

OTDK-DOLGOZAT

OTDK DOLGOZAT MŰSZAKI SZEKCIÓ

Dénes Csaba Antal
HÁLÓZATI RENDSZEREK ÉS SZOLGÁLTATÁSOK TANSZÉK | [BME]
2024.



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

Dénes Csaba Antal

SZIMULÁCIÓS KÖNYVTÁR KVANTUMMŰHOLDAS RENDSZEREK TERVEZÉSÉRE ÉS IRÁNYÍTÁSÁRA

TANSZÉKI KONZULENSEK

Dr. Bacsárdi László

Mihály András

KÜLSŐ KONZULENSEK

Dr. Takarics Béla

Dr. Vanek Bálint

BUDAPEST, 2024

Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	3
Abstract	4
1 Bevezetés.....	5
1.1 A feltörekvő relevancia – Egy új korszak hajnala.....	5
1.2 A feladat felépítésének szintjei.....	7
2 Elméleti háttér, eddigi megvalósítások, a kikövezni kívánt út	9
2.1 A Kvantumkulcsszétosztás ereje	9
2.1.1 Megbízható csomóponton alapuló kvantum kulcs szétosztás	10
2.1.2 Nem megbízható csomóponton alapuló kvantum-kulcsszétosztás.....	12
2.2 Micius technikai demonstráció.....	12
2.2.1 Központi fedélzeti rendszerek	13
2.3 Nanosatellite Optical Downlink Experiment.....	15
3 Létrehozott könyvtár és Konceptió	18
3.1 A koncepció átfogó áttekintése – Big Picture	18
3.2 Optikai alrendszer.....	20
3.2.1 Fény leírása és ábrázolása	21
3.2.2 Beeső fénysugár és síkbéli visszaverődés	22
3.2.3 Belső optikai elosztórendszer	23
3.2.4 Optikai lencsék	24
3.2.5 Optikai szenzor	26
3.3 Aktuátorok.....	27
3.3.1 Piezo elektromos gyorsan mozgatható tükör (Fast Steering Mirror)	27
3.3.2 Stewart Platform.....	28
3.3.3 Pozícionálás és orientáció.....	29
4 A Jelenlegi helyzet, és távlati tervek	32
4.1 Jelenlegi rendszer képességei, flexibilitás és kompatibilitás előnyei.....	32
4.2 Rövid, és hosszútávú célkitűzések	32
5 Köszönetnyilvánítás.....	33
6 Irodalomjegyzék	34

Összefoglaló

Napjainkban a kvantumkommunikáció használata a limitált számítási kapacitáson alapuló titkosítási módszerek sebezhetőségét jelentősen csökkentheti, ezáltal kiváltja a klasszikus több tízjegyű prímszámokra épülő titkosítást (RSA).

A földfelszíni kvantumkommunikáció számtalan problémába ütközik, melyek között szerepel az állomások rendszereinek megbízhatóságának kérdése, illetve az optikai kábelben történő jeltovábbítás fizikai korlátja. Ezért elengedhetetlen a kvantumkommunikáció és kvantum kulcsszétosztás műholdas megvalósítása, amely egy komplex, több szintű szabályzást igénylő feladat, ahol a pályaszámítási és pályakövetési feladatok mellett, a kellő pontosság eléréséhez elengedhetetlen a földi állomásról érkező referencia lézernyalábok követése, melynek első szintje a műhold pozicionálása, a következő az optikai távcsövek a földi állomásokkal való szinkronizálása, majd a távcsövekben elhelyezett piezoelektromos tükrökkel a fénynyalábok zárt hurkú szabályzása.

A tanulmányom célja a kvantumkommunikációs műholdaknál fellépő szabályzási kérdéseinek vizsgálata, melyek magukba foglalják a pályák, hasznosterhek és fedélzeti rendszerek konfigurálását; a kommunikációs periódusok szimulálását, a teljes szabályzási körök megvalósítását.

Dolgozatomban egy kvantumkommunikációs könyvtárat és eszközkészletet hozok létre, a Matlab, Simulink és Simscape környezet segítségével, mely a maximális paramétereizhetőség mellett segíti a kvantumkommunikációs műholdak tervezését. A kidolgozott eszköztár a különböző paraméterek függvényében lehetőséget nyújt a kommunikáció idejének és minőségének maximalizálására.

Kulcsszavak: Műhold Modellezés, Fedélzeti rendszerek szimulációja, Kvantum kulcsszétosztás, Optikai kommunikáció, Referencia lézernyaláb követés, Kommunikációs periódusok szimulálása, Kvantumkommunikációs Könyvtár és eszközkészlet.

Abstract

Nowadays, the use of quantum communication can significantly reduce the vulnerability of encryption methods based on limited computing capacity, replacing the classical encryption based on several digits of prime numbers (RSA).

Quantum communications over terrestrial networks face a number of problems, including the reliability of station systems and the physical limitation of transmitting signals over optical cables. It is therefore essential to implement quantum communication and quantum key distribution by satellite, a complex task requiring multiple levels of control where, in addition to orbit computation and tracking, tracking of reference laser beams from ground stations is essential to achieve the required accuracy, the first stage is the positioning of the satellite, the next is the synchronization of the optical telescopes with the ground stations, followed by the closed-loop control of the beams by using piezoelectric mirrors in the telescopes.

The aim of my study is to investigate the control challenges in quantum communication satellites, which include the configuration of orbits, payloads and on-board systems; simulation of communication periods, implementation of complete control loops.

In my thesis, I will create a quantum communication library and toolkit using Matlab, Simulink and Simscape environment to help design quantum communication satellites with maximum parameterization. The developed toolkit provides the possibility to maximize the communication time and quality according to different parameters.

Key Words: Satellite modelling, Simulation of on-board systems, Optical communication, Reference laser beam tracking, Simulation of communication periods, Quantum communication library and toolkit

1 Bevezetés

Dolgozatomban a műholdas kvantumkommunikáción alapuló titkosított összeköttetés szabályzási kérdéseit fogom megvizsgálni. Ennek keretein belül bemutatom az általam készített Matlab, Simulink és Simscape környezetet felhasználó keretrendszert, mely a jövőben nagy mértékben segítheti a kvantumkommunikációs műholdak tervezését és nagy pontosságú, több szintű szabályzását. A keretrendszer magas fokú paraméterezhetősége és kompatibilitása lehetővé teszi a műhold fizikai méretének és – legfőképpen – tömegének csökkentését. Emellett, segíti az elérési idő és a kommunikációs kapacitás maximalizálását, amely kulcsfontosságú a jövőbeni műholdas kvantumkommunikációs rendszerek számára.

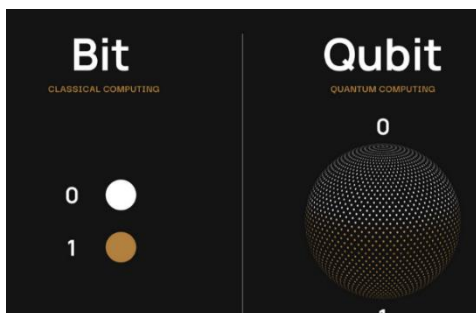
A dolgozat keretein belül, a könyvtár felhasználásával célkitűzés egy olyan szimulált technikai demonstráció megvalósítása, melynek során az alacsony Föld körül pályán keringő műholdegység kvantum összefonódáson és nem megbízható csomópontokon alapuló kvantum kulcsszétosztást valósít meg, a BB84-es kvantumkulcsszétosztásos protokollnak megfelelően (lásd később), egyszerre tartva a kapcsolatot két földi állomással, egy-egy külön álló optikai rendszer segítségével.

A megoldandó szabályzási kérdések között szerepel a pálya és az abból fakadó erők, és forgatónyomatékok leírása, a műhold orientációjának szabályzása, az optikai távcsövekkel a földi állomásokról érkező referencia lézer nyalábok detektálása (a távcsövek Stewart platformos mozgatásával, amelyből származó erők visszahatnak a műhold orientációjára). Továbbá, a belső optikai részegységben az adat lézernyaláb továbbítása a földi állomás fele, a referencia lézerrel megegyező, de ellentétes irányú irányvektorba, mindezt úgy, hogy a kiküldendő adatnyaláb nem térhet el néhány mikró radiánál jobban a beérkező referencia lézernyalábtól, ezért az optikai rendszer precíz szabályzásához egy Gyorsan Forgatható Tükör (Fast Steering Mirror [1] [2]) a szabályzás legalsó szintje.

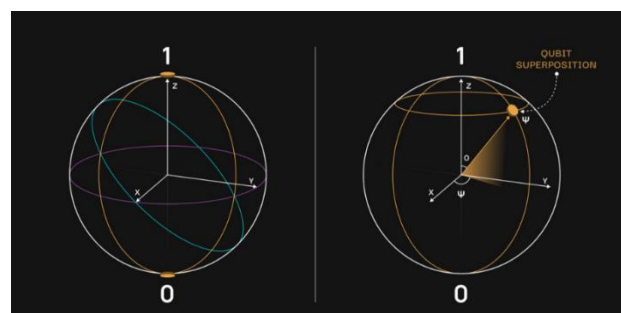
1.1 A feltörekvő relevancia – Egy új korszak hajnala

A probléma, melyet megoldani kívánok (a régi biztonságtechnikai megoldások elavulása [3]), napról napra relevánsabb, és egyre égetőbb biztonsági kérdéseket vet fel. Mert a kvantum számítástechnika [4] [5] [6] folyamatos úttörésével azon kriptográfiai

[7], vagyis titkosítási megoldások, melyek a limitált számítási kapacitásra épültek, létjogosultságukat veszítették. Ennek egyik legkézenfekvőbb példája az RSA titkosítás [8] [9], mely lényegében egy publikus [10] (mindenki által ismert), és egy titkos [11] (csak az üzenet küldője és fogadója által ismert) kulcson alapuló rendszer, melynek alapja a prímtényezőkre bontás. Ugyanakkor, mivel a kvantumszámítógépek alapvető logikai egysége a kvantumbit vagy más néven Qbit [12] – amely a klasszikus 1-es és 0-s helyett egy egység sugarú gömbön (Bloch-gömb [13]) bármilyen állapotot felvehet, mely több állapot egymásra tevődése, úgy nevezett szuperpozíciója [14] – ez olyan új megközelítéseket tesz lehetővé, amire a kezdetekkor nem is gondolhattak. Az 1-es ábrán a Normál bit, és a Qbit potenciális állapota (állapottere) látható, míg a 2-es ábrán (a jobb oldalon) egy kvantum bit egyszerű, illetve, szuperpozíciós állapota.



1. ábra: Klasszikus és kvantumbit potenciális állapota [4]



2. ábra: Kvantumállapotok egymásra tevődése, szuperpozíciója [4]

A kvantumszámítógépek a szuperpozíció elvét felhasználva párhuzamosan is tudnak számításokat végezni, így azok a műveletek, melyek még a szuperszámítógépek számára is évezredekig vettek volna igénybe, a kvantumszámítógépekkel, és az erre a célra fejlesztett algoritmusokkal (Shor-algoritmus [15]) már rövid időn belül megoldhatóvá váltak. Ez vészjósló probléma, tekintettel arra, hogy a jelenlegi infrastruktúrák, és kritikus rendszerek védelmének egy alapkövét képezi az RSA titkosítás, miközben folyamatosan jelennek meg újabb sikerek ennek kvantum alapú feltörése terén. [16] [17]

A földfelszíni kvantumkommunikációs és kvantum kulcsszétosztás [18] ugyanakkor több problémába is ütközik. Az egyik fő kihívás az optikai szálakban és a levegőben fellépő jelentős teljesítmény veszteség [19] (szóródás, visszaverődés, elnyelődés és kisugárzás révén), amely limitálja a kommunikáció hatótávolságát mindössze körülbelül 100 kilométerre. Ezen túlmenően, bár a nagy távolságú kommunikációt földi ismétlőállomások („trusted nodes [20]”) használatával el lehetne

érni, ez több akadályba ütközik. A No-cloning tétel, vagyis a másolhatatlanság elve [21], akadályozza a klasszikus értelemben vett jel erősítését, mivel az ismeretlen kvantumállapot másolása – amely szükséges lenne egy egyszerű jelerősítéshez – nem lehetséges kvantumrendszerekben.

