



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

Köpeczi-Bócz Gergely

**Drónokon alapuló
kvantumkulcsszétosztó rendszer
szimulációja**

KONZULENSEK

Dr. Bacsárdi László
Dr. Benedek Csaba

BUDAPEST, 2023

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés	1
2 Elmúlt évek kutatásai	2
2.1 Amerikai drónokon alapuló kvantumkulcsszétosztás	2
2.2 Kínai drón alapú összefonódás szétosztás	4
2.3 Kínai drón alapú kvantumkulcsszétosztás	5
3 A drónok környezeti kihívásai	7
3.1 Légmozgás	7
3.2 Hőmérséklet és csapadék	8
3.3 Egyéb veszélyek	10
3.4 A drón kommunikációs hatótávolsága.....	11
3.4.1 Turbulencia	12
3.4.2 Rayleigh-szórás.....	14
3.5 SWOT-elemzés a drónok QKD-hoz való felhasználásáról	15
3.5.1 Erősségek	15
3.5.2 Gyengeségek.....	15
3.5.3 Lehetőségek	16
3.5.4 Veszélyek.....	16
4 Szimulátor tervezése	17
4.1 Qiskit keretrendszer	17
4.1.1 Rétegei	17
4.1.2 Qiskit elemei	18
4.2 A szimulátor felépítése és működése.....	19
4.2.1 Fizikai modul	20
4.2.2 Kvantumkommunikációs modul.....	23
5 Szimulálás	24
5.1 A két szimulált rendszer kialakítása	24
5.2 Első típusú rendszer szimulálása	26
5.2.1 Főbb paraméterek	26
5.2.2 Csatorna veszteségek	26
5.2.3 Kvantumkulcsszétosztás eredményei	27
5.3 Második típusú rendszer szimulálása	29

5.3.1 Főbb paraméterek	29
5.3.2 Csatorna veszteségek	29
5.3.3 Kvantumkulcsszétosztás eredményei	30
5.4 Konklúzió.....	31
6 Összefoglalás.....	32
7 Irodalomjegyzék.....	33

Összefoglaló

Az egyre gyorsabban fejlődő kvantumszámítógépek veszélyt jelentenek napjainkban használt titkosítási algoritmusokra, de ezt ellensúlyozva számos kutatás és előrelépés megy végbe a kvantumkommunikáció témakörében, ahol kvantumszámítógépek által is feltörhetetlen algoritmusokat használunk, kihasználva a kvantummechanika jelenségeit.

Számos kutatás irányul az optikai szálon történő kvantumkommunikációra, amely a jelenlegi hálózatainkba integrálható, illetve az optikai szálak mellett a szabadtéri optikai kvantumkommunikáció sem kerüli el a kutatók figyelmét. A szabadtéri optikai kvantumkommunikáció területén belül már több megoldást is láthattunk, amely kvantumkulcsszétosztást, földfelszíni fix pozíciójú optikai eszközök segítségével hajtott végre, vagy akár földkörüli pályára állított műholdak segítségével, amelyekkel nagy távolságokon is képesek vagyunk kvantumkommunikációt végrehajtani.

Az előbb felsorolt két gyakori, és részletesen kutatott terület, habár nagyon ígéretesnek bizonyul, megvannak a hátulütői, amik ezeket a rendszereket képesek közel használhatatlanná tenni. Ilyen akadályok például a fizikai sérülések, távolsági és környezeti hatásokból eredendő problémák, amelyek nehezebbé vagy megvalósíthatatlanná teszik a folyamatos szolgáltatás nyújtását.

Ezekre a problémákra próbál megoldást kínálni a drón alapú kvantumkommunikáció, amellyel ezeket a rendszereket helyettesíteni lehet, akár vészhelyzetben is. Dolgozatomban a drón alapú kvantumkulcsszétosztást vizsgálom egy általam készített szimulátor segítségével. A szimuláció a drónok viselkedését és működését mutatja be több különböző környezetben, miközben azok segítségével kvantumkulcsszétosztást hajtunk végre, két földi állomás között.

Abstract

The increasingly fast-evolving quantum computers pose a threat to the encryption algorithms used today, but this is counterbalanced by a lot of research and progress in quantum communications, where we use algorithms which exploit the phenomena of quantum mechanics, making it unbreakable even by quantum computers

There is a lot of research on quantum communications over optical fibres, which can be integrated into our current networks, and free-space optical quantum communications are also being explored alongside optical fibres. Within the field of free-space optical quantum communication, we have already seen several solutions that have implemented quantum key distribution using fixed-position ground stations, or even satellites orbiting the earth, which enables quantum communication over long distances.

Although very promising, these two common and extensively researched areas have drawbacks, which can render these systems almost useless. Such obstacles include physical damage, distance and environmental problems, which make the provision of continuous service more difficult or infeasible.

These problems are addressed by drone-based quantum communications, which can be used to replace these systems even in emergencies. In this thesis, I analyze different drone-based quantum key distribution systems using a simulator developed by myself. The simulation demonstrates the behaviour and operation of drones in several different environments while performing quantum key distribution between two ground stations.

1 Bevezetés

A kvantuminformatika témakörével és azon belül a kvantumkommunikációval specializációs éveim alatt ismerkedtem meg, egészen az ötödik félévtől kezdve. Egy pár hónapos bevezetés során megismerkedtem az alapokkal és azután egy részletesebb téma kidolgozás keretein belül nanoműholdas kvantumkommunikációval foglalkoztam. Ezután adódott egy lehetőség, amellyel egy számomra nagyon érdekes és viszonylag felfedezetlen területtel kezdtem el foglalkozni, amely nem más, mint a drón alapú kvantumkommunikáció.

A kvantumkommunikáció területén óriási előrehaladás figyelhető meg az elmúlt évek során, amely magába foglalja az optikai szálon, illetve a szabadtéri optikai kommunikáción – legyen az műholdas vagy földfelszíni - alapuló rendszerek vizsgálatát. Mindkét területen sikeres kutatások, fejlesztések és létező megoldásokon való tesztelések láthatóak. Ennek köszönhetően ezen rendszerek előnyeiről és hátrányairól is sokat megtudtunk, illetve azt is hogy ezeket hogyan lehet még jobban megerősíteni vagy kiküszöbölni.

A drónokon alapuló kvantumkommunikációs rendszerek, az előbb felsorolt technológiákon alapuló megoldások főbb hibáira kínálnak egy ígéretes köztes utat. A második fejezetben bemutatom az eddigi lezajlott kutatások és fejlesztések alatt elkészített, több ilyen rendszer felépítését és működését.

Az áttekintést követően a harmadik fejezetben a drónok környezeti kihívásairól lesz szó, amelyben a főbb befolyásoló tényezőkről és az ezen tényezők hatásának csökkentésére használt megoldásokról írok. A környezeti tényezők ismertetése után egy általam készített SWOT elemzésben foglalom össze a fejezetben elhangzottakat.

A negyedik fejezet során bemutatom egy általam készített szimulátorhoz felhasznált Qiskit keretrendszert, amely segítségével a kvantumkommunikációban használt BB84 kvantumkulcsszétosztó protokollt valósítottam meg. Emellett egy rövid áttekintést adok a szimulátorom fizikai moduljáról, amelyben a főbb környezeti tényezők implementálása található meg.

Az ötödik, egyben utolsó fejezetben két lehetséges rendszer kialakítását mutatom be, továbbá ezzel a két kialakítással futtatok le több szimulációt különböző paraméterekkel, majd összehasonlítom és kiértékelem azok eredményeit.

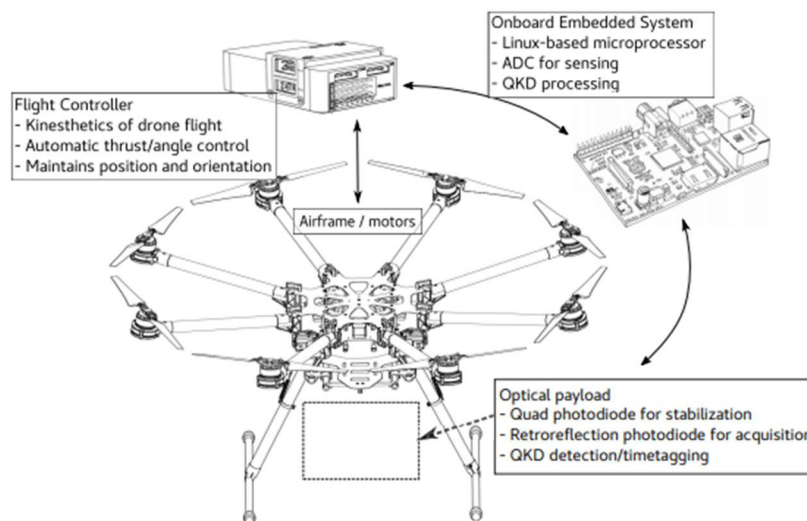
2 Elmúlt évek kutatásai

Ebben a fejezetben egy tervezetről, illetve két kísérletről írok, amelyeket irodalomkutatás során találtam. Közlöm a kísérletek eredményeit, továbbá a felhasznált eszközök egy részének működését.

2.1 Amerikai drónokon alapuló kvantumkulcsszétosztás

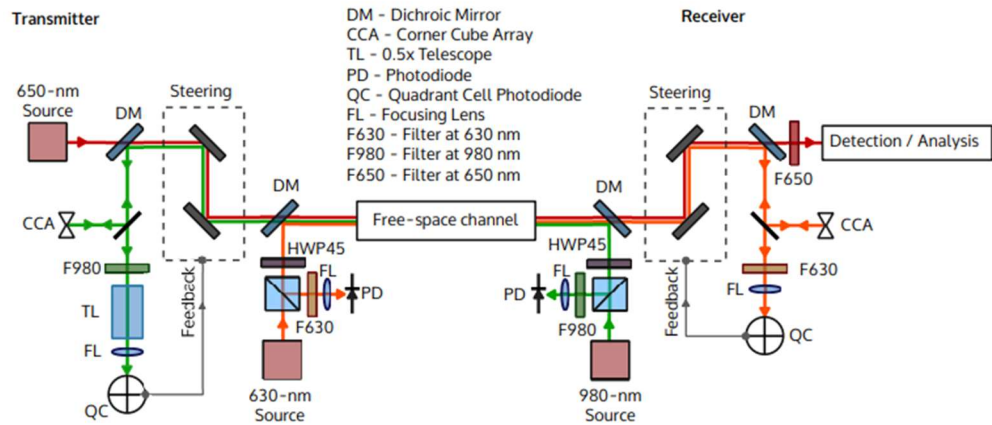
Az Illinois-i és az Ohiói Egyetem fizikusai egy olyan kísérleti tervet dolgoztak ki, amely egy kétsomópontos kvantumhálózatot valósítana meg, több propelleres drónokat használva közvetítőként [1]. A jelenlegi nem katonai célra fejlesztett drónok körülbelül 10 kg hasznos terhet képesek szállítani, ami nehéz feladatot jelent a fejlesztésre nézve, hiszen könnyű, de mégis egy teljesen működőképes konstrukciót kell létrehozni, amely repülés közben is képes pontosan a kívánt irányba célozni úgy, hogy közben kis hibával sikeresen továbbítsa a fotonokat más csomópontok felé.

