



SZÉCHENYI
ISTVÁN
EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI, INFORMATIKAI ÉS
VILLAMOSMÉRNÖKI KAR

SZAKDOLGOZAT

Úrtávközlési földi állomás rendszertervezése optikai kommunikációra

Csoma Zsolt

**Villamosmérnöki BSc szak
Infokommunikációs szakirány**

Győr, 2024

Széchenyi István Egyetem

Feladatkiírás

Hallgató adatai:

név: Csoma Zsolt

szak: Villamosmérnöki BSc

specializáció: Infokommunikáció

Neptun-kód: DXIQIS

Cím: Űrtávközlési földi állomás rendszertechnikai tervezése optikai kommunikációra

Feladatok leírása:

Elemezze az optikai kommunikáció műszaki lehetőségét műhold és földi állomás között. Mutasson be egy hibrid (rádiótávközlési és optikai) földi állomás rendszertechnikáját. Tegyen javaslatot az egyetemen létrehozandó földi állomás felépítésére. Térjen ki az ehhez szükséges infrastrukturális rendszerekre és velük szemben támasztott követelményekre. Mutassa be a frekvenciakoordináció folyamatát egy tervezett LEO pályán üzemelő (433, 868-915, 2400 MHz) műhold esetén. Tekintse át a vonatkozó nemzetközi és hazai műszaki előírásokat és egészségügyi előírásokat.

Belső konzulens adatai:

Név: Dr. Vári Péter

Munkahely: Távközlési Tanszék

Beosztás: Egyetemi docens

Külső konzulens adatai:

Név: Dr. Christopher A. Vasko

Munkahely: European Space Agency

Beosztás: Optical and Quantum Innovation Engineer

Győr, 2023.05.07.

Dr. Vári Péter,
Egyetemi docens

Dr. Christopher A. Vasko,
Optical and Quantum Innovation
Engineer

Nyilatkozat

Alulírott, Csoma Zsolt, Villamosmérnöki, BSc szakos hallgató kijelentem, hogy az *Úrtávközlési földi állomás rendszertechnikai tervezése optikai kommunikációra című szakdolgozat* feladat kidolgozása a saját munkám, abban csak a megjelölt forrásokat, és a megjelölt mértékben használtam fel, az idézés szabályainak megfelelően, a hivatkozások pontos megjelölésével.

Eredményeim saját munkán, számításokon, kutatáson, valós méréseken alapulnak, és a legjobb tudásom szerint hitelesek.

Győr, 2023.05.17.

hallgató

Kivonat

Úrtávközlési földi állomás rendszertechnikai tervezése optikai kommunikációra

A Széchenyi István Egyetem csillagvizsgálójának felújítását követően merült fel a kérdés, hogyan is lehetne hasznosítani a régi teleszkópot távközlési célokra.

A CubeSatok népszerű platformokká váltak a tudományos, kereskedelmi és katonai alkalmazásokban. Korlátozó tényező viszont a rendelkezésre álló alacsony teljesítmény, kis nyereségű antennák és a rádióspektrum szűkösége. [2] Mindezek ellenére a CubeSatokkal egyensúlyt találtak a méret, kapacitás és költségek terén, melyek összességében alacsonyabb és gazdaságosabb pályára állítást tesznek lehetővé. [4]

A SZESAT jelenlegi és jövőbeli CubeSat törekvéseit figyelembe véve, Dr. Vári Péter bízott meg azzal a feladattal, hogy járjam körbe egy győri optikai földi állomás (OGS) lehetőségeit. A cél egy olyan CubeSat-Föld összeköttetés megvalósítása, mely lézerkommunikációs (lasercom) technológiát alkalmaz, amiről egyre több helyen olvasni, hogy az űrtávközlésben is korszakváltó technológia lehet.

Az RF sáv szélesség gyorsan telítődik, a földalatti száloptikai hálózat kiépítésé pedig költséges és időigényes. A szabadtéri optikai kommunikáció (FSO) ezen problémák kiküszöbölésére nyújthat megoldást. [4]

Számos felhasználási módja lehet egy ilyen OGS-nek, ilyen például az (mély)űrkutató, lézeres átjátszó alkalmazása, esetleg a fent említett LEO pályás kommunikációs hálózat hatékonyabbá tétele.

Itt jegyezném meg, hogy a szabadtéri optikai kommunikáció a rádiófrekvenciás (RF) technológiát valószínűleg még jó ideig nem fogja teljes mértékben leváltani. Egyfajta kommunikációs tartalékra szükség van, amit az RF átvitel nagy biztonsággal kiszolgál. [3]

Viszont a kisműholdak számának növekedésével, képességeik javulásával, az általuk generált adatmennyiség nyomást gyakorol az RF kommunikációs infrastruktúrára, erre pedig megoldást kell találni. [1]

A dolgozat során egy hibrid földi állomás lehetőségeit mutatom be, mely ötvözi a duplex RF kommunikációt a nagysebességű downlink lézerkommunikációval. Ezt követően teszek javaslatot az egyetemen is megvalósítható állomás alapjaira. A dolgozat megírása során törekszem rávilágítani egy korszakalkotó technológiára, annak számtalan előnyére és az ezzel járó nehézségekre

Abstract

Designing ground station system technology for interplanetary communication via optical communication

After the renovation of the Széchenyi István University observatory, the question arose: how to utilize the old telescope for telecommunications purposes.

CubeSats have become popular platforms in scientific, commercial, and military applications. However, limiting factors include the available low power, low-gain antennas, and the scarcity of radio spectrum. [2] Nevertheless, CubeSats have found a balance in terms of size, capacity, and costs, which overall enable lower and more economical orbits. [4]

Taking into account the current and future CubeSat endeavors of SZESAT, Dr. Péter Vári commissioned me to explore the possibilities of an optical ground station (OGS) in Győr. The aim is to achieve a CubeSat-Earth connection utilizing laser communication technology, which is increasingly seen as a groundbreaking technology in space telecommunications.

The RF bandwidth is rapidly saturating, and the construction of underground fiber optic networks is costly and time-consuming. Free-space optical communication (FSO) can offer a solution to these problems. [2]

There can be numerous applications for such an OGS, such as (deep)space exploration, the use of laser relays, or potentially enhancing the efficiency of the above-mentioned LEO orbit communication network.

It is worth noting that outdoor optical communication is unlikely to completely replace radio frequency (RF) technology for a considerable time. There is a need for a kind of communication reserve, which RF transmission serves with great reliability. [2]

However, with the increasing number and capabilities of small satellites, the amount of data they generate puts pressure on RF communication infrastructure, necessitating a solution.[1]

In this thesis, I present the possibilities of a hybrid ground station, which combines duplex RF communication with high-speed downlink laser communication. Following this, I propose the foundations for a station that could be implemented at the university. Throughout the thesis, I aim to shed light on a groundbreaking technology, its numerous advantages, and the challenges it brings.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Történelmi áttekintés	2
3. Műholdpályák	3
3.1. Pályasík tájolása.....	3
3.2. A pályasík excentricitása	6
3.3. Földtől való távolság.....	7
4. Műholdstabilizációs eljárások	8
4.1. Forgásstabilizálás.....	8
4.2. Háromtengelyes vagy teststabilizáció	9
4.3. Pályastabilizáció	10
5. Csatornák jellemzői	10
5.1. Rádiófrekvenciás szempontból	10
5.2. Optika szempontjából	13
6. Frekvenciasávok	14
6.1. RF összeköttetések	14
6.2. Optikai	17
7. Jelfeldolgozás, modulációk	17
7.1. Rádiófrekvenciás	17
7.1.1. Közeghozzáférési eljárások.....	20
7.2. Optikai	22
8. Antennák és teleszkópok	23
8.1. Rádiófrekvencia	23
8.2. Optika	26
8.2.1. Lézerek a távközlésben.....	30
9. Földi állomások	33
9.1. Földi állomások csoportosítása	33
9.2. Hálózati topológiák.....	34
9.3. RF földi állomásról általánosan	37
9.3.1. RF földi állomás rendszertechnikája.....	38
9.4. Optikai földi állomásról általánosan.....	42
9.4.1. Optikai földi állomás rendszertechnikája	43
9.4.2. COTS OGS működési elve	52

9.4.3.	Egy amatőr OGS alapvető hardware elemei	54
9.4.4.	Rendelkezésre állás, megbízhatóság	57
9.5.	RF-Optikai földi állomások összehasonlítása	58
9.5.1.	Nyílásszögek vizsgálata	60
10.	Rádiófrekvenciás tisztaság és interferencia elemzés.....	62
11.	Frekvenciakoordináció	64
12.	Javaslattevél az OGS rendszer kiépítésére.....	65
12.1.	Felmerülő költségek	71
13.	Összefoglaló	72
	Irodalomjegyzék.....	72
	Ábrajegyzék	75
	Táblázatjegyzék.....	76
	Rövidítésjegyzés.....	76

1. Bevezetés

Ez a szakdolgozat egy győri, hibrid földi állomás lehetőségeit, rendszertechnikáját, az ezzel járó nehézségeket és előnyöket mutatja be.

A második fejezet egy rövid történelmi áttekintés az RF és az optikai távközléssel kapcsolatosan.

A harmadik fejezetben az úrszegmens lehetséges pályáit ismertetem.

A negyedik fejezetben a pozicionálás, a kijelölt keringési útvonalon tartás kihívásait tekintjük át.

Az ötödik fejezetben a légköri kommunikációs csatornák legfőbb ismérveit, az RF és lasercom kapcsolatot befolyásoló, legfőbb hatásokról olvashatunk.

A hatodik fejezet rövid áttekintést nyújt a két technológia által felhasznált frekvenciasávokról, azok tulajdonságairól.

A hetedik fejezet bemutatja a legnépszerűbb jelfeldolgozási és modulációs technikákat.

A nyolcadik fejezetben ismertetem a légkör és az RF technológia tápvonala közti “transzformátorokat”, valamint a lasercomhoz elengedhetetlen teleszkópokat, az azokhoz szükséges mozgatómechanizmust, és követelményeket.

A kilencedik fejezetben a földi állomások témakörét boncolgatom. Betekintést nyerhetünk a különböző hálózati topológiákba, megismerhetjük az RF és az optikai állomások általános jellemzőit, rendszertechnikai követelményeit, valamint elemzem az egymáshoz viszonyított legfőbb különbségeket. Végül részletesen beszélek az OGS működési elvéről, az alapvető hardware elemekről.

A tizedik fejezetben az RF állomások legfőbb zavarairól, főbb interferenciaútvonalakról ejtek pár szót.

A tizenegyedik fejezet egy úrtávközlési hálózat üzemeltetéséhez elengedhetetlen, frekvenciakoordinációs folyamatokat mutatja be.

Végezetül a tizenkettedik fejezetben javaslatot teszek egy jövőbeli, egyetemi OGS megalapozásához, mely állomás úrtávközlési szempontból egy fontos mérföldköve lehet a Széchenyi István Egyetem és hallgatói számára.

2. Történelmi áttekintés

A rádiófrekvenciás űrtávközlés:

A modulált mikrohullámú elektromágneses tereken keresztül történő nagy hatótávolságú kommunikációt először az 1920-as években vezették be. Az 1950-es években merült fel az a gondolat, hogy valamilyen Föld körül keringő űreszköz nagymértékben elősegítené a nagyávolságú kommunikáció megvalósítását. [5]

Műholdnak nevezünk minden olyan mesterséges, meghatározott pályán keringő, hasznos teherrel ellátott égitestet, mely egy másik égitest (pl.: Föld) körül kering. [6]

A kommunikációs műhold alapvetően egy pályára állított, elektronikus, kommunikációs egység, melynek elsődleges célja az információ átvitelének kezdeményezése vagy elősegítése egyik pontból a másikba. [5]

A passzív reflektoros megoldás hátránya, hogy a lefelé irányuló kapcsolat teljesítményszintje rendkívül alacsony, a teljes fel és le irányban jelentkező terjedési veszteség miatt, melyhez egyéb járulékos veszteség is adódik a nem tökéletes reflektorból származóan. [5]

Ezzel szemben az aktív műholdak [5] transzponderekkel vannak ellátva, [7] így számos előnnyel rendelkeznek. A darabszámukról, működési frekvenciájukról és polarizációs tulajdonságukról a szolgáltató dönt, működési elvük viszont azonos:

1. uplink frekvencián vételezik a jelet;
2. a jelet downlink frekvenciára keverik;
3. erősítés után pedig kisugározzák

Ezek a folyamatok az erősítők és keverők miatt energiaigényesek, ezért napelemekre és akkumulátorokra -árnyékban való tartózkodás során- van szükség a működésükhöz. [5]

Ugyanazon felfelé irányuló hullámforma felerősített változatának újraküldése ugyanazon a műholdon nem kívánt visszacsatolást okoz lefelé irányban, emiatt a műhold a teljesítményerősítés előtt valamilyen frekvenciaátalakítást végez, így a frekvenciasávok között némi elválasztás történik. A frekvenciasáv-leválasztás azt is lehetővé teszi, amennyiben a feladóállomás a műhold lesugárzott lábnyomában van, hogy ugyanazt az antennát használjuk vételre és adásra egyaránt, leegyszerűsítve a műhold antennarendszerét. [5]

Az optikai távközlés:

Az optikai távközlés őstörténete évezredekre nyúlik vissza, de valójában a 18. század végén

kezdődik, amikor Claude Chappe optikai távirója megjelent. A találmány egy széles képernyőre vetített ki az ABC betűinek megfelelő kódokat, melyet később Guillaume Amontons francia fizikus fejlesztett tovább. Teleszkóp használatával hidalták át a nagyobb távokat, megalkotva a pont-pont optikai kommunikációt. [8]

Napjaink rohamosan növekvő adatmennyisége következtében az űrtávközlés is megkívánja az optikai összeköttetés alkalmazását. Jó példa az űrteleszkópok fejlődése, melyek egyre magasabb felbontású felvételeket készítenek és rendkívül fontos a képek veszteségmentes és mielőbbi továbbítása a földi állomások részére. [9]

3. Műholdpályák

A műholdpályák tanulmányozása az egyik legalapvetőbb és talán legfontosabb témája a műholdtechnológiának. [6] A műhold pályája határozza meg, hogy egy adott földi állomásról mennyi ideig látható az űreszköz. [2]

A műholdak Föld körüli mozgását két erő határozza meg. Az egyik a Föld középpontja felé irányuló centripetális erő, amely a gravitációs erőből fakad, a másik pedig a Földtől kifelé ható centrifugális erő. [6]

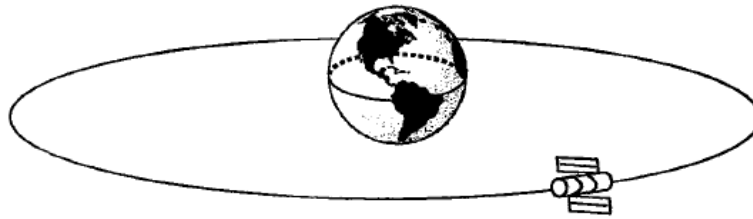
E két erő hatására a műholdak előre meghatározott, ismétlődő útvonalakon, úgynevezett keringési pályákon haladnak.

Ezek a pályák a következőktől függenek:

- pályasík tájolása;
- excentricitás;
- Földtől való távolság; [6]

3.1. Pályasík tájolása

Az egyenlítői és egy attól eltérő pályasík által bezárt szöget a műhold dőlésszögének, inklinációjának nevezzük. Eszerint a pályákat egyenlítői, poláris és ferde pályák közé soroljuk. Az egyenlítői pálya esetén az inklináció 0° , azaz a pályasík egybeesik az egyenlítői síkkal. [6]



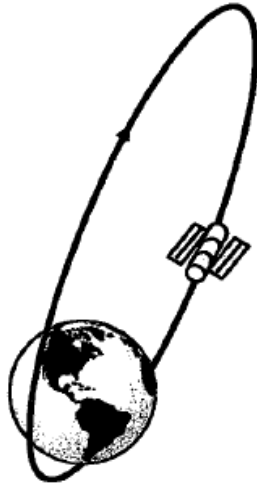
1. ábra - Egyenlítői pálya [6]

90°-os dőlésszög esetén a műhold sarki, poláris pályára áll. [6]



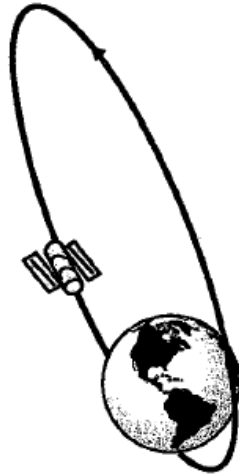
2. ábra - Poláris pálya [6]

A 0-180°-os inklinációval rendelkező pályákat pedig ferde (dőlt, inklinált), pályáknak nevezzük. Ezeket a pályákat megkülönböztetjük forgásirány szerint. A 0° és 90° közötti dőlésszöggel keringő műhold haladási irány megegyezik a Föld forgásirányával, ebben az esetben a pályát prograde pályának nevezzük. [6]



3. ábra - Prograde pálya [6]

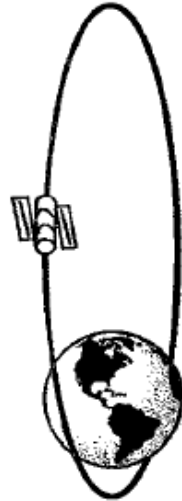
Retrograde pályáról beszélünk akkor, ha a sík dőlésszöge 90° és 180° közötti, ekkor a Föld forgásirányához viszonyítva a műhold ellentétes irányba kering. [6]



4. ábra - Retrograde pálya [6]

3.2. A pályasík excentricitása

Az ellipszis alakú pályákat jellemzi az excentricitás, mint arányszám. [10] Excentricitás esetén a pályákat elliptikus és kör alakú pályák közé soroljuk. Ha a pálya excentricitás értéke 0 és 1 között van, akkor elliptikus, melynek egyik gyújtópontjában a Föld középpontja található. [6]



5. ábra - Elliptikus pálya [6]

Nagymértékben excentrikus, ferde és ellipszis alakú pályákat használnak a magasabb szélességi körök lefedésére, melyeket a gyakorlatban Molniya-pályának neveznek. [6] Az elliptikus pálya apszispontjai, a perigeum és apogeum. Ezek a pontok meghatározzák a Föld felszínéhez mérten a pálya legközelebbi és legtávolabbi pontjait. [10]

Amennyiben viszont az excentricitás érték 0, akkor kör alakú pályáról beszélünk, bár minden körpálya valamilyen mértékben excentrikus, ekkor nem beszélhetünk apogeumról és perigeumról. [10]

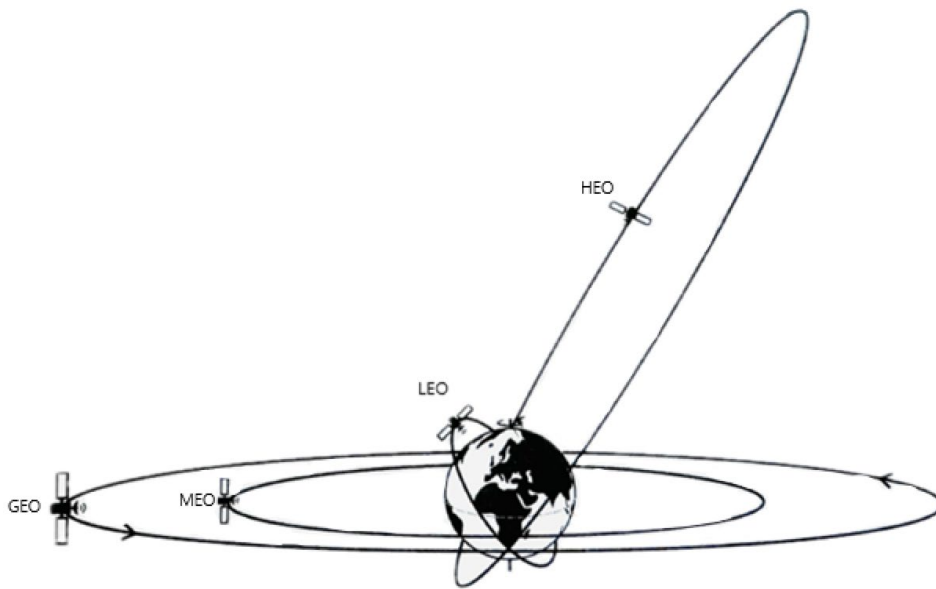


6. ábra – Körpálya [6]

3.3. Földtől való távolság

A műholdak a Föld felszínéhez mérten, különböző magasságokban keringhetnek feladatuktól függően:

- alacsony Föld körüli pályán – LEO (Low Earth Orbit),
- közepes Föld körüli pályán – MEO (Medium Earth Orbit),
- geoszinkronpályán - GEO (Geosynchronous Orbit),
- magas elliptikus Föld körüli pályán – HEO (High Earth Orbit) [6]



7. ábra - LEO, MEO, GEO és HEO pályák [10]

A LEO pályán keringő műholdak keringési magassága 2000 km-ig terjed, bár leginkább jellemző a 800-1200 km-es tartomány. [11] Az itt elhelyezkedő műholdak rövidebb keringési periódussal (1,5-2 óra), kisebb szakaszcsillapítással és jelkésleltetéssel rendelkeznek. [6]

A Nap-szinkron, Helioszinkron (SSO – Sun-synchronous orbit) pálya egy olyan típusú műholdpálya, mely e LEO kategóriába sorolható a Föld felszínétől mért távolsága alapján. [6] Előnye, hogy a műholdak adott helyi idő szerint mindig ugyan abban az időpontban haladnak el az adott földrajzi pontok felett. [10]

A MEO pálya 2000 km és 35786 km-es pályamagasságig terjed, de a satelitek leginkább 20000 km-es magasságban üzemelnek. A magasabb pályának köszönhetően hosszabb ideig

maradnak a Föld egy adott régiója felett, nagyobb lábnyommal rendelkeznek, de a távolságból adódó jelkésleltetés és szakaszcsillapítás magasabb. [10]

A geoszinkron pálya olyan speciális elliptikus prográd pálya, amelyen elhelyezkedő műhold keringési ideje megegyezik a Föld forgási idejével. Ahhoz, hogy a műhold GEO pályán keringjen és a Föld felszínéről nézve állni látszon, 35786 km magasságban kell lennie, valamint a következő feltételeknek kell teljesülniük:

- állandó szélességen kell elhelyezkednie;
- 0°-os inklináció;
- egyenletes szögsebességgel kell rendelkeznie, amely csak kör alakú pálya esetén lehetséges;
- a műhold mozgásának nyugatról kelet felé kell mutatnia; [6]

A geostacionárius pálya a geoszinkronpálya egy speciális esete, melynek jellemzője, hogy a pálya kör alakú és a műhold pályasíkja az Egyenlítő síkjával egybeesik. [10]

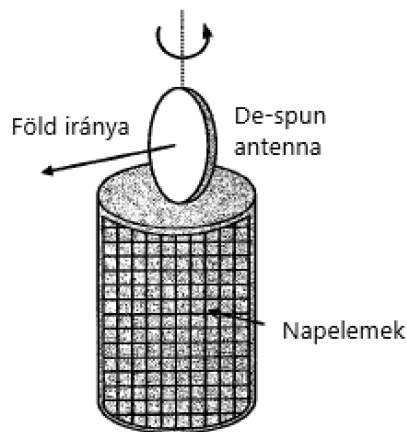
A HEO, vagy szemléletesebben magas elliptikus Föld körüli pályára jellemző a néhány ezer km-es perigeum és a több tízezer km-es apogeum. [10]

4. Műholdstabilizációs eljárások

Miután a műhold a kívánt pályára állt, mozgását különböző zavaró hatások, úgynevezett perturbációk érik. Ilyenek például más testek gravitációs erői (nap- és holdvonzás), mágneses mezők kölcsönhatásai, a Nap sugárnyomása. E tényezők miatt a műhold eredeti pályájáról képes elsodródni, irányát megváltoztatni, ezért a műhold helyzetét stabilizálni, szabályozni szükséges. [6] Erre szolgál az adott műhold attitűd-meghatározó és vezérlőrendszere (ADCS).[2]

4.1. Forgásstabilizálás

A passzív módszernek számító [10] forgásstabilizálás esetén a műholdtestet 30-100 fordulat/perc-es fordulatszámmal, [6] kiegyensúlyozottan [10] forgatják a pályasíkra merőleges tengelye körül, ezáltal elérve a kívánt stabilitást. [6]