A kvantumismétlők [22] viszont különféle kvantummechanikai jelenségek (például kvantum-összefonódás és kvantumteleportáció) felhasználásával működnek. Ezek az ismétlők nem erősítik a jelet, hanem újraépítik a kvantumállapotot egy adott távolságon túl anélkül, hogy lemásolnák. Ezen ismétlők beépítése a jelenlegi optikai hálózatokba azonban nagy mértékű infrastrukturális változtatásokat eredményeznének (majdhogynem megfizethetetlen bekerülési költségekkel), az összeköttetés mértéke pedig a gerinchálózattól nagy mértékben függene.

Ezért, egy ténylegesen működő kvantum kommunikációs és kvantumkulcsszétosztásos rendszer kivitelezéséhez elengedhetetlen a műholdas infrastruktúra létrehozása, mely a kommunikáció típusából adódóan számtalan specifikus követelménnyel és szabályzási kérdéssel néz szembe.

1.2 A feladat felépítésének szintjei

Az általam elkészített feladat több egymástól jól elkülönülő szintet valósít meg, melyek egymással különböző módon lépnek interakcióba.

Alapvetően, négy különböző elméleti szinten valósul meg a feladat, vagyis a műholdas kvantumkommunikáció:

A Műholdpálya szintje: tartalmazza a Kepleri pályaelemeket [23] és a számított műholdpályát a megfelelő vonatkoztatási rendszerekben. Tartalmazza a Földi állomásokkal való kommunikációhoz szükséges vonatkoztatási rendszer transzformációkat, a beérkező referencia fénynyalábok adatait, és a pályából származó különböző, műholdtestre ható erőket, forgató nyomatékokat.

A Műhold szintje: lokális koordinátarendszerben vett objektumok halmaza, mely magába foglalja a pozicionáló rendszert (reakciókerekes megvalósítás), az orientáció mérő rendszert (csillagszenzor és GPS mérés általi orientáció és forgási szögsebesség mérés), a műholdra csatlakozó szilárd test objektumokat (napelem panelek), és az optikai egységeket mozgató aktuátorokat (Stewart Platformok [24]), melyek mozgatása visszahat a műhold objektumra.

Az optikai rendszer szintje: az optikai rendszer szintje magába foglalja a fedélzeti lézerforrásokat (adatlézer és referencia lézer), a fényelosztó rendszert (félíg áteresztő tükör, szűrő lencsék, síktükör), az optikai lencsét, a gyorsan mozgatható tükröt (Fast Steering Mirror), illetve, a fényszenzort.

A szabályzási rendszer szintje: A szabályzás elsődleges szintje a pályaszámításból kapott műhold pozíción alapszik, melyet egy fizikai rendszerrel a csillagszenzor, illetve GPS adatokból ismerünk. A földi állomások, amikor a műhold a pálya megfelelő pontján van, célzó lézernyalábot bocsátanak ki, mellyel a műholdon elhelyezett Stewart Platformok talapzatainak közepét célozzák meg. Előzetesen a műhold a pozicionálásával gondoskodott arról, hogy ő az előre rögzített orientációba legyen (melyet a földi állomások ismernek). A szabályzás második szintjében, a földi állomásokról érkező fénynyalábra szabályoznak rá a platformok, amelyek irányvektorát viszonylagos pontossággal ismerjük. Miután pedig az optikai rendszerben a bejövő célzó lézer ténylegesen megjelenik (ráesik a fényszenzorra), átváltunk zárt hurkú szabályzásra, ahol a platformon lévő távcső orientációját úgy határozzuk meg, hogy a beeső fénynyaláb a szenzor geometriai középpontján legyen. A harmadik szint a precíziós szabályzás szintje, ahol a kiküldendő adatlézert a bejövő lézerhez igazítjuk, a későbbi fejezetekben tárgyalt módszer szerint.

A dolgozatom az elkövetkezendő fejezetben a szakirodalom áttekintésével bemutatja az eddigi műholdas kvantumkommunikációs technikai demonstrációkat, majd a fent említett szinteknek megfelelően bemutatja az elkészült saját konstrukciót, majd annak előnyeit, kiemelkedő hangsúlyt fektetve a rövid és hosszútávú tervekre, a távlati célokra és a rendszerben rejlő potenciálra.

2 Elméleti háttér, eddigi megvalósítások, a kikövezni kívánt út

A műholdas kvantumkommunikáció az elmúlt évek egyik legígéretesebb technológiai innovációja, amely a kvantummechanikai elvek alkalmazásával, ahogy a fentiekben említésre került, jelentős és elengedhetetlen fejlődést hozhat a biztonságtechnika terén.

Ezen okból kifolyólag az Európai Unió [25], az Egyesült Államok [26], Kína [27] és más országok is elindítottak kutatásokat és demonstrációs projekteket, amelyek célja, hogy egy nemzetközi kvantumkommunikációs infrastruktúrát hozzanak létre. Az elmúlt években a tudományos közösség több fontos lépést tett a műholdas kvantumkommunikáció megvalósítására, ilyen például a következő fejezetben részletezett kínai Micius [28] műhold, mely osztrák-kínai együttműködések révén valósulhatott meg, illetve, az Európai Unió által létrehozott Quantum Space (QSpace) [29] program, illetve, a Horizon 2020 [30] program keretein belül létrejött különböző technikai demonstrációk. Például, a szintén későbbiekben bemutatásra kerülő nanoműholdas lefele irányuló kvantumkapcsolat, a NODE (Nanosatellite Optical Downlink Experiment [31]) kísérlet.

2.1 A Kvantumkulcsszétosztás ereje

Mint a bevezetőből és a nemzetközi együttműködésekben is jól látszik, elengedhetetlen egy olyan újfajta titkosítási rendszer, mely gátat szab a technológia okozta veszélyeknek, és melynek biztonsági faktora nem függ a folyamatosan változó technikai korlátoktól. Ugyanakkor az alapvető elv még mindig ugyanaz. Olyan kulcsot vagy kulcsokat kell létrehozni, melye(ke)t valamilyen úton-módon csak a beszélgető felek ismerhetnek, és amelyek nélkül bármiféle próbálkozás a lehallgatásra vagy a beiktatásos támadásra hiábavalónak bizonyulna.

Azonban tekintve, hogy az esetek legjavában semmilyen csatornában sem bízhatunk, legtöbbször pedig a közvetítő csomópontokban sem, így nem is annyira a kulcs létrehozása a legnehezebb kitétel ezeknél a feladatoknál, hanem maga a kulcsok eljuttatása a kommunikáló felekhez.

Ebben nyújt segítséget a kvantumkommunikáció, melynek alfajait és megközelítéseit többféle módon csoportosíthatjuk (generáció, kulcs generálásának technikája, ...). Én most a titkosítás egyik sokszor legfájóbb pontja szerinti csoportosítását veszem, mely nem más, mint hogy mennyire bízhatunk meg magában a közvetítő félben, akinek segítségével üzenetünk eljut a megfelelő személyhez.

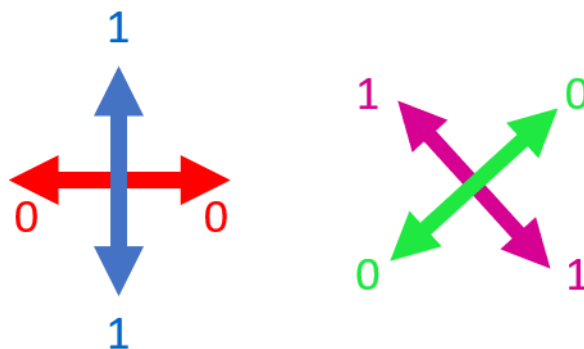
2.1.1 Megbízható csomóponton alapuló kvantum kulcs szétosztás

Mint fentebb kifejtésre került, a kvantumkommunikációt számtalan körülmény nehezíti, melyek mellett sajnos nem tudunk elmenni. Ezekből talán az egyik legfontosabb, hogy a másolhatatlansági elv szerint nem tudjuk a kvantuminformációt csak úgy felerősíteni, hanem jelismétlőkre van szükségünk. Továbbá, mivel az optikai kábelben nagyon ideális körülmények között is csupán 100-150 kilométerre tudjuk elvinni a jelet [32] (ezután a fotonnyaláb már túlságosan csillapodik), a nagy távolságokhoz elengedhetetlen a műholdas kommunikáció és átvitel.

Itt dönthetünk úgy, hogy megbízunk az alkalmazandó közvetítő eszközben, ilyenkor a módszer folyamán kialakult közös kulcsot a műhold teljes mértékben ismeri, azonban amíg a hardvere nincs veszélyben, addig a kommunikáció titkosítva van. [33]

Ezen kommunikációs forma nagy előnye, hogy a műholdnak nem kell egyszerre látni mindkét csomópontot amellyikkel kommunikálni akar. Ezen protokollra egy nagyon jó példa a BB84-es protokoll [34], mely az első generációs kvantumkulcs-szétosztásos protokollok közé tartozik.

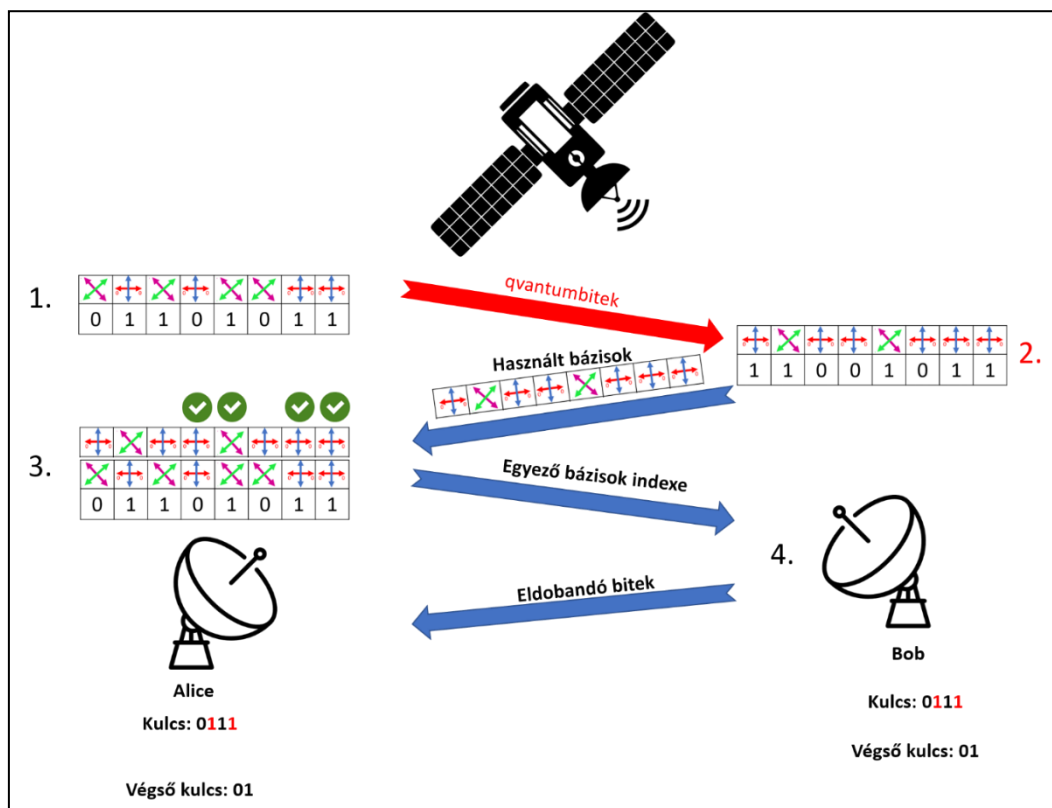
A kommunikáció legelején adott a kezdeti küldő fél, akit hívunk Alice-nak. Ő létrehoz egy véletlen bitsorozatot és minden bithez véletlenszerűen választ bázist a két lehetőség közül, melyek a 3. ábrán kerülnek bemutatásra.