A fizikusok által bemutatott kísérleti konstrukció a DJI S1000+ Octocopterert használja alapként, mivel az képes körülbelül 11 kg súlyt is elbírní. A drón mozgása félig autonóm a fedélzeti repülésvezérlőnek köszönhetően, amely képes kommunikálni külső hardverrel, például egy fedélzeti beágyazott rendszerrel (Onboard Embedded System). Ez az OES valósítja meg a QKD-protokollt, és felelős a drónok irányba állításáért, kommunikálva a repülésvezérlővel és egy gyors stabilizációs rendszerrel, amely az optikai hasznos teherben található [1].



1. ábra: A drón kísérleti felépítése [1]

A drónok mozgását az irányba állítás során korlátozták az oldalcsatornás támadások elkerülése érdekében. Ez érzékenységsztést eredményez, és a drón képtelen korrigálni a nagyobb elmozdulásokat. A drónban megtalálható repülésvezérlő képes pontosan tartani az kívánt pozíciót, mivel viszonylag kis léptékekben tudja mozgatni és forgatni drónt. Az OES megmondja a repülésvezérlőnek, hogyan milyen elmozdulásokat hajtson végre, miközben értelmezi az optikai szenzor adatait, és szükség esetén képes az optikai felszerelésben megtalálható tükröket is forgatni [1].



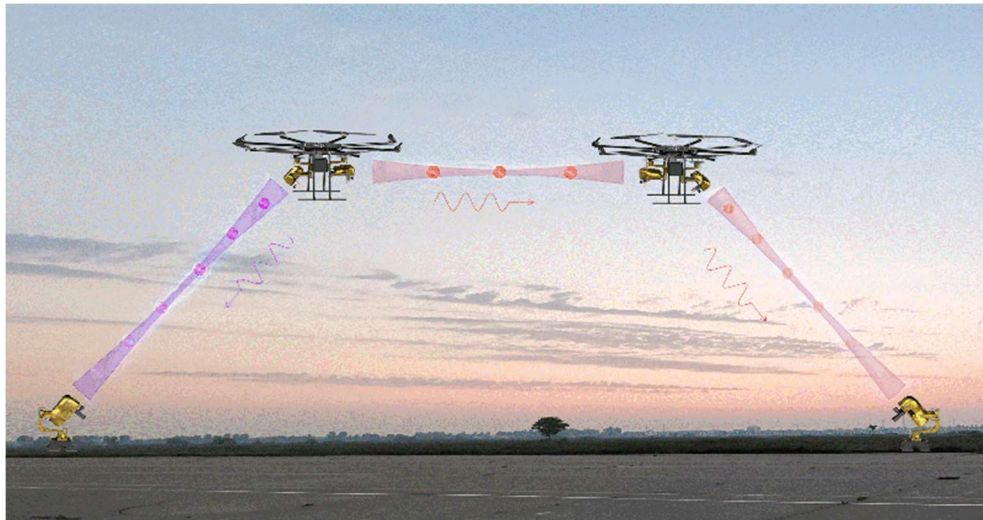
2. ábra: Az optikai felszerelés felépítése [1]

Ahogy a fenti ábrán látható, a két csomópont úgy szinkronizálódik egymással, hogy mindkettő drón bizonyos hullámhosszú fotonokat küld, amelyek a fogadó oldalon visszaverődésre kerülnek. Ha mindkét oldalon látható a szinkronizáló fotonok visszaverődése, akkor felépült a kapcsolat a két drón között. Az összehangolás során két különböző hullámhosszt használ a két drón, így a visszaverődő fotonok könnyen megkülönböztethetőek.

2.2 Kínai drón alapú összefonódás szétosztás

A Nanjingi Egyetem kutatói az elmúlt években több drón alapú kvantum megoldáson is dolgoztak, ezekül az egyik nagy előrelépés a 2020 februárjában sikeresen végrehajtott összefonódás szétosztás volt, amelyet két földi állomás között drónok segítségével hajtottak végre [2].

A kísérlethez két drónt és két földi állomást használtak. A földi állomás és a drón közötti távolság 400 méter volt, míg a két drón közötti távolság 200 méter. Megmérték, hogy az Alice (bal oldali) és Bob (jobb oldali) földi állomásokra beérkező fotonok számát. Az egyik drón csak egy továbbító csomópont volt, amely az adó dróntól kapott fotonokat továbbította Bob felé. Alice detektora az elküldött fotonok 25%-át rögzítette, míg Bob detektora csak 4%-át [2].



3. ábra: A kísérletben használt csomópontok elhelyezkedése [2]

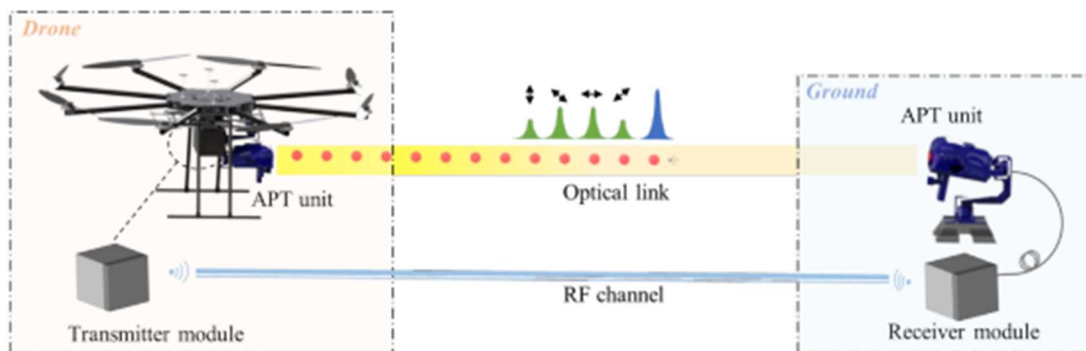
Ahogy a 3. ábrán látható, a bal oldali drón létrehozza az összefonódott fotonpárokat, majd miután szétválasztja a fotonokat elküldi az egyiket Alice-nek (lila sugár), a másikat pedig elküldi Bobnak a továbbító drónon keresztül (piros sugár). A tesztet éjszaka végezték infravörös hullámhosszon, és minden állomás 26 mm széles apertúrával és egy egyfotonos detektorral rendelkezett [2]. A továbbító drónt alapvetően fókuszáló lencseként vezették be a rendszerbe, hogy csökkentsék a diffrakció erősségét. A második drón a fotonokat egy optikai szálba gyűjtötte össze, amelyben a fotonok hullámjai újraformálódnak, így nagyobb eséllyel érkeznek meg Bobhoz.

A kísérlet végén a csapat elvégeztett egy Bell-tesztet, összehasonlítva az Alice-nél és Bob-nál detektált fotonok polarizációját. A kísérlet sikeresnek tekinthető, mivel a beérkezett fotonok mind összefonódva maradtak [2].

2.3 Kínai drón alapú kvantumkulcsszétosztás

Egy 2023-ban készült tanulmányban [3] sikeres drón alapú kvantumkulcsszétosztást hajtottak végre. Ezt a kísérletet ugyanaz a csapat hajtotta végre, mint az előbbieken bemutatott összefonódás szétosztás végző kutatók. A kísérletben az előző drón továbbfejlesztett változatát használták, egy 30 kg össztömegű (azaz az összes optikai berendezéssel együtt), teljesen saját fejlesztésű, 8 propellerrel ellátott drónt. A kvantumkulcsszétosztást repülés közben hajtották végre, miközben a drón 10 méteres magasságban lebegett a földi állomástól 200 méterre [3].

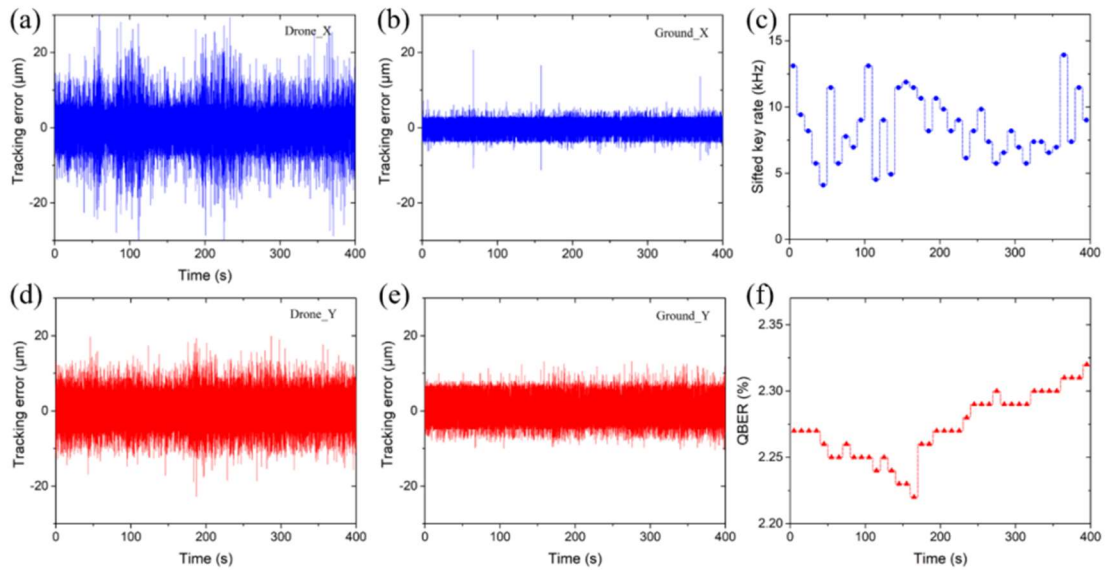
A kísérlet során egy lefelé irányuló kvantumcsatornát hoztak létre, vagyis a drón egy lézerrel generált 850 nm hullámhosszú fotonokat küldött a földi állomásnak. A kvantumkulcsszétosztást 400 másodpercen keresztül folyamatosan, élőben végezték. A kutatók egy olyan polarizációs kódolású protokollt választottak, amely a csaliállapotos BB84 protokollon alapult. A kulcsszétosztás során átlagosan 8 kHz-es biztonságos kulcssebességet értek el [3].



