



**SZÉCHENYI
EGYETEM**
UNIVERSITY OF GYŐR



TDK DOLGOZAT

Az Optikai kommunikáció alapjai a HUNTY műholddal

Pónya Szilárd

Villamosmérnöki BSc szak
Infokommunikációs szakirány
3. éves hallgató

Konzulens:
Németh Péter Ernő

Győr, 2024
Széchenyi István Egyetem

Absztrakt:

A SZESAT Szakkollégium műholdas projektje új irányt vett az optikai kommunikációs technológia kutatásával, amely komoly lehetőségeket kínál a hatékonyabb adatátvitel terén. A projekt két lépcsőben valósul meg, és egyre közelebb hozza a műholdak és földi állomások közötti gyorsabb és megbízhatóbb kapcsolat létrejöttét. Az első lépés során a földi állomásról kibocsátott lézersugár segítségével vizsgáljuk, hogy eltaláljuk-e a műholdat. A szenzor által detektált jelet a műhold rádióhullámok segítségével továbbítja a földi állomásra, ami lehetőséget ad a kapcsolat minőségének és hatékonyságának valós idejű megfigyelésére. A második lépcsőben a lézersugarat modulálva bonyolultabb információkat szeretnénk küldeni, amelyeket szintén rádióhullámokkal juttatunk el a földi állomásra. Ez a lépés egy későbbi saját műhold segítségével valósulna meg. A prezentáció során bemutatom a HUNITY műholdra telepítendő szenzormodul fejlesztését, amely alkalmas optikai jelek detektálására. A szenzort földi tesztek során vizsgáltuk, ahol fotodiódák, fototranzisztorok, mikrokontroller és analóg-digitális átalakító (ADC) segítségével végeztünk méréseket, hogy pontosan nyomon követhessük a lézerfény detektálását. A tesztek során fényt derítettünk azokra a tényezőkre, amelyek akadályozhatják a rendszer hatékonyságát, és ezek megelőzésére is dolgoztunk ki megoldásokat. A projekt célja, hogy egy új, hatékonyabb adatátviteli módszert dolgozzunk ki, amely optikai kommunikációt alkalmaz a műholdak és földi állomások közötti kapcsolattartásra.

Tartalomjegyzék

1	BEVEZETÉS	4
2	HUNTY műhold.....	5
3	OPTIKA	7
4	A fénv terjedését befolyásoló tényezők.....	8
4.1	Ionoszféra	8
4.2	Szóródás (Rayleigh-szórás)	9
4.3	Fényelnyelés	10
4.3.1	Lambert-Beer-törvény (exponenciális gyengülés törvénye)	10
4.3.2	Lambert-Beer-törvény kiterjesztése koncentrációra.....	11
5	Fejlesztés	13
5.1	Szenzormodul	13
5.1.1	Mikrokontroller (MCU)	13
5.1.2	Fényérzékelés	13
5.1.3	ADC vizsgálat	14
5.1.4	A műveleti erősítő	16
5.1.5	Hullámhossz tartomány	19
5.1.6	Szoftveres tesztelések.....	21
5.1.7	Szoftver véglegesítése	25
5.1.8	Kommunikáció a műholdal	26
5.1.9	Deszka modell (Flat-sat)	27
5.2	Földi állomás kialakítása: kitekintés.....	28
6	A lézerek veszélyei, kockázatelemzés.....	31
7	Eredmények értékelése és jövőbeli tervek	32
8	Ábrajegyzék	33
9	Irodalomjegyzék.....	34

1 BEVEZETÉS

A műholdfejlesztés a SZESAT Szakkollégiumon belül már hosszabb ideje futó projekt, amely az évek során egyre nagyobb kihívások elé állította a csapatot. Korábban sikerült már egy kommunikációra képes panelt egy műholdra szerelve az űrbe juttatni, ami lehetőséget adott, hogy még tovább gondoljuk a technológiai lehetőségeket. E tapasztalatok ösztönöztek arra, hogy elkezdjük az optikai kommunikáció megvalósítását a leendő földi adóállomás és a műhold között mert ez jobb lehetőségeket kínál a nagyobb sebességű és megbízható adatátvitel terén, ami a későbbi műholdas rendszerek szempontjából lehet lényeges.

A projekt összetettsége és nagysága miatt két lépcsőben tervezzük a megvalósítást. Az első lépésben a műholdra telepített szenzorokat lézersugárral célozzuk meg a földi állomásról, és a műhold érzékeli ezt a jelet. Az érzékelés eredményét rádióhullámok segítségével küldi vissza a Földre, így a válasz megfigyelésével ellenőrizhetjük, hogy sikerült-e pontosan eltalálnunk a műholdat a lézersugárral. Ez a lépés elengedhetetlen, mivel megmutatja, hogy a célzás megfelelő pontossággal kivitelezhető-e a távolsági optikai kommunikációhoz.

A második lépés egy összetettebb üzenetküldési folyamatot foglal magában, ahol a lézersugarat modulálva egy komplex üzenetet küldünk a műholdra. Ebben a szakaszban az információt szintén rádióhullámokkal küldi vissza a műhold a földi állomásra. Ez a megoldás lehetővé teszi az optikai és rádiófrekvenciás kommunikáció együttes alkalmazását, ami a projekt végső célja. Az optikai technológia alkalmazása azért is jelent nagy kihívást, mert különösen nagy precizitást igényel az adatátvitel során, és minimalizálni kell a külső környezeti tényezők például az az átviteli csatorna időjárás okozta változásait. Ezt a második lépést első sorban a majdani saját műholdunkra szánjuk, de már itt is el fogjuk tudni kezdeni az egyszerűsített tesztelését.

A projekt során a feladatom a műhold szenzorjának tervezése és fejlesztése volt, valamint a földi tesztelésekért feleltem. A következő szakaszokban a szenzor tervezési folyamatait, a tesztelési eredményeket, valamint az elért mérőföldköveket fogom bemutatni. Ezenkívül ismertetem a legfőbb kihívásokat és megoldásokat, amelyek hozzájárulhatnak a projekt sikeréhez.

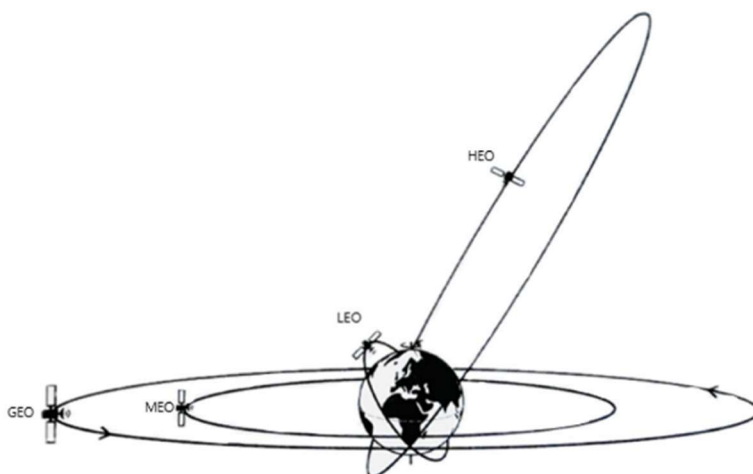
2 HUNITY műhold

A HUNITY egy magyar fejlesztésű kisméretű műhold, amely alacsony föld körüli pályára (LEO) kerülhet fel 2025-ben előre láthatóan nagyjából 400km-re a földtől. A 3PQ méretű nanosatelit célja, hogy különféle technológiai és tudományos tesztet hajtson végre az űrben, mint például az optikai detektálás, vagy kommunikáció. A műhold 3PQ méretéből 1PQ A Győri Széchenyi István egyetem SZESAT csapata kapott fejlesztésre, 1PQ a BME csapata, és a maradék 1PQ több egyetem részére is felajánlották.

A HUNITY fel van szerelve kommunikációs rendszerekkel, amelyek lehetővé teszik a földi irányítóállomásokkal történő folyamatos adatcserét. Mivel úgy terveztük, hogy a SZESAT és a BME része is önálló működésre legyen képes azaz saját kommunikációs panellel rendelkezzenek. Ezen felül a műhold földmegfigyelési feladatokat lát el.

Föld körüli pályák többféle kategóriába sorolhatók a pálya magassága, hajlásszöge, és egyéb jellemzői alapján, íme néhány általános [14]:

- 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)



1. ábra-Föld körüli pályák [15]

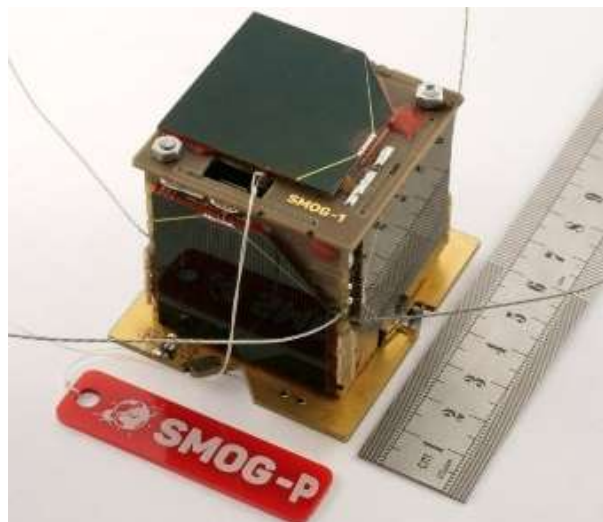
A LEO pályán keringő műholdak keringési magassága 2000 km-ig terjed. A legtöbb LEO műhold 300- 1200 km magasságban található, mivel ezen a tartományon belül optimálisak a feltételek a földmegfigyeléshez, kommunikációhoz, és egyéb kísérletekhez. Az itt elhelyezkedő műholdak rövidebb keringési periódussal (1,5-2 óra), kisebb szakaszcsillapítással és jelkésleltetéssel rendelkeznek. A Nemzetközi Űrállomás (ISS) például 400 km körüli magasságban kering. [14]

PocketQube formátum

- 1PQ PocketQube: 5 cm × 5 cm × 5 cm (125 cm³)
- 3PQ PocketQube: 5 cm × 5 cm × 15 cm (375 cm³)

CubeSat formátum:

- 1U CubeSat: 10 cm × 10 cm × 10 cm (1000 cm³)
- 3U CubeSat: 10 cm × 10 cm × 30 cm (3000 cm³)



2. ábra-1PQ méretű CubeSat [12]

Az alábbi képen egy 1PQ méretű műholdat láthatunk.

3 OPTIKA

A szabadtéri optikai kommunikáció (Free Space Optical Communication, FSO) egy olyan innovatív technológia, amely lehetővé teszi az adatátvitelt fényjelek segítségével a levegőn keresztül, fénysebességgel. Ez a rendszer számos előnnyel jár, de kihívásokkal is szembe kell néznie. Az alábbiakban bemutatom az FSO működését, előnyeit, hátrányait, valamint a kihívások kezelésének lehetőségeit.

