontot jelent. A 450-500 nm-es kommunikáció lényege, hogy a fénysugár képes behatolni a tengervízbe. Ebből következik, hogy a Nap jelentős blue-green sugárzási komponense komoly problémát okoz, hiszen az szintén behatol az alsóbb vízrétegekbe, így a tengeralattjáróra telepített optikai vevőt a napsugárzás zajként terheli. Megoldás az, hogy kihasználjuk a különbséget a nagyon keskeny sáv-szélességű lézersugár és a nagyon széles spektrális eloszlású napfény között. Egy megfelelően keskeny áteresztő-sávval rendelkező optikai szűrő ké-

pes venni a legtöbb blue-green lézer által kibocsátott fotont, miközben elnyomja a naptól érkező fotonokat. Itt jelentkezik az a probléma, hogy a biztos kommunikáció realizálásához nagy látótérrel rendelkező szűrők alkalmazására van szükség, mert a felhőkön és a tengervízen való áthaladás, a lézernyalábon szóródást és elhajlást eredményez.

Egy általánosan használt optikai szűrő nem tudja teljesíteni mindkét kritériumot. Kifejezetten tengeralattjáró kommunikációra alkalmas az ARF (Atomic Resonance Filter), mely mindkét feltételnek eleget tesz. E szűrőnél a tipikus spektrális szélesség ( $\Delta\lambda$ ) és centrális hullámhossz ( $\lambda_0$ ) aránya:

$$\Delta\lambda/\lambda_0 \approx 10^{-6}.$$

Ha  $\lambda_0 \approx 500 \text{ nm}$ , akkor az áteresztő sáv szélessége 0.0005 nm, ami valóban keskeny sáv [18].

A műholdtechnika nagyarányú fejlődése ellenére sokáig nem mutatkozott igény az egymással kommunikáló, intelligens műholdrendszerek létrehozására. Azokban a ritka esetekben, amikor műholdak közötti közvetlen sugárzott kommunikációt alkalmaztak, az összeköttetés kizárólag mikrohullámú sávra (L, S és V) korlátozódott. Kerülték a magasabb vagy optikai sávok alkalmazását annak ellenére, hogy gyakorlatilag korlátlan sáv szélesség biztosítható e kommunikációs sávokban.

## 2. Sugárzott hullámú műholdas összeköttetések

A sugárzott hullámú összeköttetések esetén két jól elkülöníthető átviteli formát különböztetünk meg, legtöbb esetben mindkettőt szabadtéri összeköttetésnek tekintik. Az egyik a valódi szabadtéri összeköttetés, melynek során az adó illetve a vevő egység között nincs semmilyen közeg, tereptárgy vagy objektum. A másik a légkörön keresztül realizált sugárzott összeköttetés.

### 2.1. Földfelszíni sugárzott összeköttetés

A földfelszíni sugárzott összeköttetés során zavaró közeg alatt leggyakrabban a légkört értjük, az atmoszféra és az ionoszféra hatását. Ez lehet bármi, amin áthalad a jel, tengeralattjáró esetén például a sós víz, másfelől a víz-levegő határán a sűrű vízpárafelhő. A légkör vagy közeg, mely a haladó hullám útjába kerül, frekvenciától függően különböző mértékben csillapítja, szórja a kisugárzott jelet, ezen kívül a frekvencia függvényében nem kívánt elhajlásokat okoz. A jel útjába eső tereptárgyokról a jel egy része visszaverődik, többutas terjedést okoz. A földfelszín görbülete okozta nagytávolságú kitakarás miatt, már a magasabb adótornyok is horizont mögé kerülnek 50 km távolságban [1].

### 2.2. Szabadtéri összeköttetés

Valódi szabadtéri összeköttetés az úgynevezett exo-atmoszférikus átvitel. Ezt az összeköttetést műhol-

dak közötti kommunikációra ISL (Inter Satellite Link), vagy műhold pályák közötti adatcserére alkalmazzák IOL (Inter Orbital Link). Az IOL általában LEO (Low Earth Orbit) – GEO (Geosynchronous Earth Orbit) kapcsolatot jelent, míg az ISL GEO–GEO pálya közötti információcserét. Az exo-atmoszférikus átvitel során legtöbb esetben, az ITU által javasolt sávok közül, a 800 nm-es optikai sávot alkalmazzák. A sáv hatalmas előnye a nagy realizálható kimenő adóteljesítmény.