4. ábra: A rendszer felépítésének áttekintése [3]

A drónra egy rádiófrekvenciás és lézeres adómodult, illetve egy bemérő, célzási és követési egységet (APT) szereltek fel. Utóbbi az adóegység által generált fotonok megfelelő irányba történő küldéséért felelős, tehát ez a modul hajtja végre azt a komplex és nehéz feladatot, aminek eredményeként a lehető legtöbb foton megérkezik a földi egységen található detektorhoz. Egy lézer generálja és küldi a fotonokat az APT egységnek, és emellett klasszikus rádiófrekvenciás csatornát hoz létre a földi állomással. Ez az adóegység a 850 nm-es fotonok generálásán kívül egy másik lézerrel 808 nm-es fotonokat is generál, amelyek szinkronizációs jelként (SYNC) szolgálnak. Ezeket szintén elküldi a földi állomásnak [3].

A kísérlet során megállapították, hogy a kvantumjel 17,8 dB csillapítást szenvedett el, beleértve a passzív projekció 3dB-ét, az érzékelési zaj 5 dB-ét és az egyéb optikai eszközök 0,8 dB-ét. Csak a szabad csatornán körülbelül 9dB csillapítást mértek. A drón APT egységének hibahatára 3,33 mikron, míg a földi egységé 2,01 mikron volt. A QBER 2,22% és 2,32% között mozgott bőven a 11%-os határ alatt, tehát a rendszer jól használható egy BB84-alapú kvantumkulcsszétosztáshoz [3].



5. ábra: A kínai kísérlet kvantumkulcsszétosztásának eredményei [3]

3 A drónok környezeti kihívásai

Ebben a fejezetben a drónokat befolyásoló környezeti tényezőkről lesz szó, egy összefoglaló áttekintést adok a drónok főbb kihívásairól, arról hogy ezek milyen következménnyel bírnak és több javaslatot is teszek, hogy hogyan tudunk ezek ellen védekezni.

3.1 Légmozgás

Számos olyan környezeti tényező van, amely nagymértékben befolyásolja a drónok működését és kommunikációját. A leggyakoribbak közé tartozik a légmozgás, a hőmérséklet és bármilyen csapadék. Természetesen ahhoz, hogy a drónok megfelelően, emberi beavatkozás és probléma nélkül működjenek, úgy kell megtervezni azokat, hogy ezen környezeti tényezők befolyását minél jobban csökkentsék.

Mivel a drónok repülnek, valamilyen berendezéssel stabilizálni kell őket, annak érdekében, hogy megfelelő minőségű szolgáltatást tudjanak nyújtani. A földi állomásokkal ellentétben, amelyek legtöbbször egy fix pozícióban vannak rögzítve, a drónoknak folyamatosan változtatni kell a pozíciójukat. A légmozgás a drónok legrosszabb és leggyakoribb ellensége, ezért természetesen a légmozgás hatásait különféle berendezésekkel csökkentik. Szinte minden drón használ valamilyen giroszkópot, az olcsóbbak mikroelektromechanikus rendszereket vagy mechanikus giroszkópokat használnak, a drágább drónok pedig vagy száloptikai giroszkópokkal, vagy gyűrűs lézergiroszkópokkal vannak felszerelve [4].

A légmozgás befolyása függ a szél erősségétől, irányától és a drón súlyától is megannyi más tényező mellett. Természetesen egy nehezebb drón (30-50 kg) elmozdításához sokkal nagyobb erősségű szélre van szükség, mint egy könnyebb (10-20 kg) drón esetében. Az erős szél azt is megnehezíti, hogy a drón a helyes útvonalat kövesse a célpozícióhoz, illetve fenntartsa azt. Ezek a kilengések, szélsőséges körülmények között egy GPS-egység segítségével kerülnek általában korrigálásra, amely a legtöbb ilyen célra készült drónban megtalálható. A stabilizálásban emellett a gyorsulásmérők is fontos szerepet játszanak, amelyek segítségével minden irányban fellépő elmozdulást képesek vagyunk azonnal ellensúlyozni [4].

3.2 Hőmérséklet és csapadék

Az extrém hőmérsékletek drónokra gyakorolt hatása sokrétű, és különböző üzemeltetési és karbantartási kihívásokat eredményezhet. A hideg mind az akkumulátorra, mind a motorokra hatással van, és gondos kezelést igényel az optimális teljesítmény és élettartam biztosítása érdekében. Másrészt a meleg hőmérséklet a drón elektronikájának túlmelegedésének kockázatát hordozza magában, ami hatékony hűtőrendszereket és biztosítékokat tesz szükségessé a kritikus meghibásodások megelőzése érdekében. Továbbá a hőmérséklet ingadozása hatással van a drón aerodinamikájára is. Ahogy a levegő sűrűsége változik, a drón felhajtóereje és általános teljesítménye is változik, ami a repülésvezérlő algoritmusok és a stabilizációs mechanizmusok beiktatását teszik kötelezővé.

A hőmérséklettel kapcsolatos problémák ellen, fejlett technológiai megoldásokat kell alkalmaznunk. Ilyenek például robusztus akkumulátor-kezelő rendszerek, amelyek képesek kezelni a hőmérsékletváltozásokat, továbbfejlesztett motorkonstrukciók, amelyek képesek hatékonyan működni szélsőséges körülmények között is, valamint hatékony hőelvezető mechanizmusok az alkatrészek túlmelegedésének elkerülésére.

A szélsőséges hőmérsékletek, legyen az hideg vagy meleg, jelentős kihívást jelenthetnek a drónok számára. Hidegebb hőmérsékleteken a drón akkumulátorának élettartama gyorsabban csökken, ami teljes kapacitás gyorsabb csökkenését eredményezi. Ennek eredményeképpen a drónok üzemeltetőinek gyakrabban kell cserélniük az akkumulátorokat, illetve a drónokat kommunikáció közben, ami idővel növeli a további költségeket. Emellett a hideg hőmérséklet negatív hatással van a drónok elektromos motorjainak teljesítményére, ami repülés közben komoly problémákat okozhat.

A magas hőmérsékletek sajátos problémákat vetnek fel. Ha a drónt túlzottan magas hőmérsékletnek teszik ki, a drón elektronikája túlmelegedhet, ami meghibásodásokhoz és potenciális károkhoz vezethet. A legrosszabb esetben a drón akár teljesen le is állhat, kockáztatva mind a funkcionalitását és a fizikai állapotát. E problémák megelőzése érdekében megfelelő hűtőrendszereket és biztosítékokat kell alkalmazni a drón alkatrészeinek optimális üzemi hőmérsékletének fenntartása érdekében.

A szélsőséges hőmérsékleti viszonyok mellett a csapadék - például eső, hó vagy jégeső - is jelentős kockázatot jelent. A nedvesség beszivároghat a drón elektronikájába, ami helyrehozhatatlan károkat okozhat, és működésképtelenné teheti a drónt. Ezenkívül

a jégképződés fizikailag is károsíthatja a drónt, veszélyeztetve annak szerkezeti integritását és általános funkcionalitását. Továbbá ezek az időjárási körülmények csökkentik a látási viszonyokat, ami korlátozza a drón tényleges hatótávolságát, amelyen a drón megbízhatóan képes kommunikálni. Emellett a kedvezőtlen időjárási körülmények miatt a manőverezőképeség is korlátozott.

Különböző vízszigetelési technikákkal védeni tudjuk a drón elektronikáját a nedvességtől. Emellett a fejlett érzékelők beépítése lehetővé teszi, hogy a drón észlelje a környezeti tényezők változásait, és reagáljon rájuk, állítva pozícióján egy esetleges csapadék elkerülése vagy mérsékelése érdekében. Ezek az érzékelők döntő szerepet játszanak a nedvességgel kapcsolatos potenciális kockázatok minimalizálásában, valamint a drón általános teljesítményének és megbízhatóságának fokozásában.

A kutatók és mérnökök emellett folyamatosan vizsgálják az új anyagokat, bevonatokat és érzékelő technológiákat, hogy fokozzák a drónok vízállóságát és javítsák a csapadékkal szembeni ellenállóképességüket. Ezeknek a fejlesztéseknek a célja, hogy a drónok kezelői robusztusabb és alkalmazkodóképesebb eszközökkel rendelkezzenek, amelyek biztonságosan és hatékonyan tudnak navigálni a kihívást jelentő időjárási körülmények között és képesek legyenek megbízható szolgáltatást nyújtani.

3.3 Egyéb veszélyek

A drónok számos kihívással szembesülnek, amikor a működtetőikkel való kommunikáció fenntartásáról van szó. Különböző akadályok, például magas épületek, fák és hegyek akadályozhatják a drón és az működtető közötti jelátvitelt. Ezek a fizikai akadályok megszakíthatják a rálátást és gyengíthetik a rádiófrekvenciás vagy optikai jeleket, ami jelvesztést vagy jelromlást okozhat.

A fizikai akadályok mellett az egyéb forrásokból származó interferencia is akadályozhatja a drónok kommunikációját. A közeli elektronikus eszközök, Wi-Fi hálózatok vagy akár a közelben működő más drónok rádiójelei is okozhatnak jelinterferenciát, ami kommunikációs zavarokhoz vagy adatvesztéshez vezethet. Ezek az interferenciák veszélyeztethetik a drón vezérlőrendszerének megbízhatóságát és hatékonyságát.

Továbbá a drón közelében lévő állatok vagy emberek jelenléte is kockázatot jelenthet a kommunikációra és a drón általános működésére. Az állatok kíváncsiságuk vagy területi ösztöneik miatt megzavarhatják a drón repülési útvonalát, vagy megpróbálhatják megragadni vagy megrongálni azt. Hasonlóképpen, az emberi beavatkozás - akár szándékos, akár véletlen - ütközésekhez vagy a kommunikáció megszakításához vezethet, ami kárt okozhat mind a drónban, mind a környező tárgyakban vagy személyekben.

3.4 A drón kommunikációs hatótávolsága

A kültéri optikai kommunikációval kapcsolatos kihívások, mint például a láthatósági korlátozottság és a légköri viszonyok, a drónok kommunikációjára is vonatkoznak. További összetettséget jelent azonban, ha figyelembe vesszük, hogy a kommunikáció nem két helyhez kötött állomás között zajlik, hanem mozgó drónok és potenciálisan több, akár mobil földi állomás között. Ez további akadályokat állít a megbízható optikai kapcsolat fenntartása elé. Nehéz pontos távolságot számolni a feladat komplexitása miatt, de ideális időjárási körülmények között a drónok optikai jelekkel potenciálisan néhány kilométeres hatótávolságot érhetnek el. Átlagosan azonban, ahogy azt a bemutatott kísérletekben is láthattuk, a tényleges hatótávolság kevesebb, mint egy kilométer. Ezt a csökkentett hatótávolságot különböző tényezők befolyásolják.