Az FSO rendszerek működésének alapját az optikai jelek továbbítása képezi. Ezek a rendszerek lézer- vagy LED-alapú fényjeleket használnak, amelyeket az adó állít elő és juttat el a vevőhöz, aki ezt az optikai jelet érzékeli és feldolgozza. Előnyei közé tartozik a költséghatékonyság: a telepítési költségek különösen rövid távú alkalmazások esetén lehetnek alacsonyabbak, mint a hagyományos vezetékes rendszereknél. Az FSO biztonságos is, mivel a fényjelek nem szóródnak szét a levegőben, így nehezen lehallgathatók. Az FSO technológia azonban számos kihívással is szembesül. A meteorológiai hatások, például köd, eső vagy hó jelentősen befolyásolhatják az optikai jelek terjedését, ami a rendszer megbízhatóságát csökkenti. A telepítési lehetőségeket korlátozza, hogy az FSO rendszerek gyakran közvetlen optikai rálátást igényelnek az adó és a vevő között. Ezenkívül a külső fényforrások, például a napfény vagy mesterséges fények is zavarhatják a jelek észlelését.[4]

A jövőre tekintve az FSO technológia fejlődése várhatóan bővíteni fogja a rendszer alkalmazási területeit, különösen városi környezetben és fejlett kommunikációs rendszerekben. A fejlesztések fókuszában a jel erősítésének, az interferencia csökkentésének és az automatikus irányítású rendszerek optimalizálásának lehetőségei állnak, amelyek mind hozzájárulhatnak az FSO rendszerek teljesítményének javításához és szélesebb körű alkalmazásához. [1]

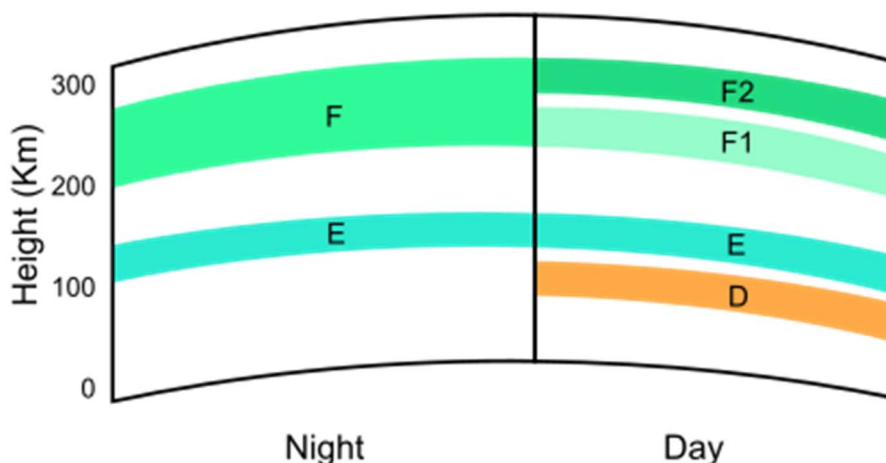
Mindent egybe véve az optikai kommunikáció már napjaink távközlési hálózataiban is fontos szerepet játszik. A műholdas optikai kommunikáció megoldást nyújthat az olyan elszigetelt területek számára, ahol a hagyományos optikai hálózatok kiépítése nem megvalósítható. A lézeres technológia, amely hasonló az optikai szálak működési elvéhez, nagy adatátviteli sebességet és sáv szélességet biztosít, viszont precíz irányzást igényel. A fény kevésbé szóródik szét, mint a rádióhullámok, ezért az adó és a vevő elemek pontos összehangolása nélkülözhetetlen a megbízható adatátvitel szempontjából.

4 A fény terjedését befolyásoló tényezők

Az űrtávközlési rendszerekben az átviteli csatorna kulcsfontosságú szegmens, mivel jelentősen befolyásolja a műholddal való kommunikáció kialakítását és teljesítményét. A Föld légkörében terjedő rádiófrekvenciás (RF) hullámok is csillapítást szenvednek, ami hatással van a jel minőségére és a kommunikáció megbízhatóságára. Különösen alacsony Föld körüli pályákon (LEO) célszerű nagyobb hullámhosszú lézerek (például infravörös tartomány) alkalmazása. Ezen a hullámhosszon a fény kevésbé **szóródik és nyelődik el** a légkörben, ami hatékonyabb és stabilabb kommunikációt biztosít [7]. Ezért a megfelelő hullámhossz kiválasztása elengedhetetlen a rendszerek optimalizálásához és a megbízható adatátvitelhez. A következő bekezdésekben ismertetem az infravörös fény terjedését befolyásoló tényezőket.

4.1 Ionoszféra

A lézer fényének terjedése az ionoszférában függ a szóródási és elnyelési folyamatoktól, valamint a lézer hullámhosszától. Az ionoszféra a légkör felső rétege, amely nagy mennyiségű ionizált részecskét tartalmaz. Ezek az ionok és szabad elektronok kölcsönhatásba lépnek az elektromágneses sugárzással, különösen bizonyos hullámhosszokon. Az ionoszférát a napszakok is jelentősen befolyásolják



3. ábra-ionoszféra rétegei [7]

Szóródás és elnyelődés az ionoszférában:

Az ionoszférában a **szóródás** elsősorban a **Thomson-szórás** és a plazmaszórás révén történik. A szabad elektronok nagyenergiájú sugárzással lépnek kölcsönhatásba, ami a sugárzás szóródását okozza. A **Rayleigh-szórás**, amely a kisebb hullámhosszú fényt (látható vagy ultraibolya) jobban befolyásolja, nem jellemző az ionoszférában, mert itt már inkább az ionizált gázok és az elektronok lépnek kölcsönhatásba a sugárzással.

Az ionoszférában az elnyelés mértéke függ a frekvenciától és az elektronplazma frekvenciájától. Ha a lézer frekvenciája alacsonyabb, mint az ionoszféra plazmafrekvenciája, akkor a sugárzás nagyrészt visszaverődik és elnyelődik. A **D-réteg** (legalsó réteg az ionoszférában, kb. 60–90 km magasságban) nappali időszakban fokozott elnyelést mutat az alacsony frekvenciájú elektromágneses sugárzásra, különösen a rádióhullámokra.[7]

A lézer hullámhossza és az ionoszféra hatása:

A rövidebb hullámhosszú sugárzás általában erősebben szóródik a részecskéken, és nagyobb az elnyelődés kockázata is, különösen az ultraibolya tartományban. Ezek a hullámhosszak érzékenyebbek lehetnek az ionoszféra részecskéire, különösen a első rétegekben.

Az ionoszféra hatása az infravörös hullámhosszú sugarakra kevésbé jelentős. Az infravörös tartományban (IR) vagy annál nagyobb hullámhosszúságú lézerek kevésbé szóródnak és nyelődnek el az ionoszférában. Az infravörös lézerek könnyebben áthatolnak az ionoszférán.

4.2 Szóródás (Rayleigh-szórás)

A Rayleigh-szórás a fény (vagy más elektromágneses sugárzás) szóródásának egy típusa, amely akkor következik be, amikor a sugárzás olyan részecskékkel találkozik, amelyek sokkal kisebbek a hullámhosszánál. Azonban ez a szóródási jelenség leginkább rövidebb hullámhosszú fény esetében figyelhető meg.

A szórt fény intenzitását az alábbi képlet írja le:

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \gamma)$$

4. ábra-szórt fény intenzitása [5]

A képlet paraméterei:

- I : a szórt fény intenzitása a π szög irányába,
- I_0 : az eredeti fény intenzitása,
- α : a részecske polarizálhatósága,
- λ : a fény hullámhossza,
- R : a fény által megtett út
- γ : a szórás szöge.

Hullámhosszfüggés

A fenti képletben jól látható, hogy a szórt fény intenzitása fordítottan arányos a hullámhossz negyedik hatványával (λ). Ez azt jelenti, hogy a rövidebb hullámhosszú fény (például kék, 450 nm) sokkal erősebben szóródik, mint a hosszabb hullámhosszú fény (például vörös, 700 nm). Ez a jelenség felelős a nappali égbolt kék színéért, mivel a rövidebb hullámhosszú (kék) fény nagyobb mértékben szóródik, mint a hosszabb hullámhosszú (vörös) fény.

Ez a szóródási mechanizmus, amelyet Rayleigh-szórásnak nevezünk, alapvetően befolyásolja a légköri fényviszonyokat és a napfény spektrumának észlelését.

4.3 Fényelnyelés

A fényelnyelés az a folyamat, amikor egy anyag elnyeli az elektromágneses sugárzás energiáját, így a fény intenzitása csökken, ahogy az anyagon áthalad. Az elnyelt energia általában hővé, kémiai energiává vagy más típusú energiává alakul. Az elnyelés nagysága függ a fény hullámhosszától, az anyag fizikai és kémiai tulajdonságaitól, valamint az útvonal hosszától, amelyet a fény az anyagon belül megtett.

4.3.1 Lambert-Beer-törvény (exponenciális gyengülés törvénye)

A **Lambert-Beer-törvény** egyike a legismertebb törvényeknek a fényelnyelés leírásában. Az elnyelés mértéke arányos a fény útjának hosszával az anyagon belül, valamint az anyag abszorpciós együtthatójával.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

5. ábra-Lambert-Beer-törvény [6]

A képlet paramétereit:

- I : a fény intenzitása az távolság megtétele után,
- I_0 : a beérkező fény kezdeti intenzitása,
- α : az anyag elnyelési együtthatója
- x : az anyagon áthaladó fény útjának hossza.

4.3.2 Lambert-Beer-törvény kiterjesztése koncentrációra

Ha az anyag egy oldat, az elnyelés a koncentrációval is összefügg, ekkor a törvényt az alábbi formában is fel lehet írni:

$$A = \epsilon l c = \alpha l$$

6. ábra-Lambert-Beer törvény [6]

A képlet paramétereit:

- A : az abszorbancia (a mért fényelnyelés)
- ϵ : az anyag moláris abszorbanciája
- c : az anyag koncentrációja az oldatban,
- l : az anyagban megtett fényút hossza.

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

7. ábra-Lambert-Beer törvény [6]

A fény elnyelése komplex kölcsönhatások eredménye az anyagban, amelyek több folyamatot foglalnak magukban, mint például:

- **Elektrongerjesztés:** Az anyag atomjai vagy molekulái fotonokat nyelnek el, és azok energiáját felhasználva a belső elektronjaik magasabb energiaszintre kerülnek. Ez

gyakran kvantumos jelenség, mivel az anyag csak meghatározott energiájú (vagy hullámhosszú) fotonokat nyelhet el.

Példa: Megfelel az atom elektronjainak két lehetséges energiaszintje közötti különbségnek azonos az atom egy elektronjának valamelyik gerjesztési energiájával. A gerjesztett elektronok visszajuthatnak az alapállapotba, hőt vagy más formájú sugárzást bocsátva ki.

- **Vibrációs elnyelés:** Molekulák esetében a fény energiája átkerülhet a molekulák belső rezgéseire. Ezt a fajta elnyelést leggyakrabban az infravörös tartományban tapasztaljuk.

Példa: A vízmolekulák az infravörös sugárzást vibrációs módjaik révén nyelik el.

5 Fejlesztés

A fejlesztés két fő részre osztható: egyrészt a műholdra telepítendő szenzormodulra, másrészt a jelenleg még csak elméleti szinten tervezett földi állomásra. A műhold leadása még 2025 elején esedékes. A műhold felbocsátása várhatóan 2025 második-harmadik negyedében fog megtörténni, így elég nagy időablak áll rendelkezésünkre a földi állomás további tervezésére és módosítására.