3. ábra: Horizontális-vertikális, és diagonális mérőbázis

Egy példa az így kigenerált bitsorrendről a választott bázisokkal a 4-es ábrán látható. A vett bitsorra Bob is elvégzi a saját mérését, szintén random választva a két bázis közül (2-es lépés).

Ezután Bob nyilvános csatornán visszaküldi, ő melyik bázisokkal mért. A 3-as lépésben Alice összeveti a Bob által használt bázisokat a sajátjával, majd nyilvános csatornán visszaküldi, melyik indexeken találta el Bob az Alice által használt bázisokat. Ezáltal, a többi mérést eldobva (mert, ha Bob más bázissal mért, akkor 50-50%, hogy eltalálta-e a bitet, vagy sem), kialakul a közös kulcs. A lehallgatást ellenőrizve és a biztonságot tovább növelve ebből a közös kulcsból még eldobnak biteket, ezzel maximalizálva a titkosítást.



4. ábra: BB84-es kvantum kommunikációs protokoll

Mivel a mérés eredményéről csak Bobnak és Alice van tudomása egy potenciális támadó hiába hallgatja le a köztük lévő, nyílt csatornán zajló kommunikációt, a mért eredmények nélkül, a titkosítást nem tudja feloldani.

Továbbá, ha a fizikai jel eltérítésével vagy másolásával próbál meg beavatkozni vagy információhoz jutni, a No Cloning tétel értelmében nem tudja az információt úgy lehallgatni, hogy az ne változtasson a csatorna paraméterein. Mert az információt hordozó

fotont, ha a támadó detektálja (távcsővel elkapja), az nem jut el a fogadó félhez, ezzel növelve meg a QBER viszonyt (Quantum Bit Error Rate [35]). Ha a támadó mégis eltökélt a másolás mellett, és a lemért fotont tovább szeretné küldeni a fogadó fél fele, nagy eséllyel a támadó mérésének kimenetele rossz, hisz ő sem lehet biztos benne, melyik bázisban volt eredetileg elküldve a foton. Így szintén nő a QBER érték, ami, ha eléri a 0,11 értéket, Alice és Bob automatikusan bontja a kapcsolatot.

2.1.2 Nem megbízható csomóponton alapuló kvantum-kulcsszétosztás

A nem megbízható csomóponton alapuló kommunikáció bizonyos tekintetben egyszerűbb protokoll szerint zajlik, ugyanakkor ezen módszer már összefonódott fotonpárokat használ. Ezeket például a C-NOT [36] kapukkal állítják elő, és noha ezt az összekötő csomópont (jelen esetben műhold) állítja elő, nincs azokra befolyással.

Jelen esetben, az összeköttető műhold fedélzetén nincs meg semmilyen formában a titkos kulcs, rajta pedig az információ csak áthalad (mert a kulcs kvantummemóriában [37] ugyan tárolható lenne, de kifejezett cél, hogy a műhold, mint hardver, ő se ismerje a titkos kulcsot). Ezen protokoll alá tartozik a B92 [38] és az E91 [38], ezek közül most az E91-es protokollt fejteném ki.

Ezen protokoll kiinduló pontja, hogy Alice és Bob is rendelkezzen közös, összefonódott fotonpárokkal. Itt az előző példához képest sokkal több potenciális bázisunk van, az alapbázis – $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ – amelyek elforgatásra kerülnek, Alice oldalán potenciálisan $\{0, \pi/8, \pi/4\}$ szögekkel, míg Bob oldalán potenciálisan $\{-\pi/8, 0, \pi/8\}$ szögekkel. Mindketten minden bitnél random választanak bázist, majd rögzítik az eredményeket. Ezután nyílt csatornán lekommunikálják egymással, ki melyik bázist választotta, majd az ezelőttiekhez hasonlóan azon biteket tartják meg, ahol mindketten ugyanazokat a bázisokat választották. Ezután megosztják egymással a különböző bázisban mért eredményekből számolt korrelációs értéket, mely abban az esetben, ha senki sem fonódott hozzá a rendszerhez, $S \approx 2\sqrt{2}$ értéket kell mutasson.

2.2 Micius technikai demonstráció

Ezen kísérlet, ahogy már szó esett róla, 2016-ban zajlott, és több létfontosságú technikai demonstrációra is sor került a projekt keretein belül.

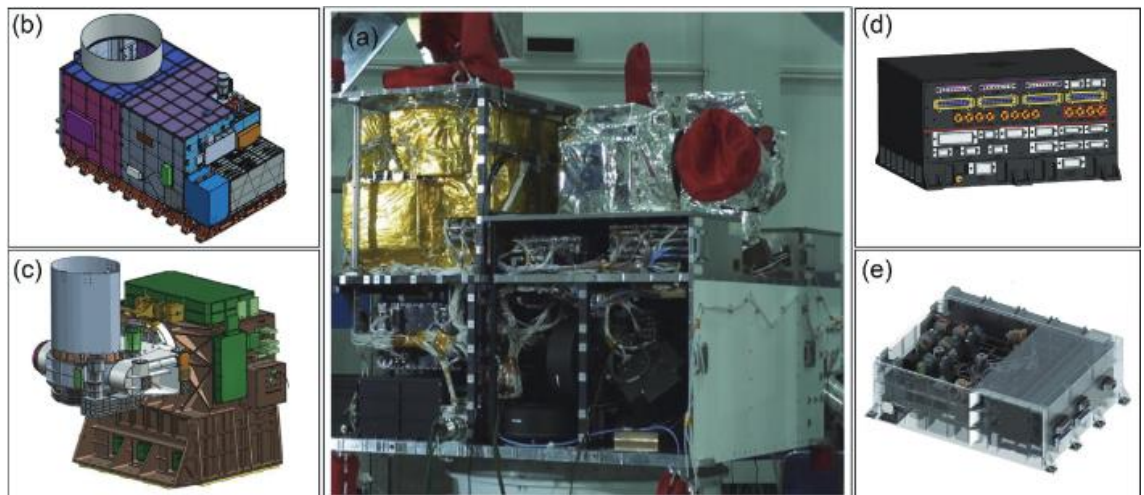
Az egyik legerőteljesebb ilyen technikai demonstrációt és áttörést a kétféle kvantum-kulcsszétosztásos technika demonstrációja jelentette, melynek keretében a

műhold alacsony föld körüli pályán keringve (2000 kilométer alatti pályamagasságban) valósította meg a fentiekben már bemutatott BB84-es kvantum-kulcsszétosztásos protokollt, ami pedig még ennél is nagyobb mérföldkövet jelentett, hogy a fedélzeten előállított, összefonódott fotonpárokon alapuló kulcsszétosztást is meg tudta valósítani, ezzel titkosított összeköttetést teremtve Peking és Bécs között, a fentiekben már kifejtett, összefonódáson alapuló protokoll segítségével.

Hogy megérthessük, mindehhez milyen fedélzeti rendszerek kellettek, első sorban vegyük figyelembe a műholdra jellemző általános adatokat.

2.2.1 Központi fedélzeti rendszerek

A fent említett űreszköz 4 központi payload egységgel rendelkezett, ezen egységek, illetve, a teljes műhold fizikai megvalósítása látható a 5. ábrán:



5. ábra: Micius kísérlet – a műhold szerkezete és központi payload elemei [28]

Mint az ábrán is egyből fellelhető, a műhold két optikai egységgel rendelkezett (b, illetve c ábra), melyek a fotonok küldését, illetve fogadását megvalósították. Az első optikai egység (továbbiakban csak transzmitter) fontosabb paraméterei:

- Teljes tömeg: 115 kilogramm
- Távcso átmérő: 30 centiméter
- Tartalmazott komponensek: nyolc darab meghajtókkal ellátott lézer dióda, egy BB84 polarizációs kódoló modul, egy teleszkóp és egy fogadó modul

A fogadó modul magában foglalta az optikai és kvantum specifikus komponenseket, mint a Negyedhullámú lemezt (QWP: quarter-wave plate), a

félhullámhosszú lemezt (HWP: half-wave plate), a polarizációs sugárelosztót (PBS: polarization beam splitter), és két egyfoton detektort.

Továbbá, az egység tartalmazta a nagy pontosságú érzékelő, célzó és követő rendszert (high-accuracy acquiring, pointing, and tracking (APT)), mely az alábbi központi komponenseket tartalmazta:

- Célzó lézer
- Durva felbontású kamera (Coarse camera)
- Két tengely szerint forgatható tükör
- Egy finom kamera (Fine camera)
- Egy gyorsan vezérelhető tükör (FSM)

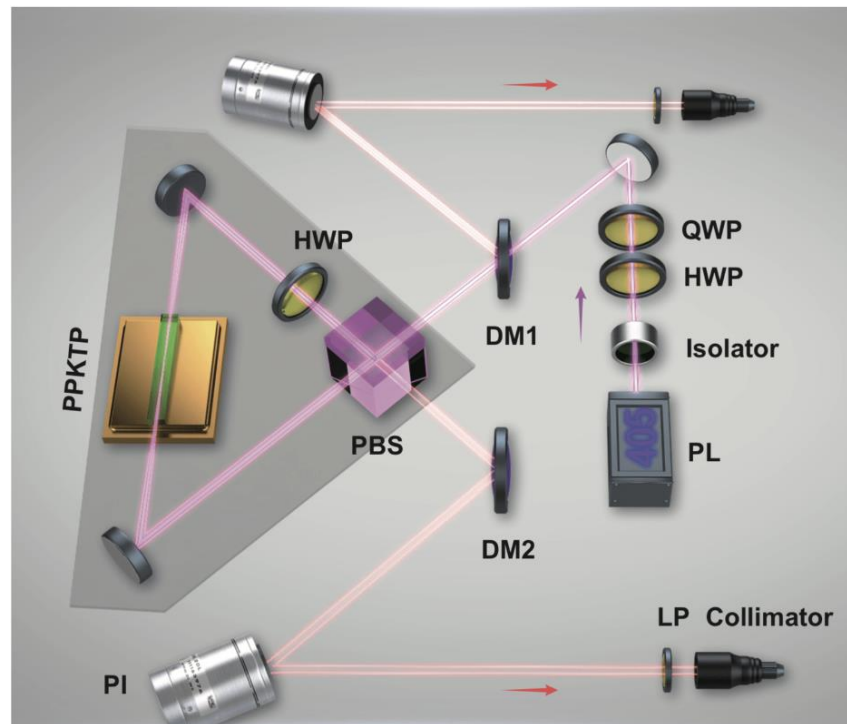
A másodlagos teleszkóp felépítése is nagy mértékben megegyezett az elsővel, azzal a jelentős különbséggel, hogy az itt alkalmazott ATP rendszer nem tartalmazta a két szabadságfokú forgatható tükröt, helyette egy Gimbal-os (kettős kardáncsuklás) megoldással maga a távcső szerkezete válik forgathatóvá.

Ezen rendszer főbb paraméterei a következők:

- Teljes tömeg: 83 kilogramm
- Távcső átmérő: 18 centiméter

Ezen második távcső a kísérletben specifikusan a kvantumösszefonódáson alapuló kvantumkommunikáció és kvantum-kulcsszétosztás megvalósítására lett létrehozva. A nagyfokú mozgathatóságra pedig azért volt szükség, hogy míg az elsődleges célzást az első földi állomással való összekapcsolódáshoz megvalósítják a műholdtest orientációjának változtatásával (mivel az első teleszkóp a műholdtörzsbe süllyesztve került beillesztésre), addig a második távcső képes legyen viszonylag nagy szögeltéréssel ráfordulni a második földi állomásra, a nélkül, hogy a két földi állomás közti megengedett távolságot a távcsövek fizikai elhelyezkedéséből adódó paraméterek nagy mértékben limitálnák.