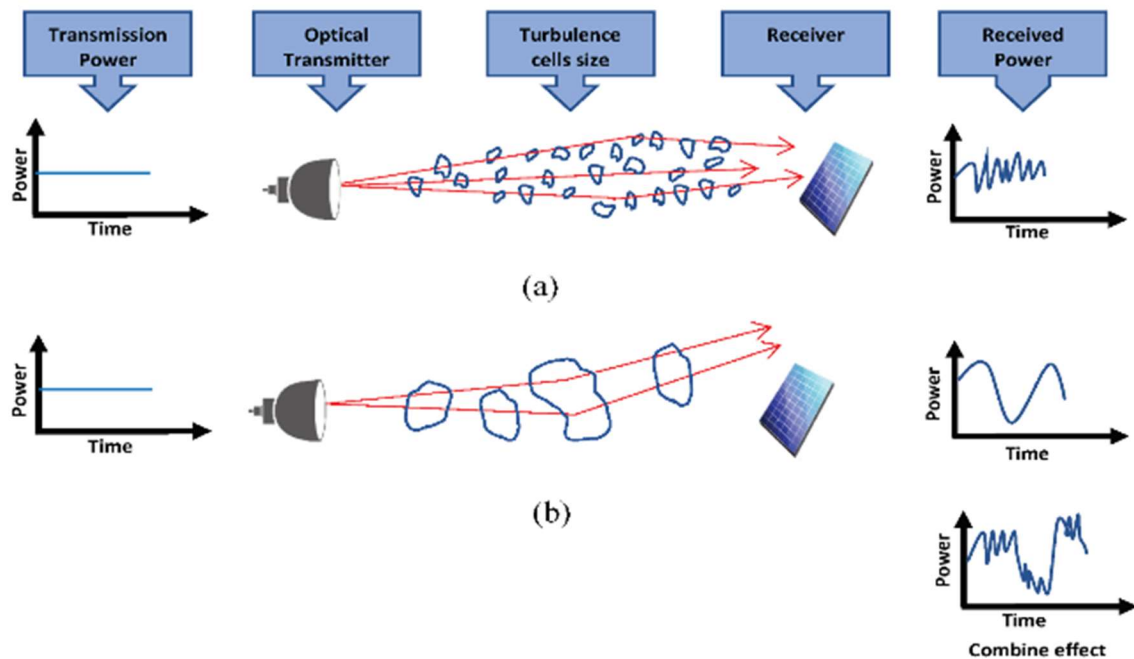
Az egyik jelentős tényező a láthatóság, mivel a légköri viszonyok befolyásolhatják az optikai útvonal tisztaságát. A légmozgás és a hőmérséklet-ingadozás okozta turbulencia olyan zavarokat okoz, amelyek ronthatják az optikai jelet és korlátozhatják a kommunikációs hatótávolságot. Ezenkívül a repülő állatok jelenléte tovább befolyásolhatja az optikai kapcsolatot, potenciálisan akadályozva a jel útját, egy bizonyos időtartamra.

Ezen túlmenően olyan tényezők, mint a célzási pontosság, a lézer teljesítménye, a vevő érzékenysége és a környezeti zaj is szerepet játszanak a kommunikációs hatótávolság meghatározásában. A jelerősség maximalizálásához és a hibás beállításból eredő veszteségek minimalizálásához elengedhetetlen az adó- és a vevőrendszer pontos összehangolása. A kommunikációhoz használt lézer erőssége és a vevő érzékenysége szintén befolyásolja a hatótávolságot. Továbbá a környezeti zaj, beleértve a környezeti fényt vagy más zavaró jeleket, további nehézségeket okozhat a megbízható optikai kapcsolat fenntartásában.

Az optikai kommunikáció hatótávolságát befolyásoló másik tényező a Rayleigh-szórás. A Rayleigh-szórás a fénynek a légkörben lévő részecskéken való szóródására utal. Ez a szórási jelenség a jelek csillapodásához és romlásához vezethet, csökkentve a kommunikációs kapcsolat tényleges hatótávolságát.

3.4.1 Turbulencia

A turbulencia okozta fakulás egy olyan tényező, amely rontja a szabadtéri optikai kapcsolatok teljesítményét, tehát az optikai jel intenzitásának gyors és véletlenszerű ingadozását eredményezi. Ez annak köszönhető, hogy a törésmutató folyamatosan változik az átviteli út mentén a hőmérséklet inhomogenitása és a légkör nyomása miatt. Ezek miatt a fény útja meg-hajlik és torzul, aminek eredményeként a beérkező optikai jel intenzitása ingadozik. Ezek az inhomogenitások súlyosan ronthatják a jel minőségét és ezért növelik a vett jel hibáit.



6. ábra: A két korábban említett turbulencia típus működése [5]

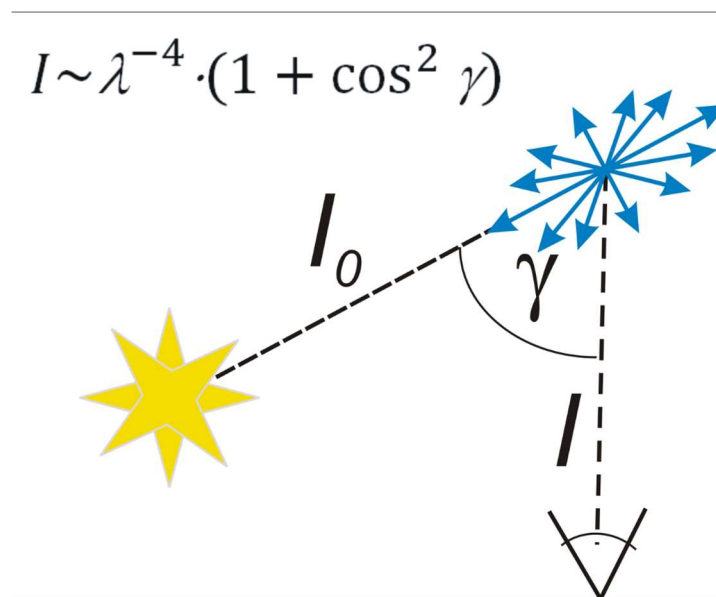
A fakulás jelenségének intenzitása az időjárási viszonyoktól és magának a turbulenciának az erősségétől függ. Az optikai jelünkre ható turbulenciát kétféleképpen tudjuk besorolni a turbulens részecske nagyságának alapján. Amikor a turbulens részecske átmérője kisebb, mint a lézernyaláb átmérője, akkor a lézernyaláb elferdül, eltorzul (5. ábra, a) esete). Ilyenkor apró eltérések keletkeznek a beérkező lézernyaláb komponensek között, amik konstruktív és destruktív interferenciát okoznak, amelyek átmeneti ingadozást eredményeznek az optikai jel intenzitásában a vevő oldalon. Ez a jelenség a szcintilláció [5].

Amikor a turbulens részecske átmérője nagyobb, mint a lézernyaláb átmérője, akkor a teljes optikai út megváltozik. Az 5. ábra b) esetében látható, hogy teljesen máshova érkeznek meg az elküldött optikai jeleink, mint ahogy azt vártuk volna. Ez drónok esetében különösen nagy probléma, hiszen ott még mozgásban is van mind az adó és a vevő is. A nagyobb hullámhosszú jelek (pl. infravörös tartományban) általában kevésbé érzékenyek a turbulencia által okozott fakulásra, míg a rövidebb hullámhosszú jelek (pl. látható tartományban) nagyobb mértékben szenvedhetnek a jelenség miatt [5].

3.4.2 Rayleigh-szórás

A másik fontos és befolyásoló jelenség a a Rayleigh-szórás. A jelenség a fény vagy más elektromágneses hullámok, az azoknál sokkal kisebb részecskéken vagy molekulákon történő szóródásával magyarázható. A Rayleigh-szórás különösen a kisebb méretű részecskék esetén jelentős, amikor azok mérete kisebb vagy hasonló nagyságrendű, mint az adott fény hullámhossza [6].

A Rayleigh-szórás alapvetően a fény szóródásának eredménye a részecskéken. Amikor a fény egy részecskével találkozik, az elektromágneses hullámok kölcsönhatásba lépnek a részecskével. Ennek eredményeként a fény eloszlik és szétszóródik különböző irányokba. A Rayleigh-szórás során a kisebb hullámhosszú fények, például az ultraviola vagy a kék színű fény, erősebben szóródnak, mint a nagyobb hullámhosszú fények, mint például a vörös színű fény. Ennek oka a Rayleigh-szórás matematikai leírásában rejlik, amely a szórási intenzitás függvényében a hullámhossz negyedik hatványával arányos összefüggést mutat. Mivel a viszonylag kis hullámhosszok szóródnak, ezért sokkal kisebb hatása van az optikai kommunikációban használt optikai jeleinkre, amelyek az amerikai kísérleti rendszerben 600 és 900nm környékén vannak [6].



7. ábra: Rayleigh-szórás intenzitása, egy adott szögben [7]

3.5 SWOT-elemzés a drónok QKD-hoz való felhasználásáról

A fejezet során eddig megtárgyaltak és a szakirodalom vizsgálata alapján készítettem összefoglalásul egy SWOT elemzést, amely rövid áttekintést ad egy ilyen rendszer tulajdonságairól.

3.5.1 Erősségek

- **Megbízható és biztonságos:** Számos kísérlet kimutatta, hogy a QKD megfelelő felszereléssel és jó környezetben megbízhatóan és biztonságosan megvalósítható drónokon.
- **Széles körű alkalmazás:** A QKD a drónok segítségével számos területen alkalmazható, beleértve a katonai, tudományos kutatási és kereskedelmi iparágakat.
- **Mobilitás:** A drónok mobilisak, és gyorsan bevetethetők távoli, nehezen elérhető vagy igény szerinti helyekre, így ideálisak a QKD-alkalmazásokhoz olyan területeken, ahol a földi vagy műholdas infrastruktúra korlátozott vagy nem áll rendelkezésre.
- **Költséghatékonyság:** A drónok sokkal költséghatékonyabb alternatívát jelentenek a műholdakkal szemben, mivel telepítési és felszerelési költségeik elhanyagolhatóak a műholdakhoz képest.

3.5.2 Gyengeségek

- **Bonyolultság:** A QKD megvalósítása speciális felszerelést és szakértelmet igényel, amelynek megvalósítása költséges és nagy kihívás.
- **Korlátozott hatótávolság:** A QKD-rendszerek jellemzően korlátozott hatótávolsággal rendelkeznek, ami kihívást jelenthet a nagy távolsági kommunikációt igénylő drónalkalmazások esetében.
- **Érzékenység a környezeti feltételekkel szemben:** A QKD-rendszerek érzékenyek a külső zavarokra, például a hőmérséklet-változásokra, a légköri turbulenciákra, az időjárásra és a jelet blokkoló objektumokra, amelyek befolyásolhatják a rendszer teljesítményét és megbízhatóságát.
- **Korlátozott kereskedelmi elérhetőség:** A QKD-technológiák még a fejlesztés korai szakaszában vannak, így a piacon sem elérhető ilyen megoldás, ami azt jelenti, hogy a költségek növelésével, de magunknak kell kifejleszteni egy ilyen rendszert.