5.1 Szenzormodul

5.1.1 Mikrokontroller (MCU)

A szenzormodul tervezésekor elsősorban a műholdhoz választott mikrokontroller paramétereit kell figyelembe venni. A műholdon egy "STM32L476RGT3" típusú mikrokontroller kerül felhasználásra, amely az STM32L4 sorozat része, és kifejezetten alacsony fogyasztású alkalmazásokra optimalizált. A fejlesztés során azonban egy "Nucleo-G071RB" fejlesztőpanelt használtam, amely szintén az STM32 család tagja, így lehetőségem volt hasonló fejlesztőeszközök, például az STM32CubeIDE használatára. A fejlesztőpanel megkönnyítette a kezdeti kódolást és tesztelést.

5.1.2 Fényérzékelés

A fényérzékeléshez egy próbakapcsolást kellett létrehozni egy panelen, amely tartalmaz egy fényérzékelő eszközt, hogy emulálhassuk a szenzort. Ehhez a célhoz elsősorban egy fotodiódát választottam. A kapcsolat elkészítése után az STM32CubeIDE-ben be kellett állítani a megfelelő paramétereket, és egy egyszerűbb tesztkódot kellett írni, hogy vizsgálhassuk a panel működését. A kódot előrelátóan kellett megírni, hogy a későbbiekben erre építkezve haladhassunk tovább. Úgy terveztem, hogy a fejlesztő bordón található teszt LED akkor kapcsoljon fel, ha a bemeneten feszültség jelenik meg.

Ez könnyen megvalósítható, mivel a fotodiódán csak kis mennyiségű feszültség jut át, mivel fordított irányban kellett bekötni, vagyis záróirányban működik. A fotodióda olyan fényérzékelő, amely minél több fényt kap, annál nagyobb feszültséget enged át. Az általam választott fotodióda a „BPW34” típusú volt [2]. A feszültséget a fotodióda anód oldaláról kellett levenni, majd ezt a pontot kötöttem a Nucleobord bemenetére. A környezeti fény és a bemeneti feszültség folyamatos ingadozása miatt azonban a LED nem világított folyamatosan, hanem villogott.

5.1.3 ADC vizsgálat

A folyamatos feszültségváltozás miatt szükség van a bemeneti feszültség szintjének meghatározására. Ehhez a fejlesztőpanel bemeneti lábáról a jelet át kellett kötni egy ADC (Analog-to-Digital Converter) lábra. Az ADC egy olyan átalakító, amely az analóg jeleket digitális értékekké konvertálja, hogy a mikrokontroller képes legyen azokat kezelni és feldolgozni. Az átalakítás során az analóg jelet egy digitális formába hoztam, amely feldolgozható a rendszer által.

Ebben az esetben egy 12 bites ADC-t használtam. Az ADC felbontása meghatározza a legkisebb érzékelhető feszültségváltozást. Például egy 12 bites ADC-nél, ha a bemeneti feszültség 3,3V akkor a legkisebb érzékelhető feszültségkülönbség $805\mu V$. Ez az érték mutatja meg, hogy milyen finom feszültségváltozásokat tud érzékelni a rendszer. A legkisebb érzékelhető feszültségkülönbség (Least Sensable Bias) kiszámítható a V_{ref} referencia feszültség, és az ADC N bit számából a következő módon:

$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^N}$$

8. ábra-ADC [3]

Az ADC (Analog-to-Digital Converter) által mért feszültség visszaszámításához a következő lépéseket kell követni:

1. A legkisebb mérhető feszültségértéket úgy kaptam meg, hogy a teljes feszültségtartományt elosztottam az ADC bit felbontásával. Ha például 3,3 V van, és 12 bites ADC-t használok, a képlet így néz ki [3]:

$$\frac{3,3V}{2^{12}} = \frac{3,3V}{4096} \approx 0,000805V$$

9. ábra-legkisebb mérhető feszültség

Ez a legkisebb mérhető feszültségérték, amelyet a 12 bites ADC képes érzékelni.

2. Ha a digitális ADC értékből szeretném visszaszámolni az analóg feszültséget, az ADC értéket megszorozom ezzel a legkisebb feszültséggel. Például, ha a mért ADC érték 1234, akkor a visszaszámított feszültség:

$$1234 \cdot 0.000805 \text{ V} = 0.99337 \text{ V}$$

10. ábra-példa számolás

Ez azt jelenti, hogy az ADC által mért feszültség közelítően 0,99337 V, azaz majdnem 1 V.

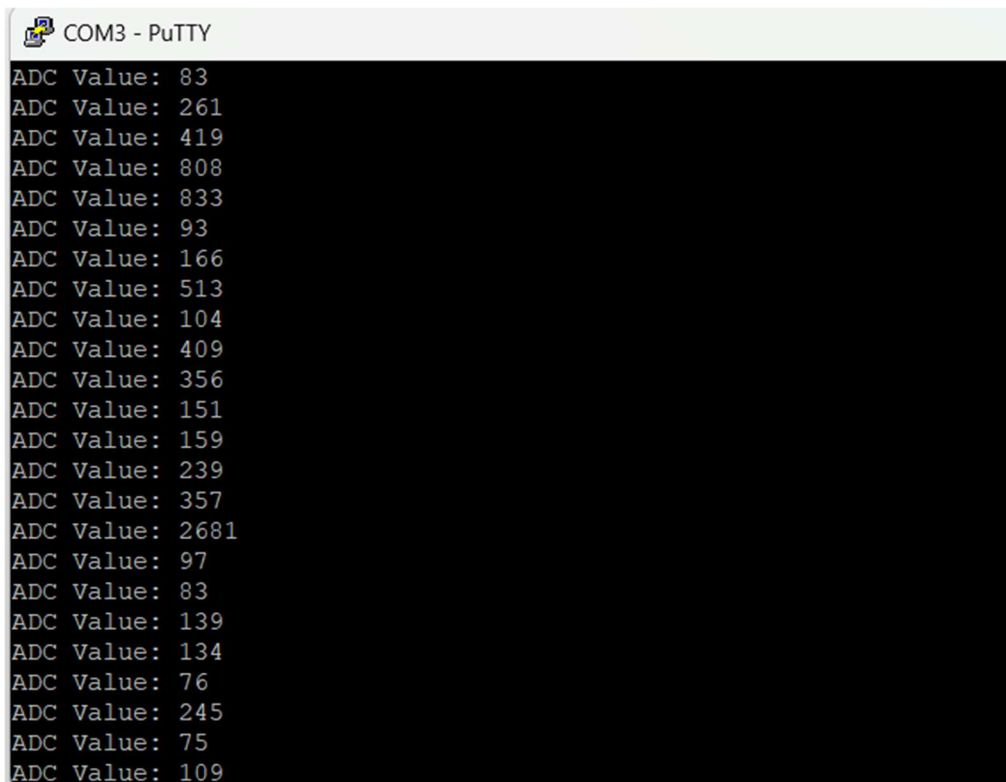
Ez a módszer lehetővé teszi, hogy az ADC által adott digitális értékből visszkapjam az eredeti analóg feszültséget.

A feszültségmérés alapjainak megismerése után a mikrokontroller ADC mérésre képes lábát bemenetként beállítva folyamatosan méréseket végeztem egy, az SMT-re feltöltött program segítségével. Az ADC mérések eredményeinek megjelenítéséhez UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) kommunikációt kellett létrehozni a számítógép és a mikrokontroller között.

A kód megírása során figyelembe kell venni a következő lépéseket:

1. **ADC konfiguráció:** Be kell állítani az ADC lábát bemenetként, és konfigurálni kell a szükséges paramétereket (pl. referenciafeszültség, mintavételezési sebesség).
2. **Mérések végrehajtása:** Az ADC folyamatosan mér, és a mért értékeket digitális formában tárolja.
3. **UART kommunikáció:** Létre kell hozni a UART kommunikációt a számítógéppel, amely lehetővé teszi a mérési eredmények kiíratását.
4. **Kiíratás:** A mért ADC értékeket a UART segítségével ki kell íratni a számítógépre.

A mérési eredményeim egyszeri kiíratásához tökéletesen megfelel a PuTTY, amely képes fogadni az UART-on keresztül érkező adatokat. Ha az eredményeket tárolni szeretném, akkor a PuTTY mellett más segédprogramokat is használhatnék, mint például a Tera Term vagy a CoolTerm, amelyek lehetővé teszik az adatok egyszerű rögzítését és fájlba mentését.



```
COM3 - PuTTY
ADC Value: 83
ADC Value: 261
ADC Value: 419
ADC Value: 808
ADC Value: 833
ADC Value: 93
ADC Value: 166
ADC Value: 513
ADC Value: 104
ADC Value: 409
ADC Value: 356
ADC Value: 151
ADC Value: 159
ADC Value: 239
ADC Value: 357
ADC Value: 2681
ADC Value: 97
ADC Value: 83
ADC Value: 139
ADC Value: 134
ADC Value: 76
ADC Value: 245
ADC Value: 75
ADC Value: 109
```

11. ábra-UART proba

Most már jól láthatók a mérési eredményeim, így elkezdhetem a hibák javítását, valamint a kapcsolás továbbfejlesztését és módosítását. Ez lehetőséget ad arra, hogy alaposan átvizsgáljam az áramkört, azonosítsam az esetleges tervezési hiányosságokat, és optimalizáljam a rendszert a jobb teljesítmény érdekében. A pontos mérések alapján célzott változtatásokat tudok végrehajtani, amelyek hozzájárulhatnak a végleges megoldás sikeréhez.

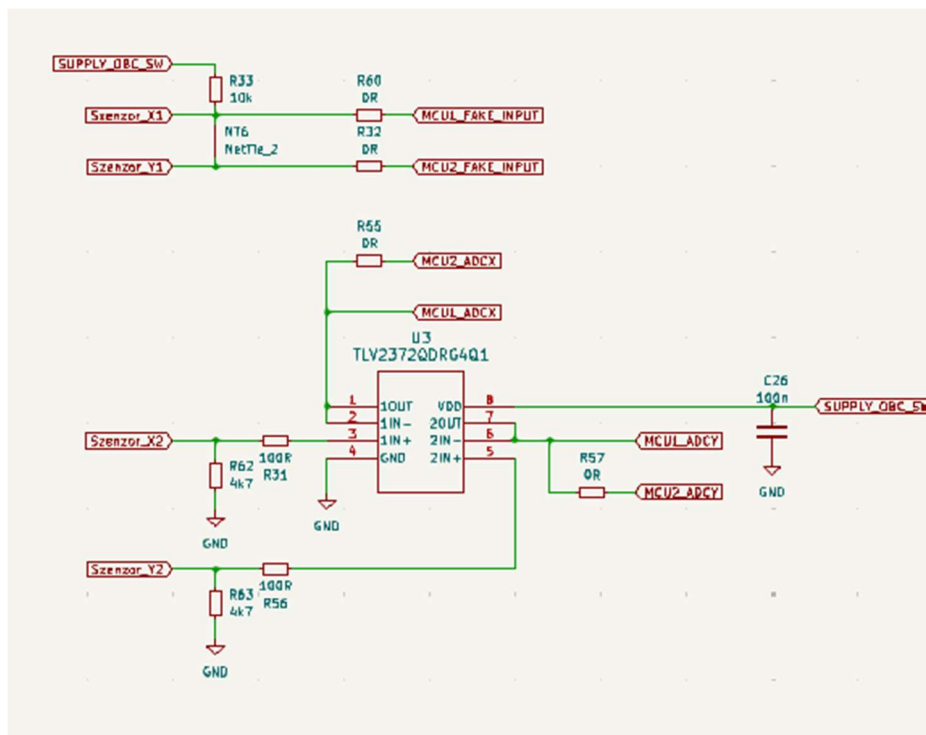
5.1.4 A műveleti erősítő

A műhold tervezésénél az egyik legfontosabb szempont, amelyet mindig szem előtt tartottunk, a redundancia. A fellövés közben bekövetkező rázkódás vagy egy erőteljesebb napkitörés ugyanis jelentős károkat okozhat az eszközben, vagy akár működésképtelenné is teheti azt. Természetesen nem minden elemet lehet redundánsan elhelyezni a paneleken, de ahol lehetséges, ott igyekszünk ezt megtenni. A szenzorok redundanciája is prioritást élvezett a tervezés során.