8. ábra – Forgásstabilizáció [6]

A pörgésstabilizált műholdak általában hengeres alakúak. [6] Amennyiben irányított antennát alkalmaznak, akkor biztosítani kell, hogy mindig a kívánt irányba (pl.: Föld felé) nézzen, amit "despun" platformokkal oldanak meg. Ebben a megvalósításban a forgórészhez viszonyítva azonos szögsebességgel, de ellentétes irányba, elektromos motorokkal forgatják a műhold azon részét melyre az antennákat helyezték. Ennél egyszerűbb, ha a forgás miatt körsugárzó antennákat alkalmaznak. [10]

4.2. Háromtengelyes vagy teststabilizáció

Háromtengelyes stabilizálás esetén nevéből adódóan a műhold három tengely mentén történő mozgásának szabályozásával érhető el. A legtöbb ily módon stabilizált műhold [10] giroszkópokat, [6] lendkerekeket használ. A műhold a kerekek sebességváltoztatásával ellentétes irányba fordul, így alapvető vezérlési technikája a kerekek gyorsítása vagy lassítása, [6] mely megoldás rendkívül érzékeny a csapágyhibákra. [5]

Ezeknél a stabilizációs módszereknél a műhold teste általában doboz formájú [6] és egyik tengelye merőleges a Föld felszínére, így az antennák mindig a kívánt irányba néznek, emiatt kapta azt az elnevezést is, hogy teststabilizáció. [10]

A passzív módszerek közül megemlíteném a gravitációs tér és a napszél hatásait kihasználó módszereket, melyek pontatlanabb, kevésbé alkalmazott stabilizáló eljárások. [10]

4.3. Pályastabilizáció

A perturbációs hatások miatt a műholdat a megfelelő pályán kell tartani. [10] Jó példa a GEO pályás műholdak jellegzetes nyolcas alakú mozgása, [7] melyet aktív stabilizáló rendszerekkel, ion vagy kémiai hajtóművekkel kiviteleznek. [10]

A CubeSatok tekintetében ADCS nagy mértékű fejlődésen ment keresztül, durva napérezékelőkkel, napelem-áramok értelmezésével képesek attitűd meghatározásra. A helyszabályozást CubeSat szempontból passzív (állandó mágnesekkel) vagy aktív magnetorquerekkal oldják meg. [2]

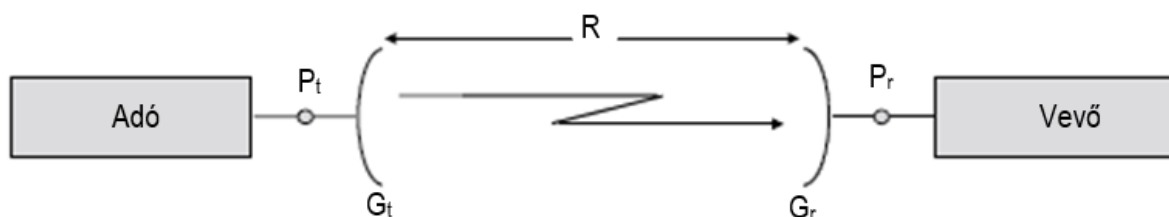
5. Csatornák jellemzői

5.1. Rádiófrekvenciás szempontból

Az űrtávközlési rendszerekben az átviteli csatorna kritikus szegmens, mivel jelentősen befolyásolja a műholdon keresztüli kommunikáció kialakítását és teljesítményét. A Föld légkörében terjedő RF hullámok csillapítást szenvednek el, mely dB-ben kifejezhető. Uplink vagy éppen downlink irányban, GSO műholdas összeköttetés esetén közel 200 dB-es, míg non-GSO kapcsolat esetén megközelítőleg 150 dB-es jelesillapításra számíthatunk. [12]

Az elegendő tartalék biztosítása érdekében előzetes teljesítménymérleg (Link-budget) számítása szükséges. [7]

Egy alapvető kommunikációs kapcsolatot felépítése:



9. ábra - Alap kommunikációs csatorna [12]

Adó oldalon:

- P_t : adóteljesítmény;
- G_t : antennyanyereség;

Vevő oldalon:

- P_r : vevő teljesítmény;
- G_r : vevő antenna nyeresége;

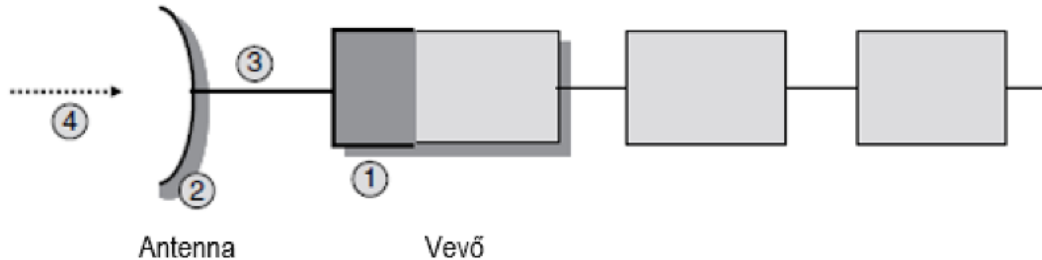
Szabadtér:

- R : adó-vevő közti távolság [12]

Rendszerzaj:

Az adástól a vételig, a jelút minden pontján zajok (nemkívánatos jelek) kerülhetnek a műholdkapcsolat vevőágába. A kommunikációs rendszerben számos zajforrás található. A legjelentősebb viszont a vevő oldalán megjelenő zaj, mivel a hasznos jelszint itt a legalacsonyabb:

1. front-end receiver;
2. vevőantenna;
3. összekötő tápvonalak és szerelvények;
4. szabad térből származó zaj [12]



10. ábra - Front-end receiver [12]

A rádiófrekvenciás zaj fő forrása a termikus zaj, amelyet a vevő eszközökben található elektronok hőmozgása okoz. [12]

Átvitel rendszerteljesítménye:

A műholdas kapcsolatok teljesítménye számos tényezőtől, valamint az adó- és vételi berendezések kialakításától, konfigurációjától függ. Nehéz megbecsülni egy adott link várható teljesítményszintjeit a konkrét paramétereinek és feltételeinek alapos elemzése nélkül. [12]

Légköri hatások, paraméterei:

- esőcsillapítás;
- keresztpolarizációs csillapítás;
- jel-zaj viszony;
- vivő-interferencia viszony [12]

Az eső csillapítása okozza a rendszer teljesítményszintjeinek legnagyobb mértékű romlását.[12]

Átviteli zavarok:

A Föld légkörének a rádióhullámokra gyakorolt hatása állandó problémát és nehézséget jelent a műholdas összeköttetés tervezés során. Az önmagukban vagy együttesen fellépő átviteli zavarok, anomáliák változásokat idézhetnek elő a vett jel amplitúdójában, fázisában, polarizációjában és érkezési szögében, melyek analóg átvitel esetén minőségbeli romlást, digitális átvitel esetén a hibásan átvitt bitek számát növelheti. A jelre gyakorolt hatások a növekvő frekvenciával, a magassági szög csökkenésével jelentősebbé válnak.

A térbeli kommunikáció erősen korlátozott, bizonyos abszorpciós sávokon, ezért ezen sávok között úgynevezett „rádióablakokban” valósult meg az RF - úrkommunikáció.[12]

Az átviteli zavarok vizsgálata RF szempontból:

- ~3 GHz alatti:

Ebben a tartományban az ionoszféra hatásai a legjelentősebbek, melyet D, E és F rétegekre bonthatunk.

Legfőbb károsító hatások:

- ionoszférikus szcintilláció;
- polarizációs rotáció:

A rádióhullám polarizációjának elforgatását az ionoszférában lévő elektronokkal való kölcsönhatása okozza.

- csoportkésleltetés;

A rádióhullám terjedési sebességének csökkenését jelenti.

- diszperzió;
Az átvitt jel spektrumának alsó és felső frekvenciája L közötti időkésltetés különbsége, jelentős sáv szélesség esetén. [12]

5.2. Optika szempontjából

Egy földi optikai állomás, amely a világűrben a Föld légkörén keresztül terjedő lézersugarakat fogad, az érkező jelben zavarokat, atmoszférikus csillapítást, a turbulencia miatt fadinget, a teleszkóp fókusztávolságában a sugarak szétterjedését, hullámfront dőlését/döntését, a közvetlen napfény és az égbolt sugárzása miatt háttérfényt, valamint további, hasonlóan nemkívánatos jelenségeket tapasztalhat. [13]

Tiszta rálátás szükséges mindkét végpont között, hogy egy optikai kapcsolat létrejöhessen. A légköri hatások súlyosságuk szerint az enyhébb hatásoktól, a teljes link elérhetetlenségig terjednek. A három fő légköri hatás, amely a sugárterjedést befolyásolja az abszorpció, a szórás és a törésmutató ingadozás. Előbbiek jelgyengülést, utóbbi, azaz a turbulencia hajlamos besugárzási ingadozást és térbeli koherencia elvesztését okozni. [1]

A fel és lefelé irányuló linkekre a légkör eltérően hat.

Uplink irányban a jel szcintillációt, erősebb sugárvándorlást szenvedhet, mivel a nyaláb nem terjed ki jelentősen, így a teljes jel eltéríthető. [1]

Downlink esetén a sugár elérve az atmoszférát szétterül, így hajlamos a szcintillációra, az érkezési szög pedig a megváltozásra. [1]

Az említett atmoszférikus hatásokat minden esetben figyelembe kell venni a mutató és nyomkövető rendszer kialakítása során, valamint a link budget-nél. [1]

Egy szabadtéri optikai kommunikációs kapcsolat a célzás és követés hibái, valamint az adótól a vevőig időben változó atmoszférikus útvonal miatt fading jelenséget tapasztalhat. [13]

Jitter:

Az alacsony jelteljesítmények támogatásához olyan detektorokra van szükség, amelyek képesek foton számlálásra, vagyis egyetlen beérkező foton hatására [13] elektromos impulzust

[4] generálnak. Az ilyen detektorok esetén van egy véletlenszerű késleltetés ingadozás attól az időpillanattól kezdve, amikor egy adott foton beérkezik a detektorba, egészen addig az időpontig, amikor a foton hatására impulzus generálódik. Ezt a késleltetés ingadozást, detektor jitternek, vagy egyszerűen jitternek nevezünk, mely némi teljesítményromlást okoz egy olyan rendszerhez képest, amelyben nincs jitter jelenség. [13]

A legfőbb csillapítási forrás viszont a felhőzet és a köd által bekövetkező abszorpció és szóródás, amit a légkörben lévő csapadék és aeroszolok okoznak. [13]

A légköri hatásokból származó optikai kapcsolat degradációjának jelentős részét a helyes helyszínválasztás segítségével lehet csökkenteni. [13]

6. Frekvenciasávok

6.1. RF összeköttetések

A mikrohullámú technológia alapelveinek ismerete elengedhetetlen egy modern műholdas hálózat kialakításához. A mikrohullámú spektrum az L, S, C, X, Ku és Ka sávokra oszlik, amelyeket aktívan használnak a kereskedelmi és katonai műholdas kommunikációban.[11]

Ezek közül a leggyakrabban használtak:

1. táblázat - Leggyakoribb műholdas frekvenciasávok [7]

Frekvenciasávok	Frekvencia	Lábnyom	Teljesítménysűrűség	Csapadék hatása
C	Uplink: 5,85-6,425 GHz Downlink: 3,7-4,2 GHz	Nagy	Alacsony	Minimális
Ku	Uplink: 13,75-14,75 GHz Downlink: 10,95-12,75 GHz	Közepes	Közepes	Közepes
Ka	Uplink: 27,5-31 GHz Downlink: 18,3-18,8 GHz/ 19,7-20,2 GHz	Kiesi	Magas	Jelentős
L	950-2150 MHz	-	-	-

L sáv: A beltéri egység és az antennafej közti információátvitelre alkalmazott, úgynevezett műholdas középfrekvencia. [7]

S sáv: 2 GHz-es frekvenciatartomány, alacsony jelszint jellemzi. Leginkább (MSS) műholdas telefonszolgáltatásra, a LEO pályás műholdaknál alkalmazzák. [7]

C sáv: Ezt a sávot a relatív alacsonyabb frekvenciák és körpolarizáltság jellemzi. Az így kialakított műholdas kommunikáció nagyobb lábnyommal, kis esőcsillapítással rendelkezik. Megjegyzendő, hogy a mobilhálózatok (MFCN) 4G, 5G technológiák is ebben a sávban üzemelnek elsődleges jelleggel. Ez a műholdas használat visszaszorulását eredményezi. [7]

Ku sáv: Magasabb frekvenciák, jelentősebb esőcsillapítás és lineáris polarizáció jellemzi. Kisebb műholdas lábnyommal rendelkezik, így adott területegységre nagyobb a kisugárzott teljesítmény, legelterjedtebb alkalmazási területe a műsorszórás. [7]

Ka sáv: Magas frekvencia, pontnyalábok alkalmazása és kis végponti antennák jellemzik. Leginkább műholdas internetszolgáltatásra használják. [7]

Mivel LEO pályás műholdakkal szeretnénk kommunikálni, ezért polgári felhasználás szempontjából a következő frekvenciasávokat vizsgálom meg.:

- 432-438 MHz (433 MHz)
Adási teljesítmény max.:1000W
A sáv alkalmazásai:
 - Amatőrrádiózás
 - Aktív műholdas Föld-kutatás alkalmazásai
 - LoRa technológia [14]

- 868-915 MHz
A sáv alkalmazásai:
 - RF műholdkommunikáció
 - LoRa technológia [14]

- 2300-2370 / 2370-2400 / 2400-2450 MHz (2400 MHz)

Adási teljesítmény max.:150W

A sáv alkalmazásai:

- Amatőrrádiózás (2300-2370 MHz, 2370-2400 MHz)
- Műholdas amatőrrádiózás (2400-2450 MHz) [14]

Amatőr rádiózást rendszeresen folytatnak a helyszínen, valamint a hullámhosszak mérete miatt ezek kellően robusztus sávoknak tekinthetők, így az igényeknek megfelelő rendelkezésreállítás biztosítható.

A frekvenciasávokat két további csoportra bonthatjuk:

- Engedélyköteles frekvenciasávok
 - NMHH általi frekvenciakijelölés, rádióengedély szükséges
 - Díjrendelet szerinti spektrumhasználati díjat számolnak fel
- Nem engedélyköteles frekvenciasávok
 - Díjmentesen, frekvenciakijelölés és engedélyek nélkül használható [7]

Mindkét esetben az NFFF által leírt szabályok betartása kötelező! Ez tartalmazhat teljesítmény, alkalmazás és felhasználási korlátokat. [14]

A fent megnevezett három frekvenciasáv a nem engedélyköteles sávok közé tartozik, ezért nincs bejelentési kötelezettség, valamint frekvenciahasználati díjat sem kell fizetni. [14]

A legtöbb CubeSat rádiófrekvenciás kommunikációs rendszerekre támaszkodik, mely robusztus, alacsony SWaP és sebesség (pl.: 1200bps) jellemzi. [2] A kommunikációs alrendszer régóta korlátoz, gyakran tovább tart egy adott RF spektrum engedélyezése, mint maga a műholdtervezés, megépítés és tesztelés. Az amatőr sáv pedig egyre zsúfoltabb. Ezzel szemben a lézerkommunikációs spektrum jelenleg nem igényel hivatalos kiosztást a keskeny sugarak miatt, amelyek csekély interferenciakockázatot jelentenek. Az egyetlen korlátozás a biztonságra irányul. Gondos tervezéssel, elővigyázatossági intézkedésekkel, mint például repülőgépfelügyelővel, adás esetén a hatóságokkal való előzetes egyeztetéssel, elkerülhetők az ezzel kapcsolatos aggályok. [1]

6.2. Optikai

A hullámhossz kiválasztását több tényező is befolyásolja: a légköri áteresztőképesség, lézerek és alkatrészek elérhetősége, a kommunikációs detektor, vevő (földi állomás) típusa, valamint a szem biztonságával kapcsolatos megfontolások.[2]

Bármilyen optikai hullámhossz használható, de a leggyakoribb FSO hullámhosszak: 850 nm, 1064 nm, 1400 nm, 1550 nm [15]

Ezek a hullámhosszok egybeesnek a kedvező légköri transzmissziós ablakokkal, valamint hatékonyan detektálhatók COTS detektorokkal (pl.: Si, InGaAs APD). [2]

1400 nm-ig a terjedő fénysugár közvetlenül retinára fókuszál, ezért a lézer és szembiztonság, valamint a légköri viszonyok miatt az 1550 nm a preferált.

Ezen a hullámhosszon nem az eső befolyásolja drasztikusan a terjedést (3 dB/km-es csillapítás), hanem például az erős köd (30 dB/km), mivel a ködcseppek méretével mérhető össze.

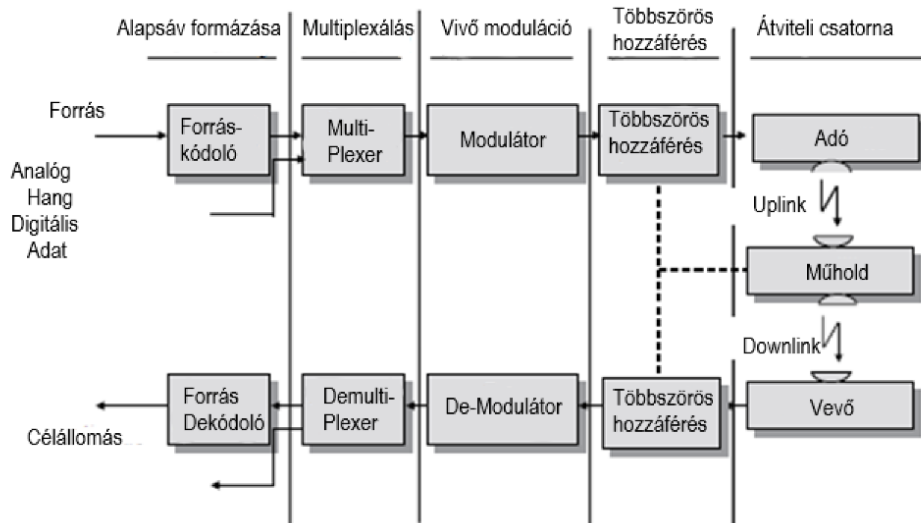
Az első optikai ablakhoz tartozik a 850 nm-es, legrégebbi és egyben legolcsóbb rendszer, a második ablakhoz az 1300 nm-es, a harmadikhoz pedig a legdrágább, az 1550 nm-es technológia. Mindhárom rendszerhez szabványos komponensek, interfészek érhetőek el, a más hálózatokhoz való csatlakozáshoz.

Átvitel szempontjából az 1550 nm kompatibilis az EDFA technológiával, ami fontos a nagyteljesítményű és nagy adatsebességű rendszerek kialakításához, valamint kompatibilis a legtöbb jelenlegi és jövőbeli optikai hálózattal, ezért kijelenthető, hogy ez a legalkalmasabb hullámhossz a Föld-űr kommunikáció számára.[2]

7. Jelfeldolgozás, modulációk

7.1. Rádiófrekvenciás

A következő jelfeldolgozási elemek kritikus építőelemeként szolgálnak a műholdas rendszerekben. Fontos szerepet játszanak a jel előkészítésénél, a továbbításnál, a vételnél, valamint dekódolásnál. Ezen elemek elengedhetetlenek a rendszertervezés és -teljesítmény számszerűsítésénél. [12]



11. ábra - Az alapvető rendszerelemek egy általános, műholdas átvitel során [12]

Ezek a forrástól való előrehaladás sorrendjében a következők: alapsáv formázása, multiplexálás, moduláció, többszörös hozzáférés és átviteli csatorna.

Az első három elem – az alapsáv formázása, a multiplexálás és a moduláció – előkészíti a jelet az átviteli csatornán való átvitelhez. A csatornán keresztüli átvitel után a vett jel egy fordított feldolgozási sorozaton megy keresztül.

Ha MA is szerepel a folyamatban, azt általában a moduláció után vezetnek be, ami az ábrán szaggatott vonallal látható. [12]

A rendszerelemek konkrét megvalósítása nagymértékben függ attól, hogy a forrás információ analóg vagy digitális. [12]

Analóg moduláció: Üzemelő rendszerek esetében található még olyan műholdas szolgáltatás, mely a kezdeti analóg modulációkat használja. Ilyen például az FM modulációt használó LEO pályán üzemelő NOAA meteorológiai műholdak. Napjainkban is állítanak pályára analóg modulációval működő műholdakat főként rádióamatőr szolgálat esetén. [10]

Digitális moduláció: Az elmúlt évtizedben az analóg modulációt kiszorította a digitális moduláció a műholdas szolgálatok jelentős részében. Ennek oka az egységnyi információ átviteli költségének drasztikus csökkenése, a jelek átviteli minőségének javulása. [10] A digitális rendszerek hatékonyabb, rugalmasabb jelfeldolgozási lehetőségeket kínálnak az

analóg rendszerekhez képest. A digitális jelek biztonságosabbak, jobb rendszerteljesítményt és sávhatékonyságot biztosítanak. Kódolás, hibaészlelés és javítás terén átfogóbb lehetőségeket biztosítanak. [12]

Digitális alapsávi jel formázása:

A két legnépszerűbb formátum az osztott fázisú (Manchester) kódolás és az alternatív jel inverziós (AMI) kódolása. [12]

Digitális multiplexálás:

Időosztásos multiplexálás esetén több digitálisan kódolt jelet, egyetlen összetett jellé egyesítenek.[12]

Digitális moduláció:

A digitális modulátor szerepe, hogy egy adott bitfolyamot fogadjon, majd ezzel az információval a szinuszos vivőt modulálja, hogy az az RF csatornán továbbítható legyen. [12]

A digitális moduláció a bináris bitfolyam által, a vivő amplitúdó, frekvencia vagy fázismodulációjával valósul meg.:

- Amplitúdó változtatása (AM) → ASK (amplitude shift keying) - amplitúdóbillentyűzés;
- Frekvencia változtatása (FM) → FSK (frequency shift keying) - frekvenciabillentyűzés;
- Fázis változtatása (PM) → PSK (phase-shift keying) - fázisbillentyűzés [12]

Mint az analóg forrásjelek esetében, a műholdkommunikációs csatornában a fázismoduláció nyújtja a legjobb minőséget. [12]

Az űrtávközlésnél leggyakrabban alkalmazott modulációs formátumok:

- Differential Phase Shift Keying (DPSK) – differenciális fázisbillentyűzés: a vivő fázisa akkor változik, amikor az aktuális bit különbözik az előző bittől. A szinkronizációról referencia bit gondoskodik.

- Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) – kvadratúra fázisbillentyűzés: a bitfolyamot két bitsorozattá alakítják, I-re és Q-ra, majd bináris, 90°-os szomszédos fázistolásokat alkalmaznak.
- M-ary Phase Shift Keying (MPSK) - többfázisú billentyűzés
- Minimum Shift Keying (MSK) - minimális frekvenciabillentyűzés
- Kvadratúra Amplitúdó Moduláció (QAM) - többszintű moduláció, ahol az amplitúdója és fázisa is modulált. [12]

A fázisváltásos modulációk, a BPSK és a QPSK, a leginkább elterjedtek a műholdrendszerekben.[12] Az átvitel során esetlegesen keletkező adatvesztéséget redundanciával lehet kiküszöbölni, egy példa erre a Reed-Solomon hibajavító kódolás.