3.5.3 Lehetőségek

- **Javított adatvédelem és titkosság:** A QKD jelentősen javítja az adatok védelmét és titkosságát, így egy extra védelmi réteget kínál, ami különösen értékes olyan alkalmazásokban, ahol drónokkal végeznek megfigyelést és gyűjtenek információt.
- **Fejlődés a kvantumtechnológiában:** A kvantumtechnológia folyamatos fejlődésével lehetőség nyílt a drónok számára még hatékonyabb és eredményesebb QKD rendszerek kifejlesztésére.
- **A biztonságos kommunikáció iránti megnövekedett igény:** A kiberbiztonsággal és az adatvédelemmel kapcsolatos növekvő aggodalmak miatt egyre nagyobb igény mutatkozik a biztonságosabb kommunikációs technológiák iránt, ami a drón alapú QKD rendszerek számára új lehetőségeket kínálhat.
- **Együttműködés a QKD és más kommunikációs technológiák között:** A QKD integrálható más kommunikációs technológiákkal, például üvegszálal vagy műholdas kommunikációval, hogy növelje azok lefedési képességét. Ez az együttműködés lehetőséget teremthet a robusztusabb és biztonságosabb kommunikációs rendszerek kialakítására.
- **Jobb akkumulátorok:** Az akkumulátorok fejlődése sokkal nagyobb üzemidőt eredményezhet, ami összességében csökkentené a költségeket, mivel a drónokat kevesebbszer kellene cserélni, illetve magukban drónokban kevesebbet kéne cserélni az akkumulátorokat, hosszabb élettartam esetén.

3.5.4 Veszélyek

- **Szabályozási kihívások:** A QKD technológiára és a drónokra szabályozási korlátozások vonatkozhatnak/vonatkoznak, amik az ilyen rendszerek használatát korlátozzák.
- **A közvélemény megítélése:** A közvéleményben aggályok vagy tévhitek merülhetnek fel a QKD drónok biztonságával, védelmével és céljával kapcsolatban, ami korlátozhatja azok elfogadottságát és alkalmazását bizonyos helyeken.
- **Fizikai traumának való kitétttség:** A drónokat könnyen megrongálhatják madarak, emberek, más tárgyak és élőlények, mivel elsősorban a drónok nem a fizikai és egyéb sérülések ellen van fejlesztve.

4 Szimulátor tervezése

Ebben a fejezetben az általam készített szimulációról lesz szó. Bemutatom a kvantumkommunikáció megvalósítására használt Qiskit keretrendszert, illetve a fizikai modulom felépítését és működését.

4.1 Qiskit keretrendszer

A Qiskit egy nyílt forráskódú SDK, amellyel könnyedén tudunk kvantumszámítógépekkel dolgozni. A Qiskit egy keretrendszer formájában elérhető a Python programozási nyelvhez is, melyben a szimulátort is készítettem. Ezen könyvtár segítségével lokálisan tudunk kvantumprogramokat futtatni, egy tényleges kvantumszámítógép jelenléte nélkül, amely jelenleg csak felhőben elérhető. Ez a környezet, lehetővé teszi az olyan kvantumalgoritmusok tervezését, végrehajtását, szimulálását, mint az általam is implementált BB84 protokoll.

4.1.1 Rétegei

A Qiskit különböző rétegekben működik, és ezek együttműködése teszi lehetővé a szimuláció gördülékeny végrehajtódását. Ezek a rétegek a következők:

- **Alapvető kvantuminformációs réteg:** Ennek a rétegnek a célja a kvantuminformáció ábrázolása és műveletek végzése kvantumbitek (qubit) és kvantumállapotok manipulálásához [8].
- **Nyelvi réteg:** A Qiskit nyelvi rétege a már említett Python programozási nyelv, amelyben különböző programok készítése könnyű feladat, a tulajdonságaiból fakadóan [8].
- **Szimulációs réteg:** Ez a réteg lehetővé teszi kvantumos szimulációkat. Szimulálhatók különböző kvantumhardverek és kvantumalgoritmusok, még anélkül is, hogy valódi kvantumszámítógépeket használnánk [8].
- **Kvantum hardver réteg:** A Qiskit támogat számos valós kvantumszámítógépet és felhőalapú kvantumhardver szolgáltatást. Ez lehetővé teszi a valódi kvantumszámítógépekkel való interakciót [8].

4.1.2 Qiskit elemei

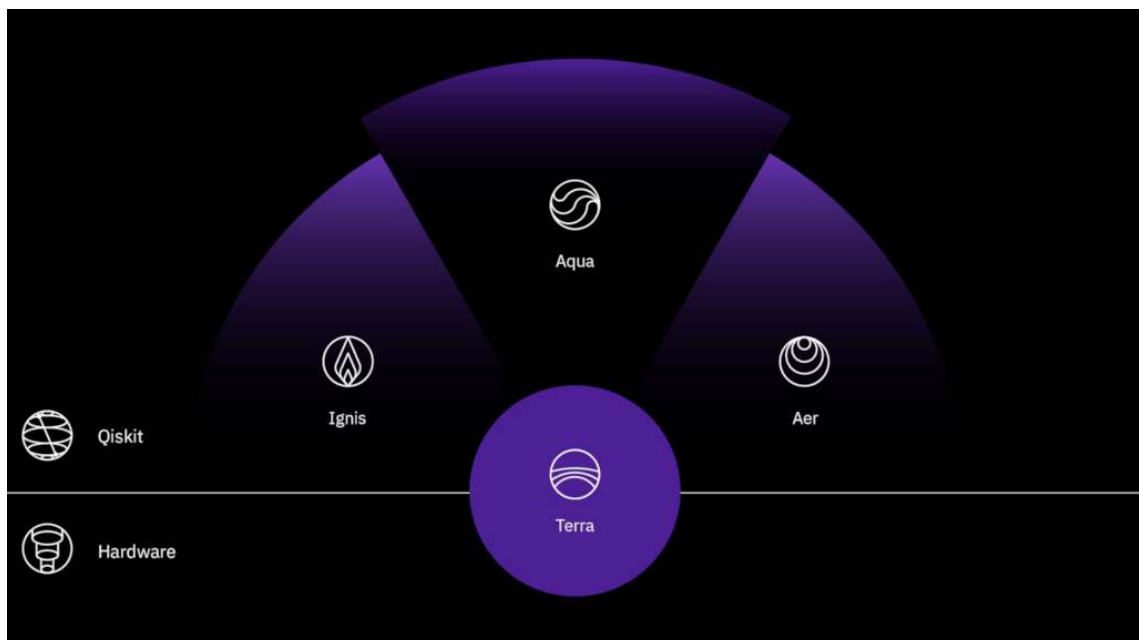
A Qiskitnek több eleme is van, amelyek közül a következő négy a legfontosabb:

Qiskit Terra: Ez a Qiskit magja, az összes működéshez szükséges réteget, illetve ez kapcsolja össze a hardvert a szoftverrel. Itt definiálhatók és manipulálhatók a kvantumbitek és kvantumállapotok, valamint tervezhetők és végrehajthatók a tényleges kvantumhardvereken futtatandó kvantumprogramok [9].

Qiskit Aer: Ez a modul a Qiskitnek a kvantumszimulációhoz szükséges eszközöket és algoritmusokat tartalmazza. Lényegében ez ütemezi a különböző kvantum szimulációk futtatását és egyben hajtja végre azokat [9].

Qiskit Ignis: A Qiskit Ignis a zaj és hibahelyes kvantuminformáció-elméleti technikák implementációját nyújtja. Ennek a rétegnek a célja a kvantumszámítógépekben felmerülő zaj és hibák kezelése, amelyek az algoritmusok teljesítményét befolyásolhatják [9].

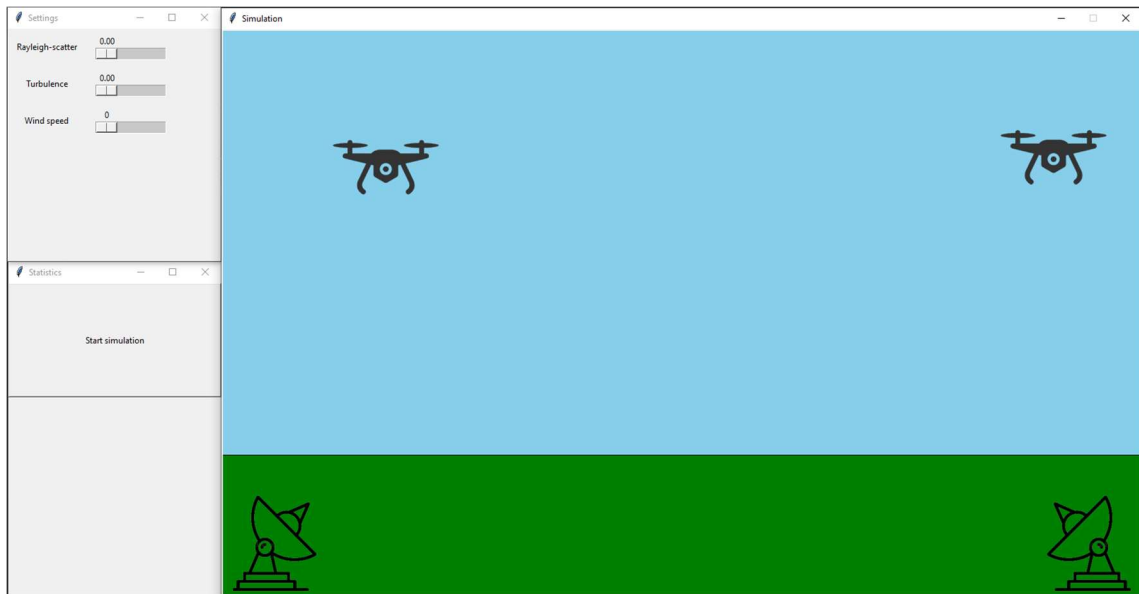
Qiskit Aqua: A Qiskit Aqua a magasabb szintű kvantumalkalmazásokat és algoritmusokat tartalmazó réteg. Gyakorlatilag előre elkészített algoritmusokat és áramköröket fogja össze egy készletbe, ilyenek például Grover kereső algoritmus vagy Shor faktorizáló algoritmus [9].



8. ábra: Qiskit elemi felépítése [9]

4.2 A szimulátor felépítése és működése

Az általam készített szimulátor három főmodulból áll, az első egy minimális felhasználói kezelő felület, ahol megadhatjuk a szimulációkhoz szükséges paramétereket, illetve kialakíthatunk egy elrendezést két mozgatható drón és két fix földi állomás segítségével. A paramétereket lehet kézzel is állítani, vagy a fizikai modult felhasználva kiszámítani az elrendezés alapján.