A műhold négy élére szenzorokat tervezünk elhelyezni, amelyeket átlósan párhuzamosítva kötötünk össze. A redundancia érdekében olyan integrált áramkört (IC) választottunk, amelyben két műveleti erősítő is helyet kapott. Ennek köszönhetően a két-két szenzornak külön bemenetei és külön kimenetei lesznek. A két külön kimenet a redundáns mikrokontrollerekhez kapcsolódó, ADC mérésre képes lábakra fog menni.

A választott műveleti erősítő a „TLV2372QDRG4Q1”, amely alacsony feszültségű és alacsony zajszintű működése révén ideális a szenzorok jeleinek erősítésére, lekövetésére. Ez az eszköz a kettős erősítési konfigurációnak köszönhetően biztosítja a redundanciát, ezáltal növelve a rendszer megbízhatóságát és ellenálló képességét a külső zavarokkal szemben. A műveleti erősítő kiválasztásánál figyelembe vettem a teljesítményt, a sebességet és a tápfeszültség határokat, hogy a lehető legjobb teljesítményt nyújthassa a tervezett kísérletek során.

Ahogy korábban említettem, a legkisebb mérhető ADC-szint $805\mu\text{V}$. A műveleti erősítő feszültségkövetőként van bekötve a kapcsolásba, hogy a magas bemeneti impedanciájával és megfelelő „slew rate” -jével gyorsan és pontosan adja vissza a szenzorokon mért feszültséget.



12. ábra-szenzor kapcsolási rajza

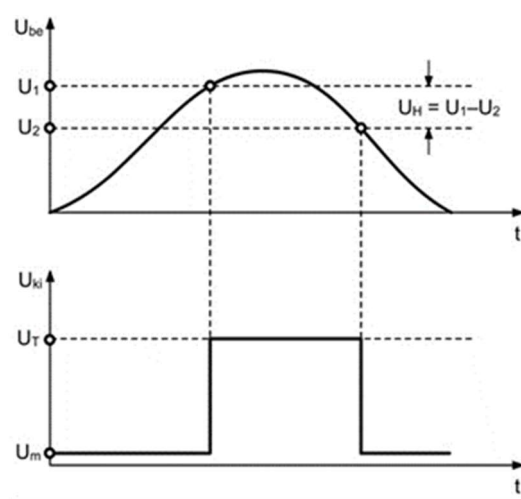
Az alábbi képen látható a tervezett szenzor modul, a fototranzisztorok nincsenek be kötve a rajzon, a kollektor lábat a Szensor_x1, y1 lábra kell kötni, az emitter lábat pedig a Szensor_x2, y2 lábra. Természetesen a 2-2 fototranzisztort külön x és y lábra.

A földi állomás jelenleg még csak elméleti tervezés alatt áll, a lézert a szenzormodul specifikációit szem előtt tartva fogjuk kiválasztani. A lézer teljesítményéből és a szenzormérésből képesek leszünk meghatározni, hogy a külső hatások, például az ionoszféra,

milyen mértékben gyengítik a földi állomás adóteljesítményét. Miután ezeket az adatokat megismerjük, olyan lézerteljesítményt állíthatunk be, amely a szenzor minimális és maximális érzékelési tartománya között maximális intenzitással váltakozik.

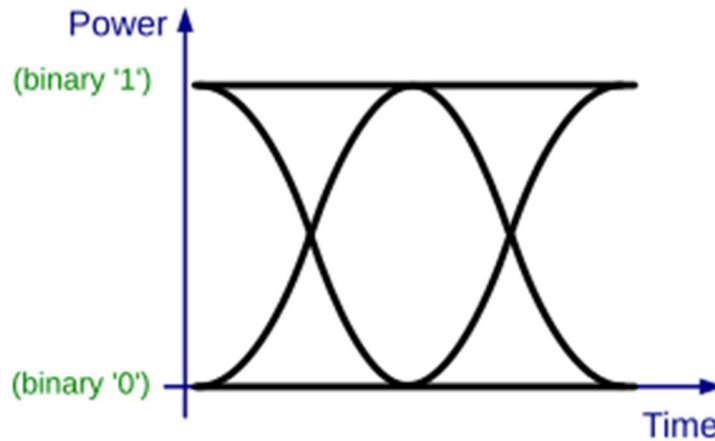
A műveleti erősítőknél érdemes lehet kitérni a komparátorok működésére, mint például egy Schmitt-trigger és egy csúszó komparátor működésére.

A Schmitt-trigger egy olyan bistabil billenőkör, amelynek kimeneti állapota a bemeneti jel amplitúdójától függ. Ez az áramkör lényegében egy küszöbérték-kapcsolóként működik, hiszen csak akkor vált át a kimeneti állapot, amikor a bemeneti jel eléri vagy meghaladja a meghatározott alsó vagy felső küszöbértékeket. Ez a hiszterézis hatás miatt történik, amely megakadályozza a kimenet ingadozását kisebb bemeneti feszültségingadozások esetén.



13. ábra-hiszterézis ábra [4]

A csúszó komparátorban a referenciasfeszültség nem állandó, hanem a bemeneti jel változásait követi, például egy mozgó átlag vagy egy alacsony frekvenciájú szűrés eredménye alapján. Az ilyen típusú áramkör alkalmas olyan helyzetekre, ahol a bemeneti jel ingadozik a rendszer mégis pontos összehasonlítást igényel. A referenciasfeszültség folyamatos igazítása miatt a komparátor képes reagálni a hosszú távú változásokra is, miközben a rövid távú változásokra érzékeny marad. A csúszó komparátor referencia szintjét azok a metszéspontok adják meg, amelyek a bemeneti jel és a komparátor által beállított felső és alsó küszöbértékek találkozásánál helyezkednek el. Ezek a metszéspontok határozzák meg, hogy a kimenet mikor vált magas vagy alacsony szintre, azaz mikor esik a bemeneti jel a beállított tartományba vagy hagyja el azt.



14. ábra-referencia jel [9]

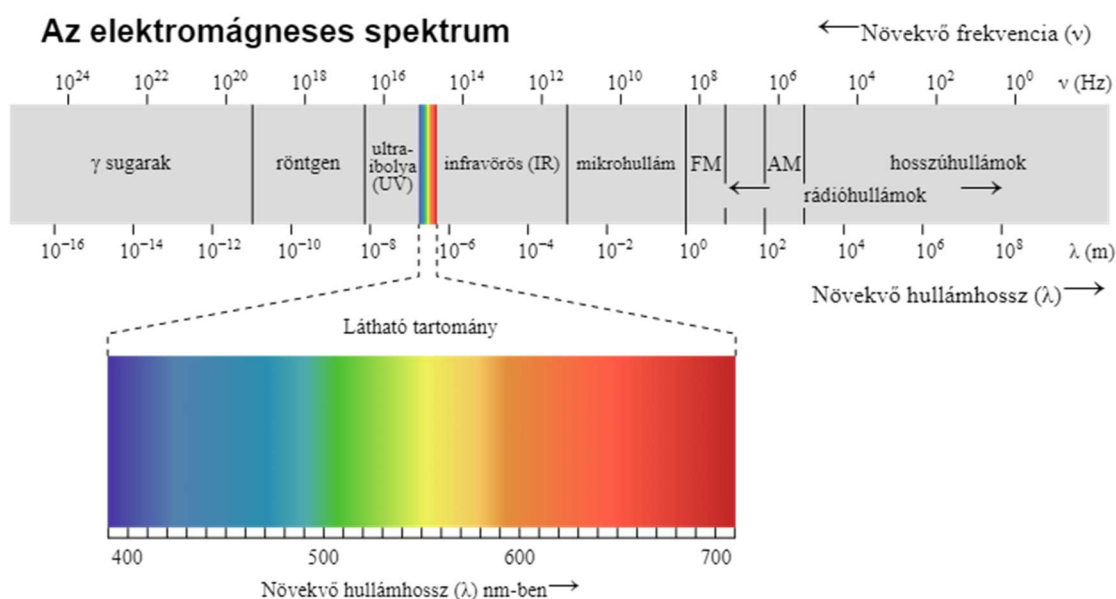
Az átbillenéshez elégséges feszültségkülönbség nagyon kicsi általában néhány μV nagyságrendű, mivel a műveleti erősítő nagy nyílthurkú feszültségerősítéssel (kb. 100 dB) rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy ha a két bemeneten csak μV nagyságrendű különbség van, akkor az erősítő kimenete már át fog billenni.

Olyan környezetekben, ahol sok zaj van, a csúszó komparátor segíthet a zaj átlagolásával egy stabilabb referenciafeszültséget fenntartani. A komparátor követi a bemeneti jel hosszabb időtartamú átlagos változásait, és így pontosabb eredményt adhat, ha az átlagolt jelhez viszonyítjuk a bemeneti változásokat. Ez egy érdekes technika, amely alkalmazható például érzékelők adatainak feldolgozásában, ahol fontos a hosszú távú trendek figyelembevétele, miközben a rövid távú változásokra is reagálni kell.

5.1.5 Hullámhossz tartomány

A kapcsolat redundanciájának biztosítása mellett fontos célom volt az optikai érzékenység fokozása is. Ezt úgy értem el, hogy olyan hullámhosszon működő szenzort választottam, amely kizárólag az infravörös tartományban érzékeli a jeleket.

A kiválasztott szenzor egy „TEMT7100ITX01” típusú szilícium NPN sík fototranzisztor, amely nappali fényt blokkoló szűrővel rendelkezik. A szűrő sáv szélessége **830 nm-től 950 nm-ig** terjed, amely lehetővé teszi az infravörös sugárzók hatékony észlelését. Ez a megoldás segít csökkenteni a külső fényforrások zavaró hatásait, így a szenzorunk érzékenyebbé válik az optikai jelekre, és megbízhatóbb működést biztosít a különböző környezeti feltételek mellett is. Az infravörös hullámhossz használata különösen fontos a műholdas alkalmazásokban, ahol a környezeti zaj és a háttérfény befolyásolhatja a mérések pontosságát.