#### 2.2.1. Műholdpályák közötti összeköttetések (IOL)

IOL kiépítése során több probléma is felmerül.

Amennyiben nem azonos-pályás a két műhold, akkor az alacsonyabb pályán lévő hold időről időre eltűnik a horizont, pontosabban a Föld mögött, így földárnyékba kerül. A kitakarás következtében megszakad az összeköttetés. Ez abban az esetben okoz problémát, ha a kapcsolat ismételt kiépítésének pillanatában nem a megszakadás helyén kell keresni az ellenpontot (a másik holdat), hanem mint jelen esetben, a Föld átellenes oldalán. Ha egy LEO pályás hold az Északi-sark felett tűnik el, akkor a Déli-sark felett kell várni az ismételt felbukkanást. A kapcsolat ismételt felépülésének legkritikusabb pontja a két hold pozícióra állása.

A magasabb pályás holdhoz képest (GEO) az alacsonyabb hold (LEO) a magasság különbség arányában nagy sebességgel mozog. Ezért a kommunikáció során a két műholdnak végig követnie kell egymást. A műhold követése során két üzemmód kíséri egymást: először a kereső üzemmód, melynél a lézernyaláb közel 750 mikroradián nyílásszögű kereső fénnel fogja be az érkező LEO pályás holdat. A második ütemben a GEO hold átáll követő üzemre, melynek során egy keskeny optikai nyalábbal követi a LEO műhold mozgását, biztosítva ezzel a nagysebességű adatcsere biztonságát a két hold között.

A SILEX rendszer az optikai exo-atmoszférikus átvitel prototípusa, a hatalmas távolság leküzdéséhez (átlag 37 ezer kilométer) elengedhetetlen a nagy precizitású anyagok alkalmazása. Mint ilyen, megépítése során felhasználták az optikai kommunikáció technológiai fejlesztéseit: nagy pontosságú félvezető lézerek, nagyérzékenységű szélessávú szenzorok, ultra stabil szerkezeti anyagok, pontos irány meghatározó rendszerek, nagy precizitású optikák, pontos hőmérséklet-szabályozás [2,10].

#### 2.2.2. Műholdak közötti összeköttetések (ISL)

GEO pályás műholdak közötti, ISL rendszerű optikai link létrehozása, az IOL kommunikációnál egyszerűbb feladat. A kommunikáció kiépítése során a két holdnak meg kell találnia egymást. A link fenntartása nem automatikus. Szükséges az úgynevezett folytonos követő-üzemmód alkalmazása. A GEO pályán adódó komoly távolságok miatt, a két GEO pályás hold egymáshoz képest, azonos tangenciális sebességük ellenére is mozog. Ez a mozgás minimális, de nagyságrendekkel nagyobb, mint amit egy optikai link kompenzálni tud.

Ha egy három GEO pályás műholdból álló rendszert szeretnénk optikai linkkel összekötni (klasszikus Clarke rendszer, egymással 120°-os szöget bezáró holdak [14]), akkor körülbelül 72-73 ezer kilométeres szakasz-távolságot kell áthidalni. Figyelembe véve a szakaszcsillapításból származó jelvesztéséget igen jelentős antenna nyereségekkel és adóteljesítményekkel kell ellátni a rendszert. A rendszer felbecsülhetetlen előnye a hatalmas realizálható adatsebesség.

### 3. Optikai sávú kommunikációs egység (SILEX rendszer)

Az IOL és az ISL rendszerek lelke a SILEX optikai sávú kommunikációt lehetővé tevő egység.

#### 3.1. SILEX rendszer működési elve

Az IOL rendszer szempontjából az ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission Satellite) egy földszinkron pályán keringő optikai átjátszóállomás, melyen keresztül az alacsonypályás felderítő műholdak jelét (például: SPOT-4, EnviSat, OICETS) az európai ESA központba, Toulouse-ba (Franciaország) illetve Redu-be (Belgium) lehet sugározni. Az ARTEMIS holdon lévő átjátszó maga a SILEX rendszer OPALE (OPTical Payload for Intersatellite Link Experiment) eleme. A GEO pályás átjátszó pont, valamint az optikai link kiépítését az alacsonypályás holdak láthatósági problémái indokolták.