9. ábra: A szimulátor elindítása után megjelenő ablakok, bal felső ablak beállítások, bal alsó szimuláció indítása és annak végeztével statisztikák megjelenítése, jobb oldali ablak pedig az elrendezés kialakítására, illetve az egyes csomópontok paramétereinek

A második és harmadik modul szorosan együttműködik, az egyik azért felelős, hogy valósághoz viszonylag közeli fizikai szimulációt valósítson meg. A harmadik modul a kvantumkommunikációs modul, amiben a korábban már bemutatott Qiskit keretrendszer segítségével valósítottam meg a BB84 protokollt. A továbbiakban erről a két modulról lesz szó.

4.2.1 Fizikai modul

Ez a modul vette a legtöbb munkát igénybe, ugyanis itt kell megoldani az optikai kommunikációs csatorna szimulálásához szükséges számítási feladatokat, továbbá a drónra ható erőhatások szimulációját. A feladat komplexitása miatt több feltételezést és becslést is tettem úgy, hogy a korábban bemutatott kísérletek eredményeihez közel álljon az ugyanazokkal a paraméterekkel elvégzett szimuláció.

A modulban két, korábban már részletesen ismertetett környezeti hatás szimulációja is megtalálható, amelyek nem másak mint a turbulencia és Rayleigh-szórás. Ezek mellett célzási és detektálási hibákat is beiktattam. A célzási hibát kilométer alapon határoztam meg egy valószínűségként, tehát annak az esélye, hogy egy fotonként reprezentált kvantumbitünk elveszik, az 0,003/km. Itt a megtett kilométer a két kommunikációs eszköz távolságaként értendő. A detektálási hiba valószínűségét pedig $P_{dh}=0,003$ -ben határoztam meg.

A turbulenciát a széleskörben használt Huffnagel-Valley 5/7-es modellje alapján számoltam, ezt a modellt föld és űr közötti kapcsolatok vizsgálata során szokták használni. Kétféle irányt különböztettem meg számítás szempontjából, az egyik a vertikális, a másik a horizontális. Ezek alapján a következő egyenletek állnak elő:

Horizontális:

$$C_n^2(H) = 0,00594(v/27)^2(10^{-5}H)^{10}e^{-H/1000} + 2,7*10^{-16}e^{-H/1500} + Ae^{-H/100}$$

1. képlet: Turbulencia erősségének számítása [hivatkozás]

Vertikális:

$$C_n^2(H) = \frac{\sum_{h=1}^H 0,00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10}e^{-h/1000} + 2,7 * 10^{-16}e^{-h/1500} + Ae^{-h/100}}{H}$$

2. képlet: Módosított képlet a turbulencia erősségének számítására, átlagoljuk az összes magasságon a turbulencia erősségét, H magasságig.

Ahol $A=1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$, amely a turbulencia földfelszíni approximációja, v a szél sebessége, alapértelmezetten 21 m/s, amely szél négyzetes közép sebességével egyenlő, és H a tengerszint feletti magasság. A második egyenlet segítségével egy átlagot számolok a turbulencia erősségére.

Miután kiszámoltam a turbulencia erősségét, az alapján hozzárendelek egy százalékos értéket, ami azt mondja meg, hogy az elküldött fotonok hány százaléka veszik el turbulencia által. A számítás során a turbulencia okozta elhalványulás és a turbulencia okozta

kilengés miatt elvesztett fotonokat egybe számolom. A turbulenciát 10^{-16} - 10^{-12} -ig terjedő nagyságrendekben osztottam 3 csoportba, amely a következőképpen alakult:

Erősség	Gyenge	Közepes	Erős
Turbulencia	10^{-16} - 10^{-15}	10^{-14} - 10^{-13}	10^{-12}
Veszteség	~0,03%	~0,3%	~3%

1. táblázat: A különböző turbulencia erősségekhöz rendelt veszteségek. Gyenge turbulencia esetén nagyon kevés veszteség, míg erős turbulenciánál nagyon sok.

Habár a Rayleigh-szórás ilyen kis távolságokon, ekkora hullámhosszoknál (700+ nm) nem gyakorol nagy mértékű befolyást, mégis érdemes kiszámolni, hiszen nagy fotonszámoknál már igenis el fog veszni pár fotonunk. A számolás több lépésből áll, és azzal a feltételezéssel indul, hogy egy Rayleigh-szórt foton 180 fokban szórva teljes csilapítást szenved el. Ebből a feltételezésből elég megszámlalnunk a részecskék számát egy adott térfogaton belül és azt kiterjeszteni a megtett távolságra.

Először is meg kell adni, hogy mennyi az abszorpciós keresztmetszete egy O_2 vagy N_2 molekulának, amelyet 420 nm hullámhossz esetében $\sigma_{abs,420} = 7 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2$. Ezek után kiszámoljuk az adott nyomást, a tengerszint feletti magasság alapján. Ezt a következő módon tudjuk megtenni:

$$P = P_b \cdot \left[1 + \frac{L_b}{T_b} \cdot (h - h_b) \right]^{\frac{-g_0 \cdot M}{R \cdot L_b}}$$

3. képlet: Adott magasságon a nyomás kiszámítására szolgáló képlet

ahol P_b a nyomás tengerszinten (Pa), T_b a hőmérséklet tengerszinten (K), L_b a méterenkénti hőmérséklet csökkenés (-0,0065 K/m), h a tengerszint feletti magasság (m), h_b a jelenlegi atmoszférikus réteg alsó határa (0 m troposzférában), R az egyetemes gázállandó ($8,31432 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), g_0 a földi nehézségi gyorsulás ($9,80665 \text{ m/s}^2$), és M a föld levegőjének moláris tömege ($0,0289644 \text{ kg/mol}$).

A nyomás kiszámítása után most már ki tudjuk számítani az ideális gáztörvény alapján, hogy egy cm^3 -en belül mennyi molekulánk van, amit a következőképpen tudunk megtenni:

$$n = \frac{P}{k_B T}$$

4. képlet: Ideális gáztörvényből kiszámolható a molekulák számossága

ahol P az előbb kiszámított nyomás, k_B a Boltzmann-állandó és T a hőmérséklet.

Ha n -t integráljuk egytől egy adott h magasságig, akkor megkapjuk, hogy egy cm^2 felett hány molekulánk van, tehát megkapjuk N -t, azaz az oszlopsűrűséget. Így egy egyszerű számítással kiszámíthatjuk, hogy egy foton szóródására mekkora a valószínűség:

$$P_{\text{scatter}} = 1 - e^{-N\sigma}$$

5. képlet: Szóródási valószínűség számítása

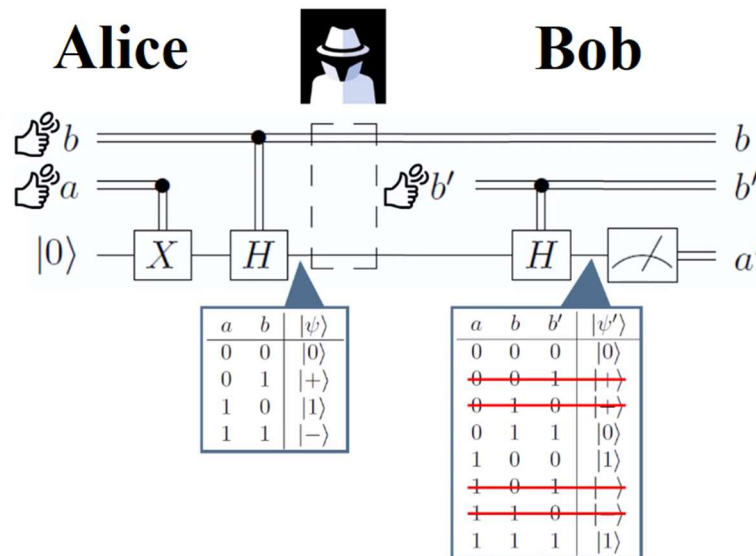
Végigszámolva ezt 420nm hullámhosszal azt kapjuk, hogy $n=2 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $N=2,5 \cdot 10^{25}$, illetve $P_{\text{blue scatter}}=0,16$. Ha más hullámhosszra szeretnénk ezt kiszámítani, de ugyanezekkel a feltételekkel, akkor csak elég megnézni, hogy mennyivel kisebb az adott hullámhosszon a keresztmetszet, amelyet a Rayleigh-szórás $\sigma \propto \lambda^{-4}$ tulajdonságából könnyen ki tudunk számolni. Tegyük fel például, hogy szeretnénk megnézni ugyanígy csak 850 nm-en: $(850/420)^4=16,776$, és így elég behelyettesíteni a X -edik képletbe:

$$P_{\text{scatter},850} = 1 - e^{-N\sigma_{420}/16,776}$$

6. képlet: Szóródási valószínűség számítása más hullámhosszhoz

4.2.2 Kvantumkommunikációs modul

Ez a modul felelős a kvantumbitek létrehozásért, azokon való műveletek elvégzéséért és ezen kvantumbitek segítségével a kvantumkommunikáció végrehajtásáért. A modul tartalmaz egy BB84 protokoll implementációt, amely állítható paraméterekkel működik, így több, különböző kvantumkulcsszétosztást is végre lehet hajtani. A protokollnak meg lehet adni, hogy mennyi kvantumbittel szeretnénk dolgozni, illetve, hogy van-e lehallgató a csatornában. A lehallgatót 2 állapotban lehet megadni, egyik az inaktív, második az aktív állapot, amit egy $P_{Eve} \in]0,1]$ intervallumban megtalálható valós számmal adhatunk meg, amely azt a valószínűséget jelöli, hogy mekkora eséllyel hallgat le egy kvantumbitet. Aktív állapotban $P_{Eve}=1$ valószínűséggel a lehallgató minden kvantumbitet lehallgat.



10. ábra: A BB84 kvantumkulcsszétosztó protokoll kvantumáramköre, lehallgatóval együtt

Az elkészített BB84 protokoll az eredeti változathoz képest annyiban tér el, hogy a lehallgató detektálására egy információegyeztéses almodul került be. Információegyeztés során Alice és Bob saját kulcsaiknak egy valódi - az eredeti halmaznál sokkal kisebb - részhalmazát összehasonlítják publikus (klasszikus) csatornán. Összehasonlítás során megszámolják a kulcsaikban eltérő bitek számát, és azt elosztják a kulcs hosszával, ezáltal előáll egy kvantumbit hiba arány (QBER). Ha a QBER meghaladja a 11%-ot, akkor BB84 protokoll használatára nem alkalmas a kvantumcsatorna, mert így már információt nyerhet ki a lehallgató. A QBER-be továbbá beleszámoljuk azt is, ha a csatornában a környezeti hatások által elveszett az elküldött kvantumbitünk.

5 Szimulálás

Többféle szimulációt végeztem el, két különböző, általam tervezett rendszerrel. Ismertetem a rendszerek előnyeit és hátrányait, majd a két rendszerrel végzett szimuláció eredményeit, majd azok kiértékelése után levonom a következtetéseket a rendszerek megvalósíthatóságával kapcsolatban.