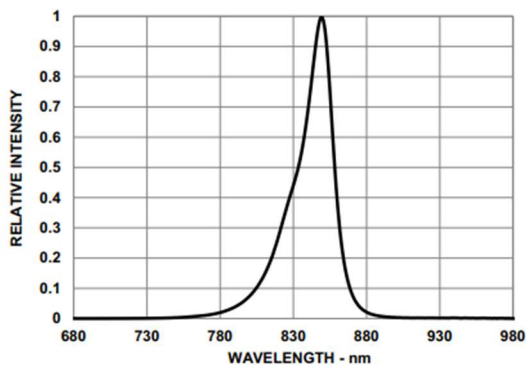


15. ábra-elektromágneses spektrum

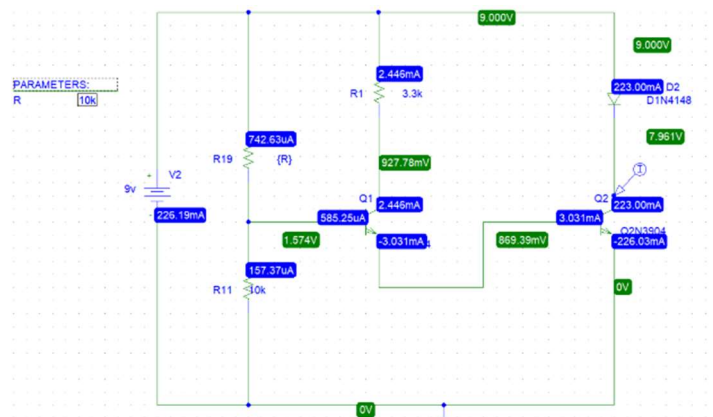
A hullámhossz kiválasztását számos tényező befolyásolja. A lézervény levegőben való terjedési csillapítását a légkör különböző optikai tulajdonságai és a fény hullámhossza közötti összefüggés határozza meg. A legfontosabb tényezők közé tartozik a fény elnyelése és szóródása a levegő molekuláin, aeroszolokon és egyéb részecskéken.

LEO (Low Earth Orbit) pályán célszerű nagyobb hullámhosszú lézert alkalmazni, például infravörös tartományban, mivel ez a hullámhossz lényegesen kevésbé szóródik és nyelődik el a légkörben. Ennek következtében hatékonyabb és stabilabb kommunikációt biztosít, amely elengedhetetlen a műholdas rendszerek megbízhatóságának és teljesítményének szempontjából.

Most, hogy eljutottam odáig, hogy a kapcsolás kizárólag az infravörös fényre reagál, jelentősen értékelhetőbb mérési eredményeket kaptam. Ehhez azonban először egy infravörös LED-es kapcsolást kell összeállítanom a teszteléshez. Az általam választott infravörös LED a "HLMP-Q700-00011", amelynek effektív hullámhossza 850 nm. Érdekes megemlíteni, hogy ez a LED a látható vörös fény tartományába is beelóg, így gyengén, de szabad szemmel is látható a fénye. Kamerával lefotózva pedig még inkább megjelenik, így egyértelműen látható, hogy infravörös LED-ről van szó.[8]



16. ábra-infra tartomány



17. ábra-kapcsolási rajz

5.1.6 Szoftveres tesztelések

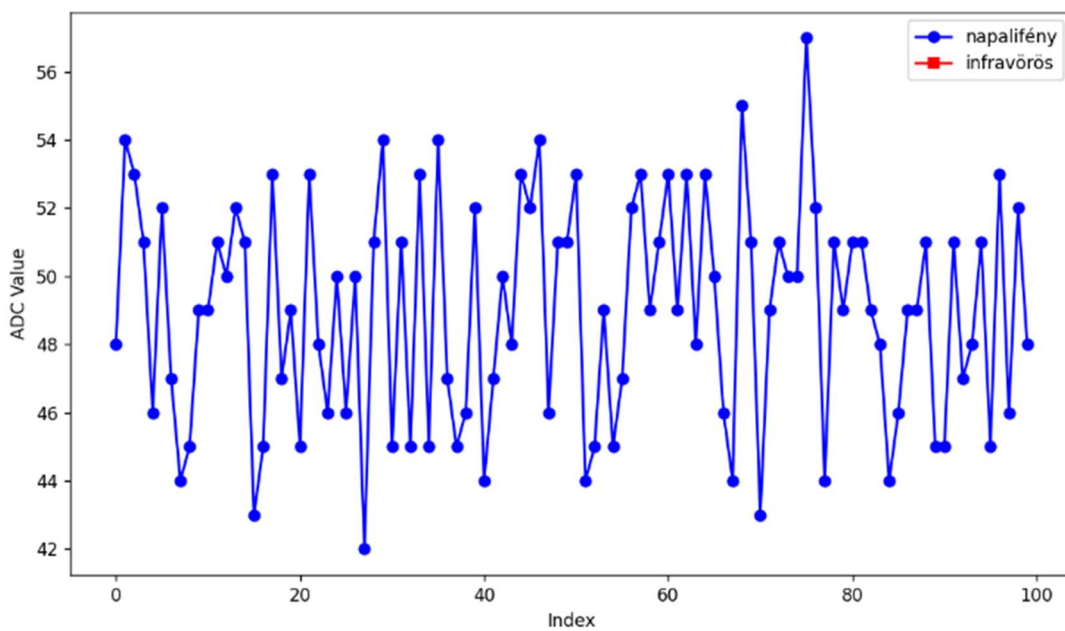
Ahogy korábban említettem, az ADC érték mérését a mikrokontroller végzi, és az adatokat UART kommunikáción keresztül küldöm át a számítógépre. Míg a fotodiódával végzett méréseket a fény pillanatnyi ereje jelentősen befolyásolta, addig a fototranzisztor szinte elhanyagolható számú, mindössze 47 ADC értéket jelez, ami feszültségszintben 0,04 V-nak felel meg. Ezt a mérést egy olyan kóddal végeztem, amely folyamatosan figyeli a bejövő jel szintjét, és tizedmásodpercenként kiírja azt. Továbbá, 100 darab mérés után átlagolja az eredményt, ami segít a megbízhatóbb adatok előállításában.

```
ADC Value: 48
ADC Value: 48
ADC Value: 48
ADC Value: 46
ADC Value: 45
ADC Value: 47
ADC Value: 48
ADC Value: 48
ADC Value: 47
ADC Value: 47
ADC Value: 47
ADC Value: 45
ADC Value: 48
ADC Value: 47
ADC Value: 48
ADC Value: 43
ADC Value: 50
Average ADC Value (last 100 readings): 47
```

18. ábra-fototranzisztoros mérés

Egy másik vizsgálat során megfigyeltem azt is, hogy a szenzor hogyan reagál egy elemilámpa fényére, hogy annak van-e hatása a mérésekre. Az így kapott eredmény 46 ADC érték lett. Ez alapján kijelenthető, hogy a szenzor kizárólag az infravörös fényt képes érzékelni.

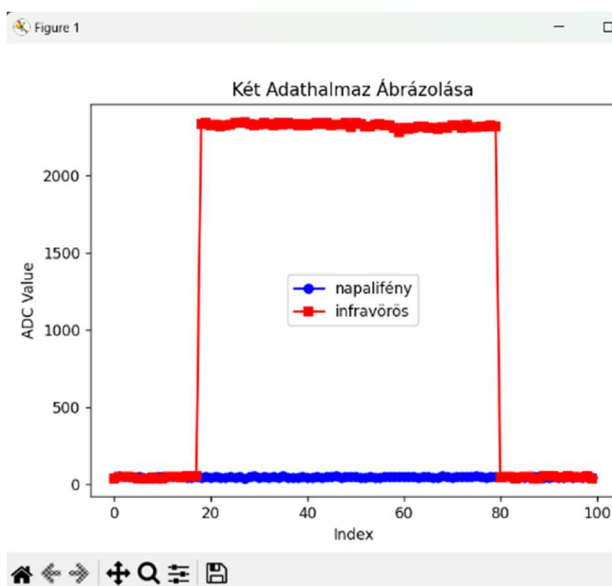
Ezek után írtam egy egyszerű kódot Visual Studio Code-ban, amely a száz mérési eredményt egy grafikonnal illeszti össze.



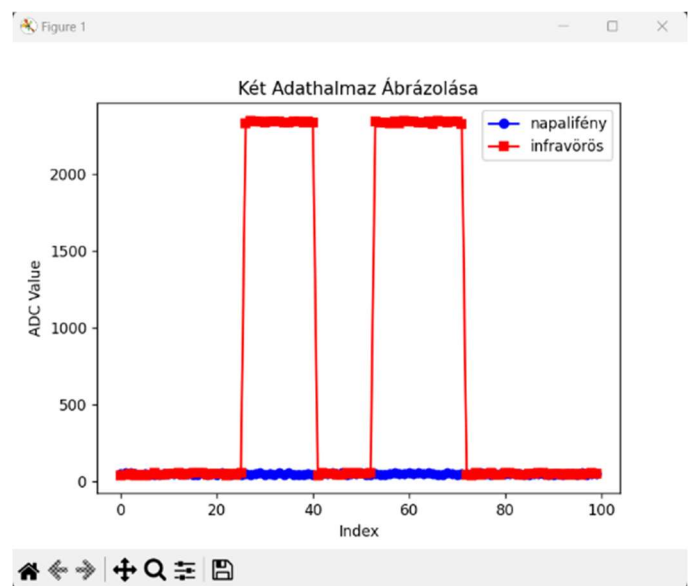
19. ábra-100 mérési eredmény

A grafikonon jól látható, hogy a száz mérés mindegyike a 40 és 60 ADC érték között volt. Ezt követően bemutatok olyan grafikonokat, ahol megtartottam ezeket a méréseket, de a mérés kezdetét követően bekapcsoltam az infravörös LED-et, majd később ki is kapcsoltam azt.

A jövőben részletesebben foglalkozok majd a mérési értékek változásaival, redundánsan kapcsolt elemek vizsgálatánál.

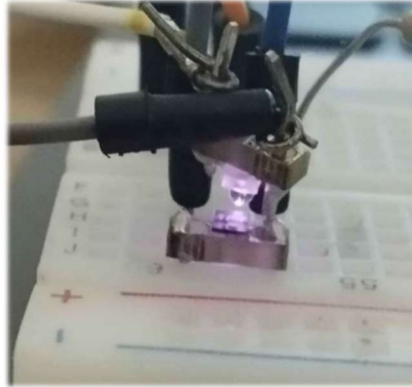


20. ábra-egy impulzus



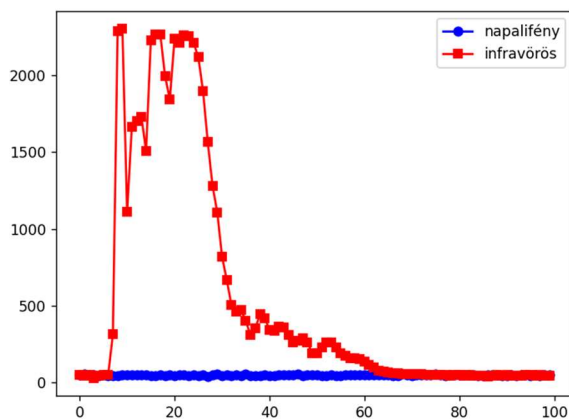
21. ábra-két impulzus

Szemmel látható, hogy amíg nem volt bekapcsolva az infravörös LED, a mérések szinte teljesen illeszkedtek. Amint viszont bekapcsoltam, a mért értékek mindenféle átmenet nélkül a beállított maximális értékre ugrottak. A mérés elvégzésekor a szenzort és a lézert a lehető legközelebb helyeztem el egymáshoz.