Az átvinni kívánt bitfolyamot elszörtan érdemes átvinni, a burst adatvesztés elkerülése érdekében, amit a konvolúciós kódszöveggel valósíthatunk meg. A túlzott redundancia viszont rendkívül erőforráspazarló így FEC (Forward Error Correction) alkalmazása szükséges, mely a hasznos és hibajavító bitek arányát hivatott beállítani. [7]

7.1.1. Közeghozzáférési eljárások

A felhasználók számára biztosított és rendelkezésre álló erőforrásokat egynél több terminális rendszereknél szabályozni kell kétirányú adatátvitel esetén. [7]

2. táblázat - Hozzáférési eljárások csoportosítása [7]

Koordináció mértéke	Csatorna szinkronizáció	
	Szinkronizált	Szinkronizálatlan
Rögzített hozzáférés	SCPC/TDMA	SCPC/FDMA, CDMA
Véletlen hozzáférés	Réselt ALOHA	ALOHA
Szabályozott hozzáférés	DAMA-TDMA	SCPC-DAMA

- Rögzített hozzáférés esetén a kapacitás akkor is rendelkezésre áll, ha nincs aktív forgalom.
- Véletlen hozzáférésnél az állomások versenyeznek az információátvitel érdekében.
- Szabályozott hozzáférésnél viszont minden felhasználó csak addig veszi igénybe a hálózati kapacitást, míg ténylegesen szüksége van rá. [7]

Frekvenciaosztásos többszörös hozzáférés (FDMA):

Ez a legegyszerűbb MA technika, mivel az egyes földi állomások különböző frekvenciákon sugározzák jeleiket, ebből kifolyólag egyszerű konfigurálni és kezelni, viszont érzékeny lehet az interferenciára. [11]

Az FDMA-n belül megkülönböztetünk:

- SCPC – minden egyes jel (beszéd, műsor, adat) saját vivőt kap;
- MCPC – több csatornát multiplexelnek egyetlen vivőre [11]

Időosztásos többszörös hozzáférés (TDMA):

Az állomások egymástól időben elválasztva sugározzák jeleiket, [11] ezek az időrések, időablakok teszik lehetővé a csomagok továbbítását. [7] Ebben az esetben az adó és a vevő idősinkronizációjára van szükség, a forgalom lebonyolításához a réselt ALOHA protokoll nyújt segítséget, mely ütközés esetén automatikus újraküldést biztosít.[11]

ALOHA, réselt ALOHA:

Amikor az adott csatornát több földi állomás egyidőben szeretné használni, akkor előfordulhatnak ütközések, ennek elkerülése érdekében fix időréseket kell definiálni, mely időrések elején lehet csak elkezdeni az adattovábbítást. Ezt a módszert slotted/réselt ALOHA protokollnak hívják. [7]

Kódosztásos többszörös hozzáférés (CDMA):

A különböző jelfolyamok kódolva vannak, így egyazon frekvencián több vivő is továbbítható. Az adatok helyreállítása előtt a CDMA vevőnek kód- és idősinkronizációra (autokorrelációra) van szüksége. [11]

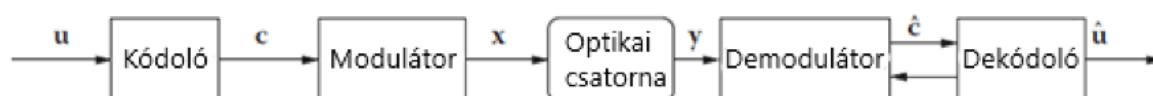
Igényt szerinti többszörös hozzáférés (DAMA):

Igényt szerinti többszörös hozzáférésnek (DAMA) nevezzük azt az esetet, amikor az MA és a hozzárendelt igény kombinálódik. A DAMA kifejezés használata nem tájékoztat bennünket az alkalmazott MA konkrét típusáról. Segítségével a földi állomások egyenként hozzáférhetnek a műhold erőforrásaihoz, amikor szükségük van rá. [11] A kommunikációra igényt tartó állomás jelez a központi állomásnak, hogy melyik másik állomással szeretne kapcsolatot létesíteni.

Amennyiben van szabad kapacitás, a központi állomás elküldi a csatorna adatait a hívott fél számára, így biztosítva számukra egy kommunikációs csatornát.[7]

7.2. Optikai

A lézerekommunikációt optikai szimbólumkészletek átvitelével valósítjuk meg, melyek a fázis, polarizáció, hullámhossz, vagy az amplitúdó változtatásában nyilvánulnak meg. A leggyakoribb és legegyszerűbb készlet az optikai impulzus meglétéből vagy annak hiányából áll. [13]



12. ábra - Egy kódolt optikai csatorna [13]

Az információs bitekből álló „u” blokkokból kódolás segítségével kódszavakat képzünk, majd modulációval csatornaszimbólumvektorokká „x” alakítjuk, melyeket optikai csatornán továbbítunk. Az optikai detektor kimenete kvantált, szinkronizált, és slot-számlálást vagy szimbólum-bebecsléseket (y) biztosít a csatorna dekóder számára. Az optikai detektor és vevő is a csatorna részét képezi. A csatorna kimeneti információinak felhasználásával a dekóder, ami akár demodulációs funkciót is elláthat, bebecsléseket generál a továbbított felhasználói adatokról. A rendszer jóságát a bit-hibaaarány (BER) és a kódérték-hibaaarány (WER) méri a dekóder kimenetén, ahol az elvárt BER érték tipikusan a 10^{-6} , míg a WER ideális esetben 10^{-4} nagyságrendű. A rendszer hibás kódértékek észlelése esetén az összes hibás kódszót eldobja. [13]

Ahhoz, hogy az optikai csatornát, a fotonokat [4] információátvitelre használhassuk, modulációt kell alkalmaznunk. Az átvitel megbízhatóságát növelhetjük, ha a felhasználói biteket először hibajavító kódolással látjuk el (ECC). Az ECC redundáns információt/biteket ad a felhasználói bitekhez, hogy lehetővé tegye a hibajavítást a vételi oldalon. Ez a teljesítmény és a sáv szélesség hatékonyabb felhasználását eredményezi. A kiváló távolsági tulajdonságok, valamint a hatékony kódolási és dekódolási műveletek a kommunikációs rendszerekben az Reed Solomon kódok széleskörű elterjedéséhez vezettek. [13]

A szabadtéri optikai csatornára jellemzőek a hosszabb kimaradások, melyek burst

jellegű hibákat okoznak, így egész kódszavak tűnhetnek el, emiatt interleaving technikákkal kell ötvöznünk, a blokk jellegű FEC módszereket. [2]

Megjegyzendő, hogy az interleaving késleltetéssel járhat, így megnehezítheti az optikai kapcsolat vezérlési célokra való alkalmazását. [2]

Modulációk:

A koherens technikák, melyek egyidejű amplitúdó, frekvencia és fázismodulációt hajtanak végre, nem kedvezőek COTS környezetben, a magas követelmények (pl.: rendkívül pontos lézerek) és az energiaigény miatt. Egy másik technika az intenzitás moduláció (IM), mely közvetlenül érzékelhető egy fotodiódával, fotonszámláló detektorral. [2]

Népszerű adatátviteli formátumok közé tartozik a pulzuskód moduláció (PPM), a fáziseltolódásos kulcsolás (PSK), valamint az amplitúdó eltolódásos kulcsolás (ASK), ennek speciális esete a be-ki kapcsoló kulcsolás (OOK). [13]

A legegyszerűbb és COTS rendszereknél a legnépszerűbb IM séma a be-ki kapcsoló kulcsolás (OOK – on-off-keying), mely az adó intenzitásával kódolja a biteket. Hátránya, hogy a COTS vevőnek képesnek kell lennie a megfelelő on-off küszöbértékek azonosítására, mely kihívást jelent zaj, interferencia (szórt fény) jelenlétében. [2]

8. Antennák és teleszkópok

8.1. Rádiófrekvencia

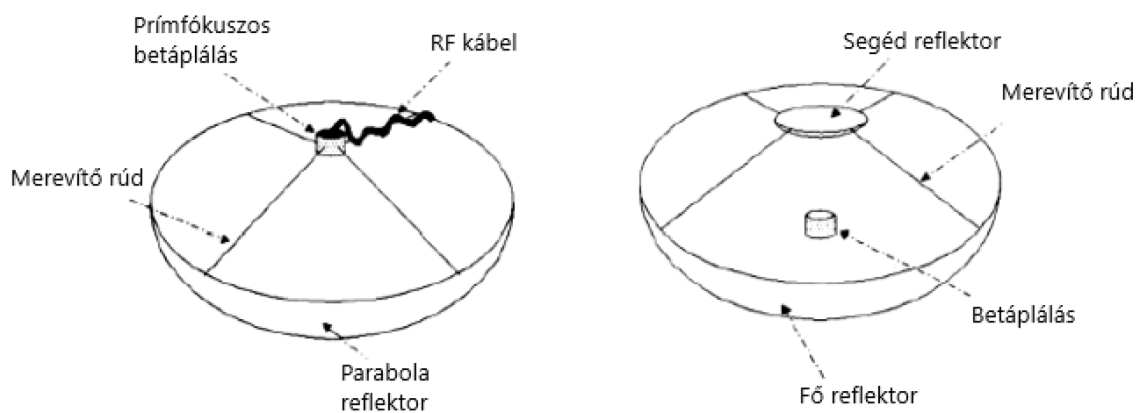
Az izotróp teljesítménysugárzás nem hatékony a műholdkommunikációs kapcsolatoknál, mivel teljesítménysűrűségének szintje a legtöbb alkalmazáshoz alacsony lesz. Szükség van tehát némi irányítottságra, mind adó, mind vevő oldalon. Műholdas alkalmazásoknál, az antennák dB-ben kifejezett erősítését az izotróp sugárzóhoz viszonyítva dBi-vel jelölik. [12]

Az antenna átmérőjének duplázásával az erősítés 6 dB-vel növekszik, a frekvencia kétszeresre való emelésével az erősítés szintén 6 dBi-vel nő. [12]

A keskeny nyalábszélesség miatt, a nagy nyereség érdekében a műholdas kommunikációban a segédreflektoros antennák terjedtek el. [7] A parabola reflektorok kedvező tervezési, gazdasági költségekkel, valamint jó hatásfokkal rendelkeznek.

Az antennák legfontosabb jellemzői:

- nyereség
- nyalábszélesség
- sáv szélesség
- felső határfrekvencia grid kialakításnál
- polarizáció
- melléknyalábok elhelyezkedése
- Adás esetén a maximális teljesítmény felvétele és kisugárzása.[11]

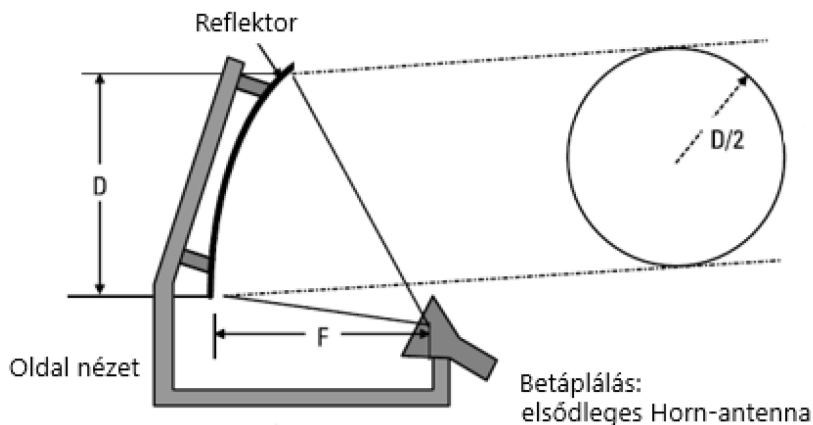


13. ábra - Egyreflektoros és többreflektoros parabola antennák [11]

Egyreflektoros sugárzóknál az antenna betáplálását támasztókarok segítségével tartják a fókuszpontban. Ezek a karok és lelógó tápvonal csökkenthetik, adott esetben megszüntethetik az adatkapcsolatot. [11]

Ezeket a káros hatásokat többreflektoros Cassegrain vagy Gregorian [7] antennarendszerekkel mérsékelhetjük, [11] melyek fő és segéd reflektorokból állnak. A segédreflektor a Cassegrain domború, a Gregorian pedig homorú kialakítású. [7] Ebben az esetben is szükséges a tartókarok alkalmazása, viszont a főreflektorba történő betáplálás [11] rövidebb jelutat eredményez, ami csökkenti a tápvonalból származó csillapítást.[7]

Ellenben mindkét megközelítésből származnak veszteségek a belógó fémszerkezetekből adódóan, amire megoldást nyújthatnak az offset reflektor antennák.[11]



14. ábra - Offset-reflektor antenna [11]

Ezek az antennák körkörös szimmetria helyett csak függőleges szimmetriával rendelkeznek, ugyanis egy adott paraboloid felső részének egyetlen darabjából állnak.

Az antenna nyereségét némileg csökkenti a betáplálás eltolt pozíciója, de ez még mindig kisebb, mint a kitararásból, az alsó felület jegesedésből, hó lerakódásból származó veszteségek.

Az alkalmazott módszer megválasztásáról a tervező dönt, figyelembe véve a gyártási költségeket, a telepítési helyszínt, a környezeti feltételeket, fizikai stabilitást és a teljesítményt.[11]

Az állomások zavartalan működését a következő rendszerek biztosítják:

- Műhold követő rendszer (Tracking System): [7]

A nagy állomások számára szükséges úgynevezett műholdkövető és pozícionáló rendszer. [5] 3,7 m-nél nagyobb átmérőjű antennák esetén a megfelelő jelszint tartása érdekében az antennának muszáj lekövetnie a GEO műholdak jellegzetes fekvő nyolcas alakú mozgását, egy a műhold által sugárzott beacon jel teljesítményszintjének folyamatos monitorozása által. Ezzel a módszerrel akár kétszer nagyobb teljesítményszintet is elérhetünk a tracking rendszert nélkülöző állomásokkal szemben.

- De-Icer rendszer:

A hó és a jég csillapításának elkerülése érdekében az antennát, vagy egyes részeit, fűteni szükséges.

- Dehidratáló rendszer:
Ahhoz, hogy a csőtápvonal tisztaságát, páramentességét, szennyeződésektől mentes állapotát fenntartsuk, nyomás alatt kell tartani, így elősegítve a korrózióvédelmet, csökkentve a csillapítást.
- Rainblower rendszer:
Az esőcsillapítás minimalizálása érdekében a primersugárzót lezáró fólia felszínét szárazon, tisztán kell tartani. A fólia felszínére kerülő esőcseppeket a rainblower fújja el. [7]

8.2. Optika

A lasercom rendszer a teleszkópok száma szerint is osztályozható. Monosztatikusnak nevezzük azt a rendszert, mely egyetlen teleszkóppal valósítja meg a lézerkommunikációt, mely gyakran előnyösebb, mivel csak egyetlen durva mutatószerkezetet pl.: gimbal-t igényel. [2]

Bisztatikus rendszereknél általában a vételi nyílás nagyobb, az adónyílás kisebb. A két jel szétválasztása, az optikai utak önálló tervezésére ad lehetőséget, így kialakítható egy duplex (pl.: uplink: 850 nm, downlink 1550 nm) működés speciális optikai szűrők nélkül. Ez utóbbi rendszer lehetővé teszi a COTS lencseszerelvények használatát az egyedi optikai padok helyett.

Egy teleszkóp „teljesítményét” több tényező is befolyásolja: rekesznyílás mérete [D], gyújtótávolsága [f], látómezeje (FOV). [3]

Egy földi állomás elsődleges feladata, hogy a jeleket a vevőre gyűjtse, ezért alapvető tervezési paraméter a teleszkóp átmérője. [1] Ez maga az optikai felület, mely kör keresztmetszetű és képes az általa fogadott fényt a detektor (emberi szem, kamera) felé irányítani. [3] Egy nagyobb méretekkel rendelkező távcső kívánatos lehet, mivel több foton begyűjtésére képes. [1] Minél nagyobb a nyílás átmérője, annál érzékenyebb. A fényérzékenység pedig az egyik legfontosabb tényező, hogy képesek legyünk kellően kis objektumot (LEO-CubeSat) észlelni. Egy nagyobb rekesznyílás magasabb felbontást, megnövekedett nagyítást, világosabb képeket, viszont kisebb FOV-t eredményez. Maga a (szög)felbontás két objektum megkülönböztetésének képességét szabja meg. Minél kisebb ez az érték, annál könnyebb megkülönböztetni az egymáshoz közeli objektumokat. Ezt a szögfelbontást a Rayligh-kritérium határozza meg. Egy 8 és egy 12 hüvelykes rekesznyílás összehasonlításakor, utóbbinál 2,25x több fény jut a rendszerbe. [3] Az apertúra átmérője a

modulációs sémától is függ, mely a leggyakrabban intenzitásmoduláció, ekkor a fotonok adott időpillanatban való megléte, vagy hiánya hordozza az információt. [1]

Azonban előfordul koherens kommunikációt alkalmazó rendszer, melyben a bejövő jel fázisa is hordoz információt, ezért ezt vissza kell tudni állítani a vétel során.

Direkt érzékelés (inkoherens) esetén a teleszkóp átmérőjét a szükséges teljesítmény alapján választják meg, így az apertúra átmérője is bekerül a kapcsolat költségvetésébe, az adóteljesítménnyel, a link hosszával és a nyaláb divergenciával együtt. [1]

A teleszkóp felépülhet több kisebb gyűjtő területből vagy egyetlen nagy apertúrából.

Előbbinél a teleszkópok igazítása, a jel csatolása, utóbbinál az egyetlen nagy teleszkóp megépítése hordozza a kihívást. Mindkét verziónál egyetlen célt kell elérni, mégpedig, hogy elegendően nagy rekesznyílás álljon rendelkezésre. Például koherens földi állomások esetén az apertúrát a Fried paraméter alá kell csökkenteni, ami nagy rekesznyílást igényel.[3]

A fókusztávolság hatással van a kis objektumok észlelésének képességére. A nagyobb fókusztávolság nagyobb nagyítást, valamint kisebb FOV-t eredményez. Ez az érték egy általános mérőszám az egyes teleszkópok összehasonlításánál, mely általában mm-ben van kifejezve. [3]

A teleszkópok optikáit két csoportra bonthatjuk: (1) gyors és (2) lassú optika

Az optikának ezen tulajdonsága a fotonok összegyűlésének sebességét befolyásolja a detektoron vagy szemlencsén. [3]

(1) A kisebb nevezőkkel rendelkező értékek pl.: $f/4$ vagy $f/5$ gyorsnak,

(2) míg a pl.: $f/11$ -es érték lassú optikának tekinthető.

Átmeneti, középtartomány az $f/6$ és $f/10$ közötti értékek.

LEO CubeSat észleléshez gyors vagy közepes gyűjtőtávolságú, kisebb arányú, kisebb nagyítást és szélesebb FOV-t biztosító teleszkóp javallott. A lassú, nagyobb arányokkal rendelkező teleszkópok, nagyobb távolságokon lévő objektumok megfigyelésére alkalmasak.[3]

A FOV az a szög, mely meghatározza a teleszkópon keresztül látható területet nagyságát, mely több tényezőtől is függ. A nagyobb gyűjtőtávolság csökkenti, míg a nagyobb detektorméret növeli az FOV-t. [3]

LEO CubeSatok észlelésénél megkövetelt a széles FOV. Ha például a TLE adatok nem eléggé pontosak és a műhold nem éppen a meghatározott pozícióban tartózkodik, vagy ha a teleszkóprendszer nem elég precíz, akkor kisebb FOV könnyen ellehetetlenítheti a műhold

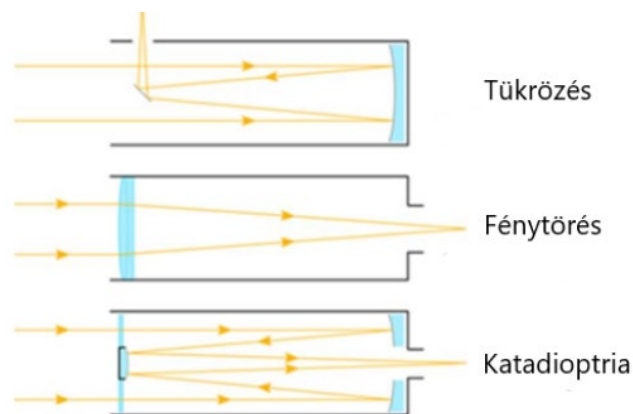
„megszerzését”. [3]

Kimondható, hogy egy nagy apertúra jobb teljesítményt nyújt a vevő szempontjából, valamint az adó és a vevő apertúrák méreteinek nem szükségszerűen azonosnak lenniük. [13]

A LUCE és egy németországi ESA földi állomás között kísérletekkel bizonyították, hogy egy LEO műhold – Föld optikai kommunikáció megvalósítható egy hordozható (40 cm-es) teleszkóppal. A COTS teleszkópok széles választéka elérhető 30 cm-es mérettől, melyek tartói a legtöbb esetben alkalmasak LEO pályás nyomkövetésre. [2]

A professzionális teleszkópokkal ellentétben, az amatőr teleszkópokat sokkal gyakrabban kell kalibrálni. Ennek két fő oka van: (1) Az amatőr teleszkópokat általában kevésbé ellenőrzött környezetben helyezik el, míg a professzionális teleszkópoknak rendszerint saját obszervatóriumi vannak. (2) Az amatőr teleszkópok általában inkrementális jeladókkal, kódolókkal vannak ellátva, így minden ki-be kapcsolásnál hiányzik az információ a tájolásról (0 azimut és elevációs értékek), így kalibrációra van szükség. Ezzel szemben a professzionális teleszkópok abszolút kódolókkal vannak ellátva, így a tájékozódáshoz szükséges információ sosem vesz el. Amatőr megoldás esetén a kalibrálásnak egyszerűnek és gyorsnak kell lennie, gyakoriságából adódóan. [1]

A COTS teleszkópok alapvetően három konfigurációval rendelkezhetnek: tükrözés, fénytörés és a kettő kombinációja a katadioptria [3]

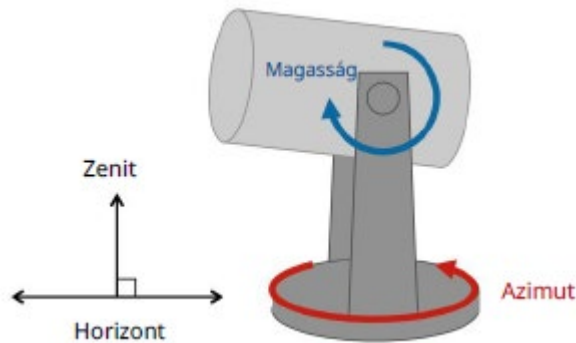


15. ábra - COTS teleszkópok alapvető konfigurációi [3]

A tükrözés során tükröket a fénytöréskor lencsétet katadioptria esetén pedig ezek kombinációját alkalmazzák. Ezek közül a tükrös megoldás a legolcsóbb és legkönnyebb megoldás így ezek a teleszkópok hordozhatók. [3]

A rögzített állomások a távcső jelét leggyakrabban Coudé útvonalon keresztül juttatják az optikai egységhez, ami olcsó COTS hardverrel, valamint a kompakt és szállítható követelményekkel nem összeegyeztethető. Ezért az optikai egységet közvetlenül a távcsőre kell szerelni, mely egység tömegét érdemes a lehető legjobban redukálni, így elkerülve a gimbal rendszer esetleges túlterhelését. [3]

Ezeket a teleszkópokat azonban a kívánt irányba kell tudni mozgatni, forgatni. A legtöbb COTS teleszkóp abszolút kódoló helyett inkrementális kódolót használ, mely kódolóknál a nulla pozíció minden tápciklusnál visszaáll, ekkor kalibrálásra van szükség. [3] A leggyakoribb LEO nyomkövető rendszerek azimut (alt-azimut) rögzítési módot használnak. Ez egy gimbal rendszer, mely vízszintes irányban 360°-os mozgást, függőleges irányban pedig 0-90°-ig biztosít mozgásteret.[1]



16. ábra -Gimbal rendszer [1]

Amikor a zeniten át szeretnénk haladni, szingularitás lép fel, ekkor az azimut gimbalnak azonnal el kell fordulnia 180°-kal, hogy a követés folytatódhasson. Ez nagyon magas fordulási sebességet (~ 10 °/s) igényel, a vízszintes tengelyen. [1]

Minél alacsonyabb a műhold tengerszint feletti, magassága, annál nagyobb kihívás a földi állomás általi lekövetés. [1]

A tartószerkezet minősége sem elhanyagolható. Egy kiváló minőségű szerkezet esetén, elegendő a tartó általi nyílt hurkú követés, hogy a finom mutatórendszer adott tartományon belül maradjon, így kiküszöbölve a zárt hurkú követési igényt. [3]

Abban az esetben, ha nincs igény a teleszkóp átcsoportosítására célszerű egy kupolával ellátni a megfigyelőrendszert. [16]

Többféle kupolatípusból választhatunk, a klasszikus „slot” kupola, melynek ajtaja hátracsúszik, a kagylókupola mely 360°-os rálátást biztosítanak, vannak kupolák melyek oldalra nyílnak és olyan „fészerek”, melyeknek lecsúsztható a tetejük. A kagyló típusú azért lehet az egyik legjobb, legegyszerűbb választás, mert azt nem szükséges motorizálni. [3]