Egy bizonyos földi pontról a LEO pályán keringő holdak ritkán és nagyon rövid ideig láthatók, az alacsonypályamagasság miatt néhány percig tartózkodnak horizont felett. Minél alacsonyabb körpályán kering a műhold, annál rövidebb a láthatósági időzés. A Föld felszínét pásztázó felderítő holdak, mint SPOT-4, ENVISAT, OICETS tipikusan 900 km alatt keringenek. Funkciójukból adódóan nagy sávszélességű, hosszú időn át fenn tartható kommunikációs csatornára van szükségük.

Ha e holdakról a nagy mennyiségű adatinformációt közvetlenül kell a földi központba lesugározni, akkor vagy hosszú ideig tart az adatok továbbítása (akár napokig) vagy több, a Föld különböző területein elhelyezett vevőállomásra van szükség (például Dél-Amerika, Ausztrália stb.)

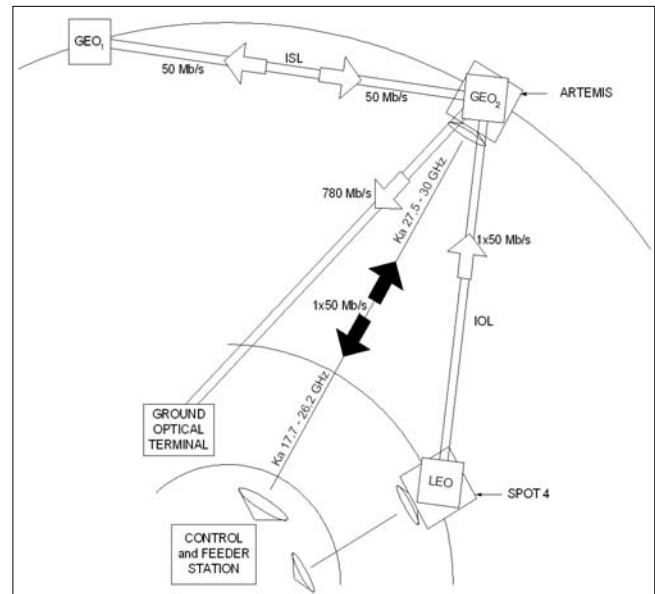
Problémára megoldást jelentett, hogy a vevőállomás egy segédantennáját, pontosabban egy átjátszó pontot feltelepítettek GEO pályára, ez az egység található az ARTEMIS műholdon. Az átjátszó-pont beüze-

melésének köszönhetően az alacsonypályás holdak láthatósági ideje nagyságrenddel megnőtt, természetesen, most a GEO pálya felől nézve számítjuk a holdak láthatósági időzését. Az adó és vevő egységek közötti szabad, légkörmentes tér, a nagy távolság ellenére lehetőséget adódott az optikai sáv alkalmazására. Nincs zavaró légkör, mely elhajlást, pluszcillapítást vagy szóródást idézne elő a kisugárzott jelben. Az optikai sávú kommunikációnak köszönhetően az átviteli adatsebesség 10 Gbit/s nagyságrendig növelhető. A kommunikációs adatsebességnek csak a vételi ponton lévő egység kapacitása szab korlátot.

Az ARTEMIS hold beüzemelése előtt a SPOT-4 naponta öt alkalommal tudott néhány percig adatot sugározni a földi központ felé, mikrohullámú sávon. Az átjátszó beüzemelése után a SPOT-4 láthatósági ideje naponta 6 alkalomra emelkedett, a kommunikációs időzések hossza így 30 perc. A két műhold közötti, nagy adatsebességű, 50 Mbit/s-os optikai link biztosítja a megfelelő adatforgalmat. Az ARTEMIS a SPOT-4-ről sugárzott adatfolyamot az európai földi központ felé Ka sávon, 10 Mbit/s-os adatsebességgel sugározza vissza.