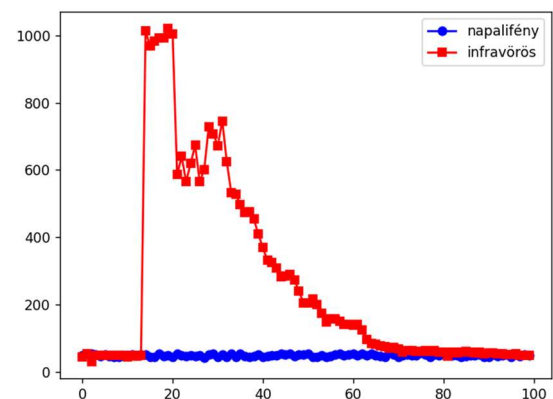


22. ábra-LED

Ahhoz, hogy a tényleges működési körülményeket valamivel pontosabban modellezsem, a következő lépés az volt, hogy megvizsgáltam, mi történik, ha egyre távolabb tartjuk a lézert a szenzortól. A távolság növekedésével a lézer fényének intenzitása csökken, így a szenzor által mért ADC értékek várhatóan fokozatosan csökkenni fognak.



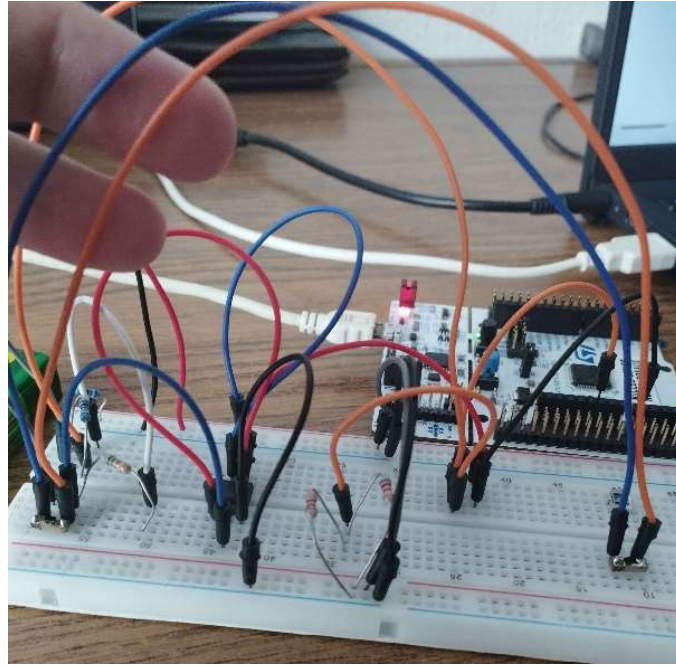
23. ábra-függvénygenerálás



24. ábra-függvénygenerálás

Ha elég lassan és óvatosan tudnám eltávolítani a lézert a szenzortól, akkor nagyon szép exponenciálisan csökkenő görbét rajzolhatnék ki az ADC értékek és a távolság között. Fontos azonban megjegyezni, hogy egy ilyen kis teljesítményű infravörös LED-del az előző mérések alapján csupán 15-20 cm-re tudtam eltávolítani az adót, és ekkor az ADC érték már majdnem az alapérték vonalára simult.

Az eddigi rendszer **egy** fototranzisztor méréseit tartalmazta, azonban mivel a HUNTY-n redundánsan lesznek kötve a fototranzisztorok, fontos, hogy a földi viszonyok között is megvizsgáljuk, hogy mire számíthatunk.



25. ábra-szenzorok párhuzamosítása

Látható, hogy a fototranzisztorokat párhuzamosan kapcsoltam, megfelelő távolságra egymástól, hogy szenzoronként külön-külön is megvizsgálhassam az ADC értékeket. Bármelyik fototranzisztort is világítottam meg, a kettő mérési eredményeiben nem tapasztaltam különbséget.

```

ADC Value: 65
ADC Value: 65
ADC Value: 59
ADC Value: 58
ADC Value: 65
ADC Value: 68
ADC Value: 68
ADC Value: 87
ADC Value: 93
ADC Value: 71
ADC Value: 95

```

26. ábra-párhuzamosítót mérés

A mérés megkezdése után azt tapasztaltam, hogy jelentősen magasabb ADC értékeket mérek, mint korábban. Míg a korábbi mért értékek 40-60 ADC között mozogtak, most ezek akár másfél-kétszerese is lehet a korábbiaknak. Ebből hasznos következtetéseket vonhatok le a HUNTY mérésihez. Végül is ott négy szenzor lesz felszerelve, így az érzékenység közel négyszeresére nőhet.

5.1.7 Szoftver véglegesítése

Miután megfelelő mennyiségű mérési adatom van, nekiláthatok a szenzor szoftverének véglegesítésének. Egy átlagos LEO pályán keringő műhold 90-100 perc alatt kerüli meg a Földet, de ez alatt az idő alatt a láthatósági idő csupán 10-15 perc. De az időből adódóan egy nap alatt többször is meg kerüli a földet.

1. 90 perces keringési idő:

$$\text{Keringések} = \frac{24 \text{ óra} \times 60 \text{ perc}}{90 \text{ perc}} \approx 16 \text{ keringés}$$

2. 100 perces keringési idő:

$$\text{Keringések} = \frac{24 \text{ óra} \times 60 \text{ perc}}{100 \text{ perc}} = 14.4 \text{ keringés}$$

27. ábra-keringési idő

Azonban hiába van 14-16 keringés egy nap alatt, nem minden fényviszony alkalmas optikai kommunikáció folytatására. A Nap erőteljesen sugároz az infravörös tartományban is, ami zavarhatja a kommunikációt. Ezért a szenzor többségében esti kísérleteknél lesz aktív, a 10-15 perces időközökben.

A szoftvert úgy kellett megtervezni, hogy ebben a viszonylag szűkös időkeretben is minél több adathoz juthassunk. Ennek érdekében öt percen keresztül fogunk méréseket végezni öt periódusban, amelyeket egymás után küldünk le. Percenként 60 mérést fogunk elvégezni, azaz másodpercenként egyet, így öt perc után összesen háromszáz mérési eredményünk lesz.

Az első periódusban nem próbálunk kommunikációt létesíteni, így az ebből származó adatok a világűr fénye és a Földről visszavert és kisugárzott fény értékei lesznek, amelyekhez viszonyítani tudunk. A második periódusban be- és kikapcsolhatjuk a lézert, így látható lesz az intenzív változás az értékek nagyságában. Ezen kívül a második periódus legnagyobb elemét kiemeljük, majd ennek az értéknek a feléhez viszonyítjuk a többi periódus folytonosságát. Ha minden érték nagyobb ennek az értéknek a felénél, akkor ne csak az eredményeket küldjük le, hanem egy üzenetet is, hogy sikeresen leköveltük a műhold mozgását. Így ez a harmadik periódustól egy folyamatosság-vizsgálat is lesz.

```
Cycle 1 measurements: 69,66,61,64,66,69,65,64,67,59
Cycle 2 measurements: 68,67,61,64,2235,62,51,62,57,54
Cycle 3 measurements: 55,61,59,2293,2296,2288,2297,2281,769,1616
Folyamatos érzékelés
Cycle 4 measurements: 2085,2081,1584,1509,1491,1457,1477,1458,1421,1438
Cycle 5 measurements: 1433,61,66,70,61,69,61,72,63,63
```

28. ábra-Folyamatosságvizsgálat

Ebben a mérésben hitelesítettem a redundánsan kapcsolt szenzorokat és a mérési kód együttes működését. A mérések felgyorsítása és egyszerűsítése érdekében nem egy egész percet vizsgáltam, hanem csupán 10 másodpercet. Azonban jól látható, hogy az előbb említett szoftver felépítése megmaradt.

5.1.8 Kommunikáció a műholdal

Az eddigiek alapján minden rendelkezésünkre áll ahhoz, hogy sikeresen detektáljuk a különböző optikai jeleket. A műhold elsődleges kísérleti célja annak tesztelése, hogy a földi állomásról képesek vagyunk-e pontosan eltalálni egy 3PQ méretű műholdat. A teljes modulált optikai kommunikációt saját műholdunkra szánjuk, de nem zárjuk ki a lehetőséget, hogy a későbbiekben egy bootloADERES kódfrissítéssel rendszerüzeneteket vagy adatokat is lekérhetünk.

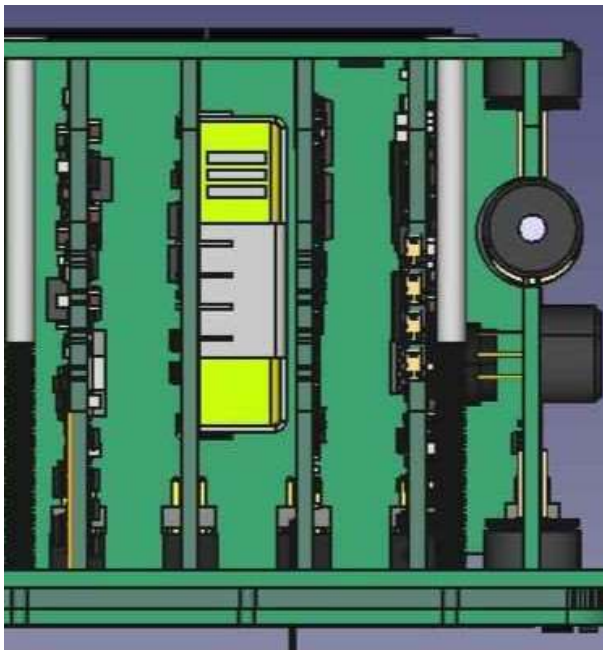
A bootloADERES frissítést mind a Földön, mind az űrben elvégezhetjük. A következőkben vázolom egy lehetséges modulációs kód felépítését: A megfelelő számú mérés után kiértékelhetjük az eredményeket, és ennek alapján határértékeket állíthatunk be egy amplitúdó-modulációhoz. Az eredeti mérések során egy perc alatt 60 adatpontot rögzítettünk. Ezt úgy egyszerűsíthetjük, hogy ötösével összevonjuk és átlagoljuk őket. Az ötös csoportosítást azért alkalmazzuk, mert egy esetleges időbeli elcsúszás a távolság vagy külső környezeti tényezők miatt előfordulhat, azonban ha öt adatból számolunk átlagot, sokkal nagyobb eséllyel leszünk pontosak, és így a kapott eredmény megbízhatóbb lesz. Ennek eredményeként 12 adatunk marad. Az egyszerűség kedvéért egy határértékkel különíthetjük el az adatokat, ahol az alsó határ a nulla, a felső pedig az egy lesz. Fontos, hogy a határértéket úgy válasszuk meg, hogy a felső határ valóban csak az általunk kilőtt lézer detektálására vonatkozzon.

Most tehát 12 darab egyes és nullás értékünk van, amelyeket négyes csoportokban fogunk vizsgálni. Mivel 2^4 az tizenhat, így 16 különböző állapotot tudunk definiálni, és minden állapothoz hozzárendelhetünk egy adott parancsot. Ezekben a parancsokban meghatározhatjuk, hogy milyen rendszer adatokat kérünk le. Ezeket előrelátóan kell megválasztani, például célszerű a 0000 állapotot üres adatként definiálni, míg az 1111-et csak mérési adatként kezelni. Így egy mérés során 3 különböző rendszer információt is lekérhetünk. A rendszer adatokat

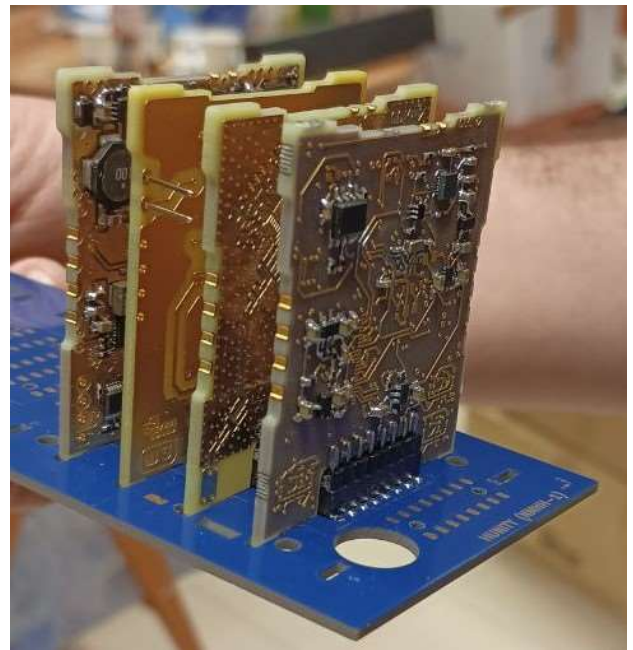
rádióhullámokkal továbbíthatjuk a földi állomásra.