8.2.1. Lézerek a távközlésben

Manapság az üvegszálak technológia lefedi a földi gerinchálózatok nagy részét. A magas költségek, a geológiai akadályok miatt azonban bizonyos, elszigetelt területeken az üvegszálak hálózatok nem kiépíthetőek. A műholdakon keresztül történő távközlés áthidalhatja ezt a szakadékot. [13]

A jelenleg szabályozatlan spektrumú és több THz-es sávzélességű optikai technológia nagyságrendekkel bővítheti a kommunikációs lehetőségeket. A műholdak közötti keresztkapcsolatok nagy kapacitású LEO műholdkonstellációkat is lehetővé tennének sokkal kevesebb földi átjáró állomással, több tíz Gbps-os sebességgel. [13]

A LASER szóösszetételt a fényerősítés gerjesztett kibocsátással (Light Amplification by Stimulated Emission) szavak angol kezdőbetűi alkotják. Az optika és a fény olyan elektromágneses hullámokat jelent, amelyek hullámhossza vákuumban 1 mm-nél is kisebb, azaz 300 GHz feletti frekvenciájú. [17]

Lézerbiztonság:

A szem biztonsága fontos tervezési szempont minden olyan rendszernél, amely szabad térben történő terjedést alkalmaz. Az ANSI és az IEC szabványokat fogalmaz meg (pl.: ANSI Z126.1) a biztonságos lézerhasználathoz. [2]

A maximális megengedett expozíció (MPE) [W/cm²], a hullámhossz függvényében a szem, a bőr expozíciója esetén meghatározott. A névleges veszélyességi zóna (NHZ) méterben van kifejezve. [2]

Példa: 1550 nm; 0,9 mm-es adónyílás és 2,1 mrad félteljesítményű sugárszélesség esetén 0,1 W/cm² az MPE, ami 4,1 m-es NHZ. [2]

A lézerbiztonságot nagyon komolyan kell venni, mivel egy 1 mW teljesítményű látható sugárzást kibocsátó lézer teljesítménysűrűsége például egy szem lencséjének fókuszában 10⁵ W/cm², mely teljesítménysűrűség a szem károsodásához vezet. [17]

A lézersugárnak a földről a levegőbe vagy a térbe történő terjedése során követnie kell a biztonsággal kapcsolatos követelményeket és a különböző kormányzati szervek által meghatározott irányelveket. Ezek közé tartozik az OSHA (munkaerő védelme), az FAA (pilóták és repülőgépek védelme), valamint a Space Command Laser Clearinghouse, amely a világűri eszközök védelméért felelős. [13] A Szövetségi Légügyi Hatóság (FAA) irányelveket tett közzé a lézerek szabad térben való használatáról [59], viszont a szem számára láthatatlan hullámhosszokon nem kell betartani, elegendő csak az MPE biztonsági szabványokat. [2]

Lézerek használata űrtávközlési szempontból:

A mai készen kapható lézertávadók megfelelnek a földközeli lézerkommunikációs kapcsolatok kimeneti teljesítmény- és sugárminőségi követelményeinek. [13]

A lézerkommunikációban számos lézerhullámhossz kiemelkedő. Közülük az 1550 nm-es hullámhossz a legnépszerűbb, mivel ezek az eszközök a kereskedelemben könnyen beszerezhetők, és az atmoszférikus csillapítás és a szemet érő veszélyek kisebbek 1550 nm-en, mint 800 vagy 1064 nm esetén. [13]

Jelenleg 10 Gb/s-ot meghaladó adatátviteli sebesség érhető el félvezető lézerekkel, amelyek kimeneti teljesítménye 1 mW-ról több ezer milliwattra növelhető optikai erősítők, például erbiummal adalékolt szálal erősítő alkalmazásával. Az optikai erősítő fenntartja a helyi oszcillátor modulációs és sugárminőségi jellemzőit a több Gb/s modulációs sebesség mellett. A lézeradó tervezési szempontjai közé tartozik a hullámhossz, a kimeneti teljesítmény, a nyereség, a nyereség együttható, a nyereség ingadozása, a zajszint, és a sáv szélesség. [13]

Korábban fénykibocsátó diódákkal (LED) is folytak CubeSat kísérletek, de a LED-ek közel sem olyan monokromatikusak, mint a lézeralapú források. Az energia 10 nm-nél nagyobb spektrumban oszlik meg, ez korlátozza a spektrális szűrést, ami a háttérfény (pl.: csillagok) miatt SNR csökkenéshez vezet. [2]

A lézeradókat két csoportra bonthatjuk:

a) koherens:

A koherens adatátvitel a nem koherens séma alternatív átviteli elve, mely a fényt elektromágneses hullámként ábrázolja, valamint az intenzitás mellett, a fázisinformációt is felhasználja. Számos előnye van, beleértve a jobb érzékenységet, a kevésbé sérülékenységet a szórvány- vagy háttérfénnyel szemben. [13]

Egy koherens rendszerben a fénycsugár(információ) egy másik fénycsugárra(vivőre) helyezik, amelyet egy (LO) helyi lézercsilláttal állítanak elő, ezért a koherens rendszer adóját nem csupán fényforrásnak, hanem csilláttal is kell tekinteni. Ez a két fénycsugár a detektorra fókuszál, mely fotodetektor nemlinearitása kimenő áramot hoz létre, amely a vett és a lokálisan generált fénycsugarak keveredési szorzatát tartalmazza. Ez az áram tartalmazza a továbbított információt, mely áramerősség a két fénycsugár amplitúdójától, fázisától és polarizációjától függ. [13]

A koherens adatátviteli rendszerek jól alkalmazhatók az 1550 nm-es sávban működő dióda lézerek és a szilárdtestlézerek. [13]

Egy szilárdtestlézer alapvetően három elemből áll: a lézercsilláttól, a rezonátorból és a pumpa forrás(ok)ból. [13]

Az Nd:YAG jó optikai és termikus anyagtulajdonságokkal rendelkezik, ennek eredményeként széles körben alkalmazzák az iparban, valamint meglehetősen ellenálló az kozmikus sugárzásokkal szemben. Az előnyben részesített forrás a koherens távközlési rendszerek számára a monolitikus Nd:YAG csillát lézerek, melyek bevált technológiának számítanak, és több gyártótól is beszerezhetők a kereskedelemben. [13]

b) inkoherens (közvetlen észlelésű lézercsillát):

Egy nem koherens adatátviteli rendszerben (közvetlen észlelési rendszernek is nevezik) az átvitt fényt korpuszkuláris jellegében modellezik és csak az intenzitása hordoz információt.[13]

Az optikai távközlési piac igényeinek köszönhetően a szálcsillát lézereket és erősítőket széles körben fejlesztették ki 1,5 μm hullámhosszon. Manapság a 10 Gb/s-ot meghaladó adatátviteli sebesség lehetséges félvezető lézereken keresztül, amelyek csúcs- vagy átlagos kimeneti teljesítménye milliwattos teljesítményszintről 1000 milliwatt-ra növelhető optikai erősítők, például erbium-adalékolt szálcsillát erősítő (EDFA) alkalmazásával. [13]

A mai készen kapható lézercsillátok megfelelnek a földközeli lézercsillát kommunikációs (lasercom) kapcsolatok kimeneti teljesítményére és sugárminőségére vonatkozó követelményeknek. [13]

9. Földi állomások

A műholdas rendszerek a Föld mesterséges holdjait használják, melyek mellett földi állomásokat is tartalmaznak. Felépítését tekintve egy űrszegmensből és egy földi szegmensből épülnek fel. [11]

Az űrszegmens tartalmaz egy vagy több műholdat és TT&C állomást, állomást. A földi szegmens a klasszikus helyhez kötött földi létesítményeket, valamint a légi, tengeri és földi mobil vagy nomadikus (mozgó) eszközöket jelenti. [11]

Feladatuk, hogy kapcsolatot létesítsenek műholdak segítségével egy vagy több ugyanolyan földi bázissal, vagy egy vagy több űrállomással. A központi földi állomást "hub" vagy földi átjáró állomásnak nevezik, mely nagy antennákkal rendelkező, nagykapacitású, kétirányú kommunikációt megvalósító, hálózat menedzselő állomások. Például műsorszórás esetén ezek az állomások sugározzák a műholdak felé a televíziós jeleket. [10]

A földi állomásokat általában nagy és kis állomásokba sorolják, a kisugárzott teljesítményük és antennáik mérete alapján. A nagyobb állomások akár 10-60 m átmérőjű, míg a kisebb állomások 3-10 m átmérőjű, tetőre szerelhető antennákat használnak. A nagy állomásoknak gyakran szükségük lehet műholdkövető és mutató alrendszerekre, amelyek folyamatosan követik a műholdat pályája során, így biztosítva a maximális teljesítmény mellett az átvitelt és vételt. [5]

A földi állomás fogadja, és sok esetben megbízhatóan és megfizethető áron továbbítja a megfelelően formázott jelet. [5]

Egy vagy több televíziós jelet, adat (parancsok, telemetriai adatok stb.) vagy hanginformációt továbbíthat vagy fogadhat, valamint távolságmeghatározási (navigációs) jeleket, esetleg mindezen elemek kombinációját. [5]

9.1. Földi állomások csoportosítása

Szolgáltatások szerint:

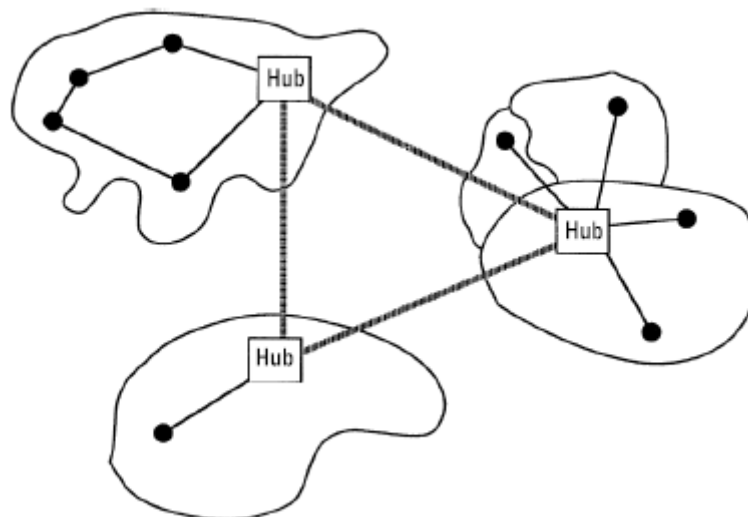
- Fixed Satellite Service (FSS): Földi, helyhez kötött állomások közötti kommunikációra szolgál. A szolgáltatások jellemzően szélessávúak (1-200 Mb/s), a fix, irányított antennák kapcsolati teljesítménye miatt. Kezdetben a GEO műholdak

számára lett kiosztva, de már több non-GEO konstelláció is zavartalan hozzáférést kapott ehhez a spektrumhoz.

- Broadcasting Satellite Service (BSS): Közvetlen hozzáférésű, szélessávú információátvitelt biztosít nagy közösségek számára. Ez a szolgáltatás szintén a GEO műholdak számára lett fenntartva, viszont több non-GEO műholdrendszernek is engedélyezik a spektrumhoz való hozzáférést.
- Mobile Satellite Service (MSS): Olyan L és S sávok, amelyek mobil földi állomásokkal (pl.: járművekkel, személyekkel) való kommunikációra szolgálnak. Az L- és S-sávokat kijelölték a non-GEO műholdhálózatok számára, melyek általános felhasználásban lassan terjedtek el. [11]

9.2. Hálózati topológiák

A kommunikációs műholdak a földi állomásokkal kombinálva hálózatokat alkotnak, melynek célja a végfelhasználók kiszolgálása különféle tartalmakkal és alkalmazásokkal. Az alábbi ábra egy hálózat általános nézetét mutatja annak földrajzi elrendezése alapján, amelyet topológiának nevezünk. [11] Ezeket sáv, csatorna és kapcsolódási útvonaljellemzőik alapján csoportosítjuk.[7]



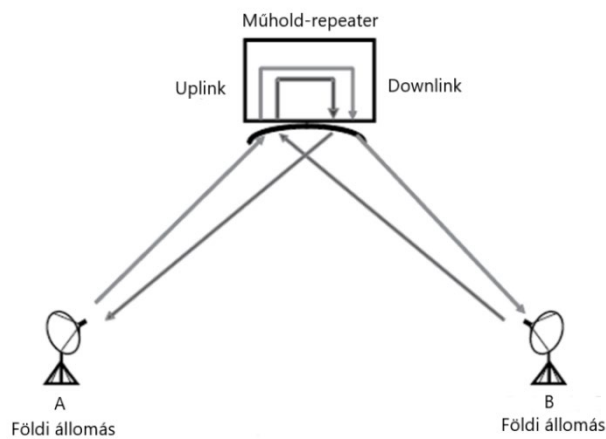
17. ábra - HUB hálózati topológia [11]

Ebben a topológiában, a kiszolgált régiókon túl, egy magasabb szinten három távközlési központunk van, melyekben az egyes régiók keresletei összpontosulnak. Ezek a HUB-ok

„backhaul” áramkörökkel vannak összekötve, amit hagyományos távközlési rendszerekben „trunk” -nek nevezünk. [11]

Összeköttetésnek nevezzük, amikor egy földi állomás kapcsolatba kerül egy kommunikációs műholddal. A fő kapcsolódási lehetőségeket a következő ábrák szemléltetik, amelyek a pont-pont, pont-multipont és többpontos "interaktív" kapcsolatot mutatják be. [11]

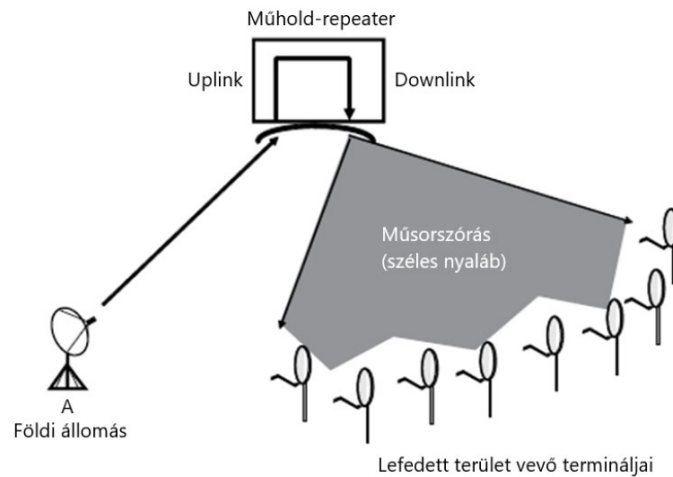
Pont-pont összeköttetés:



18. ábra - Pont-pont műholdas összeköttetés [11]

Ez a fix csatornás kommunikáció a legegyszerűbb és leggyakoribb módszer, ugyanis HUB mentes, kiváló minőséggel és adatátviteli sebességgel, biztonsági tulajdonságokkal rendelkezik, viszont rendkívüli erőforrásigényes, teljesítmény pazarló. [7] A pont-pont kapcsolat teljes duplex utat biztosít két földi állomás között, a műholdat középen átjátszóként használva. [11]

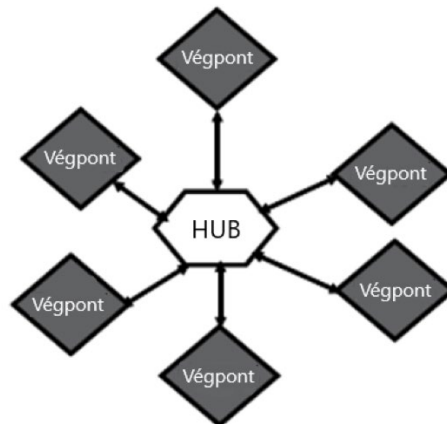
Pont-Multipont:



19. ábra - Pont-többpont összeköttetés [11]

A pont-többpont összeköttetés célja a video- és audiofolyamok eljuttatása számos helyre. Ezt "műsorszórásnak" is nevezik, mert ugyanazt az információt kapja a jobb oldali sugárban lévő összes vevő. A pont-multipont kapcsolatokat olyan régiók kiszolgálására használják, ahol több millió otthoni antenna található. Ehhez a műholdas összeköttetéshez elegendő egyetlen földi adóállomás. [11]

Star topológia:

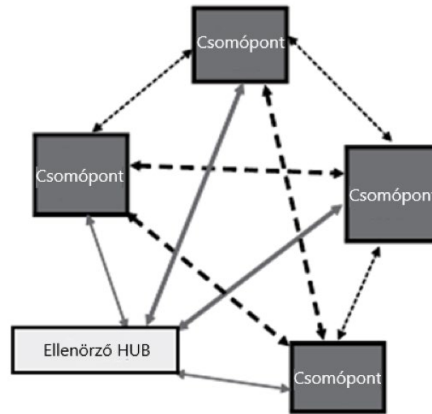


20. ábra - Csillag topológia [11]

A HUB a középpontban helyezkedik el, ehhez csatlakoznak a távoli végpontok, műholdkapcsolaton keresztül. Kétirányú (duplex), interaktív átvitel esetén a forward link (vagyis a kimenő csatorna) a központból indul, és egyetlen szélessávú csatornán jut el az összes

távoli végponthoz. A return link (vagy más néven bejövő csatorna) kiindulópontja a távoli végpontoknál található. [11]

Mesh topológia:



21. ábra - Háló topológia [11]

Ebben az esetben a végpontok közvetlenül egymással pont-pont kommunikációt folytatnak, a HUB csak ellenőrző, vezérlő szerepet tölt be. [11] A jövőbeli FSO hálózatokhoz ez lesz a legjobb topológiai megoldás, mely nagy megbízhatóságot, elérhetőséget biztosít. [15]

9.3. RF földi állomásról általánosan

Rádiókommunikációs eszközként, a földi állomásnak megbízhatóan és megfizethetően kell vennie, sok esetben továbbítania a megfelelően formázott jeleket. A földi állomásokat uplinkként, koncentrációs pontként és hálózatkezelő központként is használják. Ezzel szemben az előfizetői termináloknak kevesebb alkatrészből kell állniuk, a működtetésnek és karbantartásnak egyszerűnek kell lennie. [11]

CubeSat szempontból, ajánlott egy RF - földi állomás alkalmazása a valós idejű vezérlések lebonyolításához. Az aszimmetrikus kommunikációs követelmények miatt, az adatátvitel jelentős része lefelé irányul, ezért elegendő egy alacsony sebességű, de robusztus kapcsolat a műhold irányításához. [2]

9.3.1. RF földi állomás rendszertechnikája

Egy-egy állomás rendszertechnikája nagyban függ az alkalmazási területtől és a kommunikáció irányától. [7]

Telephely kiválasztása:

Egy földi állomás telephelyének megválasztásakor jelentős pénz- és időbeli költségekkel számolhatunk. Különösen akkor, ha az adott állomás a földi mikrohullámú rendszerekkel azonos frekvenciasávban kíván működni, ahol potenciálisan magas az RFI. Cél az állomásra vonatkozó összes műszaki követelmény teljesítése, valamint az interferencia minimalizálása. [11] A külföldi mikrohullámú hálózatokkal való konfrontáció elkerülése érdekében, érdemes az országhatártól távol eső telephelyet választani. Emellett a telephelyről, a kívánt antennamagasságból lehetőleg a teljes égboltra való szabad „optikai” rálátást kell biztosítani.[7]

A helyszín megválasztása az RFI szempontjából:

1. A választott frekvenciasávban, szomszédos csatornáknban (spektrális átfedés miatt) működő mikrohullámú állomások előzetes felmérése.
2. A potenciálisan zavaró és zavart állomásokról, a különböző metszési sugarak irányával, topológiai térkép készítése. (domborzat, növényzet, épületek nélkül)
3. Az RFI-nek kitett földi állomások útvonalprofiljainak részletes kiértékelése.

Itt már figyelembe kell venni:

- Föld görbülete;
- domborzat, növényzet, állandó épületek; [11]

A földi állomás elhelyezésével kapcsolatban szem előtt kell tartani:

- amennyiben vevő szerepet is betölt, a „rádióárnyék” elérése érdekében, ideális esetben egy medencében, völgykatlanban tudjuk elhelyezni, melyet minden oldalról nem túl magas hegyek vesznek körül.
- ha az állomás csak uplink irányt képvisel, akkor kevésbé befolyásolja rendeltetésszerű működését a külső zaj- vagy zavarforrás.

A földi állomás telephelyét, környezetét célszerű saját tulajdonként birtokolni, ugyanis így garantálható, hogy a későbbiek folyamán is tiszta, „optikai” rálátás lesz az égboltra LEO, MEO vagy GEO esetén is. Így kiküszöbölhető a természetes és mesterséges akadályok jövőbeli képződése. [7]

Földi állomás létesítményének tervezési szempontjai:

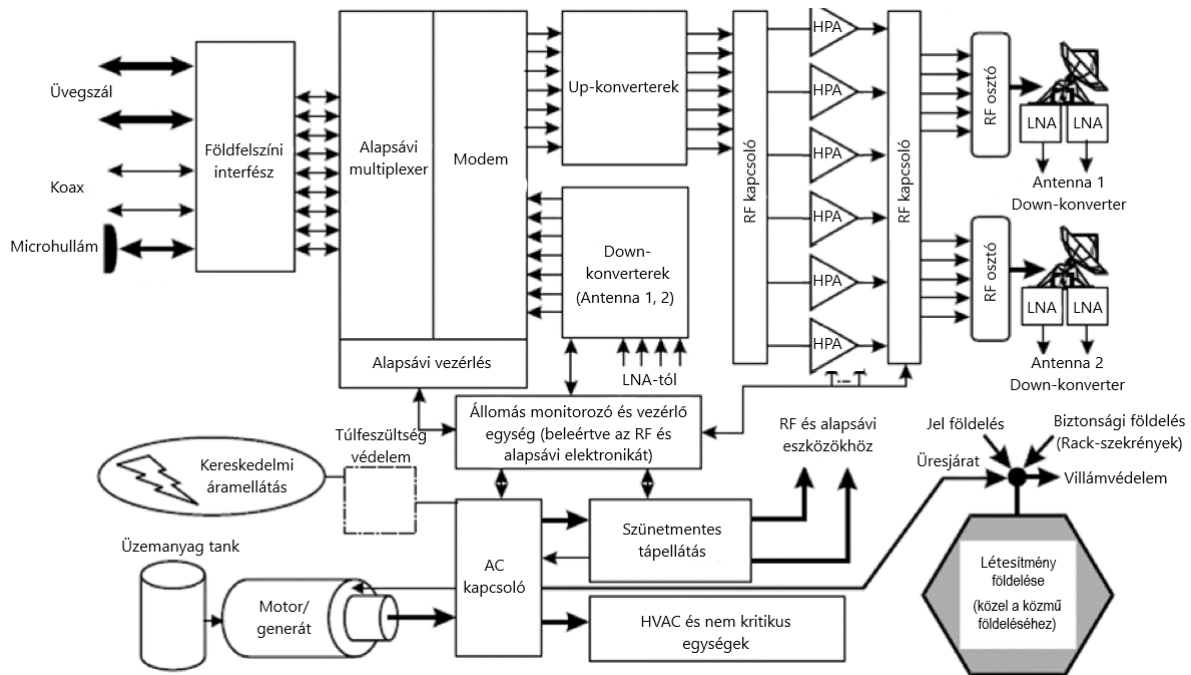
A földi állomások olyanok, mint más összetett műszaki létesítmények, például adatközpontok, vagy a műsorszóró adóállomások. Mindegyik esetben kiemelt szerepe van a kiszolgáló infrastruktúrának pl. szünetmentes áramellátás, klimatizálás. A VSAT vagy TVRO típusú egyszerű felhasználói végberendezések nem igényelnek különösebb infrastruktúrát. Ezenkívül szót kell ejteni a környezeti hatásoknak kitett kültéri berendezésekről: antennákról, rádiófrekvenciás elektronikákról. [11]

Azilyen típusú létesítmények általában vonzzák a figyelmet, ezért akár elrejtve, de biztonságban kell lenniük. [11]

A megbízható szolgáltatás nyújtásához elengedhetetlen:

- kétoldalú erőáramú betáplálás;
- üzemi és tartalék (szünetmentes-UPS) tápellátás;
- fűtés, szellőzés és légkondicionálás (HVAC);
- az épület megfelelő elrendezésének kialakítása (berendezés, üzemeltetés, karbantartása szempontjából);
- védelem kialakítása (villám, RF, tűz, árvíz, földrengés, jogtalan behatolás);
- georedundás telephely kialakítás. [11]

A telephelyet érdemes lakott területtől nem túl messze kijelölni, ugyanis a közművek kialakításánál roppant mód megnőhetnek a költségek. [7]



22. ábra - Rendszerszintű, általános blokkdiagram [11]

A fenti ábrán egy rendszerszintű blokkdiagram látható, amely általánosan mutatja be ezeknek az elemeknek az elektronikai rendszerekkel, valamint egymással való kapcsolatát. A létesítmény tervezésének érdekessége, hogy nincs olyan, hogy szabványos elrendezés. Ehelyett a létesítményt a földi állomás és üzemeltetői egyedi igényei szerint alakítják ki. Lehet, hogy a létesítmény már meglévő bizonyos módosításokkal, de lehet, hogy teljes mértékben új építésű.