A 5. ábrán fellelhető másik két fő payload egység, az összefonódott foton forrást előállító egység (e), és a kísérleti kontrol egység (d). Ez utóbbi pontos leírása nem releváns a mi szempontunkból, amit azonban még érdemes megemlíteni, az maga az összefonódott fotonpárokat előállító szerkezeti egység, melynek a 6. ábrán látható szerkezeti diagrammja már tartalmazza a precíziós irányításhoz szükséges szerkezeti egységet is, a fentiekben szintén említett FSM tükröket.



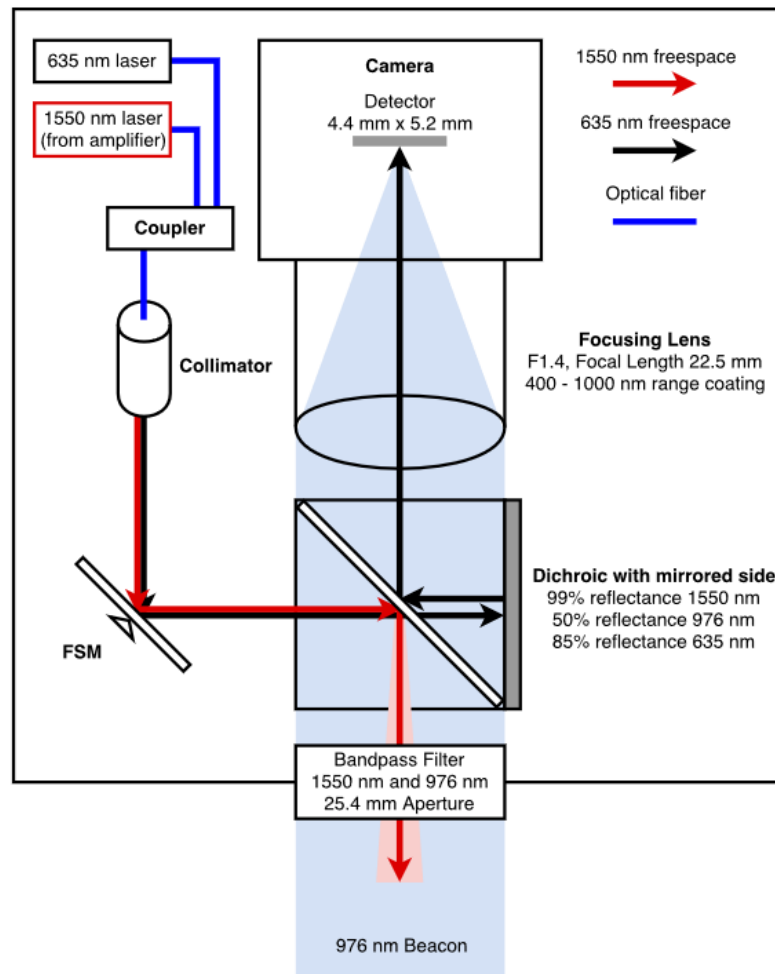
6. ábra: Összefonódott fotonpár forrás sematikus ábrája, az FSM tükrökkel [51]

2.3 Nanosatellite Optical Downlink Experiment

A Micius kísérlettel ellentétben, a NODE [31] kísérlet a kvantumkommunikáció megvalósítását a nanoműholdak szintjén, a költségek minden szintű minimalizálásával szerette volna kivitelezni, elsődleges célkitűzése a precíziós célzórendszer kialakítása volt.

Ennek megvalósításához a Micius kísérletben látott optikai elemeket hívták segítségül, ugyanakkor, az optikai rendszert mozgató aktuátorok nélkül, így a műhold tömegét minimalizálva. Noha a kísérlet csak földi tesztelés szintén valósult meg, sikerrel bizonyította a kellő pontosságot, és precízitást, így az az általam létrehozott konstrukcióban már a NODE kísérlet által lefektetett alapokra építettem.

De mindenekelőtt, tekintsük meg a NODE optikai rendszerének felépítését, mely a 7. ábrán látható:



7. ábra: NODE optikai egység [31]

Ezen egység főbb komponenseit képezi:

- A két fedélzeti lézerforrás, melyeknek hullámhossza 635, illetve 1550 nanométer. Ezek közül, az 635 nanométer hullámhosszú lézernyaláb az úgy nevezett referencia lézer, mellyel a gyorsan mozgatható tükör (Fast Steering Mirror) pontos pozíciója visszamérhető. Az 1550 nanométeres lézer maga az adatlézernyalábunk, mely a kvantumkommunikációt valójában lebonyolítja.
- Féligáteresztő tükör [39], mely lényegében ketté választja a két lézernyalábot. Az adatvonal 1550 nanométeres sugara a félig áteresztő tükör frontális felületéről visszaverődik, ez által elindulva az elérni kívánt célállomás fele, mely a földi állomás.

- Síktükör, mely a félig áteresztő tükör után helyezkedik el, amin a referencia lézernyaláb keresztül megy, majd a síktükörről visszaverődve ismét a félig áteresztő tükör fele folytatja útját. Ennek hátoldaláról visszaverődve, a referencia lézernyaláb egy optikai lencsén keresztül a fényszenzorra vetül, amely egy kamera digitális optikája.
- Gyorsan mozgatható tükör, ez által a két kibocsátott fénynyaláb, az adatvonal és a referencia lézernyaláb viszonylag kis szabadságfokkal irányítható. Mivel a Collimator-ként [40] feltüntetett nyaláb egyesítő által a két fénynyaláb a térben megegyező irányban és irányítással érkezik a tükörrre, így a tükör beavatkozása jól visszamérhető a referencia lézer segítségével.

Ezen komplex rendszer elsődleges célja, hogy a földi állomásról érkező célzó lézernyalábra rászabályozhassunk. Mert a földről érkező külső lézer a félig áteresztő tükörön irányváltoztatás nélkül halad át, így ő közvetlen módon az optikai gyűjtőlencsére, majd onnan a kamera detektor felületére esik. Így, hogyha a kamera detektora pontosan a gyűjtőlencse fókusz távolságában van, akkor, ha el tudjuk érni azon helyzetet, mi szerint a referencia lézernyaláb pozíciója a szenzoron megegyezik a külső célzó lézer nyaláb pozíciójával, ez azt jelenti, hogy a referencia lézernyaláb párhuzamos a beérkező célzó lézernyalábbal.

Mivel pedig a referencia lézernyaláb a síktükörnek ütközve, majd visszaverődve lényegében a kibocsátott adatvonal visszafele irányuló meghosszabbításának tekinthető, így, ha a referencia lézernyaláb párhuzamos a beérkező célzó lézernyalábbal, akkor a kibocsátott adatvonalunk is párhuzamos lesz a beérkező célzó lézernyalábbal. Ha pedig az egybeesés pontosan a szenzor geometriai középpontjában valósul meg, az azt jelenti, hogy a kiküldött adatnyalábunk nem csak párhuzamos a vett lézernyalábbal, de a távolság a két párhuzamos nyaláb között is minimalizált.

Dolgozatomban, ezen rendszer elgondolást ültetem át Matlab Simulink, Simscape környezetbe, hogy két ilyen optikai egységet felhasználva, Stewart Platformos aktuátorok felhasználásával megvalósíthassam az elvárt kapcsolatot egyszerre két földi állomás között olyan szabályzási pontossággal, mely eleget tesz a fent említett E91-es protokoll követelményeinek.

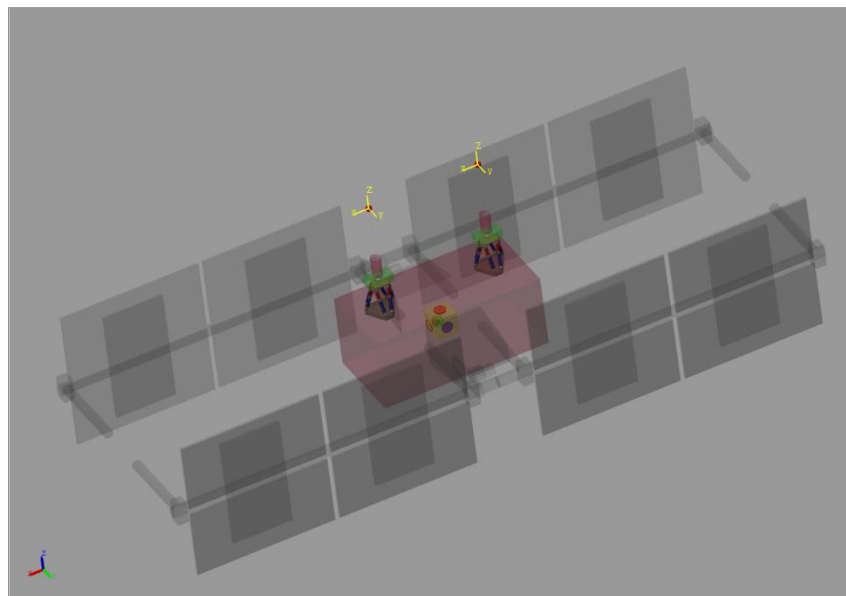
3 Létrehozott könyvtár és Konceptió

A források és eddigi megvalósítások, illetve a piacon már nyíltan fellelhető komponensek alapján egy olyan keretrendszert készítettem, ahol Simulink, illetve Simscape elemek felhasználásával bárki elkészítheti, illetve paraméterezheti a saját műhold koncepcióját, illetve, paraméterezheti a kiinduló alap koncepciót.

Az elkészült rendszer hierarchikus felépítést mutat, ahol minden elem a legalsó szintig önállóan, önmagában is felhasználható, felső szintek bevonása nélkül. Ugyanakkor, a központi gyűjtő elemekben az alsó szintek magas fokú paraméterezhetőséget mutatnak, amely a matlabos maszkokban állítható, és propagálódik le a legalsó szintek felé. Mielőtt ez részletezésre kerülne, tekintsük át a fő rendszer koncepciót, a teljes perspektívát, angol szakkifejezéssel élve, a Big Picture-t [41].

3.1 A koncepció átfogó áttekintése – Big Picture

Ahogy az 1.2-es fejezetben tárgyalásra került, a teljes rendszer négy különböző szintből épül fel, melyek egymáshoz a megfelelő interface-ken keresztül kapcsolódnak. Mivel ezen összekapcsolás még több ponton jelenleg is zajlik, és mivel a műholdak pályájának kiszámítására kiterjedt szakirodalom lelhető fel, így első sorban a műhold koncepció szerkezeti felépítését mutatnám be. A műhold szerkezete a 8. ábrán látható.



8. ábra: Saját műhold koncepció Simscape megvalósítása

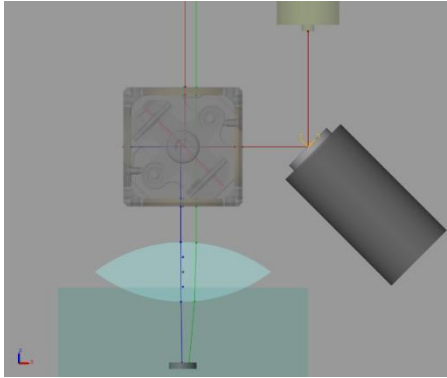
A koncepció két darab Stewart platformot tartalmaz, melyek mindegyike egy-egy, a fenti fejezetben említett NODE optikai egységet. Az optikai egység minden egyes komponense külön Simscape szintű megvalósítással rendelkezik. A koncepció legfőbb előnye a Simscape multibody könyvtárra való építkezés és a fizikai rendszerekre épülő implementáció, így a legnehezebb kérdéseket, melyek a szabályzás legsarkalatosabb pontjai lennének (súlypontok, visszaható erők és inerciák), a rendszer automatikusan számolja. Maga a központi elem, a vörös színnel jelölt műholdplatform, melyhez minden kapcsolódik, a lokális koordináta rendszerben egy 6-DOF típusú csomóponttal van a kötött világhoz csatlakoztatva, ami azt jelenti, hogy minden kifejtett erő visszahat a műholdra, a nagyobb tömeggel rendelkező optikai rendszerrel ellátott távcsövek mozgásától kezdve, egészen a piezó elektromos FSM tükör 0.5 grammos felületének mozgásáig. A kompatibilitás pedig olyan szintű, hogy bármilyen szilárd testet beilleszthetünk a modellbe a Simscape könyvtár Solid File komponensét használva, legyen az napelem, áramkörü rész 3D modellje, vagy bármilyen egyéb komponens. A jelenleg a szerkezeten lévő napelem [42] egy ingyenesen letölthető, egyszerű modell, melyet beintegrálni a szimulációba hozzávetőlegesen 5 perc volt.