5.1.9 Deszka modell (Flat-sat)

A műholdaknál a "deszka modell," angolul "flat-sat," egy olyan kísérleti összeszerelési forma, ahol a műhold összes alrendszerét – például a kommunikációs, energiaellátási és vezérlési rendszereket – egy síkfelületre, például egy deszkára vagy asztalra rögzítik. Itt integrálják és tesztelik őket együtt, mintha a végleges műholdon működnenek. Ez a módszer lehetővé teszi az alrendszerek együttműködésének ellenőrzését és a lehetséges problémák időben történő azonosítását a tényleges összeszerelés előtt.

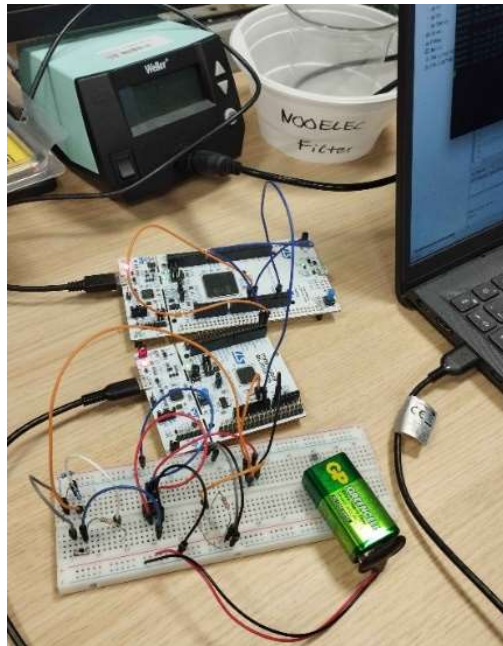


29. ábra-flat-sat 3D modell



30. ábra-flat-sat

Mivel a TDK írása és a műhold fejlesztése egyidőben történik ennek megvalósulását még nem volt lehetőségem dokumentálni, azonban az egyes részegységek, beleértve a kapcsolásokat és mikrokontrollereket, külön-külön szoftveresen le lettek tesztelve.



31. ábrarészegységek tesztelése

A képen látható, hogy a két Nucleo board UART kommunikációval van összekötve, és az egyik a másikra továbbítja a mérési eredményeket. Ez rendkívül fontos volt számunkra, mivel a panelek is UART kommunikációval lesznek összekapcsolva, és csak így tudjuk a COM panelnek továbbítani a mérési adatokat.

5.2 Földi állomás kialakítása: kitekintés

A földi állomás kiépítésére vonatkozó elképzeléseink jelenleg még a tervezési fázisban vannak, a gyakorlati megvalósítás még nem kezdődött el. Bár egyelőre nem vagyunk teljesen biztosak abban, hogy pontosan milyen elemekből álljon a rendszer, célunk egy olyan optikai földi állomás létrehozása, amely képes műholdakat detektálni és nyomon követni. Az alábbiakban bemutatom a tervezési szempontokat és a rendszer felépítésével kapcsolatos elképzeléseinket.

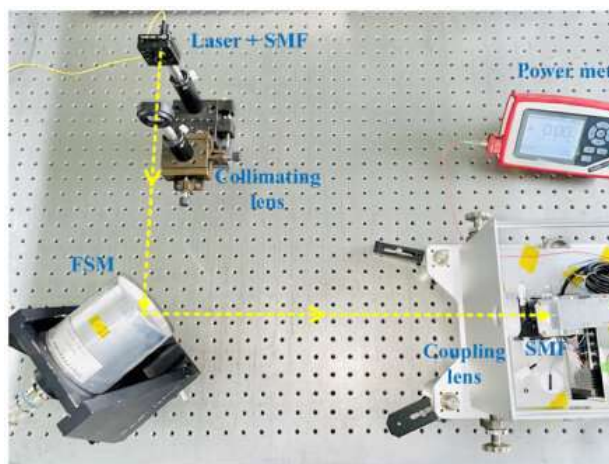
Használható hullámhosszak

Az optikai kommunikációhoz számos hullámhossz használható, de a leggyakrabban alkalmazottak az FSO (Free Space Optical) rendszerekben a 850 nm, 1064 nm, 1400 nm, és 1550 nm. Ezek a hullámhosszok egybeesnek a légkör transzmissziós ablakával, amelyen keresztül a legkisebb veszteséggel képesek áthaladni. A "légkör transzmissziós ablaka" azt

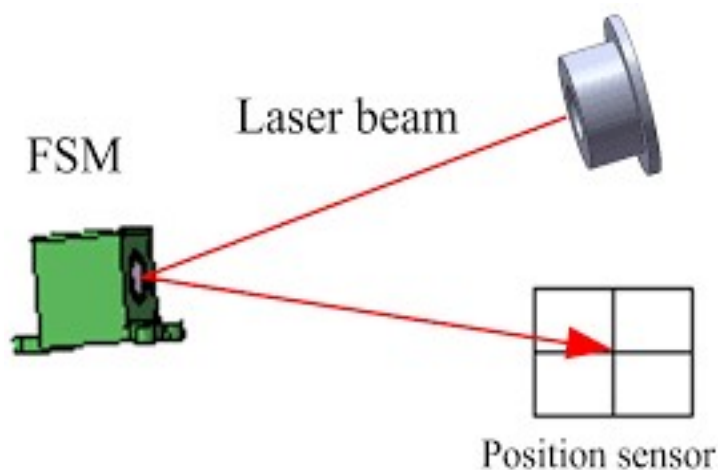
jelenti, hogy a Föld légköre bizonyos hullámhosszokon kevesebb abszorpciót és szórást mutat, így az ezekbe a tartományokba eső elektromágneses hullámok minimális veszteséggel haladnak át rajta. Ez különösen fontos a távközlésben, mivel lehetővé teszi, hogy a jelek hatékonyan ériék el a célpontjaikat, például műholdakat. Ezen kívül ezek a hullámhosszak hatékonyan érzékelhetők kereskedelmi forgalomban kapható (COTS) detektorokkal, például fotodiódákkal és fototranzisztorokkal, amelyek kifejezetten az adott tartományra érzékenyek. Például az infravörös tartományban az InGaAs detektorok (1000-1700 nm) és a Si detektorok (1100 nm alatti tartományban) gyakoriak. Ezek az eszközök előnyösek a költséghatékonyság és a könnyű elérhetőség szempontjából.

Az OGS (Optical Ground Station)

A földi állomás telepítési helyének kiválasztása kulcsfontosságú, mivel ez határozza meg a műholdak detektálásának időtartamát és megbízhatóságát. Akár fix, akár mobil állomásról van szó, a teleszkópot akadálymentes helyre kell telepíteni, amely biztosítja a zavartalan rálátást az égbolton mozgó objektumokra, hosszabb ideig nyomon követve őket. Az állomás kialakításának első lépése a követelmények precíz meghatározása. Minél pontosabban definiáljuk az adó-vevő rendszer céljait és paramétereit az adott küldetéshez, annál hatékonyabb és megbízhatóbb lesz a rendszer. A műholdak követéséhez finom, gyors mozgásokra képes tükrökre (FSM - Fast Steering Mirror) van szükség, amelyek a műholdak sebességéhez igazodva gyorsan és pontosan képesek követni a célpontot. [4]



32. ábra-FSM [10]



33. ábra-FSM [11]

A földi állomások általában nagyobb teljesítménnyel rendelkeznek, mint a műholdak, ezért a kommunikáció kezdeményezése gyakran a földi állomás feladata. Ez különösen fontos az alacsony Föld körüli pályán (LEO) keringő műholdakkal történő kommunikáció esetében, mivel ezek sebessége elérheti az $1.1^\circ/\text{s}$ -ot, ami komoly kihívást jelent a pontos követés során. Az ilyen nagy sebességű műholdak esetében a pontos követési rendszer elengedhetetlen ahhoz, hogy a kommunikáció sikeres legyen, különösen optikai rendszerekben, ahol a jel fókusza szűkebb. [16]

A költségek minimalizálása érdekében érdemes elkerülni az egyedi, drága megoldásokat, és inkább kereskedelmi forgalomban kapható (COTS) amatőr állomások kialakítását előnyben részesíteni. Első lépésként el kell dönteni, hogy fix vagy mobil állomást kívánunk kiépíteni. [1] A fix állomások előnye, hogy kevesebb újra kalibrálást igényelnek, mivel állandó helyen, saját obszervatóriumban találhatók, és pontosabb mozgásokat tesznek lehetővé az abszolút kódolókkal ellátott szerkezetük révén. Hátrányuk azonban, hogy működésük nagyban függ az időjárási körülményektől. Mobil állomás esetén a rugalmasság és az új helyszínek könnyebb elérhetősége a fő előny, de több karbantartást és újra kalibrálást igényelhet.

Az állomás kialakításának fontos eleme a stabil, mozdulatlan talapzat, amely megőrzi stabilitását az átmozgatások során is. A megfelelő helyszín kiválasztása is lényeges szempont. Egyetemünk tetején található RF állomásokkal ellátott pódium például ideális helyszín lehet, mivel kiépített infrastruktúrával rendelkezik, amely megkönnyíti a kezdeti tesztelést és az elsődleges működéshez szükséges feltételek biztosítását, például a tápellátást.[16]

Egy olyan földi állomás kialakítására törekszünk, amely hasonló elveken alapul, mint a fentiekben leírt rendszer: költséghatékony, kereskedelmi forgalomban kapható eszközöket alkalmaz, stabilan működik, és alkalmas a műholdak detektálására és nyomon követésére. Ha sikerül megvalósítani a tervezett követelményeket és telepítési szempontokat, egy megbízható, hatékony optikai földi állomást hozhatunk létre, amely hozzájárulhat a jövőbeni küldetések sikeres kommunikációjához.