A konkrét tervezés általában az építészek, mérnökök és az üzemeltetési csapat együttműködésének terméke. [11]

További tervezési szempontok:

- jövőbeli igények, technológiák figyelembevétele;
- hatékony, gyors, olcsó munkavégzés biztosítása;
- gyakorlati ütemterv;
- telephely megközelíthetősége az év minden napján [11]

Ezek a szempontok olyan építészek, építőmérnökök, villamosmérnökök és egyéb szakemberek szakértelmét igénylik, akik a fent említett problémákkal kapcsolatosan, több évnyi tapasztalattal rendelkeznek. [11]

Felügyeleti és vezérlő (M&C) rendszerek:

A földi állomásokat a műszaki személyzet helyileg, vagy ha a rendszer lehetővé teszi, távolról is üzemeltetheti. A megfelelően megtervezett M&C rendszer lehetővé teszi az alkalmazottak számára, hogy időben észleljék, elhárítsák és megoldják a műszaki problémákat.[11]

A tápellátási rendszerek:

A földi állomás létesítményének az egyik legkritikusabb pontja, mely generátorokkal, akkumulátorokkal biztosítható.

Zavartényezők:

- hálózati ingadozások;
- villámlás;
- véletlenszerű rendszerhibák (pl.: hibás transzformátor);
- természeti katasztrófák (pl.: vihar, földrengés, árvíz) [11]

Fűtés, szellőztetés és légkondicionálás:

Az általános hőmérsékleti követelmény 20°C, szabályozásához pedig légkondicionált levegőre van szükség. A HVAC rendszer ezen kívül a páratartalmat is a biztonságos, előírt tartományon belül tartja. A teljes rendszert érdemes redundánsra tervezni a biztos és hosszú élettartam érdekében. [11]

Villámvédelem:

A földi állomások biztonsági kérdésköreiben a villámvédelem fontos szempont, mind az üzemeltető személyzet, mind a berendezések szempontjából. [11]

Ezzel kapcsolatos fontosabb intézkedések:

- a koaxiális kábelen alapuló összeköttetések átalakítása üvegszálásra, az azonos telephelyen található épületek között;
- a földfelszíni vezetékek cserélése föld alattira;
- nagy mértékű túlfeszültség-védelem a berendezések szekrényeiben;
- villámhárítók telepítése a közeli építményekre, szerkezetekre, antennákra [11]

9.4. Optikai földi állomásról általánosan

Közel valós idejű megfigyelésre van igény számos olyan esemény bekövetkeztekor, mint például természeti katasztrófák, biztonságot veszélyeztető helyzetek, tömeges összejövetelek, ahol esetenként a kommunikációs infrastruktúra nem megfelelően, vagy egyáltalán nincs kiépítve. Ezek az események gyakran előre nem meghatározott helyen és időben jelennek meg és igénylik a gyors beavatkozást. Erre nyújt megoldást például a DLR TOGS (Transportable Optical Ground Station) szállítható állomása. Egy ilyen állomás gyorsan bevethető és közel valós időben fogadja a Föld-megfigyelési adatokat. (pl.: képet, hőértéket stb.) [1]

Jelenleg a lézerkommunikációs földi vevőkészülékek világméretű hálózata csak részben létezik. [13] Tehát a lézerkommunikációs földi állomások száma korlátozott, melyek jellemzően csillagászati obszervatóriumokra épülnek. [1]

A lézerkommunikáció lehetővé teszi a több Gb/s-os adatátviteli sebességet. Ezzel a technológiával kiküszöbölhető, hogy a földmegfigyelő műholdaknak alacsonyabb pályákon kelljen keringeniük a magasabb felbontású képalkotáshoz, míg a kommunikációs műholdaknak magasabb pályákon kelljen lenniük a nagyobb kapcsolati idő elérése érdekében. [13]

Bár a jövőbeli földi-optikai vevők az atmoszférikus problémák elkerülése érdekében a Föld körül keringő platformokon helyezkedhetnek el, az űrlézer-kommunikáció első évtizedében valószínűleg alacsonyabb kockázatú és kevésbé költséges földi vevőkre támaszkodnak majd.[13]

Az atmoszférán keresztüli kapcsolatok esetében meg kell küzdeni az atmoszférikus csatorna kommunikációs sugárnyalábokra gyakorolt káros hatásaival. [13]

A légkörből vagy az űrből érkező sugárnyalábok, a felhőlefedettség csökkentését célzó stratégiák nagy figyelmet követelnek a lasercom rendszerfejlesztőitől. Ezen túlmenően, a száloptikai kommunikációs technológiák nagy része alkalmazható szabadterű optikai kommunikációs rendszerekben, ahol a szálhullámvezetőt precíziós lézersugárral helyettesítik.[13]

9.4.1. Optikai földi állomás rendszertechnikája

A végponttól végpontig tartó optikai kommunikációs rendszerek tervezését a kívánt kapcsolati jellemzők és a transzcieverekre vonatkozó csatorna korlátozások határozzák meg.[13]

A tervezést több fő tényező is befolyásolja, többek között a követési, irányváltási, kommunikációs teljesítménymérleg, egy adott kommunikációs tartományban az adatátviteli sebesség és a bithibaarány (BER), az üreszköz maximális tömege és teljesítménye, valamint a rendelkezésre álló földi és űrbéli adó-vevő apertúra mérete. [13]

Egy optikai kommunikációs kapcsolat tervezésének legfontosabb része az elegendő vételi és követési kapcsolati tartalék, mely a legnagyobb figyelmet érdemli. [13]

Egy adott űrbéli transzciever által biztosított magas adatátviteli sebesség szűk sugárnyalábokat igényel, mely megkívánja a precíziós sugárirányítást. Egy hatékony kapcsolat létrehozásánál minimálisra kell csökkenteni a sugárirányítási veszteségeket. A sugár irányítása fokozatosan nehezebbé válik, ahogy a transzciever apertúra mérete nő. [13]

OGS telephely:

A teleszkóprendszer elhelyezése egy fontos tényező, mely hatással van a rálátás időtartamára. Ahogy egy állandó helyűt, úgy egy mobil rendszert is lehetőleg akadálymentes helyre kell telepíteni, mely így nagyobb látótávolságot tesz lehetővé. [3]

Az időjárás által támasztott követelmények, kihívást jelentenek egy OGS számára. Felhőmentes rálátás (LOS – Line of Sight) szükséges a földi és űrszegmentek között, ami csökkentheti a telephelyek elérhetőségét. Sok jellemzőjük közös a csillagászati obszervatóriumokkal, [1] emiatt a világ legjobb csillagászati helyszínei tökéletes jelöltek egy OGS kialakítására. [13]

Optimális légköri és turbulencia körülményeket érhetünk el nagy tengerszint feletti magassággal, ahol alacsony a páratartalom, a por és felhők okozta káros hatások, valamint alacsony a légköri turbulencia. Egy nagyon elszigetelt hely viszont többletköltségeket ró az OGS-re, ami megvalósíthatatlanná teheti. [13]

Az űreszközök láthatóságával kapcsolatos szempontok szintén hatással lesznek a helyszínválasztásra. Egy kapcsolat során a magasabb elevációs szögek kedvezőbbek, mivel csökkentik az ekvivalens légsűrűséget, valamint a légköri turbulencia hatásait. Geoszinkron pályán lévő műhold esetében a hely közelsége az egyenlítőhöz hozzájárul a zenitszög minimalizálásához, mely csökkentett légsűrűséget biztosít. A konstrukció tervezése során figyelembe kell venni, hogy az égboltot teljes mértékben képes legyen lefedni, és a helyszínen lévő egyéb épületeknek minimalizálniuk kell a kitakarást.[13]

OGS követelmények:

A követelmények meghatározása a tervezési folyamat első lépése. Egy adott küldetésnél minél pontosabban határozzák meg az adó-vevő céljait és követelményeit, annál pontosabb, hatékonyabb lesz a tervezés. [13]

A vevőállomásra vonatkozóan meg kell határozni az apertúra átmérőjét, az állomások számát és helyszíneit, az optoelektronikai vevő teljesítményét. Meg kell határozni a szükséges, minimális adatátviteli sebességeket és BER értékeket, a rendszer megbízhatósági követelményeit, például a kívánt misszió élettartamára vonatkozóan, valamint ésszerű a terhet áthelyezni az „égi” transzcieverről a földi transzceiverre. [13]

3. táblázat - OGS minimális követelményei [19]

Komponensek	Tulajdonságok	OGS	Műhold
Durva követő kamera	Típus	CCD	CMOS
	FOV (fok)	0.33x0.33	2.3x2.3
	Pixelek száma	1024x1024	512x512
Finom követő kamera	Típus	CCD	CMOS
	FOV (mrad)	0.3x0.3	0.64x0.64
	Pixelek száma	128x128	60X60
Jelzőfény	Teljesítmény (W)	2.3	0.11
	Hullámhossz (nm)	671	532
	Eltérés(mrad)	1.5	1.2
OGS követelmény	Pálya-hiba becslés (μrad)	+/- 750	
OGS tulajdonság	Pályapozíció becslési hiba (μrad)	+/- 150	
	Célzási pontosság (μrad)	<5	
	Igazítási hiba (μrad)	<100	
Teleszkóp állvány	Forgási sebesség (° / s)	> 1	

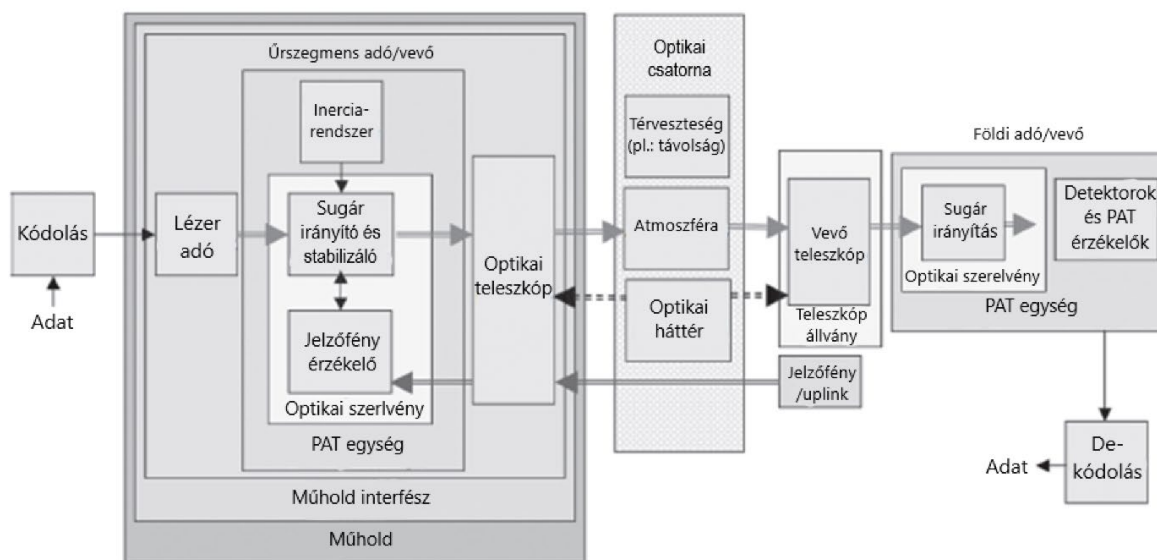
Egy OGS fő célja, hogy légköri turbulencia jelenlétében kétirányú kommunikációs kapcsolatot hozzon létre egy műholdon lévő optikai terminállal. Számos magas szintű követelményt támasztanak az OGS-sel szemben, mely követelmények különböző csoportokba sorolhatók.[13]

Földi vevő alrendszerére vonatkozóan:

- Légköri hatások kompenzálása: láthatóság, csillapítás, elevációs szög, napszög, napterhelés, turbulencia és szóródás;
- Optika: apertúra méret, napfényvisszaverése, és hőmérséklet-szabályozás;
- Uplink lézeres jeladó: térbeli üzemmód minősége, kimeneti teljesítmény, lézerek mennyisége és a légköri hatások mérséklése;
- Vevő: érzékelő típusa, erősítés típusa, zaj, érzékelésihatékonyság, és látómező;
- Jelfeldolgozás: jel-zaj viszony (SNR) és szinkronizáció [13]

Alrendszer technológiák:

Az ábra egy legfelső szintű optikai kommunikációs jelfolyamatot mutat be, amely a műhold adó-vevőből, földi adó-vevő(k)ből és a közbenső optikai csatornából áll. [13]



23. ábra - Kétirányú lézeres távközlési jelátvitel légi adó-vevő, földi adó-vevő és az átviteli csatorna ábrázolásával. [13]

Jelészlelés:

Számos koherens vagy inkoherens vevőarchitektúrát dolgoztak ki a lézerkommunikációhoz. [13]

Fotonszámláló detektorok:

A nagy hatékonyságú fotonszámláló detektorok bevezetésével a koherens optikai detektálás előnye a közvetlen detektálással szemben egyre csökken. A fotonszámlálós közvetlen detektálás elméleti határa 36,2 bit/foton. A hatékony földi érzékelők csökkentik a műhold szükséges sugárzó lézerteljesítményét, így a tömeg és az energiafogyasztás terhei a földi állomás felé tolódnak. [13]

A lézersugár irányítása, stabilizálása:

Az optikai kommunikáció egyik legnagyobb kihívást jelentő aspektusa egy mozgó platformra, vagy onnan indított lézersugár irányítása. [13]

A lézeres kommunikáció fényirányítási problémáját általában két részre lehet bontani: (1) az optikai látómező stabilizálására és (2) a vevő helyzetéhez viszonyított, megfelelő irányítási referenciapont biztosítására. Az előbbit általában a vevőhelyről származó jelzőfény biztosítja, az utóbbit pedig egy magas sáv szélességű vezérlőhurok segítségével érik el, amely érzékeli és korrigálja a platform remegését (jitter). [13]

Ahhoz, hogy hatékonyan továbbíthassuk a jelet a földi állomásra, a lézerkommunikációs adóberendezésnek képesnek kell lennie követni a vevőállomást, oly módon, hogy a remegési hiba kevesebb legyen, mint az adó sugárnyaláb szélességének körülbelül 10%-a. [13]

Egy 1500 nm-es lézersugár szög szélessége, amelyet egy 15 cm átmérőjű, diffrakciókorlátozott teleszkópon továbbítanak, körülbelül 10 μ rad, ezesetben kb.: 1 μ rad a megengedett jitter hiba. [13]

Optomechanikus összeállítás a földi transzceiverhez:

A földközeli összeköttetésekhez különféle teleszkóp-konfigurációk megfelelőek. A meghajtási követelmények közé tartozik a napközeli működés, amikor a lefelé irányuló kapcsolati jel a napkorong néhány fokán belül látható, a zenitszögek akár 80°-os szögben történő működése, a légköri hatások részleges kompenzálása, valamint a teleszkóp

gimbalszerű mozgásának ívmásodperces pontosságot kell biztosítania. [13]

Szükség lesz a háttér és a szórt fény mérséklésére. A lasercom-ra alkalmazható szűrési sémák közé tartozik a térbeli szűrés, több detektor használata, időbeli szűrés, polarizált fény használata, moduláció/kódolás, napfényszűrés, speciálisan tervezett teleszkópok, amelyek megakadályozzák a napfény gyűjtősíkba jutását, valamint a spektrális szűrés. [13]

A teleszkópba jutó napfény káros hatásai közé tartozik az optika vagy a terelőelemek károsodása, a termikusan előidézett aberrációk és eltolódások, a rossz látási viszonyok, valamint a túlzottan nagy mennyiségű szórt fény. [13]

OGS műszerezése:

Az OGS-nek tartalmaznia kell minden olyan műszert, amely a műholdakkal való kétirányú optikai kommunikációs kapcsolatok létrehozásához és teszteléséhez szükséges. Az OGS műszereit is úgy kell megtervezni és üzemeltetni, hogy a turbulenciahatásokat a lehető legnagyobb mértékben csökkentsék. [13]

A szükséges fókusz-sík-műszerezésben két fő rendszer különböztethető meg: a fókuszponti optika (FPO) és a fókusz-sík vezérlés (FPC), beleértve az elektronikát és a szoftvert. [13]

Az FPO-t (Free-Space Optical Communication Payload) szilárdan rögzített optikai padra kell felszerelni, ami mereven kapcsolódik az OGS (Optical Ground Station) szerkezetéhez vagy talapzatához. Így elkerülhetőek a teleszkóp és az FPO közötti differenciális rezgésekből származó további zavarok. A teleszkóp és az optikai pad közti sugárút lehetőleg izolált legyen. Az optimális megoldás az lenne, ha a teleszkóp és az optikai pad közötti fényút vákuum szigetelve lenne. [13]

A vétel és a nyomkövetés megvalósításához aktív elemekre lehet szükség, mely tükröknek részben képesnek kell lenniük az atmoszférikus turbulencia kompenzálására, a sugár pontosságának és stabilitásának javítása érdekében.

A COTS finom kormányzási megoldások három osztályba sorolhatók: mechanikus, piezoelektromos és mikroelektromechanikus (MEMS). [2]

A hagyományos mechanikus FSM-ek általában hangtekerceket használnak,

melyek szükségtelenül nagy tükrökkel, méretekkel rendelkeznek. A nagy mozgó tömeg érzékennyé teszi a rendszert a vibrációkkal, ütésekkel szemben. [2]

A piezoelektromos technológia erős nemlinearitása és hiszterézise miatt, komplex vezérlést igényelne. [2] A MEMS kategória tovább bontható, elektrosztatikus és elektromágneses egységekre, bár utóbbit már nem gyártják. Elektrosztatikus verziókból a Mirrorcle Technology Inc (MTI) kínálatából válogathatunk. Ezek a tükrök elegendő mérettel: 1-6 mm közötti átmérővel rendelkeznek. [2]

Az OGS és a műhold fedélzetén lévő optikai eszközök közötti kapcsolat létrehozásához az OGS műszernek három fő funkciót kell teljesítenie: a műhold optikai jelének vétele és nyomon követése, megbízható optikai nyaláb továbbítása a műholdra, valamint mérni mind a vett, mind az átvitt jel jellemzőit, mely funkciókat az FPC biztosítja. [13]

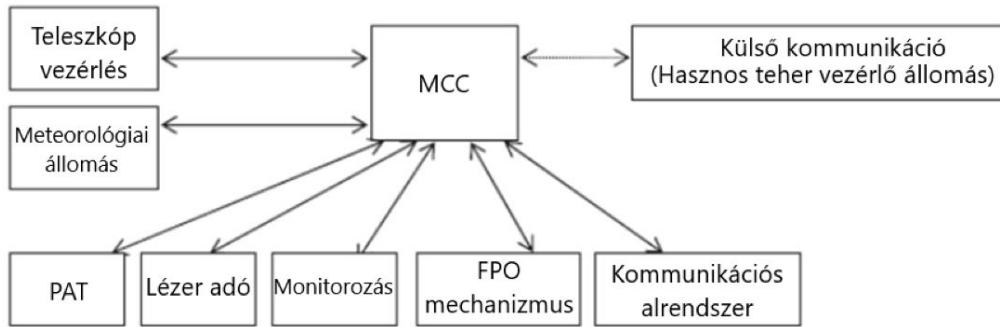
A műholdjel vételéhez és követéséhez (a teleszkóp vezérlésén kívül) az FPC-nek tartalmaznia kell az FPO-ba beépített összes mechanizmus vezérlését (nyalábfókusz, sugárdivergencia, sugárforgatás, sugárosztás, polarizációs lemezek irányítása). Az átvinni kívánt jel generálásához az FPC-nek tartalmaznia kell egy vezérlőt az átviteli lézerrendszerhez (TLAS-Transmit Laser System) és fő paramétereire (hullámhossz és teljesítmény). [13]

Végül a jelek és a kapcsolat jellemzéséhez az FPC-nek tartalmaznia kell egy adatátviteli és fogadóberendezést (modulátor és demodulátor), egy vevő front-end-et (RFE) (közelségi elektronikájával), kommunikációs (BER) analizátort, és sok egyéb általános célú műszerezést a sugár jellemzéséhez (spektrométert, polarimétert hullámfront érzékelőt (WFS)). [13]

Külső kommunikációs képességeket is kell tartalmazni annak érdekében, hogy lehetővé tegye a kapcsolat kialakítását a különböző műholdvezérlő állomásokkal, főként a pálya és a teljesítmény információk megszerzéséhez. [13]

További kiegészítő berendezéseknek is rendelkezésre kell állniuk, hogy információval szolgáljanak azokról a körülményekről, amelyek befolyásolják a kapcsolat teljesítményét (monitorok és meteorológiai állomás megfigyelése). Utóbbiakat kalibráláshoz és monitorozáshoz használják, segítséget és alapinformációkat nyújtva az

OGS üzemeltetőknek.[13]

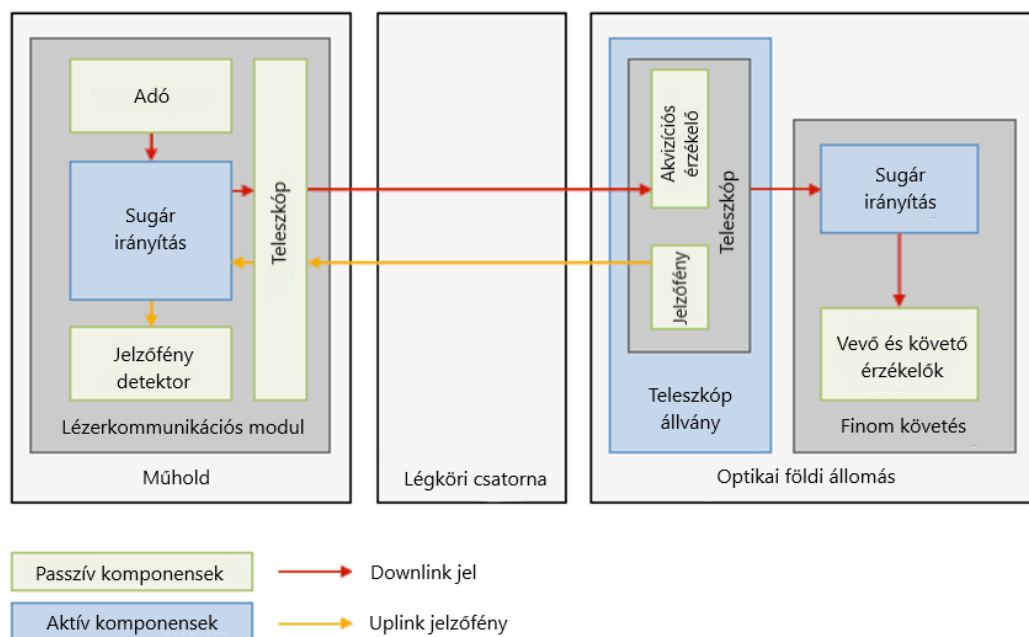


24. ábra - FPC blokkdiagram [13]

A földi állomás üzemeltetési költségének és erőforrásainak optimalizálása érdekében a műszerezés összes vezérlését egy FPC fő vezérlő számítógépben (MCC) kell központosítani, mely egyetlen interfészként szolgál az OGS kezelője és az FPC között. [13]

Az alábbi ábrán egy általános lézerekommunikációs blokkvázlat látható, mely magába foglalja: a teleszkópot, a tartót, az adatgyűjtő érzékelőt, a finomkövető érzékelőt, ennek működtető egységét, valamint adót és vevőt. Ami a vevőt illeti, három általános architektúra létezik: közvetlen érzékelés előerősítés nélkül, közvetlen érzékelés előerősítéssel, valamint koherens érzékelés, melyek közül a legnépszerűbb a közvetlen érzékelés fotodiódával (pl.: APD).