A két különálló platform (az ábrán a műholdtörzs tetején) azt a célt szolgálja, hogy mindkét platform az optikai alrendszerrel (melynek belépési referencia pontja a vörössel jelölt optikai távcső teteje) egyszerre követhessen nyomon egy-egy földi állomást, a fent említett E91-es protokoll teljesítéséhez. Ezen szint már csak a pályaszámítás szintjéből érkező, a földi állomásokról indított célzólézer irányvektorait kapja meg, lokális koordináta rendszerben számolva, kiindulóponttal (origin, mely a képen vörös ponttal, és sárga tengelyekkel van jelölve) ellátva. Továbbá, a műholdtörzsre ható erőket, melyek elsősorban a forgató nyomaték, és a szögsebesség. (Ezek visszacsatolása a dolgozat írásának pillanatában folyamatban volt.)

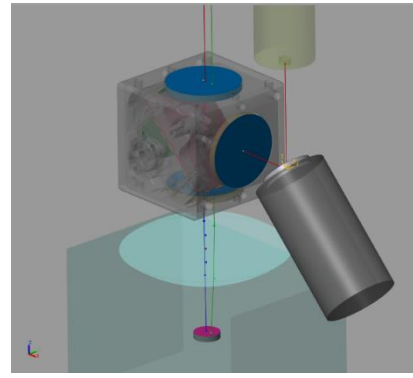
Az ábrán továbbá megfigyelhető az orientáció megváltoztatására alkalmas, 4 reakciókerekes beavatkozó, mely a vörös műholdtörzs közepén helyezkedik el, a négy kerék pedig különböző színnel van jelölve, a szerint, hogy milyen irányvektor szerint fejtenek ki forgatónyomatékot. Ezen beavatkozó rendszer a későbbiekben kerül kifejtésre.

3.2 Optikai alrendszer

A Node koncepció alapján elkészült optikai rendszer a 9., illetve a 10. ábrán látható, frontális, illetve izometrikus nézetben. A kilences ábrán, a jobb felső sarokban megjelenik a lézerforrás (piros fénynyaláb), mely egyszerre tartalmazza a referencia lézert, és az adatlézert. Vagyis, a nyalábe gyesítő utáni állapotot.



9. ábra: Optikai alrendszer frontális nézet



10. ábra: Optikai alrendszer izometrikus nézet

Az alrendszer a Függelékek fejezetben, az Optikai részegységek modul szintű ábrázolása című ábrán, Optical Targeting Submodule néven látható. Három bemenettel és négy kimenettel rendelkezik, melyek közül az első az External Targeting Light, mely egy adatbusz, ami egyszerre tartalmazza a földi állomástól érkező fény forráspontját (PointOfOrigin), az irányvektorát (Direction), illetve, az érkező fény érvényességét (Valid) – a részletesebb elírás az elkövetkezendő fejezetben. A második és harmadik bemenet Simscape Frame típusú bemenet, a localOrigin meghatározza, fizikálisan hova van csatolva az optikai részegység (a Stewart Platformmal mozgatott távcsőhöz), az utolsó bemenet pedig a calcReference, amely meghatározza, mihez viszonyítva végezzük el a számításokat. Ennek a pontnak egy rögzített koordináta rendszernek kell lennie, ez jelen szimulációban a szimuláció Világ (World) pontja.

Az alrendszer négy kimenettel rendelkezik, az első a CalcPrevExtTargLength, amely meghatározza a beérkező célzó fényvektor hosszát az optikai alrendszerig (mindig akkor állapítható meg a vektor hossza, ha valamilyen elemmel metszettük a fénynyalábot), ezután következik a fényszensor általi két mérés, mely már a síkra vetített XY távolságot adja meg a szenzor közepétől, mind a földi állomástól érkező célzó lézerre (intersectLocalTarg), mint a belső referencia lézerre (intersectLocalRef). Az utolsó kimenet szintén Simscape Frame típusú, lightSensorSurfaceOrigin néven, amely kimenet tesztelésre szolgál, visszaadja a fényszensor középpontját, így a tesztek alatt a földi

állomás megcélozhatta direkt a szenzort, amíg a vezérlő algoritmusok fejlesztése folyamatban volt

3.2.1 Fény leírása és ábrázolása

Ahogy a fenti fejezetben már említésre került, a fénynyalábok a modellemben busz szintű információk, melyek az alábbi változókkal vannak azonosítva:

- PointOfOrigin: [1x3] méretű vektor, mely a fénynyaláb kiinduló pontját tartalmazza
- Direction:
 - [1x3] méretű vektor, mely megfelel az egyenes irányvektorának. Az irányvektor az az egyenes, amely párhuzamos az eredeti egyenessel, és nem null vektor (0 hosszúságú vektor), így a forráspont ismeretében egyértelműen meghatározza az egyenest. A matematikai leírás szerint, ha ismert $P(x_0, y_0, z_0)$ kezdőpontokkal rendelkező egyenes, az irányvektor paraméteres egyenlete:
$$\begin{cases} x = x_0 + a \cdot t \\ y = y_0 + b \cdot t \\ z = z_0 + c \cdot t \end{cases}$$
 ahol $t \in \mathbb{R}$, vagyis a természetes számok halmaza.
 - Az irányvektor ezen ábrázolásban a $\vec{d} = (a, b, c)$, amely a 3 dimenziós térben is egyértelműen meghatározza az egyenest (nem úgy, mint az egyenes normálvektora, mely merőleges az egyenesre, de a térbeli reprezentációban végtelen lehetőség létezik erre)
- Validity: logikai változó, mely meghatározza, hogy a beérkező vektor ténylegesen eljuthatott-e az adott optikai elemig. Mivel a teljes optikai rendszerem huzalozott logikát alkalmaz, ha valahol a beérkező fény érvénytelenné vált (például nem az Optikai elosztó rendszer bemeneti lencsén keresztül érkezik a félig áteresztő tükörrre, hanem az alrendszert fizikálisan burkoló szilárd testen át, ebben az esetben, az információ tovább adódik a teljes rendszerben, és a megjelenítés is megszűnik az első érvénytelen szakasz után)

The diagram illustrates the lighting model's architecture. It starts with inputs: '1' (Light), 'B' (Cartesian Joint Intersection Point to wanted position), '2' (lightLength), and 'Int_size'. The 'Light' input is split into '<PointOfOrigin>' and '<Direction>' signals. The '<Direction>' signal is also compared with '<Valid>' and '<Invalid>' signals. The '<PointOfOrigin>' signal is processed by a 'mirroredVector' block, which also receives 'thetaX' and 'thetaY' inputs. The output of 'mirroredVector' is then processed by a 'rotationCalc' block, which also receives 'thetaX' and 'thetaY' inputs. The output of 'rotationCalc' is then processed by a 'RefI Frame' block. The output of 'RefI Frame' is then processed by a 'Variable Length Light Vector' block, which also receives 'lightLength' and 'Int_size' inputs. The output of 'Variable Length Light Vector' is then processed by a 'Light Source Point' block, which also receives 'Int_size' and '0' inputs. The final output is a 'Valid' signal.

3.2.2 Beeső fénysugár és síkbéli visszaverődés

A paraméteres megoldás a szakirodalomnak megfelelően:

A metszéspont, tekintve, hogy rajta van az egyenesen,

22

A visszaverődés, a szakirodalmat figyelembe véve [43]:

$$P_{mirrored} = \vec{d} - 2 \cdot (\vec{d} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n}$$

3.2.3 Belső optikai elosztórendszer

A belső optikai elosztórendszer kivitelezésénél a piacon fellelhető eszközökből indultam ki, így a rendszer központjának a ThorLabs CM1-DCH [44] típusú, félig áteresztő tükörrel ellátott sávelválasztóját választottam.

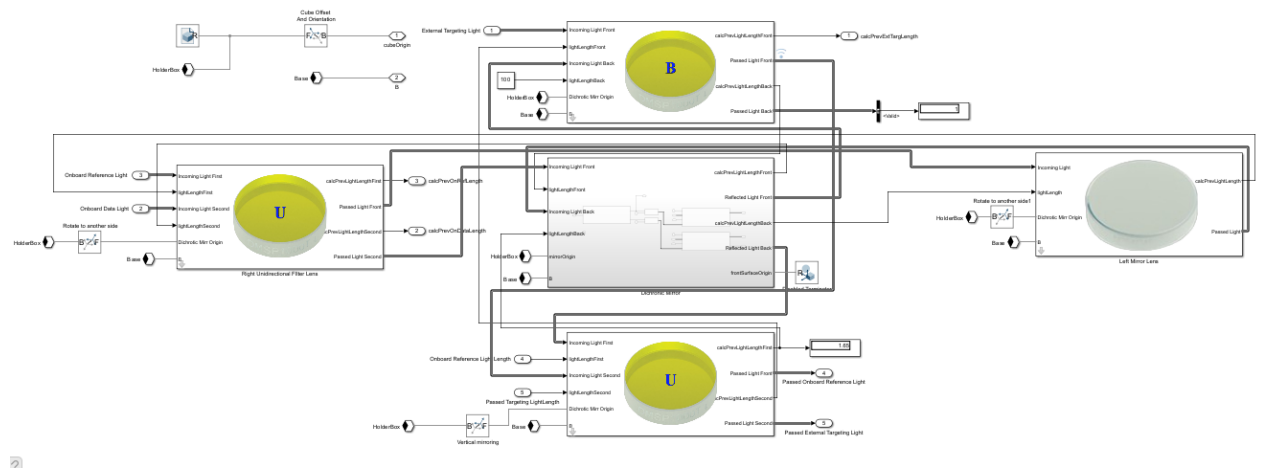


13. ábra: Thor Labs CM1-DCH, integrált féligáteresztő tükör, és a szimulált rendszer

Az almodul mindhárom fénynyalábot kezeli, a külső célzó lézert, a referencia lézert, és az adat lézernyalábot is. Ennek megfelelően, 3 fény jellegű bemenete van, 2 Simulink-es bemenete, melyektől megkapja az adott fény hosszát (mindig visszamenőlegesen rajzoljuk ki a fényt), illetve, megkapja a minden modulnál megszokott matematikai viszonyítási rendszert (jelenleg a modul bemenetén B-vel jelölt Frame típusú bemenet), illetve, megkapja, lokálisan hol helyezzük el az almodult (cubeOrigin, szintén Simscape Frame típusú). A kimenetek között szerepel a két szenzorba tartó nyaláb (reference, és

external targeting), illetve, a bejövő 3 fénynyaláb hossza. (Egy következő lépésben a kiküldött adatlézer is tovább propagálásra kerül.)

Az almodul teljes hierarchiai felépítése a 14.-es ábrán látható:



14. ábra: Optikai elosztó modul felépítése

Ezen blokkdiagrammon jól látható az 5 különálló részegység. A három sárga törőfelülettel jelölt lencse “szűrőlencse”, melyek jelenleg tesztelési feladatot látnak el, hogy a fénysugár a kívánt területen lépett-e be, rajtuk keresztül. Mindegyik ilyen lencse vizsgálja azt is, hogy a fény melyik oldaláról érkezett be. A kék B-vel jelölt szűrőlencse bipoláris, vagyis mindkét irányból átengedi a fényt (2 külön fényvezető almodul, ellentétes irányítással), a kék U betűvel jelölt szűrőlencse pedig unipoláris, vagyis csak az egyik irányba engedi be a fényt (mindkét fényvezető almodul azonos irányítással.) Jobb oldalt a tükörként szolgáló “lencse” található, mely visszaveri a referencia lézernyalábot, hogy a középen lévő félig áteresztő tükrön át, az alsó szűrőlencsén kijutva, eljuthasson majd a szenzorig, ahol mérésre kerül. (Pontos leírás részletezve megtalálható a 2.3-as fejezetben).