6 A lézerek veszélyei, kockázatelemzés

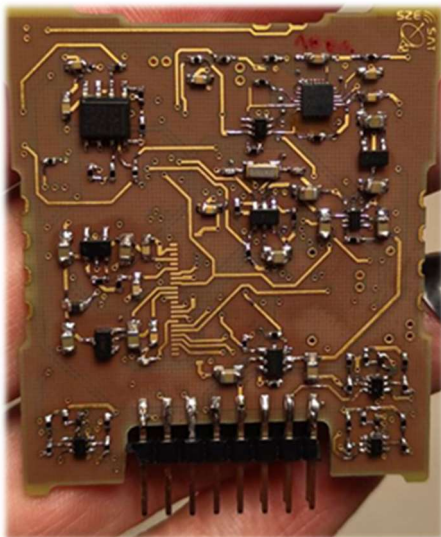
A lézerek alkalmazása számos közvetlen és közvetett veszélyt rejt magában. Nemcsak közvetlen érintkezés útján okozhatnak súlyos sérüléseket, hanem visszaverődő felületekről visszapattanó lézersugarak is kockázatot jelenthetnek. Egy nagyobb teljesítményű lézer például megégetheti az ember bőrét, de még veszélyesebb, hogy könnyen látáskárosodást, sőt, vakságot okozhat. A szem biztonsága kiemelten fontos tervezési szempont minden olyan rendszer esetében, amely szabad térben terjedő lézersugarakat használ. Például egy látható sugárzást kibocsátó, mindössze 1 mW teljesítményű lézer teljesítménysűrűsége a szem lencséjének fókuszában elérheti a 105 W/cm^2 értéket, ami súlyos, maradandó szemkárosodást okozhat. Ennek elkerülése érdekében a lézeres rendszerek tervezésénél és használatánál szigorú biztonsági előírásokat kell alkalmazni.[17]

A lézersugarak nemcsak a földi célpontokra, hanem a légi közlekedésre is veszélyt jelentenek. A lézersugarak megzavarhatják a repülőgépek műszereit, és potenciálisan balesetveszélyes helyzeteket teremthetnek. A repülőgépek biztonságos működésének biztosítása érdekében fontos a repülési pályák figyelemmel kísérése, hogy a lézersugarak ne zavarják a légi közlekedést. A lézersugarak szabad térben történő használata során nemcsak a közvetlen emberi biztonságra, hanem a légi közlekedés és az űrben lévő eszközök védelmére is figyelemmel kell lenni. A lézersugárnak a földről a levegőbe vagy az űrbe történő terjedésekor be kell tartani a biztonsági előírásokat és a kormányzati irányelveket. Az ilyen irányelvek közé tartozik az OSHA (munkahelyi biztonság) előírásai, az FAA (pilóták és repülőgépek védelme), valamint a Space Command Laser Clearinghouse irányelvei, amelyek az űreszközök védelmét szolgálják. A Szövetségi Légügyi Hatóság (FAA) specifikus irányelveket dolgozott ki a lézerek szabad térben való használatára, különösen a légi közlekedés biztonságának érdekében. A szem számára láthatatlan hullámhosszú lézersugarak esetében ugyanakkor nem szükséges ezek szigorú betartása, elegendő az MPE (Maximum Permissible Exposure) biztonsági szabványok követése. [1]

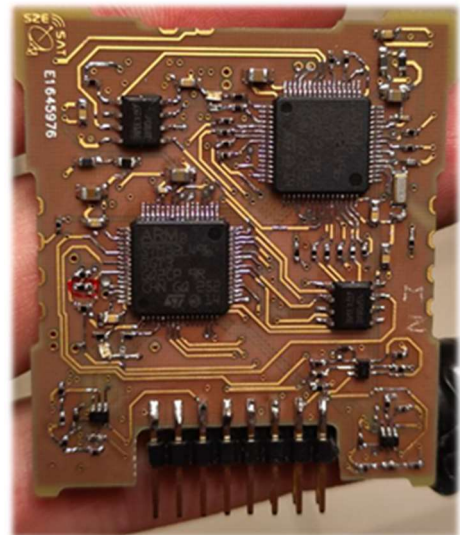
7 Eredmények értékelése és jövőbeli tervek

A dolgozat során bemutattam egy teljes rendszer fejlesztését. Összeállítottam egy emulált rendszert, amely a teljesítményen kívül minden fontos tulajdonságában megegyezik a véglegesnek szánt PCB panel tulajdonságaival. A HUNTY több küldetéssel is rendelkezik, amelyek közül természetesen az első, hogy sikeresen túlélje az űrt, önmagában ez is hatalmas eredmény lenne. Emellett szeretnénk minél több kísérletet sikeresen elvégezni.

Az optikai kísérlet jelenleg a legközelebb áll a végleges formájához, hiszen már csak a PCB-s tesztelések vannak hátra. Emiatt rendkívül bizakodó vagyok a jövőre nézve. A fejlesztés azonban nem állhat le, miután a csapatra eső részt leadtuk a műholdból. Utána is számos tesztet kell elvégezni, hogy tisztában legyünk a várható fogyasztással és viselkedéssel.



34. ábra-OBC BOT



35. ábra-OBC TOP

Mivel minden panelünk rendelkezik majd bootladerrel, a szoftveres fejlesztés folyamatosan aktuális marad. Ennek köszönhetően lehetőségünk lesz a mérések lecserélésére egy olyan kommunikációs protokollra, amely amplitúdómodulációval különböző rendszerüzeneteket továbbít. Mivel a fellövés és a tesztelés 2025 harmadik-negyedik negyedévében lesz esedékes, ez is jövőbeli tervnek mondható, de már most merünk távolabbra tekinteni, ahol egy teljesen saját 1U méretű műholdat terveznénk. Természetesen ezen ki bővítenénk és javítanánk a mostani rendszereinket azok a tapasztalatok alapján, amit a HUNTY-vel szerzünk.

8 Ábrajegyzék

1. ábra-Föld körüli pályák [15]	5
2. ábra-1PQ méretű CubeSat [12].....	6
3. ábra-ionoszféra rétegei [7]	8
4. ábra-szórt fény intenzitása [5]	9
5. ábra-Lambert-Beer-törvény [6]	11
6. ábra-Lambert-Beer törvény [6]	11
7. ábra-Lambert-Beer törvény [6]	11
8. ábra-ADC [3].....	14
9. ábra-legkisebb merhető feszültség	14
10. ábra-példa számolás	15
11. ábra-UART proba	16
12. ábra-szenzor kapcsolási rajza	17
13. ábra-hiszterézis ábra [4]	18
14. ábra-referencia jel [9]	19
15. ábra-elektromágneses spektrum	20
16. ábra-infra tartomány.....	21
17. ábra-kapcsolási rajz	21
18. ábra-fototranzisztoros mérés	21
19. ábra-100 mérési eredmény	22
20. ábra-egy impulzus	22
21. ábra-két impulzus	22
22. ábra-LED	23
23. ábra-függvénygenerálás	23
24. ábra-függvénygenerálás	23
25. ábra-szenzorok párhuzamosítása.....	24
26. ábra-párhuzamosítót mérés	24
27. ábra-keringési idő	25
28. ábra-Folyamatosságvizsgálat.....	26
29. ábra-flat-sat 3D modell.....	27
30. ábra-flat-sat.....	27
31. ábrarészekységek tesztelése	28

32. ábra-FSM [10].....	29
33. ábra-FSM [11].....	29
34. ábra-OBC BOT	32
35. ábra-OBC TOP.....	32

9 Irodalomjegyzék

- [1] Kingsbury, R. W.: Optical Communications for Small Satellites "PhD disszertáció": Massachusetts Institute of Technology, Communications and Networking, 2015.
- [2] TME. BPW34 Fotodióda adatlap. Letöltés dátuma: 2024. Október 4., forrás: TME: <https://www.tme.eu/hu/details/bpw34-v/fotodiodak/vishay/bpw34/>
- [3] Mastering Electronics Design. An ADC and DAC Least Significant Bit (LSB). Letöltés dátuma: 2024. November 4., forrás: Mastering Electronics Design: <https://masteringelectronicsdesign.com/an-adc-and-dac-least-significant-bit-lsb/>
- [4] Sulinet Tudásbázis. Tudásbázis Schmitt-trigger. Letöltés dátuma: 2024. November 4., forrás: Sulinet Tudásbázis: https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/0d0cc85d-f7b5-41fb-aec0-d1b8362c7ebf_e90c4562-46d5-4b3a-a5ed-d640f67b512a_102e5c57-b50f-4053-b4a3-c1a7c5aa564f_4968c6d9-a979-41ae-9bf6-28d92b50e551_cfff9ede-a4f2-4625-98c6-3f9b81f1ee45_f8b98ace-9229-403d-bf2f-517ade796614.
- [5] Eli-ALPS. (n.d.). Rayleigh-szórás alapjai. Letöltés dátuma: 2024. szeptember.24., forrás: [https://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/HU%20-%20Optikai%20alapok%20az%20ELI-ALPS%20t%C3%BCkr%C3%A9ben%20I.%20-%20Msc%20\(e-learning\)/rayleighszrs1.html](https://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/HU%20-%20Optikai%20alapok%20az%20ELI-ALPS%20t%C3%BCkr%C3%A9ben%20I.%20-%20Msc%20(e-learning)/rayleighszrs1.html).
- [6] Spektr-Lab. (n.d.). Beer–Lambert-törvény. Pécs, 2010. február 6. Letöltés dátuma: 2024. október 4., forrás: <https://polc.ttk.pte.hu/nemetb/Spektr-Lab-Elm-4-Beer-Lambert-torveny.pdf>
- [7] Endre, F. (n.d.). Hullámterjedés. Utolsó letöltés: 2024. december 24. Forrás: https://ha5mrc.bme.hu/library/terjedes/Florian_Endre_hullamterjedes.pdf
- [8] Mouser Electronics. 2023. *HLMP-Q700-000xx datasheet*. Letöltés dátuma: 2024. szeptember 23., forrás: https://hu.mouser.com/datasheet/2/678/HLMP_Q700_000xx_DS100-3217961.pdf.
- [9] Wikipedia. Szemábra. In Wikipedia, a szabad enciklopédia. Letöltés dátuma: 2024. November 1., forrás: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Szem%C3%A1bra>.
- [10] ResearchGate. (n.d.). *Experimental setup: SMF (Single Mode Fiber), FSM (Fast Steering Mirror)* [Ábra]. Letöltés dátuma: 2024. Október 11., forrás:

https://www.researchgate.net/figure/Experimental-setup-SMF-Single-Mode-Fiber-FSM-Fast-Steering-Mirror_fig6_371708333.

- [11] Chaudhary, A. A., & Khatoon, S. (n.d.). Gyors irányító tükör optikai precíziós célzásra. Semantic Scholar. Letöltés dátuma: 2024. október 23., elérhető: <https://www.semanticscholar.org/paper/Fast-Steering-Mirror-for-Optical-Fine-Pointing-A-A-Chaudhary-Khatoon/cabee932d90d0339d6b238f58eb928e5ab276f2>.
- [12] MathWorks. (n.d.). PocketQube műhold légkört vizsgál az elektroszmog szennyezés miatt. Elérhető: <https://ch.mathworks.com/de/company/mathworks-stories/pocketqube-satellite-scans-atmosphere-for-electrosmog-pollution.html>.
- [13] 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.
- [14] Gagliardi, R. M.: Satellite Communication: 1. kiadás, Van Nostrand Reinhold, 1991, New York, p. 602, ISBN: 9789401097628
- [15] 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: 1. kiadás, Wolters Kluwer Hungary Kft., 2020, Budapest, ISBN: 9789632959597
- [16] Kőműves G.: Műholdas földi állomások kialakításához szükséges tervezési és engedélyezési eljárások "BSc disszertáció": Széchenyi István Egyetem, Villamosmérnöki, 2014.
- [17] Hemmati, H.: Near-Earth Laser Communications: 1. kiadás, CRC Press, 2009, Boca Raton, London, New York, p. ISBN: 9781351837316