Az ISL és az IOL rendszerek egyszerű vázlatát láthatjuk az 1. ábrán, a SILEX rendszert alkotó holdak néhány lényeges adatát pedig az 1. táblázat mutatja [2,9,13].

Az IOL rendszerrel alkalmazott berendezés két különböző egységből áll. A két részegység rendre egy GEO pályás (ARTEMIS), illetve egy LEO pályás (SPOT-4, OICETS) műholdon üzemel [3].



1. ábra ISL és az IOL rendszerek alkalmazási lehetőségei [13]

1. táblázat A SILEX rendszert alkotó holdak néhány jellemző adata

Jellemző	ARTEMIS	SPOT-4	OICETS
Pálya inklinációs szöge	0° /GEO	98° /LEO	97.8° /LEO
Alkalmazott optikai sávok	800 nm	860 nm 830 nm	514.5 nm 532 nm 800 nm
Alkalmazott mikrohullámú sávok	Ka-band (GEO-Earth) S-band (GEO-LEO- Spacecraft)	X-band (LEO-Earth)	S/K-bands (LEO-Earth)

### 3.2. PASTEL

A SILEX egység először űrbejuttatott eleme a SPOT-4 (Satellite Earth Observation System) LEO pályás felérítő-műhold fedélzetén található, ez a PASTEL berendezés (Passager SPOT de Télécommunication Laser).

Feladatát tekintve a SPOT-4 műhold Európa felszínborításának feltérképezésében játszik szerepet. A SPOT-4 által készített nagymennyiségű, nagyfelbontású felvétel alapján, akár 10 m-es pontosságú mezőgazdasági és földrajzi térképek készülnek [3,4].

### 3.3. ARTEMIS-OPALE

Az SILEX rendszer másik eleme, az ESA tulajdonában lévő ARTEMIS többfunkciós műholdon található, OPALE egység. Az ARTEMIS 2001-es fellövése után, egy 18 hónapos pályameelési manőverrel állították GEO pályás pozíciójára és üzemelték be a kommunikáló berendezést [4,5]. Az ARTEMIS telekommunikációs műholdon működő berendezések:

- EMS (European Mobile System)
- EGNOS (European Geostacionary Navigation Overlay System)
- SILEX (Semiconductor Intersatellite Link EXperiment) berendezés, OPALE eleme [6,7].

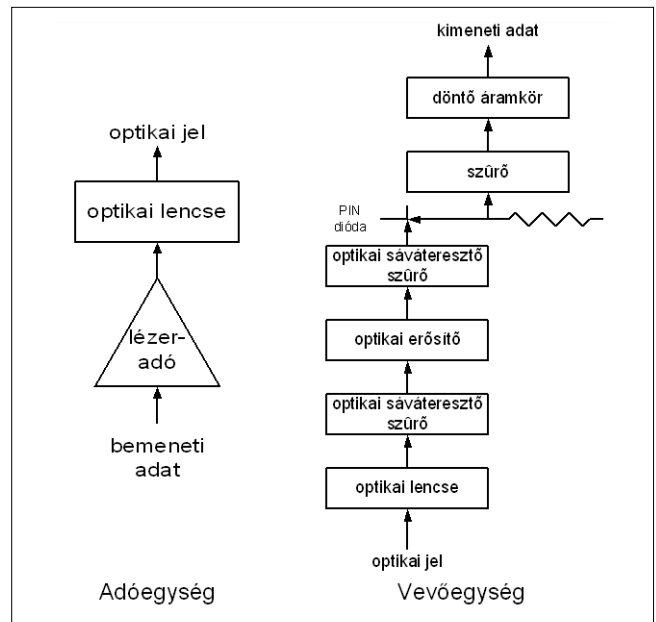
### 3.4. Optical Interorbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS)

Az ISL rendszer legutoljára, 2005. december 9-én, üzembe állított egysége az OICET, más néven KIRARI, mely egy japán teszt műhold. Feladata a fedélzetén lévő optikai berendezések tesztelése. Többek között az ARTEMIS műhoddal épít ki nagy sáv szélességű optikai kapcsolatot. A rendszer legnagyobb eredménye a kétirányú optikai linket létrehozása GEO és LEO pályák között [8].