5.1 A két szimulált rendszer kialakítása

Kétféleképpen lehet megvalósítani drónokkal kvantumkulcsszétosztást, mindkét kialakított rendszernek megvan az előnye és hátránya. Az egyik lehetőség, hogy nem bízunk meg a drónokban, így csak továbbító csomópontokként használjuk őket, és a két földi végpont között zajlik a kvantumkulcsszétosztás. Ennek a rendszernek az az előnye, hogy a két kommunikáló fél között zajlik le a kvantumkommunikáció, így biztosítva van az, hogy lehallgató nem tud észrevétlenül sikeresen lehallgatni. Cserébe viszont sokkal több hibát fog tartalmazni a kvantumkulcsszétosztás során elküldött jel, ami főleg nagy távokon több drónos rendszereknél nagy mértékű. Előnye, hogy nincs harmadik fél a kvantumkommunikációban, illetve olcsóbb a drónok elkészítése is.



11. ábra: Első rendszer, amikor nem bízunk meg a drónokban így csak továbbítóként működnek. A pirossal jelölt vonal jelzi a kvantumcsatornát.

Második lehetőség, hogy megbízunk a drónokban. Ekkor mindkét végpont a hozzá legközelebb eső drónnal hajt végre egy kvantumkulcsszétosztást. Miután mindkét

fél sikeresen szerzett egy kulcsot, a drónokon keresztül biztonságosan tudnak kommunikálni, aminek segítségével megegyezhetnek egy közös kulcsban. Ezt a kommunikációt természetesen csak akkor lehet megvalósítani, ha a drónok tényleg megbízhatóak és biztonságos csatornán kommunikálnak. Ezt egy drónok között előre megosztott kulccsal el lehet érni. A rendszer hátránya, hogy harmadik fél is részt vesz a kulcsszétosztásban, illetve a drónokat fel kell külön szerelni kvantumkommunikációs eszközökkel. Előnye viszont, hogy gyorsabban és nagyobb kulcsot tudnak generálni a kommunikáló felek.



12. ábra: Második rendszer, amikor megbízunk a drónokban így a két végponttal szomszédos 1-1 drónnal megy végbe két kvantumkulcsszétosztás.

Több megjegyzést is érdemes tenni a rendszerekkel kapcsolatban. Az első megfigyelendő dolog, hogy a drónok merőlegesre törekedve, közvetlenül a földi állomások felett lebegnek. Ez azért van, hogy a környezeti hatások minél kisebb útvonalon tudják befolyásolni a jelünket. Továbbá azt is érdemes megjegyezni, hogy a két földi állomás közötti nagyobb táv esetén minél magasabban vannak a drónok, annál jobb, hiszen a magasság növekedésével csökken a légsűrűség, tehát enyhébbek a környezeti hatások. Ezekben a kialakításokban nem érdemes magasabbra helyezni a drónokat, hiszen csak két drón csomópontunk van, illetve a földi állomások sincsenek nagyon távol egymástól, így többet vesztenénk a magasság növelésével, mint amennyit nyernénk a két drón között.

5.2 Első típusú rendszer szimulálása

5.2.1 Főbb paraméterek

- Szél sebessége: 21 m/s
- Drónmagasság: $H=100$ m
- Dróntávolság: $D=1\ 000$ m
- Lézer hullámhossz: $\lambda=810$ nm
- Kvantumbitek (fotonok) száma: 500 darab

5.2.2 Csatorna veszteségek

A vertikális komponens egy kétszeres szorzóval van ellátva a rendszer kialakítása miatt. Továbbá a célzási és detektálási hibák három- vagy négyszeres szorzóval vannak ellátva, a lehallgató jelenlététől függően.

```
Vertikális irányú veszteség számolása...
Rayleigh-szórás okozta veszteség: 0.001%
Atmoszferikus turbulencia(Cn2): 1.0888453083715264e-14
Turbulencia okozta veszteség: 0.34199999999999997%
Célzási hiba okozta veszteség: 0.06%
Detekciós hiba okozta veszteség: 0.6%
.....
Horizontális irányú veszteség számolása...
Rayleigh-szórás okozta veszteség: 0.01%
Atmoszferikus turbulencia(Cn2): 6.254203086800478e-12
Turbulencia okozta veszteség: 3.04%
Célzási hiba okozta veszteség: 0.06%
Detekciós hiba okozta veszteség: 0.6%
.....
Teljes veszteség az optikai csatornán: 4.396%
```

13. ábra: Az optikai kommunikáció során bekövetkező veszteségek az előbb ismertett paraméterekkel és lehallgató nélkül.

```

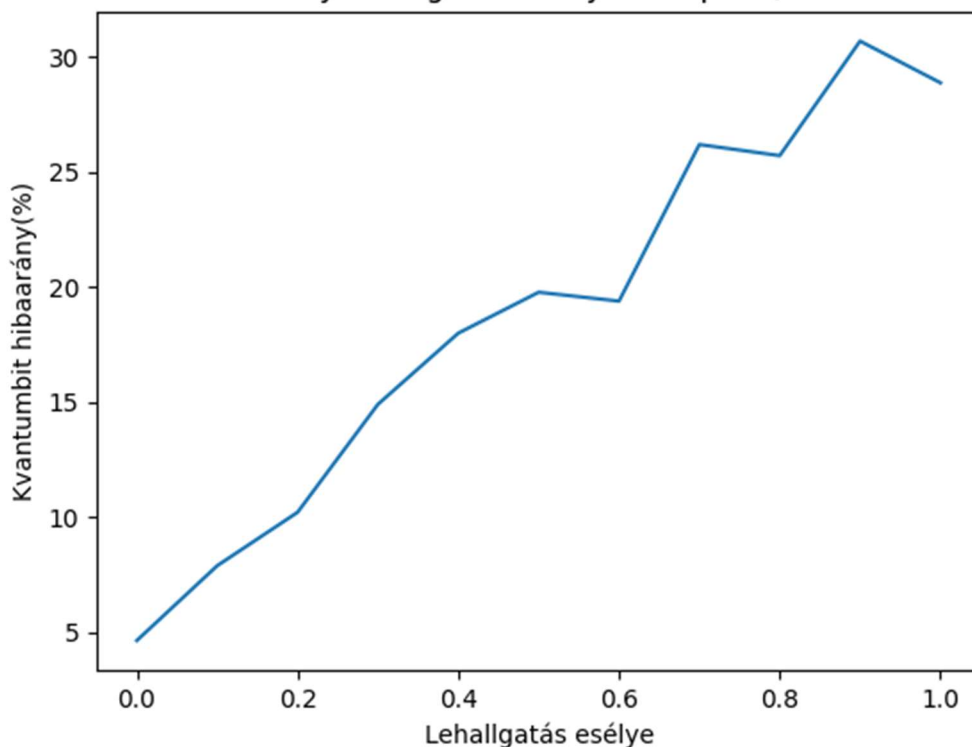
Vertikális irányú veszteség számolása...
Rayleigh-szórás okozta veszteség: 0.001%
Atmoszferikus turbulencia(Cn2): 1.0888453083715264e-14
Turbulencia okozta veszteség: 0.322%
Célzási hiba okozta veszteség: 0.06%
Detekciós hiba okozta veszteség: 0.6%
.....
Horizontális irányú veszteség számolása...
Rayleigh-szórás okozta veszteség: 0.01%
Atmoszferikus turbulencia(Cn2): 6.254203086800478e-12
Turbulencia okozta veszteség: 3.26%
Célzási hiba okozta veszteség: 0.12%
Detekciós hiba okozta veszteség: 1.2%
.....
Teljes veszteség az optikai csatornán: 5.236%

```

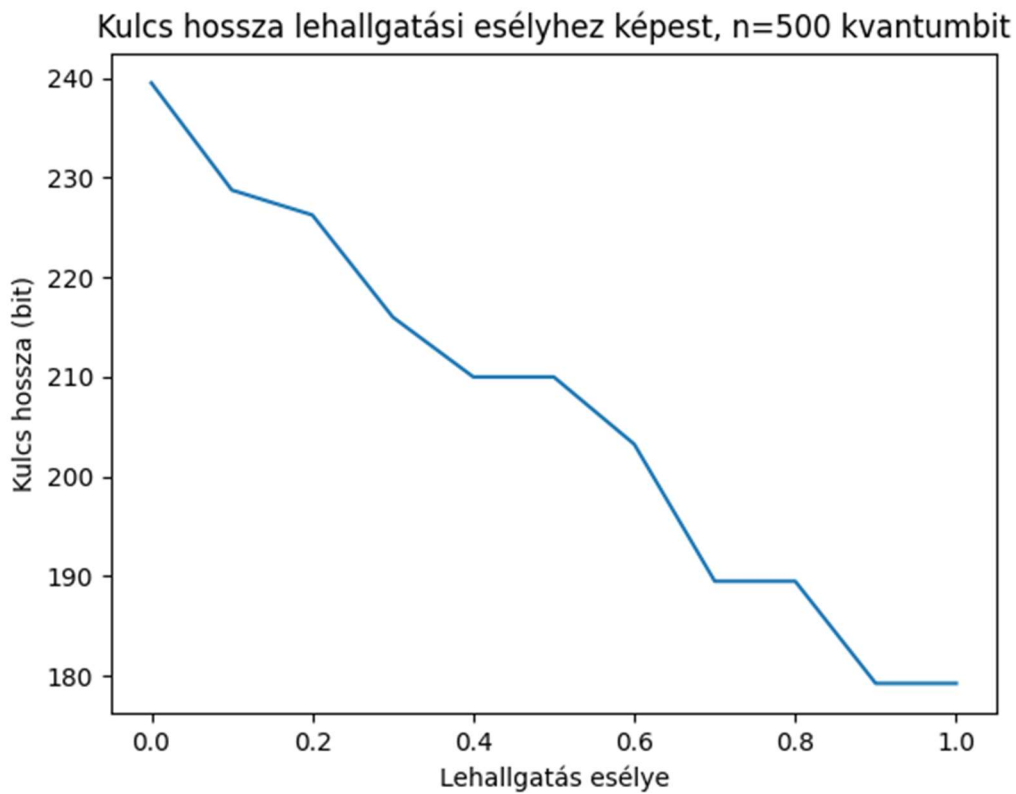
14. ábra: Az optikai kommunikáció során bekövetkező veszteségek az előbb ismertetett paraméterekkel és lehallgatóval.

5.2.3 Kvantumkulcsszétosztás eredményei

Kvantumbit hibaarány lehallgatási esélyhez képest , n=500 kvantumbit



15. ábra: Az adott rendszerrel végzett kvantumkulcsszétosztás kvantumbit hibaaránya lehallgatás esélyének függvényében. A lehallgatás esélyét 0-tól 1-ig 0,1-es léptékekkel növelve, minden léptékben négyszeri futást átlagolva.