3.2.4 Optikai lencsék

A feladat szempontjából, az optikai lencse egy sarkalatos pont, mely elengedhetetlen a megfelelő működéshez. A célkitűzések között szerepelt egy olyan lencsemodell létrehozása, amely bármilyen célra, és bármilyen lencsetípusra beállítható.

A lencsemodellem 2 féllencséből épül fel, melyek között tetszőlegesen lehet üvegtest, vagy kapcsolódhatnak a féllencsék közvetlenül egymáshoz is. A féllencsénél

megadható a görbületi sugár (R), a féllencse magassága (h), a féllencse típusa (konvex, konkáv, sík), a féllencse és a közeg törésmutatója, illetve az üvegtest vastagsága.

A lencsét a felparaméterezés után matlab maszk segítségével inicializálom, ahol a beírt paraméterekből 2 dimenziós ponthalmaz kerül kigenerálásra, mely leírja a lencse egy adott oldalának levetített nézetét. Utána, ezt alkalmazom a modellben, a Simscape Revolved Solid modulján keresztül, mely kör alapú 3D objektumot generál a 2D vetületből.

A megoldás lépéseinek főbb pontjai (a dolgozat hosszára való tekintettel, függelékben csatolom a lencsét létrehozó, illetve, a fénytörést kiszámító kódrészleteket): lencse orientációjának meghatározása (eredeti gömb orientációja), lencse normálvektorának meghatározása (szintén eredeti gömb alapján, a rotációs mátrix 3. oszlopa), ezt követi a beérkező fénysugár érvényességének eldöntése. Ez skaláris szorzattal történik, ugyanakkor, a várt előjel megfordul, a szerint, hogy konvex vagy konkáv a lencserész, illetve, első vagy hátsó szegmens. Ez után, a gömb lokális koordináta rendszerébe térek át a fény világ koordinátájából, az alábbi összefüggéssel:

$$S_d = \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|} \times (-R_L + W_L) + C_L$$

Ahol a S_d az az eltolás, amivel áttérünk gömb koordináta rendszerébe (melynek középpontja a gömb közepe áll), $\vec{n}$ a lencse normálvektora, mely világban értelmezett (a lencse orientációja a világban), R_L a lencse görbületi sugara, W_L pedig a lencseszelet vastagsága, C_L pedig a lencseszelet alsó középpontja.

A következő lépésben meghatározzuk a fényforrást a gömb vonatkoztatási rendszerében az eltolás segítségével:

$$L_{2Sphere} = L_S - S_d$$

Ahol $L_{2Sphere}$ a beérkező fény irányvektora, ami már a lencse koordináta rendszerébe tér át, L_S a fényvektor kiinduló pontja, S_d pedig a már fent kiszámolt gömbi eltolás.

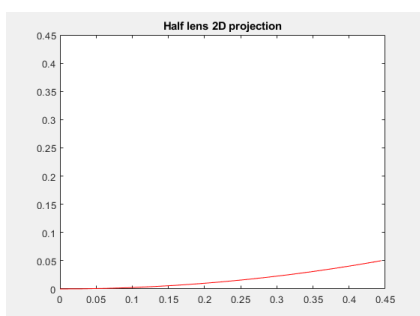
Ez után, felírjuk a másodfokú egyenletrendszert, melyet a gömb és az egyenes formulájának egyenlővé tételéből kapunk.

$$\begin{cases} A = d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 \\ B = 2 * \overrightarrow{L_{2Sphere}}' \cdot \vec{d} \\ C = L_{2Sphere_1}^2 + L_{2Sphere_2}^2 + L_{2Sphere_3}^2 - R_L \end{cases}$$

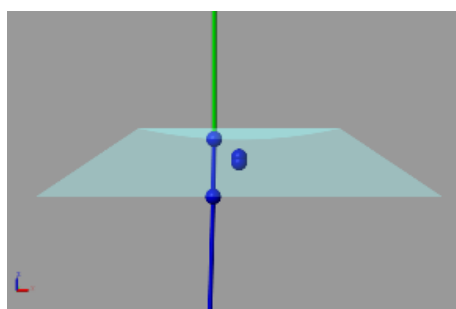
Ahol $\vec{d}$ a beérkező fényvektor irányvektora, A, B és C pedig a másodfokú egyenlet kitevői.

Ezen egyenletrendszer megoldva megkapjuk a t_1 és t_2 paramétereket, melynek segítségével metszéspontokat számolunk, ha a másodfokú egyenletnek volt megoldása. Utána a féllencsetípusok, és pozíciók figyelembevételével eldöntjük, ki a megfelelő metszéspont.

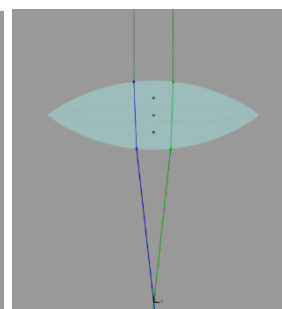
Végül, de nem utolsó sorban, a több típusú hiba ellenőrzés és tesztelés után, Snell optikai törvényeit [45] felhasználva számítom ki a végső megoldást, megkapva a megfelelő irányvektort a tovább haladáshoz.



5. ábra: 2D kigenerált pontok a lencse 3D modelljéhez



6. ábra: Szabad lencsealak meghatározás



7. ábra: Gyűjtőlencse automatikus méretezés

3.2.5 Optikai szenzor

Az optikai szenzor lényege, hogy a referencia lézer és a földi állomásról érkező lézernyaláb pontos helyzetét mérni lehessen. Amikor a rendszer, szakkifejezéssel élve lock-ol a földi állomása, akkor az elsődleges referenciát már ez a szenzor fogja nyújtani. Minimális eltérés esetén az FSM fog beavatkozni, gyors és jelentősegteljes eltérés esetén pedig maga a Stewart Platform, vagy a műholdtörzs.

Jelenleg a szenzor nagyban hasonlít azon részegységre, mely a metszéspontokat határozza meg a törő és visszaverő felületeknél. A legfontosabb különbség, hogy a szenzornál a kapott metszéspontot már nem világ koordinátában számolja tovább a rendszer, hanem itt már lokális, levetített koordináta rendszerben, melynek abszolút távolsága az origótól visszacsatolt hibaként értelmezhető.

A metszéspont megtalálása után, a síkra vetített koordináta rendszerbe való áttérés módja az alábbi:

$$\vec{V}_p = P_{intersect} - P_{center}$$

$$P_{intersect_{local}} = R_{plane} * \vec{V}_p$$

Ahol $\vec{V}_p$ a szenzor síkjának azon vektora, amely a szenzor síkjának origójából mutat a metszéspontra, amely még a világban van mérve, vagyis rendelkezik magassággal is, majd ez a vektor kerül a sík rotációs mátrixával (R_{plane}) a sík koordináta rendszerébe, ahol a síkhoz képest mért magasság 0.

3.3 Aktuátorok

A különböző fent felsorolt beavatkozók létfontosságú szerepet töltenek be a feladat megoldásában. Az elsődleges, gyors szabályzási kör a piezoelektromos gyorsan mozgatható tükörre épül (Fast Steering Mirror), míg a teljes optikai részegységet (a távcsövet és a benne található optikai feldolgozó modult) egy nagy teherbírású, hat lábbal rendelkező, inverz kinematikával bíró Stewart platform mozgatja. Mindkét rendszer egészen más karakterisztikával bír, így az elkövetkezendő fejezetben csupán nagy vonalakban említem meg működési elvüket, és a jelenlegi kivitelezésüket.

3.3.1 Piezo elektromos gyorsan mozgatható tükör (Fast Steering Mirror)

Ahogy már többször szó esett róla a dolgozat során, ezen elem a kellően pontos szabályzásnak az egyik elengedhetetlen kelléke. Mind ahogy minden más szempontban, itt is törekedtem a valósághoz minél közelebbi megoldást választani a felmerülő kérdésre, így egy konkrét üripárban már alkalmazott, viszonylag jól dokumentált rendszert választottam, az amerikai Physik Instrumente [46] kutatóközpont S-331 High-Speed Tip/Tilt Platform [47] névre keresztelt eszközét, melyet többek között a fentiekben már említett Micius kísérletben is használtak.

A platform nagy előnye, hogy a piezoelektromos és nagy pontosságú szabályzás mellett viszonylag széles dőlésszöggel rendelkezik, ami 10 milliradián, ami 0.57 foknak felel meg. Továbbá, magas a rezonancia frekvenciája (10 KHz), ami szintén előnyös választássá teszi minden tekintetben.

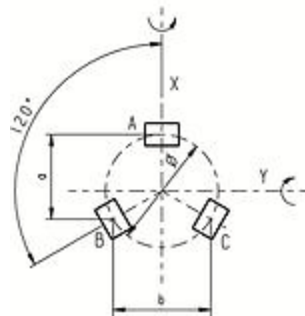
Ezen elem megvalósítása 3 szintből áll, melynek legalján az úgymond elektromos, illetve piezoelektromos szint helyezkedik el. Ennek a szintnek a közvetlen bemenete három különálló feszültség, mely megmozdítja a három “piezo erőhengert”, mely ez által elmozdítja a tükröt. Ami ezt a szintet elhagyja, az már a 3 henger “megnyúlásának a

mértéke”, melyet úgy számolunk ki, hogy azokból az átviteli függvényekből indultunk ki, melyet az eszköz gyártója a szintén általa forgalmazott piezo hengerekre karakterisztikaként megadott.

A megnyúlások visszahatása a tükörrre talán még a hengerek átvitelénél is sokkal leírhatóbb, az FSM fizikai dimenzióinak, és a változásoknak az ismeretében, az alábbi módon:

$$a = 1.5 * \text{actuatorRadius}$$

$$b = \text{actuatorRadius} * \sqrt{3}$$



$$\theta_y = \frac{2 * A - (B + C)}{2 * a}$$

$$\theta_x = \frac{(B - C)}{b}$$

$$Z = (A + B + C)$$

5. Tükörrel ellátott piezo tripod (FSM) szögelfordulás számítása [52]

Mint látható, a fenti összefüggések alapján jól számolható a tükör mozgása. Az összefüggések jobb oldali részét maga a gyártó adta meg, míg az **a** és **b** számításában a térmértan nyújt segítséget, a bal oldali ábrával karöltve. A tükör részletesebb modellje a Függelékek, FSM rendszer fejezetben lesz megtalálható.

3.3.2 Stewart Platform

A Stewart-platform egy hat szabadságfokú, párhuzamos robotstruktúra, amelyet gyakran alkalmaznak mozgásszimulációs rendszerekben, repülésszimulátorokban, és precíziós megmunkáló gépeknél, ahol nagy pontosságú és stabil mozgásra van szükség. A platform szerkezeti felépítése hat lineáris aktuátorból áll, amelyek egy alsó (bázis) és egy felső (mozgó) platform között helyezkednek el. Az aktuátorok mindkét vége gömbcsuklókkal kapcsolódik a platformokhoz, így a rendszer három transzlációs és három rotációs szabadságfokkal rendelkezik.

A Stewart-platform működésének alapelve a geometriai kinematikán alapul: a hat aktuátor hosszának beállításával a mozgó platform pontos pozícióját és orientációját szabályozhatjuk. A kinematikai modellezés során megkülönböztetünk direkt és inverz kinematikai problémákat. A direkt kinematikai probléma a platform pozíciójának és orientációjának meghatározását jelenti, ha az

aktuátorok hosszúsága ismert, míg az inverz kinematika esetében a kívánt platformpozíció alapján számítjuk ki az aktuátorok szükséges hosszát. Az inverz kinematika relatíve egyszerű számítási feladat, míg a direkt kinematika gyakran bonyolultabb, nemlineáris egyenletrendszerek megoldását igényli.