### 3.5. SILEX berendezések felépítése

A SILEX teleszkóp és optikai pad egy félgömb tartományú mozgást lehetővé tevő stabil alapzatra van felépítve. Az optikai sugár-nyaláb a speciális alapzatnak köszönhetően fél-teret képes leírni. Az optikai pad magában foglalja a kereső és követő szenzorokat (Acquisition and Tracking Mode), kommunikációs szenzorokat, lézerciódás adókat, hely-helyzet-stabilizáló mechanizmust (Fine Pointing Mechanism, FPM), PAM (Point Ahead Mechanism), valamint optikai reléket és szűrőket. Az adó és vevő egység egyszerű blokk-sémáját a 2. ábrán láthatjuk.

A követő és tartó szenzorok működésének alapja a CCD (Charge-Coupled Device) és QD (Quadrant Detector) detektorok, a kommunikációs vevődetektorok Si-APD (Silicon Avalanche PhotoDiode) diódák, a kommunikációs lézerciódák GaAlAs típusúak. A 2. táblázat összefoglalja az optikai adó és vevő fokozatok néhány jellemző adatát.



2. ábra  
SILEX rendszerben alkalmazott optikai adó és vevő egyszerű blokk-sémája [17]

A PASTEL-en lévő 830 nm-es lézerciódák kimenőteljesítménye folytonos üzemben 60 mW (max. 160 mW), mely teljesítményértékkel a maximális 42.000 km-es üzemi távolságra is létrehozható a kommunikáció. Az OPALE szilícium detektorainak a vételi teljesítményszint 1.5 nW. Ekkora vételi érzékenység oly módon valósítható meg, hogy a kommunikációs nyaláb szélessége alig haladja meg a 8 mikroradiánt. A roppant keskeny nyalábnak köszönhetően a nagyméretű 25 cm átmérőjű optikai adó, illetve vevő lencsék „antennanyeresége” jóval meghaladja a 100 dB-t. A teleszkóp és a tükrök anyaga Zerodur, mely nagyprecízitású, nulla hő-tágulással üveg-kerámia, csillagászati tükrökhöz és lencsékhez alkalmazzák. Az optikai rendszer diffrakciója limitált, a hullámfront-hiba nem érheti el a  $\lambda/15$ -t, ezért szükséges a nagyprecízitású anyagok alkalmazása [2,5,7].

### 3.6. Kereső-követő üzemmód

Legnagyobb problémát a kereső és követő lokációs üzemmód jelenti. A SILEX kommunikációs nyalábjának nyílása csupán 8 mikroradián (0.00046 fok), mely nagyságrendekkel kisebb egy tipikus nyílthurkú műholdas összeköttetés nyalábszögénél. A keskeny nyalábnyílással biztosítható a vételi ponton a megfelelő vételi teljesítmény. Minél kisebb a nyaláb térszöge ( $\Psi_{ant}$ ), annál nagyobb az antenna nyeresége ( $G$ ).

Az antennanyaláb nyílásából meghatározott nyereségét az (1) képlet alapján, feltételezve a 8 mikroradián nyalábszélességet, a (2) mutatja:

$$G = \left( \frac{4\pi}{\Psi_{ant}} \right) \tag{1}$$

$$G \Big|_{dB} = 10 \lg \frac{4\pi}{\Psi_{ant}} = 10 \lg \frac{4\pi}{(8 \cdot 10^{-6})^2} \approx 113 \text{ dB} \tag{2}$$