Egy földi állomás műszerezettségének segítenie kell, az adatgyűjtést és a követést egyaránt, így érzékelőket és vezérlő, működtető egységeket tartalmaznak. Egyes állomások több szintű mutatórendszerrel vannak felszerelve, a kívánt mutató pontosság elérése érdekében. A finom, pontos követésre alkalmaznak például gyorsan kormányozható, irányítható, dönthető (FSM) tükröket. [1]



25. ábra - Általános lézerkommunikációs blokkvázlat [1]

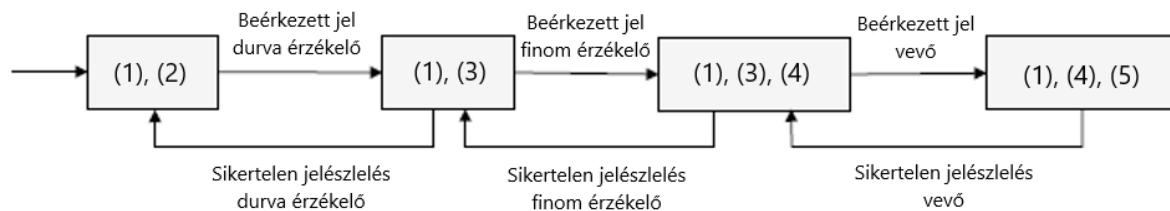
A keskenyebb sugarak miatt a lasercom linkek hatékonyabbak. Ez a hatékonyság viszont egy hatalmas kihívást állít a mérnökök elé, mégpedig a célra való pontos sugárirányítást. A jelenlegi rendszerek, a technológia ívmásodperc alatti hibát követel. Ez azt jelenti, hogy nem valósítható meg csupán teleszkóp mozgatással, kormányzással, így finom mutatófokozatot igényel. Mindezek előtt viszont az állomást be kell állítani, kalibrálni. Ehhez szükségünk van egy mutatómodellre, mely csillagok, vagy egyéb ismert égi objektumok megfigyelésével kezdődik.[1]

Egy általános lasercom terminál mutatási, adatgyűjtési és követési lépéseit mutatja be az alábbi ábra. Egy adott terminál zárt hurokkal követi a szemben lévő terminál jeleit. [1]

Műhold-Föld közötti kommunikációs kapcsolat létrehozásakor, mivel a Földön több energia áll rendelkezésre, mint a műholdon, ezért az első kapcsolatot általában a földi állomás kezdeményezi, egy szélesebb nyalábbal rendelkező beacon jel segítségével. Ez a kapcsolatteremtési eljárás biztosítja, hogy a terminálok „láthassák” egymást.[1]

A lasercom terminálok többsége beacon jeles követést alkalmaz, hogy meghatározzák a földi állomás helyét. Ebben a megközelítésben a földi állomás egy széles sugárral „megvilágítja” a műholdat, amely így korigálva a mutatóját képes „megvilágítani” a földi állomást, így lehetőséget adva egy lefelé irányuló kapcsolat létrehozásához. Léteznek

beaconless rendszerek is, melyek nem világítják meg a műholdat ilyen széles nyalábbal, például: deep space küldetések esetén. [1] Ezen rendszerek precíziós pályameghatározását ephemeris, vagy GPS segítségével végzik. [2] A gyakorlat viszont azt mutatja, [1] hogy bár elektronikai szempontból egyszerűbb felépítésű, de mégis [2] rendkívül nagy kihívást jelent egy ilyen rendszer megvalósítása. Általánosságban egy földi állomás szemszögéből a kapcsolatteremtés egy kezdeti mutatással kezdődik, a műhold várható pozíciója felé. Ezt a pozíciót a műhold orbitális paramétereiből határozzák meg, mely származhat a műholdon lévő GPS adatokból, rádiótávolság-mérésből, radarból vagy TLE adatokból. [1]



26. ábra - Mutatási, beszerzési és követési komponensek [1]

- (1) Nyílt hurkú pályakövetés
- (2) Durva keresés
- (3) Zárt hurkú durva visszacsatolás
- (4) Zárt hurkú finom visszacsatolás
- (5) Kapcsolat fenntartás [1]

Amikor a műhold a látótérbe ér, a földi állomás akvizícióba kezd. (1) Az állomás elkezd követni a műhold várható röppályáját egy nyílt hurkú követéssel. Amennyiben nem észlel jelet, (2) pásztázást végez, míg jelet nem talál. (3) Az akvizíciós fázisban a földi állomás durva érzékelőket (pl.: kamerákat) használ, széles FOV-val. (4) Amint észleli a lefelé érkező jelet, a földi állomás lezárja a követési hurkot és használni kezdi a finom mutató rendszert. (5) Amennyiben kialakult a megfelelő követési pontosság a kommunikáció megkezdődhet. [1]

A statikus mutatással ellentétben, a gyorsan mozgó objektumok lekövetése lényegesen nagyobb kihívás elé állít egy optikai földi állomást, ugyanis a maximális sebessége egy 400 km-es pályamagassággal rendelkező LEO műholdnak körülbelül 1,1 °/s, ami 264x gyorsabb, mint például egy 15 ívmásodperc/s sebességgel „haladó” csillag követése. Zenit közeli

áthaladásoknál az azimut elfordulási sebesség pedig 10 °/s-os sebességet igényelhet. [1]

Következtetés:

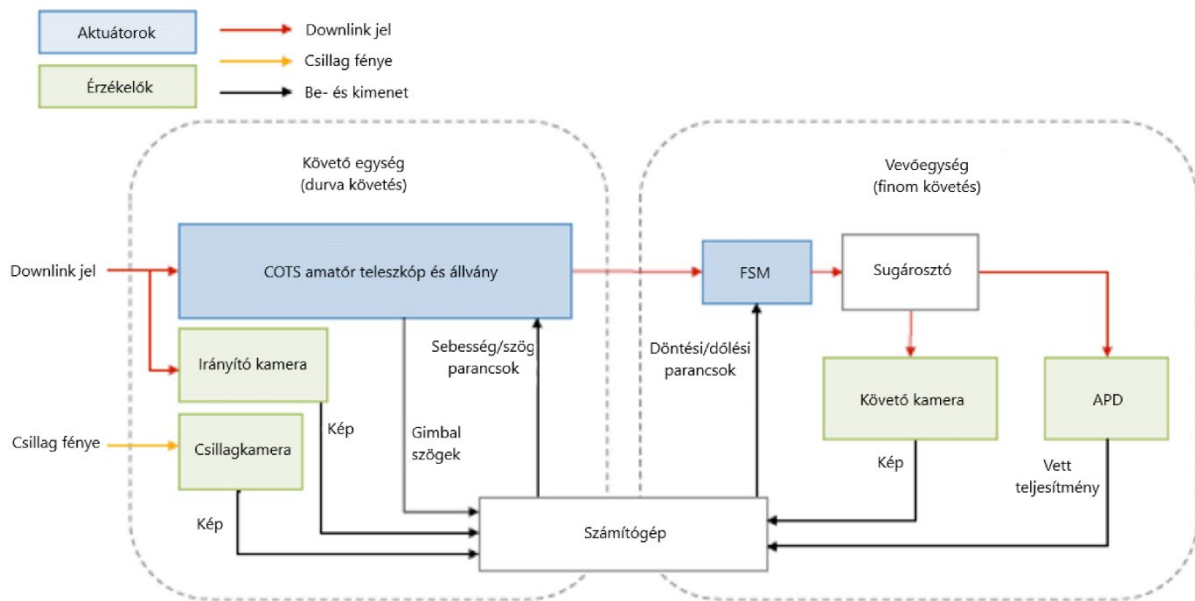
A földi állomások diverzitása hatékonyan kezeli a felhőzetet. A földi távcső bemeneti nyílásánál elhelyezett nagy átmérőjű membránszűrők segítenek a kis napszögeknél történő kommunikációban.[13]

A jövőben a lasercom technológia várhatóan forradalmasítja az űrendszer architektúráját a kapacitás növelésével, ugyanakkor a tömeg, a teljesítmény és a méret csökkentésével. Az általános telekommunikációs protokollok bevezetésének pedig várhatóan csökkentenie kell az üzemeltetési költségeket. [13]

Számos földközeli kommunikációs kapcsolat esetén a lézerkommunikációs technológia készen áll a telepítésre. [13]

9.4.2. COTS OGS működési elve

A rendszer egésze, a rekesz mérete 1550 nm-es downlink hullámhosszra tervezve, mivel ez a leggyakoribb downlink hullámhossz, amit alkalmaznak optikai (CubeSat) műholdakon. [1]



27. ábra - COTS amatőr földi állomás működési elve [1]

Az blokkdiagramon három jelutat különböztetünk meg: (1) downlink jel, (2) csillag fénye, csillagból származó jel, (3) bemeneti és kimeneti jel útja [1]

A rendszer két egységre bontható, nyomkövető szerelvény és vevőegység:

A nyomkövető egység egy amatőr teleszkópból és tartóból áll, mely fel van szerelve egy csillagkamerával és opcionálisan egy vezérlő, irányító kamerával, ez utóbbit a csillagkamera képes helyettesíteni. Abban az esetben, ha TLE adatok alapján határozzuk meg a műhold pályáját, az eredő hiba nagyobb lehet, mint a FOV, ezért ekkor szükséges egy irányító kamera.[1]

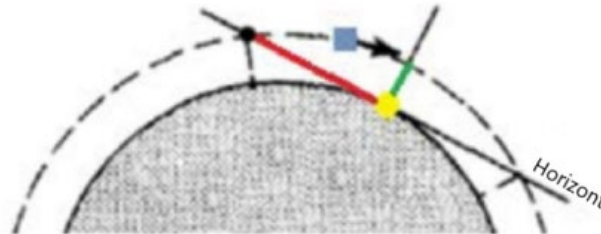
A vezérlő egység egy számítógép, ami a teleszkóp állványának, mozgató mechanizmusának irányításához szükséges. Ennek a kalibrálása a csillagkamerából származó képek, adatok feldolgozásával végezhető el. A laptop visszajelzéseket kap az inkrementális kódolótól, és sebességparancsokat ad a követés során. [1]

A vevőegység felelős a finom mutatóért, mely gyorsan kormányozható tükrökből, nyomkövető kamerából és APD vevőből áll. Ez az egység közvetlenül a teleszkóp végére, hátoldalára van szerelve. A lefelé irányuló kapcsolati jel a nyomkövető kamera és a vevő között megoszlik. A nyomkövető kamera visszajelzéseket ad a laptop számára, mely feldolgozza és kormányzási parancsokat állít elő. Az FSM meghajtásához szükséges analóg feszültséget, a laptop digitális tip/tilt parancsaiból származtatjuk. A laptopot továbbra sem a kommunikációs adatok feldolgozására szolgál, hanem a nyomkövetés biztosítására. Ehhez az APD teljesítményméréseit is felhasználja. [1]

Működési elve szerint a felhasználó meghatároz a csillagkamerában egy pixelt, mely a követési detektor közepének felel meg. Ez a pixel állítja be a csillagkövetőben a távcső LOS értékét. Ezután a felhasználó egy automatikus mutatómodell kalibrálást végez: a csillagkamera képet készít, majd kiszámítja a mutatómodell paramétereit. Ezután a rendszer készen áll egy objektum nyomon követésére. [1]

A nyomkövetéshez a felhasználó manuálisan betölti a TLE fájlt. A nyomkövetés elindítása után a teleszkóp a kívánt pozícióba fordul, a horizont azon pontjára, ahol a műhold felbukkanása várható. A csillagkamerával a durva visszacsatolás érdekében két másodpercenként készíteni kell egy képet, majd a legfényesebb objektumok azonosítása után a távcső LOS értékének korrekciója következik. Ezután az FSM-mel finom nyomkövetés kezdeményezhető. Az FSM spirális pályán pásztázást végez, míg a cél meg nem jelenik a nyomkövető detektoron. Ezt követően a rendszer automatikus visszacsatolást alkalmaz 60 Hz-en. [1]

Minél távolabb van a CubeSat a Föld felszínétől (horizonthoz közel), annál nehezebb észlelni és követni. [3]



28. ábra - Szögtávolság diagram [3]

Ugyanakkor a Zenitben, mikor a legkisebb a távolság, egy másik tényező nehezíti az észlelést. Zenitben körülbelül 5,5-ször nagyobb egy 400 km-es LEO pályán keringő műhold szögsebessége. Ezeket összesítve még mindig a horizontnál van a legnagyobb esély a műhold észlelésére és követés megkezdésére. [3]

Egy beacon jel megvalósításához több út is választható: 850 nm-es uplink jeladó, vagy egy LED-tömb, ami könnyebben megvalósítható, valamint olcsóbb is. [1]

9.4.3. Egy amatőr OGS alapvető hardware elemei

A célműhold és az alkalmazott távcsőrendszer tulajdonságai egyaránt befolyásolják a kívánt objektum „megszerzését”, lekövetésének sikerességét. Ilyen tulajdonságok például a CubeSat láthatósága, mérete, anyaga, tájolása, a teleszkóprendszer testreszabhatósága, számítógépes vezérlésre alkalmassága. [3]

A CubeSat anyaga az egyik olyan tényező, mely befolyásolja a láthatóságát, a vizuális nagyságát. Ez egy skálán elhelyezett érték, mely egyfajta rangsorolási rendszer, amely a visszavert vagy áteresztett fény mennyiségét írja le. Ez határozza meg, hogy egy adott objektum látható-e például szabad szemmel vagy kamerával. [3]

A napfény hatására, a visszavert egyfajta passzív megvilágításnak tekinthető. Ekkor nincs energiaátadás, energiaellátás sem a Földről, sem magáról a műholdról. Aktív megvilágítás esetén a műholdat lézerrel világítjuk meg, vagy maga a műhold bocsát ki fényt. [3]

A látszólagos nagyság, látszólagos magnitúdó számos tényezőtől függ: légköri viszonyok, műhold mérete, alakja, kora, megfigyelőtől és Naptól való távolsága, geometriája. Minél kisebb ez a szám (lehet negatív is), annál fényesebb, világosabb az objektum. [3] 1 lépés a skálán 2,512-szeres fényerőváltozást jelent. Például egy 3U méretű (kiálló elemek nélküli) CubeSat, 450 km-es LEO pályán +10,1-es, míg egy 1U-os +12-es maximum magnitúdó értékkel rendelkezhet. Ugyanakkor könnyen előfordulhat, hogy az adott objektum egyik alkalommal látható, például egy következő áthaladáskor viszont nem. Ez a vizuális nagyság növelhető minél simább felülettel, kiálló antennákkal és napelemekkel. Ez a skála fontos tényező a teleszkóp és rekesznyílásának megválasztásánál. [18]

Egy ilyen rendszer alapvetően 5 fő elemből épül fel: (1) csillagkamera, (2) teleszkóp és állvány, (3) vezérlő számítógép, a követésért felelős (4) szoftver és (5) detektor vagy kamera. [1]

(1) csillagkamera:

A csillagkamera kiválasztásánál figyelembe kell venni a műhold méretét (pixelben), a költségeket és a szoftverkompatibilitást. [16]

A kamera kiválasztását azonban számítások előzik meg, mely egy közelítést ad a kívánt FOV-ra. Ehhez a Wert által bemutatott módszert alkalmazhatjuk. [1]

(2) Teleszkóp és állvány:

Egy CubeSat megtalálásához és nyomkövetéséhez két távcsőre is szükség lehet. Egy rövidebb gyújtótávolsággal és egy hosszabb gyújtótávolsággal rendelkezőre. Az előbbi teleszkópot általában a főtávcsőhöz rögzítik, mely a rövidebb gyújtótávolság miatt szélesebb FOV-val ($4-5^\circ$) rendelkezik, így ezt használják a célpont megtalálására, majd ezt követően a célpontot a főtávcső középpontjába helyezik. A korábbiakra hivatkozva, célszerű minél nagyobb apertúrával rendelkező (COTS) főteleszkópot választani. [3]

Ami a teleszkóptartókat illeti, a leggyakoribb állványtípusok a német ekvatoriális (GEM) és a magasság-azimut (alt-az). Ezeket az állványokat gyakran globális helymeghatározó rendszerrel (GPS) is ellátják, mely pontos időzítést biztosít. A GEM típusú állvány időt igényel, mikor a célpont átlépi a középvonalat, mivel ekkor az

ellensúlynak át kell orientálódnia. Emiatt az alt-az tartók zökkenőmentesebb lekövetést biztosíthatnak. [3]

Ezek a teleszkóp-állvány kombinációk gyakran beépített szoftverrel vannak ellátva, [3] a precizitás növelése érdekében, az említett szoftverek helyett, például TPOINT alapú teleszkópmodelleket tartalmazó szoftverrel (Software Bisque: TheSkyX), jobb mutatói pontosság érhető el. Sajnos ezek a beépített igazító szoftverek nem elég pontosak ahhoz, hogy lézeres kommunikációra legyenek alkalmasak. Professzionális szoftverek pontosságára van szükség. [1]

(3) Vezérlő számítógép:

A tartószerkezet, csillagkamera, nyomkövető kamera, kormányozható tükrök vezérléséről egy számítógép, [1] ideális esetben egy laptop gondoskodik, figyelembe véve a mobilitást, [16] mely távoli eléréssel tovább kombinálható. [20]

(4) Szoftver:

Szükség van egy felhasználói felületre is, hogy a felhasználó kapcsolatba léphessen a hardverrel. [1]

Vannak olyan illesztőprogramok, szoftverek, melyek egyszerre több berendezés vezérlését, különböző szoftverek egyidejű használatát teszik lehetővé, [3] ilyen például az FSTrack. Egy szoftver, mely ideális esetben egyesíti a szükséges programokat. [20] Kereskedelmi forgalomban lévő szoftvereknél viszont figyelni kell a kompatibilitásra. Ebben segíthet az ASCOM webhelye, ahonnan ingyenesen tölthetünk le illesztőprogramokat a COTS rendszer összekapcsolásához. A legtöbb teleszkóp ilyen kereskedelmi szoftverrel már párosítva van. [3]

Az Autostar II szoftver, például késleltetési problémákat is képes kezelni, megoldani, mely kulcsfontosságú a sikeres műholdkövetéshez.

Egyéni, például MATLAB-ban íródott szoftverek használata is opció lehet, de ebben az esetben ügyelni kell a rendszeres frissítésekre és karbantartásokra. [3]

(5) Detektor vagy kamera:

A vevőegységnek kompaktnak kell lennie az amatőr távcső hátoldalán, így nem lehetséges Coudé vagy Nasmyth fókusz. Kicsi és könnyű alkatrészekből kell felépülnie.[1]

A detektor vagy kamera feladata, hogy a teleszkópon áthaladó fényt kvantált jelekké alakítsa (például foton-számlálással), rögzítse, megjelenítse. A csillagászati kamerákat két típusra bonthatjuk, töltés-csatolt (CCD) és komplementer fém-oxid félvezető (CMOS). Előbbi kondenzátorok soraiból áll, amik az expozíció során töltődnek fel. Utolsó sora egyfajta soros regiszterként funkcionál, mely a töltéserősítés után digitalizációt hajt végre, így létrehozva a képet. Utóbbi pixelenkénti áramkörökkel rendelkezik, mely gyorsabb feldolgozást biztosít. Ennek ellenére a CCD detektorok fényérzékenyebbek, nagy chip és pixelmérettel rendelkeznek, így például 1U LEO CubeSat nyomkövetéshez alkalmasabbak. [3]

A detektor mérete általában mm-ben van megadva és fontos tényező a FOV tekintetében. Minél nagyobb a detektor, annál nagyobb FOV-t eredményez, mely jelentős a mutatósi hibák tűrése kapcsán. [3]

A pixelméret minél nagyobb, annál érzékenyebb a fényre (CubeSat észlelés szempontjából előnyös), viszont a felbontása csökken. [3] Mindemellett egyidejűleg több pixel is kiolvasható, azok csoportosításával (binning). Ennek előnye a zajcsökkentés és a túlzott mintavételezés elkerülése fényesebb objektumoknál. Nagyobb, fényesebb objektumoknál javasolt a 2x2 vagy 3x3-as binning. [18]

(+) Opcionális kiegészítő lehet egy körülbelül 400Wh-ás, hordozható akkumulátor, melyről nagyjából 3 órán át üzemeltethető a laptopon kívül ~40 W-os állomás. [1]

9.4.4. Rendelkezésre állás, megbízhatóság

Az atmoszférikus rendelkezésre állás, amit főként a felhőfedettség miatt bekövetkező jelcsillapítás befolyásol, korlátozást jelent az optikai kommunikációs kapcsolatok számára. [13]

Egy adott meteorológiai állapot megközelítőleg egy 250 km-es cellán belül jellemző, így több optikai vevőállomás kiépítésével, amelyek néhány száz kilométerre vannak egymástól, közel teljes rendelkezésreállás biztosítható, vevőállomás és időjárás elérhetőség szempontjából.[13]

Felhőkkel kapcsolatos csillapítás következménye:

- Az időjárás statisztikák arra utalnak, hogy a legjobb obszervatóriumi helyeken egyetlen állomás elérhetősége sem lesz jobb mint 65%. A kapcsolati rendelkezésre állást tovább rontja, ha jelentős az üresközettel való kapcsolatfelépítési ideje, ha az adott állomás technikai problémák miatt működésképtelen. Ezért több földi állomásra van szükség, hogy javítsuk a lefedettség valószínűségét.
- Egy olyan alrendszer tervezése esetén, amely egy felfelé irányuló lézeres jeladóra támaszkodik (a vevőállomásról sugárzott), mind a felfelé, mind a lefelé irányuló kapcsolat kiesésével számolni kell, ha a felhők hatására a lefelé irányuló kapcsolat eltér a kívánt beesési pozíciótól. [13]

Az RF tartalék szerepe:

Az időjárástól függő rendelkezésre állás jelentős működési korlátozást jelenthet egy optikai kommunikációs kapcsolat számára, mely nem elfogadható a kritikus manőverek esetén, legyen az pályára állítás, pályakorrekció vagy egyéb biztonságot szolgáló funkció. Az optikai terminál keskeny sugárnyalábja miatt nehezebb a vészhelyzeti helyreállítás kizárólag az optikai távközlési alrendszer használatával. [13]

A kapcsolat rendelkezésre állásának növelése érdekében jelentősen nagyobb teljesítmény mérlegre lehet szükség a feltételezettől, valamint a földi vevők térbeli változatosságára az optikai kommunikáció időjárásfüggő rendelkezésre állásának enyhítéséhez.