Mivel a Stewart platform modell, amit használunk, a Matlab Simscape Stewart Platform példájának egy tovább fejlesztett változata, amelyet még mindig inverz kinematika, és PID szabályzó működtet, ezért erre nem térnék ki részletesen.

3.3.2.1 Zárt hurkú szabályzás

A platform minden egyes kommunikációs kör kezdetén ismert állásba tér majd vissza (ahogy a műhold orientációja is), hogy a földről küldött célzólézert az optikai rendszer detektálhassa, utána a GPS és csillagszenzor alapú pozíció, és beérkező célzólézer becslést zárt hurkú szabályzás váltsa fel.

3.3.3 Pozicionálás és orientáció

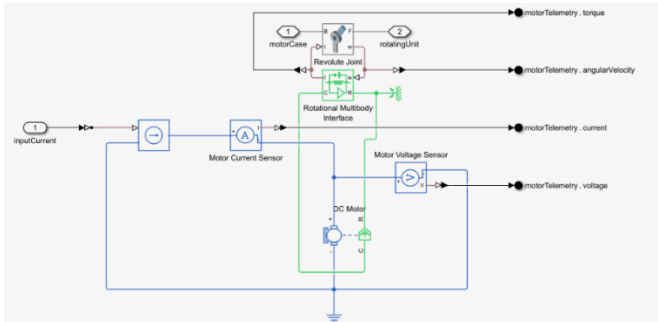
A világűrben, illetve a föld körüli pályán aktív beavatkozásra is szükségünk van, hogy az érzékeny és orientáció függő elemeket célra tarthassuk (optikai kamera, kis nyílásszögű antenna stb.). Hosszabb misszióknál a szilárd hajtóanyagú kis pozicionáló rakéták kevésbé elterjedtek, sokkal inkább előfordulnak a lendkerekes, vagy mágneses nyomatékra alapuló megoldások.

A lendkerék, vagy más néven reakciókerék, egy forgó tömegű eszköz, amelyet különösen műholdak és űreszközök orientációjának szabályozására használnak. Működési elve a perdületmegmaradás törvényén alapul: a kerék forgásának gyorsítása vagy lassítása ellentétes irányú nyomatékot hoz létre, amely megváltoztatja a jármű orientációját. A reakciókerekek jelentős előnye, hogy képesek pontos, finom beállításokat végezni kémiai vagy más típusú hajtóművek használata nélkül, így üzemanyag-hatékonyabb megoldást kínálnak. A szabályozó rendszer az elektromos motorokon keresztül változtatja a kerekek fordulatszámát, ezzel biztosítva a műhold vagy űreszköz stabilitását és irányítását hosszú távú küldetések során.

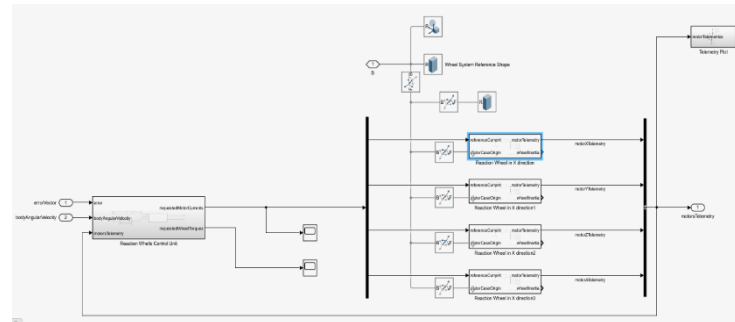
Mindezeket figyelembe véve, én is egy több szintű, szabadon paraméterezhető lendkerekes megoldást implementáltam, ahol 3 kerék a tér három irányában helyezkedik el, a negyedik pedig a két első síkra merőlegesen.

3.3.3.1 Reakciókerekek modellje

A reakciókerekekre több megoldást is implementáltam, jelenleg a könyvtárban van egy szögsebességre, és egy nyomatékra szabályzó változat is. Ez utóbbinak belső felépítése az alábbiakban látható.



6. ábra: Egy motor elektromos modellje áramgenerátorral



7. ábra: Négy keréssel és szabályzóval ellátott rendszer

3.3.3.2 Műhold orientációjának szabályzása

A szakirodalmat figyelembe véve [48], annak ellenére, hogy elsődlegesen a lendkerekek szögsebességének szabályzását valósítottam meg, később rá kellett jönnöm, hogy sokkal kifizetődőbb a forgatónyomatékra szabályozni, mert a lokálisan kifejtett forgatónyomaték aránytartó akkor is, ha nem a műhold súlypontjában van a beavatkozó rendszer. A szakirodalomra alapozva, a reakciókerekek vezérlésére a kvaternionális hibán alapuló PD megközelítést választottam.

Ezen megközelítés szerint, első sorban meg kell kapni, ahogy a név is mutatja a kvaternionális orientációs hibát, vagyis az elvárt, és a jelenlegi pozíció közti különbséget. Mivel nekem a bemenetem Euler szög, először ezt át kellett alakítanom. Az átalakításhoz vannak kész matlab függvények, így ezt nem fejteném ki. A következő lépésben nagyon fontos mind a két kvaternionális alak normálása, mert máskülönben a számítási pontosságból fakadó hiba miatt a teljes szimuláció leállhat, ha a lebegő pontos számábrázolás miatt a kvaternió normája 1-nél nagyobb lesz.

A következő két lépés a szögsebesség, számítása, mely az alábbi 2 lépésből áll:

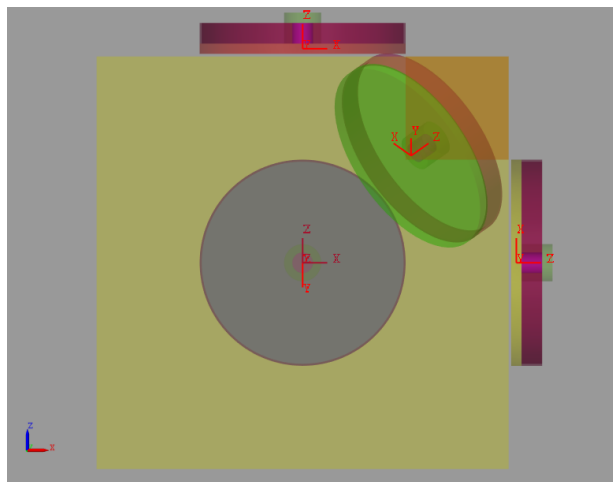
$$errorQuaternion = \frac{currentPositionQuaternion - previewPositionQuaternion}{dt}$$

$$bodyAngularVelocity = 2 \cdot quatmultiply(q_dot', quatinv(currentPositionInQuaternion'))$$

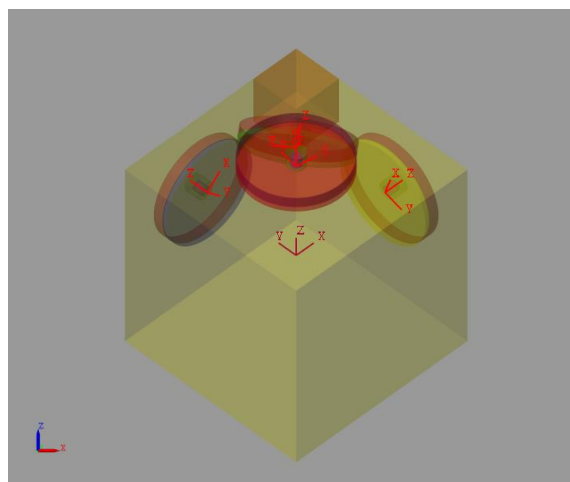
Végül, az elérni kívánt nyomaték vektor az alábbiak szerint alakul, figyelembe véve, hogy a Simscape más sorrendben kezeli a kvaterniókat:

$$radianError = -2 * errorQuaternion(2:4) * errorQuaternion(1);$$

A lendkerekes alrendszer megvalósítása, a szabályzás lefutása, illetve, az előtte, utána állapot látható az alábbi képeken:



9. ábra: Orientációs almodul alaphelyzetben



8. ábra: Orientációs almodul a cél orientációban



10. ábra: Szabályzó működése 100 Kg terhelés mellett – beállási idő 2 másodperc

4 A Jelenlegi helyzet, és távlati tervek

4.1 Jelenlegi rendszer képességei, flexibilitás és kompatibilitás előnyei

A dolgozat írásának pillanatában a rendszer több külön álló egységből tevődik össze, a teljes integráció még néhány hetet vesz igénybe. Azonban nagy előny más megoldásokhoz képest (beleértve a Matlab Aerospace Toolboxát), hogy itt maga a műhold teljesen személyre szabható, hogy bármilyen aktív, vagy passzív eszköz feltehető rá. Mivel a teljes modell Simscape-ben készült, ezért bármilyen szilárdtest komponens, vagy akár flexibilis panel egy bármilyen a Solid File által támogatott formában (vagy egy 2 perces online filekonverzió után) rögzíthető a műhold bármelyik pontjára egy egyszerű Rigid Transformatóval (még nem készítettem külön almodult erre a lépésre). De minden a műholdon levő testtel automatikusan számol a rendszer, minden erő a megfelelően visszahat, már csak a műhold pályából fakadó erőket kell becsatolni. Ez által pedig egy olyan eszköz lesz a kezünkben, amely a jelenlegi piacon is fellelhető komponensekre épít, elősegítve a jövő kvantumkommunikációs műholdjainak tervezését, úgy, hogy akár a teljes műhold is szimulálható, minden részegységével, mechanikai, és optikai komponensével együtt. Továbbá, nagy segítséget nyújthat a méretezésben, a jelenlegi fizikai keretek feszegetésében, hiszen egyszerűen és könnyen ki lehet próbálni a különböző komponensek méretének megváltoztatását, a távcső paramétereitől elkezdve egészen a lendkerekek tengelyméretéig.

4.2 Rövid, és hosszútávú célkitűzések

A rövid távú céljaim között szerepel, a szimuláció teljes összekötése, több scenario lefuttatása, hogy a jelenlegi műholdmodellemnél hatékonyabb koncepciót találhassak. Továbbá, a hosszú távú céljaim között szerepel a könyvtár minél több piacon fellelhető elemmel történő bővítése, gondolok itt különböző más aktuátorokra, lendkeres megoldásokra, vagy változatosabbnál változatosabb payloadokra. A szabályzás több irányú megvalósítására, modell prediktív, vagy Kálmán szűrős irányításra. A rendszer liberalizálásának hatékonyabbá tételére. Illetve, annak kivitelezésére, hogy a valós műholdakat akár a legapróbb részletekig, az utolsó csavarig, vagy kondenzátorig le lehessen szimulálni. Szeretném, ha a munkám ténylegesen hozzáadna valamit az emberiség jövőjéhez, és ha csak egy vagy két műhold fejlesztésénél is hasznát fogják venni, nekem már megérte az összes bele fektetett munka.

5 Köszönetnyilvánítás

Nagyon szépen köszönöm a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudomány Egyetem minden lelkes oktatójának, doktoranduszának, és gyakorlatvezetőjének ezt a tudásban és kihívásokban gazdag 2 évet, különösen köszönöm az egyetemi konzulenseimnek, Bacsárdi Lászlónak és Mihály Andrásnak, hogy mindig hittek bennem, és türelemmel fordultak felém, akkor is, ha sokszor utolsó percben adtam le az elvárt feladatokat (mint ahogy ezen dolgozat leadásánál is).