	OICETS ⇒ ARTEMIS	ARTEMIS ⇒ OICET	SPOT-4 ⇒ ARTEMIS	ARTEMIS ⇒ SPOT-4
<b>Kommunikációs sávok</b>	847 nm (kommunikáció)	819 nm (kommunikáció) 801 nm (befogó jel)	860 nm (kommunikáció)	810 nm (befogó jel)
<b>Polarizáció</b>	LHCP (Left Hand Circular Polarization)	LHCP	RHCP (Right Hand Circular Polarization)	
<b>Adatsebesség</b>	50 Mbit/s	2 Mbit/s	50 Mbit/s	
<b>Moduláció típusa</b>	QPSK	BPSK, QPSK	DPSK	
<b>Jelforma (moduláció)</b>	NRZ (Non Return to Zero)	PPM (Pulse Position Modulation) (IM/DD)	OOK (On/Off Keying) (IM/DD)	
<b>BER</b>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	
<b>Eb/No</b>	16 dB	12 dB	18 dB	
<b>Kimenő adóteljesítmény</b>	200 mW +23 dBm		60 mW (+17.8 dBm) Max.: 160 mW +22.04 dBm	Az ARTEMIS SPOT-4 irány nem aktív.
<b>Vételi teljesítmény</b>	4.8 nW (-53 dBm)		1.5 nW (-58.2 dBm)	
<b>Lézerdióda típusa</b>	GaAlAs		GaAlAs	
<b>Követő-tartó detektor</b>	CCD, QD		CCD	
<b>Adat detektor</b>	Si-APD		Si-APD	
<b>Vételi érzékenység</b>	-95 dBm		~ -90 dBm	
<b>Hullámfront hiba maximális értéke</b>	$\lambda / 16.2$		$\lambda / 15$	
<b>Optikai (lencse) antenna átmérője</b>	26 cm		25 cm	

2. táblázat  
SILEX rendszer:  
Az optikai link kommunikációs paramétereit [5,7,15]

A két műhold közötti adatkommunikáció kiépülésének alapja a kereső-követő üzemmód alkalmazása. A SILEX rendszer elvi működését a 3. ábra mutatja. Első lépése a kereső üzemmód, ennek során a két műhold felveszi egymással a kapcsolatot.

A kapcsolatfelvétel első fázisában a két hold egymás feltételezett irányába fordul. Ezután az ARTEMIS-en lévő SILEX terminál (OPALE) egy, az üzemi nyaláb szélességhez képest széles, 750 mikroradiános optikai nyalábbal pásztáz a SPOT-4 feltételezett irányába. Ez az úgynevezett jelzőfény a 3. ábrán I. útvonallal jelöltük. Jelzőfény generáló egység csak az ARTEMIS-en van, mindig ő kezdeményezi a kapcsolatfelvételt. Mikor a PASTEL egység detektálja az OPALE jelzőfényét, gyors rákorrigálás után válaszként egy keskeny kommunikációs sugart küld az OPALE felé. Az ábrán ez a II. jelzett útvonal, a kereső-követő mechanizmus.

Hasonlóan az előzőekhez, az OPALE detektálja a PASTEL visszasugárzott jelét, szintén egy keskeny kommunikációs jelet küld a PASTEL felé. Ezután a két műhold zárthurkú követő rendszerben marad a LEO műhold eltűnéséig. A sikeres kereső folyamat befejeztével realizálódhat a nagy-sáv szélességű adatátvitel, a III/a és b útvonal. A LEO hold felbukkanása után a két műholdnak csupán 90 ms ideje van arra, hogy a zártláncú követő módot kiépítse. A véges fénysebesség, illetve a két műhold közel merőleges mozgása miatt, a termináloknak oly módon kell meghatározni az adósugár eltérését, hogy bele kell kalkulálni a vett jel irányát.

A két terminál, a pályamodellek alapján, önállóan kalkulálja a kommunikációs sugár kilövési irányát. A hibának kevesebbnek kell lennie, mint 2 mikroradián.

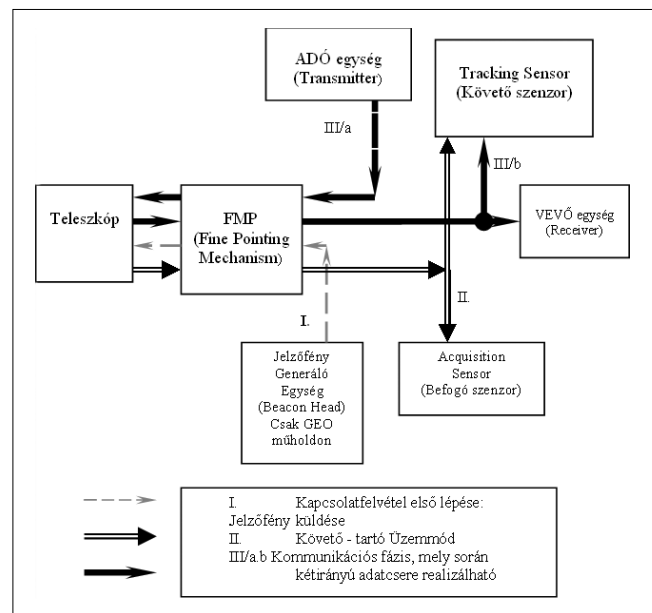
A rendszernek két hibaesetet kell kontrollálnia:

– Kompenzálni kell a műhold pozíció tartó mechanizmusának mozgásából adódó dinamikus rezgést, melynek hatására a keskeny kommunikációs nyaláb leterhet a vételi pontról és összeköttetés-kiesést okozhat.

– Ki kell küszöbölni azt a zavaró esetet, mikor a lézerdióda nyalábjába és a követő optikai szenzor sugara egy vonalba esik és zavarják egymást.

A nagy pontosságú optikai nyaláb létrehozásánál szükséges az ultra-stabil szerkezeti elemek, illetve a pontos hőmérsékleti kontrol alkalmazása.

3. ábra  
A SILEX egység kapcsolatkiépítő és kommunikációs rendszerének logikai működési elve [16]



Szükséges, hogy a műhold a Nap által megvilágított, illetve árnyékban lévő felén kialakuló nagy hőmérsékletkülönbség miatt a műhold szerkezetileg ne változzon. Ez az átmeneti szerkezeti deformálódás minden műholdnál megfigyelhető, de ha nem nagytávolságú optikai linkkel kommunikálnak, akkor nem minden esetben okoz problémát.

Az optikai pad anyagát tekintve szénszállal megerősített műanyag, melynek köszönhetően a hőtágulási együtthatója közel nulla. A műhold szerkezetében így a hőhatás nem okoz deformitást, tartani lehet az előírt pontosságot. A szénszállal megerősített műanyag hatalmas előnye, természetesen a fent említett előnyök mellett, hogy a különböző fémszerkezetekkel ellentétben igen könnyű, mely az űrtechnológiában nagy lehetőség, hiszen az egyszerre egy rakétával emelhető hasznos teher tömege legfeljebb 8 tonna [4,5,7,9].

#### 4. Összefoglalás

Az űrtechnológiában hatalmas előnnyel jár az optikai kommunikációs sávok alkalmazása. Tekintsük át a sáv előnyeit az RF sávokhoz képest.

- Elsősorban beszélni kell az optikai sávú kommunikáció esetén az interferencia-viszonyairól. Az optikai sáv sajnos igen alacsony kihasználtsága, valamint az alkalmazott keskeny nyalábszélesség miatt, gyakorlatilag a rendszerben nem kell számolni interferencia problémával. Tehát semmilyen, az RF sávban alkalmazott interferencia csökkentésére tett megszorítást az optikai sávban nem kell alkalmazni.

- Másodszor figyelembe kell venni a realizálható hatalmas adatsebességet (>10 Gbit/s), mely a sokszorosát elérheti az alkalmazott RF kommunikációs sáv szélességnek.

Az interplanetáris hálózatok (távoli bolygók és Nap körül keringő obszervációs műholdak) jelének Földre juttatása a nagy adatmennyiség és az óriási távolság miatt hosszadalmas és bizonytalan. A jelenleg működő RF vevőantennák átmérője minimum 35 m, melyből következik a roppant keskeny nyaláb és alacsony adatsebesség. Az optikai sáv nagy adatsebessége és  $10^{-6}$ - $10^{-9}$  közötti bithibaarány miatt az adatátvitel gyors és biztonságos. Kis adatvesztéssel vihetők át az adatok. Az interplanetáris rendszereken belül az optikai sáv alkalmazására több példa is van.