Alternatív megoldásként egy kis kapacitású RF tartalékrendszer hozzáadása az optikai kapcsolathoz rossz kapcsolati körülmények között is jelentősen javíthatja a kapcsolat rendelkezésre állását. [13]

9.5. RF-Optikai földi állomások összehasonlítása

Az optikai műholdas kommunikációnak jól ismert előnyei vannak a rádiófrekvenciás rendszerekhez képest. A sáv szélesség, az adatsebesség nagymértékű növekedése, a terminál tömegének, energiafogyasztásának csökkenése, magas apertúra erősítés, valamint nincs sáv szélesség- és frekvenciakorlátozás, nincs elektromágneses interferencia sem. [13]

Legfőbb hátránya viszont, hogy rendkívüli célzási, vételi, követési (PAT) precizitás, pontosság szükséges a kapcsolat megvalósításához és fenntartásához. [13]

Míg a műhold-műhold optikai kapcsolatok közel 100%-os hozzáférési valószínűséggel rendelkeznek, addig a Föld-műholdas optikai összeköttetés esetén az esetleges felhőlefedettség csökkenti az említett valószínűséget. Az optikai kapcsolatokban alkalmazott rövid hullámhosszok miatt a légkör törésmutatójának a légköri turbulenciából adódó inhomogenitásai jelentős torzulást okozhatnak a hullámfrontokon, ahogy azok áthaladnak a kapcsolat atmoszférikus szakaszán. A légköri turbulencia által kiváltott dinamikus torzító hatások jelentősen befolyásolhatják a kapcsolat teljesítményét. [13]

A downlink irányú kapcsolat esetén, ahol a zavar a vevő közelében található, káros hatások alakulhatnak ki. Ilyen például a szcintilláció, vagyis a vevő apertúrájával gyűjtött teljesítmény véletlenszerű ingadozása. [13]

Uplink irányú összeköttetéseknél, ahol a turbulencia az adóhoz közeli útszakaszon összpontosul, a szcintilláció mellett úgynevezett nyalábeffektusok is előfordulhatnak. A nagyméretű törésmutató inhomogenitás a teljes nyaláb eltérítéséhez vezethet, a sugár által keresztezett kisebb inhomogenitások pedig sugártorzulást okozhatnak. [13]

Az optikai vagy lézerkommunikációs technológiák szűk nyalábszélességük és nagy vivőfrekvenciájuk miatt kielégítik a megnövekedett igényeket, ugyanakkor jelentős fejlődési lehetőséget is kínálnak a hagyományos mikrohullámú rádiófrekvenciás kommunikációhoz képest. Ilyen például a frekvencia újrafelhasználása, a jobb csatornabiztonság, csökkentett tömeg (RF/2), csökkentett energiafogyasztás (RF/2), csökkentett méret, multifunkcionalitás más elektrooptikai műszerekkel. [13]

Ezek a tulajdonságok vonzó lehetőséget kínálnak a nagy sáv szélességű alkalmazások számára. [13]

A kisebb kapcsolati veszteségek az alacsonyabb sugárdivergencia miatt, a diffrakciós törvények által uralt nagyfrekvenciás lézerkommunikációs nyalábok szélessége három-négy nagyságrenddel keskenyebb, mint egy alacsonyabb frekvenciájú RF kommunikációs nyaláb. Következésképpen az átvitt jel kevésbé veszteséges módon továbbítható a vevőhöz. Az ebből

eredő előnyök közé tartozik a száloptikai kommunikációhoz hasonló adatátviteli sebesség, a csökkentett SWaP (méret “S”, súly “W” és energiafogyasztás “P”), valamint a távközlési funkcióval együtt alkalmazható precíziós navigáció, nyomkövetés. [13]

A korlátozott spektrumhasználatú rádiófrekvenciás kommunikációs rendszerekkel ellentétben az optikai kapcsolatok nem tartoznak a frekvenciaszabályozás hatálya alá. Ez vonzó lehetőség a nagy sáv szélességű alkalmazások számára. A frekvencia újrafelhasználása további előnyt jelent, amelyet a kommunikációs lézersugár kis eltérési szöge tesz lehetővé. [13]

A lézerkommunikációs kapcsolatok hatékonyan kihasználják azt a hatalmas és folyamatos befektetést, amelyet a száloptikai iparba fordítottak az internet globális, exponenciális növekedése miatt. [13]

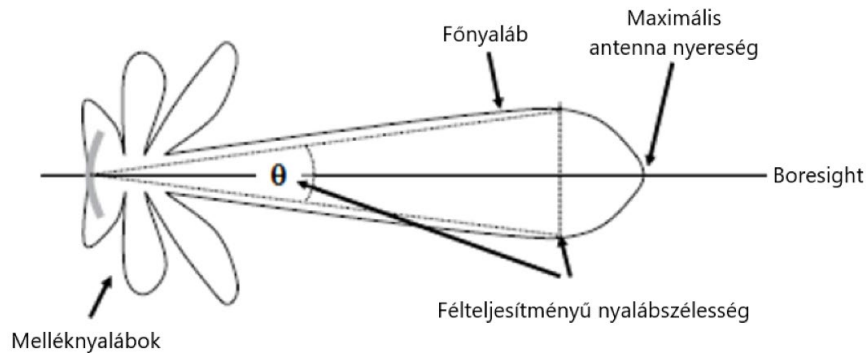
A rádiófrekvenciás rendszerekkel ellentétben, a lézerkommunikációt nehéz megállítani és zavarni, ami taktikai, katonai előnyöket is jelenthet. [13]

LEO pálya esetén, az optikai műholdas összeköttetés kapcsolatának gyorsan fel kell épülnie, mely dinamikus, rendkívül magas célzási precizitást igényel, ami a tömeg, komplexitás és a hibalehetőségek növekedését jelentheti, mind a földi, mind az űrben lévő adó-vevő számára.[9]

Az optikai kommunikáció felépítése és fenntartása során különböző fizikai zavaró tényezők jelenhetnek meg. Az űreszköznek ebben az esetben is tartania kell a nyaláb irányítottságát az adó és a vevő között, a vibráció és egyéb zavarok ellenére. Leggyakrabban gimbalokat alkalmaznak az irányban tartásra. A rendszer hatékonyságát tovább növelhetjük a gimbalra helyezett gyorsan irányítható tükrökkel, piezoelektromos kristályok alkalmazásával.[9]

9.5.1. Nyílásszögek vizsgálata

A széles átviteli nyalábszélességek pazarolják az energiát. A kapcsolat hatékonysága növelhető, ha az átvitt energia nagyobb részét a földi állomás felé irányítjuk például nagyobb adóantenna-erősítéssel, magasabb vivőfrekvenciával. [2]



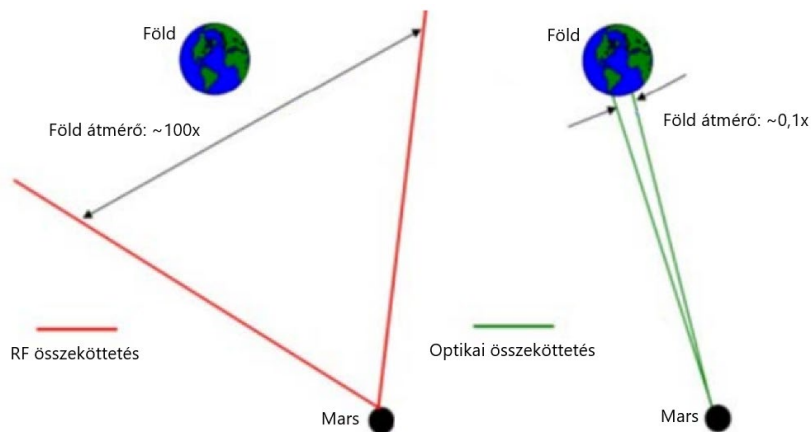
29. ábra - Antenna nyaláb [12]

A sugárzási irány a maximális erősítés irányára vonatkozik. Az $\frac{1}{2}$ (3dB) teljesítmény nyalábszélesség az a kúpszög, amelynél az erősítés a maximális nyereség irányához képest 3dB-lel kisebb. [12]

A legtöbb antennának van oldalsugárzása, sőt néha az antennatükör mögött is mérhető némi kisugárzott teljesítmény. Ezek a melléknalábok zaj- és interferenciaforrások lehetnek.[12]

A rádiófrekvenciás és optikai alkalmazás egyik legszembetűnőbb különbsége a lábnyomok mérete.[12]

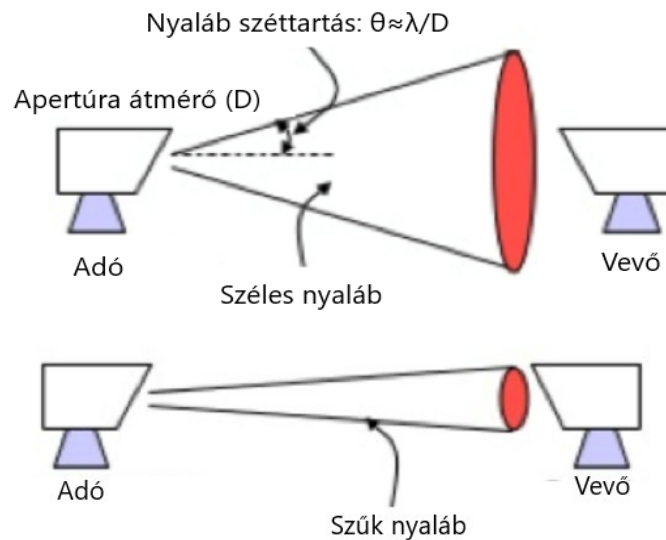
Ellentétben az RF rendszerekkel, amelyek általában több száz vagy több ezer kilométer átmérőjű sugárnyalábokkal rendelkeznek, a lasercom rendszer sugárátmérője gyakran csak néhány kilométer. Ebből fakad az a jelentős mérnöki kihívás, ami a rekesznyílás pontos irányának eléréséből származik. [2]



30. ábra - Nyalábszélesség RF és Optika esetén [9]

A kisugárzott elektromágneses sugarak főnyalábból és mellényalábokból állnak. A vevő apertúrájának a magasabb nyereség, maximális SNR érdekében a fő nyalábra kell fókuszálnia.[9]

RF esetén a nyaláb szélességét jellemző „theta” értéket meghatározhatjuk a hullámhossz és apertúraátmérő hányadosából, mely összefüggés optika esetén is fennáll. [9]



31. ábra - Nyalábszélesség RF és Optika esetén [9]

Optikai frekvenciákon rendkívül nagy nyereség érhető el, fizikailag kis rekesznyílásokkal.[2] Ezen összeköttetésnél használt nagyságrendekkel magasabb frekvencia, nagyságrendekkel rövidebb hullámhosszokat jelent, mely jelentősen csökkenti a Θ szöveget, ami így egy sokkal koncentráltabb nyalábot eredményez a rádiófrekvenciához viszonyítva. Ennek pozitív vonzatai a kisebb szóródás, adott térrészre eső nagyobb energiasűrűség, magasabb SNR. Például mélyűri (Deep Space) összeköttetés esetén követelmény a magasabb adatátviteli sebesség, a pontos, precíz célzás, valamint a kommunikációra szánt energia mennyiségének növelése. Egy mélyűrben lévő műhold optikai adattovábbítás esetén sokkal kevesebb energiát használ fel, mint rádiófrekvenciás összeköttetésnél, amely adott esetben élettartamnövekedést jelenthet, másrészt kiválthatja a komplex antennarendszerek használatát. [12]

10. Rádiófrekvenciás tisztaság és interferencia elemzés

A rádiókommunikáció alapelve szerint más felhasználók és szolgáltatások osztoznak az általunk használt frekvenciákon. Ezen a bolygón nincs olyan, hogy kizárólagos felhasználók

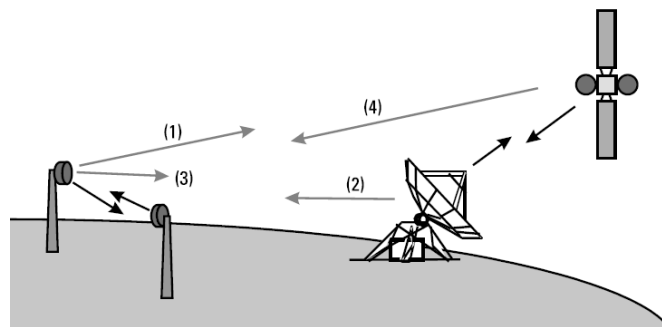
számára fenntartott frekvenciasáv, mivel bármely frekvenciát használhatja több független adó is. Természetesen sok olyan tényező van, amely lehetővé teszi a frekvenciák hatékony újrafelhasználását kölcsönös interferencia nélkül. Ha a rádiófrekvencia-mentesség elérése nem lehetséges, akkor frekvenciakoordinációt kell alkalmazni, ami egy potenciálisan fáradságos interferenciaelemzési, tesztelési és egyeztetési folyamat. A frekvenciakoordináció az érintett felek közötti megbeszélések, vizsgálatok és tárgyalások folyamata, érkezési sorrend alapján.

Más szóval az, aki először használja a frekvenciát, feltéve, hogy teljesítette az összes szükséges szabályozási eljárást a védett pozíció eléréséhez, bizonyos jogot szerez a frekvencia használatára. Az első védett felhasználó által gyakorolt hatósági jogok és ellenőrzés mértéke függ a spektrum adott részétől, az ITU (International Telecommunication Union) alá tartozó szabályoktól, valamint az érintett ország helyi kormányának szabályzataitól és rendeleteitől.

Vannak kivételek az érkezési sorrend elve alól, elsősorban azokban az esetekben, amikor az ITU előre kidolgozott terveket alkotott a spektrum adott részére (pl. műholdas műsorszórás a Ku sávban). [11]

Az RFI amely azonos frekvenciájú a kívánt jellel, vagy átfedi azt, zavarhatja a kommunikációt.[11]

Számos szabványos interferenciaút létezik, úgynevezett interferenciamechanizmusok, amelyekkel a műholdas és földi mikrohullámú kommunikáció során találkozhatunk. [11]



32. ábra – Interferenciautak [11]

Ezeket különféle szabályozási mechanizmusokon keresztül, frekvenciakoordinációval szabályozzák.[11]

- (1) 6 GHz-es földi rádióinterferencia a műhold uplink vevőjének irányába. A földi állomások alacsony kisugárzott teljesítménye miatt a gyakorlatban nem jellemző ilyen jellegű interferencia. [11]

- (2) 6 GHz-es földi állomás interferencia útja a 6 GHz-es földi rádióvevőbe. Ez a legfontosabb interferencia eset annak meghatározására, hogy egy adó földi állomás üzemeltethető-e egy adott helyen. [11]
- (3) 4 GHz-es földi rádiózavar a földi állomás downlink vevőjénél, ezért a földi állomás antennáját védeni kell a földi adóktól. [11]
- (4) 4 GHz-es műholdzavarok a 4 GHz-es földi rádió vevőjénél. A műhold sugárzás általában túl gyenge ahhoz, hogy komolyan érintse a földi vevőket, azonban az ITU maximálisan megengedett teljesítményfluxus sűrűséget (PFD) határoz meg a műhold sugárzására a Föld felszínén. [11]

Keresési technika, amely a mikrohullámú jelek helyszíni mérését foglalja magába. A megközelítés magába foglalja a szabványos vevőantennát, amely egy LNA-hoz és egy hordozható mikrohullámú spektrumanalizátorhoz csatlakozik, és a szó szoros értelmében a kívánt helyen jeleket keresünk. A rögzített adatokból ismert a földi adók iránya, azonban nem szokatlan, hogy rögzítetlen adókra is rábukkanunk. Egy földi állomás adója által egy másik földi állomásnak okozott RFI lehetőségét nem olyan könnyű megállapítani helyszíni méréssel.

RFI vétel esetén a tesztantennát a telepített földi állomás antennájával azonos magasságba kell elhelyezni, ellenkező esetben az esetleges interferencia mértékét nem lehet megfelelően mérni a kívánt helyen. [11]

11. Frekvenciakoordináció

Magyarországon a frekvenciakoordináció az NMHH feladata, nemzetközi szinten pedig ITU felügyeli az egyeztetési folyamatokat. Például a tervezett műholdas hálózatokat nemzetközileg be kell jelenteni és elfogadtatni. Ez alól kivételt képeznek azok a hálózati elemek, melyek nem sugároznak, ezáltal nem okoznak zavart és zavarvédelmet sem kérnek. [10]

A műholdas frekvenciakoordinációban alapvetően kétféle esetet különböztetünk meg egymástól:

- kötelező koordináció,
- nem kötelező koordináció.

A kötelező koordináció a geostacionárius műholdpályákat használó műholdas hálózatokra, a műholdas állandóhelyű szolgálatban és műholdas műsorszóró szolgálatban működő műholdas rendszerekre, valamint azokra az állomásokra vonatkozik, amelyek esetében a koordinációs követelményt a Nemzetközi Rádiószabályzat 5. Cikkében a frekvenciakiosztási táblázat lábjegyzete tartalmazza. Azon esetekben, ahol a Nemzetközi Rádiószabályzat nem írja elő a kötelező koordinációt, ott a nem kötelező koordinációs eljárást alkalmazzuk. Az említettekről, részletesebben az ITU „Coordination procedures” oldalán olvashatunk.

Most vegyünk egy példát: szeretnénk bejelenteni egy általunk készített rádióamatőr műholdat.

A számunkra releváns, rádióamatőr szolgálat: 432 - 438 MHz-es sávban működik. Tételezzük fel, hogy birtokában vagyunk már a rádióamatőr hívójelnek.

Az első lépés a tervezés, majd a tervezést követően a kérelmünket elküldjük az IARU-nak. Az IARU biztosít nekünk egy vivőfrekvenciát. Mivel példánkban Magyarországon vagyunk, ezért a fejezet elején részletezett okok miatt, az NMHH-től megkérjük a rádióengedélyt. A rádióengedély meglétét követően elindul a frekvenciakoordinációs folyamat, amit az NMHH kollégái végeznek.

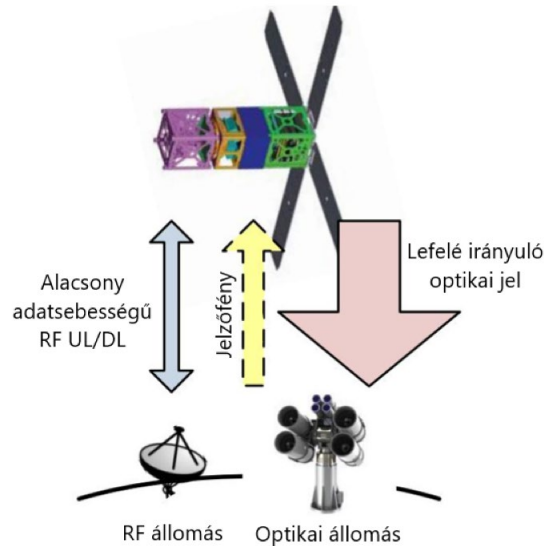
Következő lépés az ITU bejelentés elkészítése, ehhez megfelelő műszaki adatokra van szükség. Egy műholdas hálózat koordinálásához meg kell adni, az űrszegmens pályaadatát, mind a lefele, mind a felfele irányhoz tartozó összeköttetési adatokat, melyek a következők: adóberendezés teljesítménye, antennára jutó teljesítmény, adó és vevő antennakarakterisztika, vevő zajszintje, kívánt jel-zaj viszony, melyekből összeköttetési és zavartatási számításokat végeznek. [10]

A bejelentést követően, azt az NMHH elküldi az ITU-nak, ami egy API/A publikációban fog majd megjelenni.

12. Javaslat a OGS rendszer kiépítésére

Egy műhold irányításához, vezérléséhez elengedhetetlen a kétirányú kommunikáció, a megbízható és elegendő kapcsolati tartalék, ami kizárólagos optikai kommunikációval nehezen kivitelezhető, a kapcsolatot jellemző burst jellegű adatkiesések miatt. [2] Erre nyújthat megoldást egy több OGS-ből álló hálózat, de a Föld-műhold adatátviteli igények [4] aszimmetrikus jellegéből adódóan, elegendő egy kis adatátviteli sebességgel rendelkező (pl.:

9600 baud GFSK) uplink, melyet az egyetem és kollégium tetején már meglévő RF földi állomások nagy biztonsággal képesek kiszolgálni. A nagy mennyiségű információ inkább a downlink irányra jellemző, ezért itt lenne célszerű optikai linket kialakítani. Ezek voltak azok a megfontolások, amik miatt egy hibrid RF-optikai földi állomás javaslata mellett döntöttem, a jövőbeli győri műhellyel való kommunikáció lebonyolítására. [2]



33. ábra - Hibrid architektúra [2]

Mivel a SZESAT Szakkollégium még nem rendelkezik hasonló optikai állomással, és egy ilyen beruházás nagyon költséges lehet, így célszerű az egyedi és specifikus megoldásokat elkerülni, melyek roppant mód megnövelnék a kiadásokat. A korábban leírtakat figyelembe véve és azokra hivatkozva, egy COTS amatőr állomás kiépítését javasolnám, az alábbiak szerint:

Meg kell határoznunk az állomás jellegét, hogy fix vagy átcsoportosítható legyen. A fix állomás előnye, hogy ritkán szükséges újra kalibrálni, mivel saját obszervatóriumában található, valamint abszolút kódolókkal vannak ellátva, emiatt a tartó szerkezete, sokkal pontosabb, precízebb mozdulatokra képes. [1] Nagy hátránya, hogy az időjárási viszonyok rendkívül befolyásolhatják a működtetést, a rendelkezésre állás időtartamát. Még mindig jobb, egy valamivel pontatlanabb, inkrementális jeladókkal ellátott, tápfeszültség megszűnését követően kalibrációt igénylő állomással dolgozni, melynek precizitási hiányosságait különböző fizikai, szoftveres technikákkal mérsékelni lehet, mint egy működésképtelennel, ezért a mobilitást tartom fontosabbnak. Ennek köszönhetően egy számunkra ideális áthaladást nem szükséges kihagynunk csupán az időjárás viszontagságai miatt, ugyanis egy jól megtervezett

átcsoportosítással (pl.: Kékesre történő áthelyezés) kiküszöbölhető ez a probléma.

Egy ilyen amatőr állomás nem feltétlen igényel állandó pozíciót, sem kupolával ellátott obszervatóriumot, viszont egy használható optikai állomás fontos része a stabil, statikailag nyugalomban lévő talapzat, melyet az átmozgatások során is szem előtt kell tartanunk. Az egyetem tetején, az RF állomások mellett lévő pódium egy megfelelő hely lehet az állomás számára, mely kiépített infrastruktúrával is rendelkezik, így a kezdeti, tesztelési, tanulási szakaszokban nem szükséges a mobilitást szolgáló akkumulátorról, tápellátásról sem gondoskodni. Az említett pódiumon való elhelyezésnél ügyelni kell arra, hogy a tesztelések, lekövetések során ne tartózkodjunk az emelvényen, ezzel elkerülve az esetleges remegéseket, elmozdulásokat.

Teleszkóp szempontjából az alábbiakat vettem figyelembe. A dolgozatban említett 40 cm átmérőjű apertúrával rendelkező teleszkópok bizonyítottan alkalmasak a feladatra,[2] de 30 cm-es főtükörrel ellátott sikeres CubeSat lekövetésekről, kommunikációkról is olvashatunk. [1]

Az egyetemi rendszer számára, az én ajánlásom a 40 cm-es apertúra átmérővel rendelkező Meade LX600 16" F/8, vagy egy Meade LX200 16" F/10 -es teleszkóp, amelyek átmérőjük miatt a legideálisabbak a kereskedelmi forgalomban kapható eszközök közül, egy CubeSat (+12 magnitúdó) lekövetéséhez. [3] Ideális körülmények között, ekkora apertúra átmérővel, már 1U-os CubeSat-ok lekövetése is lehetséges. [16] A felsorolt teleszkópok mindegyike megvásárolható gyárilag szerelt keresőtávcsővel, valamint számítógép által is vezérelhető tartóval, [2] amelyeket egy USB-A – RS232 kábellel csatlakoztatunk a számítógéphez, és a legtöbb esetben alkalmasak LEO pályás nyomkövetésre. [16]

Automatizált lekövetéshez szükségünk lesz még csillagászati kamerára, melyet a fő teleszkóp szemlencséjének helyére rögzítünk, majd USB-A – USB-B kábellel a számítógéphez csatlakoztatunk. [16]

Mivel a lekövetés kezdetén TLE adatok alapján határoznánk meg az adott műhold pályáját, emiatt az eredő hiba nagyobb lehet, mint a főtávcső FOV-ja, így célszerű a nagyobb FOV-val rendelkező vezetőtávcsövet is egy irányító kamerával ellátni, így megkönnyítve a kiszemelt objektum megtalálását. [1]

A fényérzékenyebb, LEO pályás CubeSatok lekövetésére alkalmasabb, CCD detektoros csillagászati kamerák közül, a fő teleszkópra egy TRIUS PRO 35 (monokróm) kamerát rögzítenek, amely az LX600-as gyújtótávolságával kompatibilis.[3]

A hardverek beszerzését követően, a driverek mellett, a precizitás növeléséhez egyéb szoftverekre is szükségünk lesz. A TLE adatokat a Space-Track.org, heavens-above.com, heavenscape.com, vagy a celestrak.com oldalokról szerezném be. Amennyiben nem áll rendelkezésre TLE adat, úgy magunk is előállíthatjuk a System Tool Kit (STK) szoftvercsomaggal, az orbitális terjedésre vonatkozó információk alapján. Ezek után a TLE információt a TheSkyX Pro, vagy a Sky Track Satellite Tracker szoftverbe tölténém, ami egy professzionális, ASCOM kompatibilis követőprogram [3]

Az alap rendszer összeállt, így elkezdhető a gyakorlati kivitelezés. A nyomkövetési folyamatot célszerű fokozatosan felépíteni. Először csillagok, majd nagyméretű műholdak megfigyelésével, követésével (visszavert napfény pl.: ISS, elhasznált rakéták felületéről). Érdemes olyan időszakot választani, amikor az állomás, a megfigyelő sötétben van, az objektumot pedig megvilágítja a Nap (napkelte, napnyugta), [21]valamint a megfigyelő és a műhold között tiszta az égbolt. Az egyetemet ezekben az időszakokban, jellemzően zárva tartják, így előre egyeztetésre, engedélyekre lehet szükség. [3]

A teleszkóp tartószerkezetét stabil alapra helyezzük, csatlakoztatjuk a számítógéphez, mely a nyomkövetést fogja biztosítani, majd vízszintbe állítjuk. Erre automatizáltan képes az LX600-as tarjója. Az igazításhoz és a pontosság ellenőrzéséhez a Skytools3 szoftvert ajánlanám. Viszont a célműhold lekövetése előtt egy próbakövetést célszerű végezni, ahol ellenőrizhető az igazítás minősége, az állványt vezérlő nyomkövető szoftver átfutási/késleltetési ideje.