Továbbá, Nagyon szépen köszönöm a Számítástechnikai és Autómatizálási kutatóintézet minden kedves munkatársának, hogy befogadtak, hogy segítettek, hogy közetek tartozhatok, és hogy mindig számíthattam rátok. Köszönöm Vanek Bálintnak, hogy bevett a csapatába, köszönöm Takarics Bélának, hogy mindig számíthattam a szakértő tanácsára, a barátságára és a biztatására. Továbbá, köszönöm Balogh Dániel kollégámnak, hogy mindig segített megbékülnöm a Matlab lelki világával, s hogy mindig időt és energiát nem sajnálva segített kibogozni azokat a bugokat, amiket sokszor olyan keservesen derítettünk fel, iktattunk ki.

Nagyon szépen köszönöm mindenkinek, s végül, de nem utolsó sorban, a feleségemnek, Imolának, aki mindig hitt bennem, aki támogatott, és lelkesített, hogy az álomnak élhessek, és az úr útjára léphessek, s aki örömet hoz ebbe az oly sokszor szürke életbe. Köszönöm, hogy vagy nekem!

6 Irodalomjegyzék

- [1] „Fine and fast Steering Mirrors,” Cedrat Technologies, [Online]. Available: <https://cedrat-technologies.com/fine-and-fast-steering-mirrors/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [2] „How Do Fast Steering Mirrors (FSM) Work?,” Lion Precision, 2021. [Online]. Available: <https://www.lionprecision.com/wp-content/uploads/2021/06/LP-How-do-Fast-Steering-Mirrors-FSM-work.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [3] E. Parker, „When a Quantum Computer Is Able to Break Our Encryption, It Won't Be a Secret,” Objective Analysis. Effective Solutions, 13 szeptember 2023. [Online]. Available: <https://www.rand.org/pubs/commentary/2023/09/when-a-quantum-computer-is-able-to-break-our-encryption.html>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [4] C. Faculty, „What Is Quantum Computing?,” 29 10 2024. [Online]. Available: <https://scienceexchange.caltech.edu/topics/quantum-science-explained/quantum-computing-computers>.
- [5] I. S. Josh Schneider, „What is quantum computing?,” IBM, 5 8 2024. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/quantum-computing>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2024].
- [6] „What is quantum computing?,” Oxford Quantum Circuits, 2024. [Online]. Available: <https://oqc.tech/what-is-quantum-computing>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2024].
- [7] „What is cryptography,” IBM, [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/cryptography>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2024].
- [8] S. Wickramasinghe, „RSA Algorithm in Cryptography: Rivest Shamir Adleman Explained,” Splunk, 15 5 2023. [Online]. Available: https://www.splunk.com/en_us/blog/learn/rsa-algorithm-cryptography.html. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [9] M. Cobb, „What is the RSA algorithm (Rivest-Shamir-Adleman)?,” TechTarget, [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/searchsecurity/definition/RSA>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].

- [10] L. W. Maheshi Dissanayake, „RSA Public Key Format,” Baeldung, 6 7 2024. [Online]. Available: <https://www.baeldung.com/cs/rsa-public-key-format>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [11] „Mitchell Cornish,” Trustico, 16 április 2019. [Online]. Available: <https://blog.trustico.com/resources/trustico-blog-how-to-guides/how-to-find-rsa-private-key.php>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [12] I. S. osh Schneider, „What is a qubit?,” IBM, 28 február 2024. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/qubit>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [13] „Mi a qubit Bloch-gömb reprezentációja?,” Európai Információs Technológiai hitelesítési akadémia, 5 május 2024. [Online]. Available: <https://hu.eitca.org/quantum-information/eitc-qi-qif-quantum-information-fundamentals/introduction-to-spin/bloch-sphere/what-is-the-bloch-sphere-representation-of-a-qubit/>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [14] „What Is Superposition and Why Is It Important?,” Caltech, [Online]. Available: <https://scienceexchange.caltech.edu/topics/quantum-science-explained/quantum-superposition>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [15] „Quantum Cryptography - Shor's Algorithm Explained,” CLASSIQ, 19 július 2022. [Online]. Available: <https://www.classiq.io/insights/shors-algorithm-explained>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [16] M. Swayne, „Chinese Scientists Report Using Quantum Computer to Hack Military-grade Encryption,” The Quantum insider, 11 október 2024. [Online]. Available: <https://thequantuminsider.com/2024/10/11/chinese-scientists-report-using-quantum-computer-to-hack-military-grade-encryption/>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [17] E. Conover, „Quantum computers could break the internet. Here’s how to save it,” ScienceNews.org, 28 június 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencenews.org/article/quantum-computers-break-internet-save>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [18] A. S. Gillis, „What is quantum key distribution (QKD)?,” Techn Target, [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/searchsecurity/definition/quantum-key-distribution-QKD>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].

- [19] Y. Shlepnev, „How Interconnects Work: Absorption, Dissipation and Dispersion,” *Signal Integrity Jurnal*, 15 március 2022. [Online]. Available: <https://www.signalintegrityjournal.com/blogs/12-fundamentals/post/2418-how-interconnects-work-absorption-dissipation-and-dispersion>. [Hozzáférés dátuma: 04 11 2024].
- [20] K. K. A.-P. A. G. Gianluca De Santis, „Parallel trusted node approach for satellite quantum key distribution,” *Quantum Research Centre, Technology Innovation Institute*, 12 július 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/html/2406.08562v1>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [21] „No-Cloning Theorem,” *QuEra*, 2023. [Online]. Available: <https://www.quera.com/glossary/no-cloning-theorem>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [22] „Quantum Repeaters,” *Quantum FlagShip*, [Online]. Available: <https://qt.eu/quantum-principles/communication/quantum-repeaters>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [23] M. Fowler, „Keplerian Orbits,” [Online]. Available: https://galileoandeinstein.phys.virginia.edu/7010/CM_15_Keplerian_Orbits.html. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [24] „Basics of the Stewart Platform,” *Acrome Robotics*, 1 október 2024. [Online]. Available: <https://acrome.net/post/the-basics-of-the-stewart-platform>. [Hozzáférés dátuma: 3 november 2024].
- [25] „The future is Quantum,” *Quantum FlagShip*, [Online]. Available: <https://qt.eu/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [26] „NATIONAL QUANTUM INITIATIVE,” *Quantum.gov*, [Online]. Available: <https://www.quantum.gov/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [27] M. M. Hodan Omaar, „How Innovative Is China in Quantum?,” *Information Technologi & Innovation Foundation*, 9 szeptember 2024. [Online]. Available: <https://itif.org/publications/2024/09/09/how-innovative-is-china-in-quantum/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [28] Y. C. C.-Z. P. a. J.-W. P. Chao-Yang Lu, „Micius quantum experiments in space,” *Physics*, 94. kötet, 2022.

- [29] „Quantum Technologies,” Quantum Gravimetry , [Online]. Available: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space/research-development-and-innovation/quantum-technologies_en. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [30] D.-G. f. R. a. Innovation, „Horizon 2020,” European Comission, 2020. [Online]. Available: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2022].
- [31] O. Cierny, „ Precision Closed-Loop Laser System for the Nanosatellite Optical Downlink Experiment,” Luleå University of Technology, 2017. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1161537/FULLTEXT01.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [32] R. Noori, „Fiber Optic Cable Range: How Far Will It Go?,” The network installers, 04 09 2024. [Online]. Available: <https://thenetworkinstallers.com/blog/fiber-optic-cable-range/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [33] D. B. László, „Biztonságos kommunikáció kvantumalapú hálózatokban,” BME, 2015. [Online]. Available: http://www.hit.bme.hu/~bacsardi/pub/TermVil_Halozatkutatas_BacsardiL_2015aug.pdf. [Hozzáférés dátuma: 06 06 2023].
- [34] MR.Asif, „Quantum Key Distribution and BB84 Protocol,” medium.com, 24 06 2021. [Online]. Available: <https://medium.com/quantum-untangled/quantum-key-distribution-and-bb84-protocol-6f03cc6263c5>. [Hozzáférés dátuma: 06 06 2023].
- [35] „BB84 and Ekert91 protocols,” Quantiki, [Online]. Available: <https://www.quantiki.org/wiki/bb84-and-ekert91-protocols>. [Hozzáférés dátuma: 04 06 2023].
- [36] „Quantum Computing,” [Online]. Available: https://cnot.io/quantum_computing/two_qubit_operations.html. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [37] L. Chandrasekaran, „‘Quantum Memory’ Proves Exponentially Powerful,” Quantummagazine.org, 16 október 2024. [Online]. Available: <https://www.quantamagazine.org/quantum-memory-proves-exponentially-powerful-20241016/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].

- [38] I. R. Quantum Computing Group, „Fundamentals of Quantum Key Distribution — BB84, B92 & E91 protocols,” 06 09 2021. [Online]. Available: <https://medium.com/@qcgitr/fundamentals-of-quantum-key-distribution-bb84-b92-e91-protocols-e1373b683ead>. [Hozzáférés dátuma: 05 06 2022].
- [39] „Dichroic Mirror,” BMG Labtech, 2024. [Online]. Available: <https://www.bmglabtech.com/en/what-is-a-dichroic-mirror/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [40] E. O. Inc, „Considerations in Collimation,” Edmund Optics Inc, [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/considerations-in-collimation/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [41] C. Lee, „Big-picture thinking: Benefits and strategies - Atlassian,” Atlassian, 13 október 2023. [Online]. Available: <https://www.atlassian.com/blog/productivity/big-picture-thinking>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [42] Standard, „Solar panel 3D Model,” Free3D, 20 június 2019. [Online]. Available: <https://free3d.com/3d-model/solar-panel-419075.html>. [Hozzáférés dátuma: 01 11 2024].
- [43] T. Chen, „[Graphics] The Graphical Interpretation of the Reflection Vector Calculation Formula,” Medium, 4 07 2024. [Online]. Available: <https://medium.com/@tiffanychen1118/graphical-interpretation-of-the-reflection-vector-2d826236650d>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [44] „Cage Cube for Rectangular Optics,” ThorLabs, [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6079. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [45] Q. Y. Bryan Ng, „Understanding Focusing Lenses in Optical Systems,” Wavelength Opto-Electronic, 21 október 2024. [Online]. Available: <https://wavelength-oe.com/focusing-lenses/>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [46] „Precision Motion Control Technologies for Industry, OEM & Research,” Physik Instrumente, [Online]. Available: <https://www.pi-usa.us/en/about-pi>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [47] P. Instrumente, „S-331 High-Speed Tip/Tilt Platform,” Physik Instrumente, [Online]. Available: <https://www.pi-usa.us/en/products/fast-steering-mirrors-fsm-and->

piezo-tilt-platforms-for-active-optics/s-331-high-speed-tilt-platform-300705#description. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].

- [48] A. K. & F. F. Saberi, „Optimal Configuration of Four Reaction Wheels in Momentum Management Performance and Reliability Point of View,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering* , p. 2021–2043, 01 március 2023.
- [49] M. Fowler, „Elliptic Orbits: Paths to the Planets,” The University of Virginia, [Online]. Available: <https://galileo.phys.virginia.edu/classes/152.mf1i.spring02/EllipticOrbits.htm>. [Hozzáférés dátuma: 30 10 2024].
- [50] D. H. E. SCHNEIDER, „INTERSECTION IN 3D,” ScienceDirect, 2003. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/plane-intersection>. [Hozzáférés dátuma: 03 11 2024].
- [51] J. Y. C. Y. H. L. S.-K. L. L. Z. J.-G. R. W.-Q. C. W.-Y. L. B. L. H. D. G.-B. L. Q.-M. L. Y.-H. G. Y. X. S.-L. L. F.-Z. L. Y.-Y. Y. Z.-Q. Y.-H. G. Y. X. S.-L. L. F.-Z. L. Y.-Y. Y. Z.-Q. Z. N. W. X. C. Z. Yin, „Satellite-based entanglement distribution,” *Science*, p. 356, 2017.
- [52] „Piezo Positioning Systems with Parallel Kinematics,” Physik Instrumente (PI) SE & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.physikinstrumente.com/en/expertise/technology/parallel-kinematics/piezo-parallel-kinematics>. [Hozzáférés dátuma: 04 11 2024].