Elsőként a 2003. szeptemberében fellőtt, Hold körül keringő SMART-1 (Small Mission for Advanced Research in Technology) obszervációs műholdon alkalmazták a kétirányú optikai adatkapcsolatot. A szonda a 847 nm-es hullámhosszú lézernyalábbal a Tenerifén lévő ESA OGS-el (Optical Ground Station) kommunikál. Szintén optikai link segítségével fog a Földdel kommunikálni a 2004-ben fellőtt és 2011-ben beüzemelésre kerülő, majd a Merkúr körül keringő MESSENGER (MErcury Surface Space ENvironment GEOchemistry and Ranging) űrszonda. Az interplanetáris hálózatok kommunikációját feltétlenül optikai linken realizált adatkapcsolattal lehet optimálisan megoldani [11,12].

- Harmadrészt az optikai berendezések egyik legpozitívabb tulajdonsága a műholdtechnika szempontjából adódik. A nagy precizitás eléréséhez a stabil, magas minőségű anyagok alkalmazása elkerülhetetlen. Leggyakrabban szénszállal megerősített műanyagokat használnak. A műanyag alkatrészek hatalmas előnye, hogy tömegük töredéke a fém alkatrészek tömegének. Vagyis egy emeléssel sokkal több eszközt lehet az űrbe juttatni, mely költségkímélő és környezetbarát megoldás is egyben.

#### Köszönetnyilvánítás

Szeretném köszönetemet kifejezni dr. Gödör Évának, a Szélessávú Hírközlés Tanszék adjunktusának, a dolgozat megírásához nyújtott számtalan segítségéért és szakmai támogatásáért, valamint köszönetemet fejezem ki konzulenseimnek, Dr. Zombory Lászlónak és dr. Gschwindt Andrásnak.

#### Irodalom

- [1] dr. Gödör Éva: Jegyzetek a „Műholdas és Mobil Távközlés” tárgyhoz, Szélessávú Hírközlés Tanszék, 2005.
- [2] T. Tolker-Nielsen: Wireless' Meets Photonics, Photonics Spectra, May 2001, pp.160–162.
- [3] T. Tolker-Nielsen, J-C. Guillen: SILEX – The First European Optical Communication Terminal in Orbit, ESA Bulletin, No.96, November 1998, pp.42–44.
- [4] <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/satellit/spot4/ang/pastel.htm>
- [5] [http://directory.eoportal.org/pres\\_SPOT4.html](http://directory.eoportal.org/pres_SPOT4.html)
- [6] ARTEMIS, ESA BR-220, February 2004
- [7] [http://directory.eoportal.org/pres\\_ARTEMISAdvancedRelayandTechnologyMissionSatellite.html](http://directory.eoportal.org/pres_ARTEMISAdvancedRelayandTechnologyMissionSatellite.html)
- [8] [http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite\\_missions/list\\_of\\_satellites/oicets/](http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/oicets/)
- [9] [http://directory.eoportal.org/pres\\_OPALOrbitingPicosatAutomaticLauncher.html](http://directory.eoportal.org/pres_OPALOrbitingPicosatAutomaticLauncher.html)
- [10] H.P. Lutz: Optical Communication in Space, ESA Bulletin, No.91, August 1997, pp.25–31.
- [11] ESA Achievements, BR-250, ISBN 92-9092-493-4, pp.254–259, pp.210–215.
- [12] <http://www.nasa.gov/messenger>
- [13] [http://www.wtec.org/loyola/satcom/c5\\_s4.htm](http://www.wtec.org/loyola/satcom/c5_s4.htm)
- [14] Arthur C. Clarke: Extra-Terrestrial Relays, Wireless World, October 1945, pp.305–308. <http://www.sciencemuseum.org.uk/on-line/clarke/ww1.asp>
- [15] [http://directory.eoportal.org/pres\\_OICETSOpticalInterorbitCommunicationsEngineeringTestSatellite.html](http://directory.eoportal.org/pres_OICETSOpticalInterorbitCommunicationsEngineeringTestSatellite.html)
- [16] [http://www.wtec.org/loyola/satcom/fh5\\_9.gif](http://www.wtec.org/loyola/satcom/fh5_9.gif)
- [17] <http://www.ee.bgu.ac.il/~shlomi/publication/10.pdf>
- [18] [http://assets.cambridge.org/052162/3189/excerpt/0521623189\\_excerpt.pdf](http://assets.cambridge.org/052162/3189/excerpt/0521623189_excerpt.pdf)