Ideális esetben a megfigyelt műhold a képkocka közepén helyezkedik el. Ellenkező esetben az időhibákat a TLE, vagy a számítógép órája tartalmazza, melyeket korrigálnunk kell. [20]

Utóbbi, a számítógép órajelének szinkronizálását a NMEATime2 szoftverrel oldhatnánk meg, esetleg az "USNO" webhely segítségével frissíthetjük. [3, 20] Ha ez nem oldja meg a problémát, egy újra igazításra lehet szükség. [20]

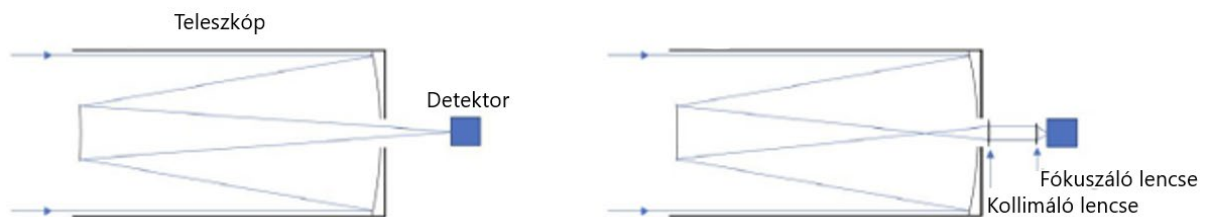
Ha a tesztek rendben lezajlottak, az említett forrásokból a célműhold TLE adatait manuálisan betöltjük a követőprogramba (pl.: Sky Track Satellite Tracker), mely mutató

parancsok segítségével a teleszkópot a műhold várható pozíciójába forgatja. A számítógépen megjelenített kamera képének beállítását követően (ideális expozíció stb.), ideális esetben megfigyelhető a műhold, bár előfordulhat, hogy a kisebb méretű CubeSatok egy-egy áthaladáskor mégsem láthatóak. [20]

Előfordulhat, hogy több programot szeretnénk egyidejűleg futtatni, erre nyújtanak megoldást például az „FSTrack” -hez hasonló szoftverek, melyek egyesítik a szükséges programokat. [3]

Célszerű szem előtt tartani a kompatibilitást, ami elengedhetetlen egy működő rendszer összeállításához, valamint lépcsőzetesen kiépíteni és begyakorolni egy ilyen rendszer működését, hogy a felmerülő nehézségeket fokozatosan tudjuk leküzdeni. [3]

A következő lépcsőfok ennek a nyílt hurkú rendszernek a továbbfejlesztése, vagy egy zárt hurkú, finom kormányzású rendszer kifejlesztése.



34. ábra - Nyílt hurkú lencses optikai rendszer [21]

Előbbinél, a detektor elé elhelyezett kollimáló [9] és fókuszáló [10] lencsék közel 3x-os növekedést ($870 \times 696 \text{ ívsec}^2$) eredményezhetnek a FOV-t illetően. Ekkora FOV-val sokkal könnyebben befogható a kívánt jel. [21]

Egy zárt hurkú nyomkövető rendszer ideális esetben egy sikeres nyílt hurkú rendszeren alapszik. A zárt hurkú finom követés működését, amihez finoman kormányozható tükörrre van szükségünk legegyszerűbben egy próbapadon elsajátítani. Az összeállítás alapja egy adott hullámhosszú lézer, egy vevő (pl.: APD) és az említett tükör. A cél, hogy a lézer fénye a tükrön megtörve a vevő közepére essen. A lézer mozgásával szimulálható a vételi jel ingadozása, amelyet a tükörnek kell kiküszöbölnie. [3] Jellemzően spirális pásztázást végez a tükör, így továbbítva a megfelelő irányba a jelet. Ennek a zárt rendszernek az alapja a vevő teljesítménybéreseinek a visszacsatolása (60Hz-en). Éles bevetés előtt, ennek a rendszernek az

algoritmusát, pontos, megbízható működését szükséges kifejlesztenünk ezen a próbapadon. [1]

Egyedi szoftver írása mellett, van lehetőségünk kereskedelemben kapható, ASCOM kompatibilis, zárt hurkú követésre használható programokat alkalmazni pl.:(Starry Night Pro (Plus), TheSkyX Pro). [3]

Ahhoz, hogy a rendszer alkalmas legyen [21] például egy 200 mW adási teljesítményre képes műhold, [2]1550 nm-es downlink sugárzásának észlelésére és nyomon követésére, célszerű módosítani az FOV értékeket, a fent említett lencserendszer alkalmazásával. [21]

Az eddigi rendszerünket ki kell egészítenünk még egy lézeres jeladóval (Beacon) is, ami lehetővé teszi a műhold számára, hogy közvetlenül mérje a mutatósi hibát az állomáshoz képest. Továbbá egy sugárosztóra is szükségünk lesz, ami a kamera és az említett hullámhosszra érzékeny InGaAs APD detektor között osztja meg a beérkező jelet.

A beacon jeladó például egy 10 W-os Ar lézerral pumpált Ti:Zafir lézer, mely 50 mm-es apertúra átmérővel és 850 nm-es hullámhosszal rendelkezik, mely nyílt hurkon, TLE adatok alapján, a teleszkóppal egybeépítve világítja meg a műholdat.[2]

Amennyiben az eddigi feladatokkal sikeresen megküzdöttünk, úgy kezdetét veheti a tényleges optikai vételi kísérlet. Saját lasercom műhold hiányában is fennáll a lehetőség tanulmányi célú kísérletek, tesztek lebonyolítására, a jelenlegi legmodernebb optikai Arab Sat 8 műhold: BADR-8-as payload-dal, amihez az ESA-nak hozzáférése van.

Egy ilyen rendszer kiépítésének nagy erőforrásigényei vannak mind emberi, mind anyagi szempontból, valamint hosszadalmas tervezési és tesztelési szakaszokon kell átesnie, hogy egy jól működő, precíz műholdkövető lézeres állomás álljon rendelkezésünkre.

12.1. Felmerülő költségek

4. táblázat - Költségbecslés

Eszközök	Ár	Megnevezés
Optomechanikus tartozékok	160 000 Ft	pl.: sugárosztó, optikai pad stb.
Tip/tilt, hangtekerceses tükör	1 200 000 Ft	FSM
APD vevő	1 500 000 Ft	InGaAs Voxel RDC1-NJAF
Beacon lézer dióda	310 000 Ft	VCSEL Array 10W 850 nm
Beacon apertúra	40 000 Ft	
Kereső távcső + csillagkamera	1 900 000 Ft + 210 000 Ft	TRIOUS PRO 35 (monokróm) + SkyWatcher Evostar ED 80
Kártyák, kábelek stb.	1 400 Ft	USB-A – USB-B kábel
	3 000 Ft	USB-A – RS-232
Számítógép (laptop)	~ 300 000 Ft	
Szoftverek	8 000 Ft	NMEATime2
	0 Ft	Sky Track Satellite Tracker
Meade konfiguráció		
Teleszkóp + tartószerkezet	2 900 00 Ft / 4 000 000	Meade LX200 / Meade LX600
Kamera	325 000 Ft	Meade Instruments LPI-G Advanced (színes) 2,4 µm x 2,4 µm
<i>Összköltség: ~ 8 950 000 Ft</i>		
Egyéb: Celestron konfiguráció és opcionális kiegészítések		
Teleszkóp + tartószerkezet	2 150 000 Ft	Celestron CPC1100 11"
	3 700 000 Ft	Celestron CGE Pro 1400 HD (GEM)
Kamera	5 200 000 Ft	Micro-SWIR 320CSX 60 Hz
Adapterek	25 000 Ft / 13 000 Ft	Meade 1,25" adapter / Celestron T- adapter
Professzionális tartószerkezet	6 600 000 Ft	Paramount Taurus 400
Egyéb szoftverek	36 000 Ft	TheSkyX Pro
	104 000 Ft	Starry Night Pro (Plus)
Kupola	9 700 000 Ft	Aphelion 3,6 m magas (12 láb) COTS
Hordozható akkumulátor	180 000 Ft	~ 400Wh

13. Összefoglaló

Az optikai kommunikáció jelentős előnyöket biztosít a küldetések számára, beleértve a sávszélesség 10, akár 100 szoros növekedését az RF rendszerekhez képest. Ezenkívül az optikai kommunikáció csökkenti a méret-, súly- és energiaszükségletet. A kisebb méret több helyet jelent a tudományos műszerek, kísérletek, egyéb hasznos terhek számára. A kisebb tömeg redukálhatja az indítási költségeket, a kisebb teljesítményigény pedig csökkentheti az akkumulátor(ok) lemerülési ciklusait. Az RF és optikai kommunikációs technológia vegyítése pedig páratlan kommunikációs képességekkel bírhat.

A EuroConsult és az NSR piackutatásai szerint, a következő tíz évben több, mint 80 ezer LEO pályás, optikai terminálra számíthatunk. A hatalmas igények kielégítésére új, feltörekvő vállalatok jelentek meg, hatalmas beruházások zajlanak az optikai kommunikációs műholdpiacot illetően, és szemmel látható, hogy ez a jövő űrkommunikációs technológiája.[22]

A Széchenyi István Egyetem színvonalának fenntartása érdekében nagyon fontosnak tartom, hogy az egyetemről kikerülő infokommunikációs szakemberek a szabadtéri lézerekommunikáció területén is versenyképes tudással rendelkezzenek.

Irodalomjegyzék

- [1] Riesing, K. M.: *Portable Optical Ground Stations for Satellite Communication*
"PhD disszertáció": Massachusetts Institute of Technology, Aeronautics and
Astronautics, 2018.
- [2] Kingsbury, R. W.: *Optical Communications for Small Satellites*
"PhD disszertáció": Massachusetts Institute of Technology, Communications and
Networking, 2015.
- [3] Anderson, L. G.: *Satellite Tracking with Telescope and Software*
"MSc disszertáció": Naval Postgraduate School, Space Systems Operations, 2019.
- [4] Villalpando, L.: *Mobile Cubesat Command and Control Ground Station Architecture
for Free-Space Optical Communication Receiver*
"MSc disszertáció": Naval Postgraduate School, Systems Engineering Management,
2022.

- [5] Gagliardi, R. M.: *Satellite Communication*
 "Könyv": 1. kiadás, Van Nostrand Reinhold, 1991, New York, p. 602, ISBN:
 9789401097628
- [6] Agrawal, V., Maini, A. K.: *Satellite Technology Principles and Applications*
 "Könyv": 1. kiadás, Wiley, 2007 Chichester, West Sussex, p. 558., ISBN:
 9780470033357
- [7] Kőműves G.: *Műholdas földi állomások kialakításához szükséges tervezési és engedélyezési eljárások*
 "BSc disszertáció": Széchenyi István Egyetem, Villamosmérnöki, 2014.
- [8] Boisrobert, C., Bouchet, O., Sizun, H., Fornel F.: *Free-Space Optics Propagation and Communication*
 "Könyv": 2. kiadás, Wiley, 2010, London, p.219, ISBN: 9780470394410
- [9] Sburlan, S.: *Introduction to Optical Communications for Satellites*
<https://kiss.caltech.edu/workshops/optcomm/presentations/Sburlan.pdf>, 2023.
- [10] Bálint I., Balogh J., Dr. Bartolits I., Berecz P., Czuprák E., Csudai A., Dr. Daczi D., Dr. Derka I., Drilla A., Farkas Z., Jánosik A., Kárándi Zs., Dr. Orbán J., Dr. Pados L., Dr. Vári P., Verik J.: *Ég és föld közötti kapcsolatok*
 "Könyv": 1. kiadás, Wolters Kluwer Hungary Kft., 2020, Budapest, p. 320, ISBN:
 9789632959597
- [11] Elbert, B.: *The Satellite Communication Ground Segment and Earth Station Handbook*
 "Könyv": 2. kiadás, Artech House, 2014, London, p. 444, ISBN: 9781608076734
- [12] Ippolito, L. J. Jr.: *Satellite Communications System Engineering Atmospheric Effects Satellite Link and System Performance*
 "Könyv": 2. kiadás, Wiley, 2017, West Sussex, p. 464, ISBN: 9781119259367
- [13] Hemmati, H.: *Near-Earth Laser Communications*
 "Könyv": 1. kiadás, CRC Press, 2009, Boca Raton, London, New York, p. 418., ISBN:
 9781351837316
- [14] 7/2015. (XI. 13.) NMHH rendelet a nemzeti frekvenciafelosztásról, valamint a frekvenciasávok felhasználási szabályairól:
<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1500007.nmh>, 2023

- [15] Leitgeb, E., Plank, T., Awan, M. S., Brandl, P., Popoola, W., Ghassemlooy, Z., Ozek, F., Wittig, M.: *Analysis and Evaluation of Optimum Wavelengths for Free-Space Optical Transceivers*
"Konferenciakiadvány": International Conference on Transparent Optical Networks, 2010 München, p. 1-7, DOI: 10.1109/ICTON.2010.5549009
- [16] Luciani, D. P.: *System Design and Implementation of the Virginia Tech Optical*
"MSc disszertáció": Virginia Polytechnic Institute and State University, Aerospace Engineering, 2016.
- [17] Renk, F. K.: *Basics of Laser Physics For Students of Science and Engineering*
"Könyv": 2. kiadás, Springer, 2017, Cham, p. 677, ISBN: 9783319506517
- [18] Gasdia F.: *Optical Tracking And Spectral Characterization Of Cubesats For Operational Missions*
"MSc disszertáció": Embry-Riddle Aeronautical University, Engineering Physics, 2016.
- [19] Dong, H., Qiang, W., Bo, Q., Jian-Wei, Z., Zhi-Jun, S., Wan-Sheng, L., Dai-Jun, Z., Ji-Gang, R., Sheng-Kai, L., Juan, Y., Yong-Mei, H.: *Acquisition technology for optical ground stations in satellite-ground quantum experiments*
"Konferenciakiadvány": *Applied Optics, Optical Society of America 2018, Vol. 57, Issue 6, pp. 1351-1357, DOI: 10.1364/AO.57.001351*
- [20] Bruski, S., Jones, M. P., Harms, S. R., Dahlke, S. R., Thomas, N.: *An Optical Satellite Tracking System for Undergraduate Research*
"Konferenciakiadvány": *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2012, Maui, p. 1-9*
- [21] Harburg, J. F.: *Improvements to LEO Tracking on The Portable Telescope for Lasercom (PorTeL)*
"MSc disszertáció": Massachusetts Institute Of Technology, Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [22] Vasko, C.: *Optical Communications – Market Perspective*
„Előadás”: *Oxfordi Egyetem, 2024.*

Ábrajegyzék

1. ábra - Egyenlítői pálya [6].....	4
2. ábra - Poláris pálya [6]	4
3. ábra - Prograde pálya [6].....	5
4. ábra - Retrograde pálya [6].....	5
5. ábra - Elliptikus pálya [6].....	6
6. ábra – Körpálya [6]	6
7. ábra - LEO, MEO, GEO és HEO pályák [10].....	7
8. ábra – Forgásstabilizáció [6]	9
9. ábra - Alap kommunikációs csatorna [12]	10
10. ábra - Front-end receiver [12]	11
11. ábra - Az alapvető rendszerelemek egy általános, műholdas átvitel során [12]	18
12. ábra - Egy kódolt optikai csatorna [13].....	22
13. ábra - Egyreflektoros és többreflektoros parabola antennák [11]	24
14. ábra - Offset-reflektor antenna [11]	25
15. ábra - COTS teleszkópok alapvető konfigurációi [3].....	28
16. ábra -Gimbal rendszer [1]	29
17. ábra - HUB hálózati topológia [11].....	34
18. ábra - Pont-pont műholdas összeköttetés [11].....	35
19. ábra - Pont-többpont összeköttetés [11]	36
20. ábra - Csillag topológia [11].....	36
21. ábra - Háló topológia [11]	37
22. ábra - Rendszerszintű, általános blokkdiagram [11]	40
23. ábra - Kétirányú lézeres távközlési jelátvitel légi adó-vevő, földi adó-vevő és az átviteli csatorna ábrázolásával. [13]	45
24. ábra - FPC blokkdiagram [13].....	49
25. ábra - Általános lézerkommunikációs blokkvázlat [1].....	50
26. ábra - Mutatási, beszerzési és követési komponensek [1].....	51
27. ábra - COTS amatőr földi állomás működési elve [1]	52
28. ábra - Szögtávolság diagram [3].....	54
29. ábra - Antenna nyaláb [12].....	61

30. ábra - Nyalábszélesség RF és Optika esetén [9]	61
31. ábra - Nyalábszélesség RF és Optika esetén [9]	62
32. ábra – Interferenciautak [11]	63
33. ábra - Hibrid architektúra [2]	66
34. ábra - Nyílt hurkú lencsés optikai rendszer [21]	69

Táblázatjegyek

1. táblázat - Leggyakoribb műholdas frekvenciasávok [7]	14
2. táblázat - Hozzáférési eljárások csoportosítása [7]	20
3. táblázat - OGS minimális követelményei [19]	44
4. táblázat - Költségbecslés	71

Rövidítésjegyzés

ADCS	Attitude determination and control system	Attitűd meghatározó és irányító rendszer
ALOHA	Abramson's logic of hiring access	Abramson szerinti felvételi hozzáférési logika
AM	Amplitude modulation	Amplitúdó moduláció
AMI	Alternate mark inversion	Alternatív jel inverzió
ANSI	American National Standards Institute	Amerikai Nemzeti Szabványügyi Intézet
APD	Avalanche photodiode	Lavina fotodióda
ASK	Amplitude-shift keying	Amplitúdóbillentyűzés
BER	Bit error ratio	Bit-hibarány
bps	Bits per second	Bit per másodperc
BPSK	Binary phase shift keying	Bináris fázisbillentyűzés
BSS	Broadcasting satellite service	Műholdas sugárzási szolgáltatás
CCD	Charge-coupled device	Töltés-csatolt eszköz
CDMA	Code-division multiple access	Kódosztásos többszörös hozzáférés
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor	Komplementer fém-oxid-félvezető
COTS	Commercially available off-the-shelf	Kereskedelmi forgalomban kapható, polcról leemelhető
DAMA	Demand Assigned Multiple Access	Igény szerinti többszörös hozzáférés
dB	Decibel	Decibel

dB	Decibels relative to isotropic	Decibel az izotropikushoz viszonyítva
DLR	German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)	Német Lég- és Űrkutatási Központ
DPSK	Differential phase shift keying	Differenciális fázisbillyentyűzés
ECC	Electronic Communications Committee	Elektronikus Kommunikációs Bizottság
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Erbium adalékolt szál erősítő
ESA	European Space Agency	Európai Űrügynökség
FAA	Federal Aviation Administration	Szövetségi Légügyi Hatóság
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Frekvenciaosztásos többszörös hozzáférés
FEC	Forward error correction	Előreccatolt hibajavítás
FM	Frequency modulation	Frekvenciamoduláció
FOV	Field of view	Látómező
FPC	Focal plane control	Fókusz-sík vezérlés
FPO	Focal plane optics	Fókusz-sík optika
FSK	Frequency-shift keying	Frekvenciabillyentyűzés
FSM	Fast-steering mirror	Gyors-irányítású tükör
FSO	Free-space optical communication	Szabadteres optikai kommunikáció
FSS	Fixed-satellite service	Fix műholdas szolgáltatás
Gbps	Gigabit per second	Gigabit másodpercenként
GEM	German Equatorial Mount	Német ekvatoriális Tartó
GEO	Geosynchronous Earth orbit	Geoszinkron pálya
GHz	Gigahertz	Gigahertz
GPS	Global Positioning System	Globális helymeghatározó rendszer
GSO	Geostationary orbit	Geostacionárius pálya
HEO	High Earth orbit	Magas Föld körüli pálya
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning	Fűtés, szellőztetés és légkondicionálás
IEC	International Electrotechnical Commission	Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság
IM	Intensity modulation	Intenzitás moduláció
InGaAs	Indium gallium arsenide	Indium gallium arsenid
INMARSAT	International Maritime Satellite Organization	Nemzetközi Tengeri Műhold Szervezet
ISS	International Space Station	Nemzetközi Űrállomás
ITU	International Telecommunication Union	Nemzetközi Távközlési Unió
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector	ITU Rádiókommunikációs Szektor
km	kilometre	Kilométer
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	Fényerősítés gerjesztett sugárással
LASERCOM	Laser communication	Lézeres kommunikáció
LED	Light-emitting diode	Fénykibocsátó dióda
LEO	Low-Earth orbit	Alacsony Föld körüli pálya

LNA	Low-noise amplifier	Alacsony zajú erősítő
LOS	Line-of-sight	Látótávolság
LUCE	Laser Utilizing Communications Equipment	Lézer alkalmazó kommunikációs berendezés
M&C	Monitoring & Control	Monitorozás és irányítás
MA	Multiple Access	Többszörös hozzáférés
MCC	Mission Control Computer	Küldetés irányító számítógép
MEMS	Micro-electromechanical systems	Mikro-elektromechanikus rendszerek
MEO	Medium-Earth Orbit	Közepes Föld körüli pálya
MFCN	Mobile/Fixed Communications Network	Mobil/Rögzített Kommunikációs Hálózat
MHz	Megahertz	Megahertz
MPE	Maximum permissible exposure	Maximális megengedett expozíció
MPSK	Multi-Phase Shift Keying	Többfázisú billentyűzés
mrad	Milliradian	Milliradián
MSK	Minimum-shift keying	Minimális frekvenciabillentyűzés
MSS	Mobile satellite services	Mobil műholdas szolgáltatások
MTI	Mirrorcle Technology Inc	Mirrorcle Technológia Inc
mW	Milliwatt	Milliwatt
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet	Neodímium-adalékolt ittrium alumínium gránát
NFFF		
NHZ	Nominal Hazard Zone	Nominális veszélyzóna
nm	Nanometer	Nanométer
NMHH	National Media and Infocommunications Authority	Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	Nemzeti Óceán- és Légköri Hatóság
NSR	National Storage REIT	Nemzeti Tárolási REIT
OGS	Optical Ground Station	Optikai földi állomás
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	Foglalkozásbiztonsági és Egészségvédelmi Hivatal
PAT	Pointing, acquisition, and tracking	Célzás, megszerzés és követés
PFD	Power Flux Density	Teljesítmény fluxus sűrűség
PM	Phase modulation	Fázis moduláció
PSK	Phase-shift keying	Fázisbillentyűzés
QAM	Quadrature amplitude modulation	Kvadratúra amplitúdómoduláció
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Kvadratúra fázisbillentyűzés
RF	Radio frequency	Rádiófrekvencia
RFE	Radio Front End	Rádió front-end
RFI	Radio Frequency Interference	Rádiófrekvenciás interferencia

SCPC	Single Channel Per Carrier	Egyetlen csatorna egyetlen hordozóval
Si	Silicon	Szilícium
SNR	Signal-to-noise ratio	Jel-zaj viszony
SSO	Sun-synchronous orbit	Nap-szinkron pálya
SWaP	Size, weight and power	Méret, súly és teljesítmény
TDMA	Time-division multiple access	Időosztású többszörös hozzáférés
THz	Terahertz	Terahertz
TLAS	Transmit Laser System	Közvetlen lézerrendszer
TLE	Two-line element set	Két vonalas elemhalmaz
TOGS	Transportable Optical Ground Station	Szállítható Optikai Földi Állomás
TT&C	Telemetry, Tracking and Command	Távérzékelés, követés és parancsolás
TVRO	Television receive-only	Csak-vevő televízió
VSAT	Very small aperture terminal	Nagyon kis nyílású terminál
WER	Word error rate	Szó-hiba viszony
WFS	Wavefront sensors	Hullámfront érzékelők