16. ábra: Az adott rendszerrel végzett kvantumkulcsszétosztás során kapott kulcsok hossza lehallgatás esélyének függvényében. A lehallgatás esélyét 0-tól 1-ig 0,1-es léptékekkel növelve, minden léptékben négyszeri futást átlagolva.

Jól látható, hogy már ilyen távolságon is jelentős nagyságú kvantumbit hibaarány-nyal szembesülünk, ami még nagyobb távolságokra kiterjesztve csak tovább romlik. Mivel a QBER jelen esetben lineárisan fog nőni az optikai csatorna romlásával, egy adott távolságon már ez a rendszer nem lesz alkalmas robusztusabb, nagy távolságú kvantumkulcsszétosztás megvalósítására. Mivel az optikai csatorna szimulációja sok megszorítással történik, ezért lehet, hogy nem annyira drasztikus a romlás, mint az feltételezhető a szimuláció alapján. Viszont, ha még visszafogottabb is a rendszer teljesítményének romlása, mivel nagy távolságokon (több 10 km) szeretnénk kommunikálni nem lesz jól megvalósítható egy ilyen kialakítású kvantumkulcsszétosztó rendszer.

5.3 Második típusú rendszer szimulálása

5.3.1 Főbb paraméterek

- Szél sebessége: 21 m/s
- Drónmagasság: $H=2\ 000$ m
- Dróntávolság: $D=1\ 000$ m
- Lézer hullámhossz: $\lambda=810$ nm
- Kvantumbitek (fotonok) száma: 500 darab

5.3.2 Csatorna veszteségek

Ebben az esetben csak vertikális irányban kell kvantumkulcsszétosztást végrehajtani, tehát a vízszintes csatorna hosszát nem kell számolnunk, így a veszteségek nagy részét az optikai eszközök adják.

```
Vertikális irányú veszteség számolása...  
Rayleigh-szórás okozta veszteség: 0.005%  
Atmoszferikus turbulencia(Cn2): 9.94793914239387e-16  
Turbulencia okozta veszteség: 0.032%  
Célzási hiba okozta veszteség: 0.6%  
Detekciós hiba okozta veszteség: 0.3%  
.....  
Teljes veszteség az optikai csatornán: 0.937%
```

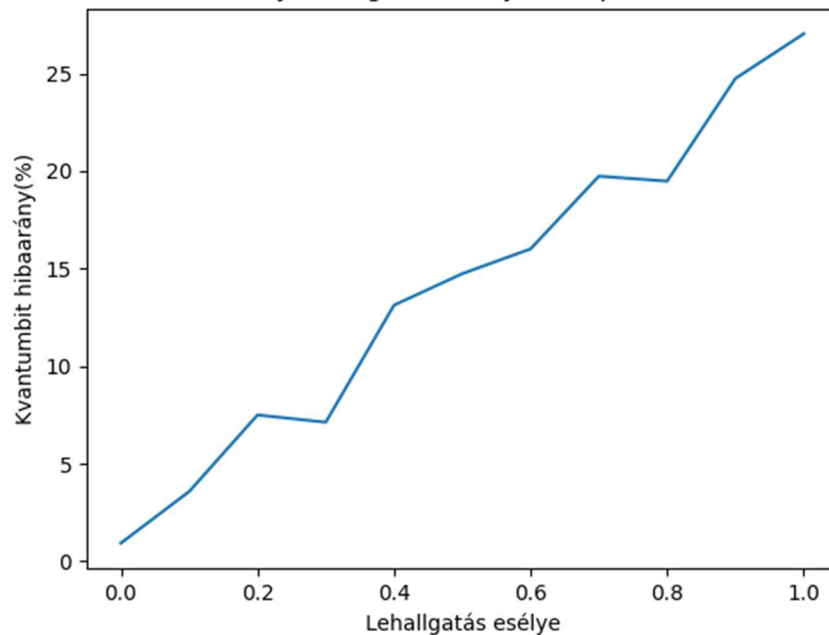
17. ábra: A második típusú rendszer optikai csatornájának köszönhetően bekövetkező veszteség. A csatornában nincs lehallgató, így a veszteségeink még kisebbek.

```
Vertikális irányú veszteség számolása...  
Rayleigh-szórás okozta veszteség: 0.005%  
Atmoszferikus turbulencia(Cn2): 9.94793914239387e-16  
Turbulencia okozta veszteség: 0.034999999999999996%  
Célzási hiba okozta veszteség: 1.2%  
Detekciós hiba okozta veszteség: 0.6%  
.....  
Teljes veszteség az optikai csatornán: 1.84%
```

18. ábra: A második típusú rendszer optikai csatornájának köszönhetően bekövetkező veszteség. A csatornában lehallgató van, ami plusz egy célzási és detektálási hibát jelent.

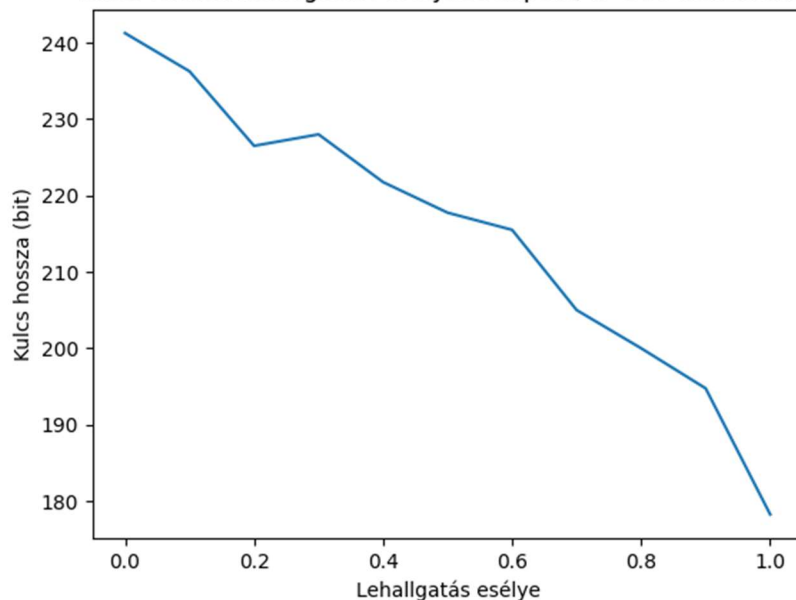
5.3.3 Kvantumkulcsszétosztás eredményei

Kvantumbit hibaarány lehallgatási esélyhez képest , n=500 kvantumbit



19. ábra: A második típusú rendszerrel végzett kvantumkulcsszétosztás kvantumbit hibaaránya lehallgatás esélyének függvényében. A lehallgatás esélyét 0-tól 1-ig 0,1-es léptékekkel növelve, minden léptékben négyszeri futást átlagolva.

Kulcs hossza lehallgatási esélyhez képest, n=500 kvantumbit



20. ábra: Az adott rendszerrel végzett kvantumkulcsszétosztás során kapott kulcsok hossza lehallgatás esélyének függvényében. A lehallgatás esélyét 0-tól 1-ig 0,1-es léptékekkel növelve, minden léptékben négyszeri futást átlagolva.

Ezen rendszer esetén látható, hogy mivel csak vertikális kommunikációt végez mindkét földi állomás a drónokkal, ezért sokkal kisebb hibaarányal tudnak kulcsokat generálni, illetve a kis zajnak köszönhetően, sokkal könnyebb észre venni egy harmadik fél beavatkozását a kommunikációba. Ennek köszönhetően horizontálisan sokkal jobban ki lehet terjeszteni a hatótávolságot több drónnal. Szinte korlátlan a rendszer hatótávolsága, ha drónok egymással előre megosztott kulccsal és rádiófrekvenciás kapcsolaton keresztül kommunikálnak.

5.4 Konklúzió

A két rendszer szimulációjából több következtetést is levonhatunk. Mindkét rendszer alkalmas drón alapú kvantumkulcsszétosztás megvalósítására BB84 alapú kvantumkulcsszétosztó protokoll segítségével, hiszen több száz méteres távolságokon képesek 11%-os kvantumbit hibaarány alatt működni. Habár amint láthattuk, az első típusú rendszer esetében ez korlátozott távolságra működik csak, mégis megvan az az előnye, hogy egy harmadik fél nem képes információt kinyerni észrevétlenül a kommunikáció megfigyeléséből. Ezeknél a rendszereknél gyakorlatilag ez egy célkitűzés. Annak ellenére, hogy jelenleg úgy tűnik az első típusú rendszer nem megfelelő, a technológia fejlődésével ezek a rendszerek is képesek teret nyerni egy ilyen piacon. Mint azt többször is említettem ezek becslések, így pontosat csak éles tesztek alapján lehet mondani.

A második típusú rendszer szinte korlátlan távolságot kínál cserébe azért, hogy harmadik félként beléphet a kvantumkommunikációba. Ez elsőre rosszul hangzik, viszont véleményem szerint, amit nyerni lehet ezzel a kiépítéssel az bőven ellensúlyozza ezt a hibát. Ez főleg akkor nagyon igaz, ha szigorú szabályozásokkal történik egy ilyen szolgáltatás elérhetővé tétele, amelynek köszönhetően sokkal nagyobb biztosításunk van a biztonságos kommunikációra.

Mint azt a mérési eredményekből is láthatjuk a magasság növelésével csökkenthetjük a turbulencia és a Rayleigh-szórás befolyását a rendszerünk működésére. Ha megnézzük a második szimuláció eredményeiben a turbulencia erősségét, akkor láthatjuk, hogy 10^{-16} tartományban van, ami a korábban bemutatott táblázat alapján gyengének minősül. Tehát egy drón alapú kvantumkulcsszétosztó rendszer megtervezése során érdemes odafigyelni az elrendezésnél a magasságra és a merőlegességre egyaránt.

6 Összefoglalás

Először is szeretném megköszönni a konzulenseimnek az elmúlt közel 8 hónap munkáját és a lehetőséget, hogy egy ilyen érdekes témával foglalkozhattam. Emellett azt is köszönöm, hogy heti rendszerességgel tudtunk konzultálni, amellyel egyrészt motiváltak a folyamatos haladásra, másrészt segítettek, ha bármilyen problémába ütköztem.

A dolgozatomban egy újkeletű és kiforratlan témában barangolhattam, és mutathattam be a drón alapú kvantumkulcsszétosztás mikéntjét. Az irodalomkutatói munkám során megtalált kísérleteket mutattam be a dolgozat elején, illetve közöltem ezekből a már végrehajtott kísérletek eredményeit. Ez a bemutatás egy jó ízelítőt adott a témához és rávilágított arra, hogy érdemes foglalkozni vele, hiszen olyan problémákra kínál megoldást, ami megtalálható más kvantumkulcsszétosztó rendszerekben.

A rövid irodalmi áttekintést követően a drónokat érintő problémákról számoltam be részletesen, illetve ismertettem, hogy milyen befolyással vannak ezek a drónokra és felvettem több létező megoldást is, amivel ezeket a problémákat akár ki tudjuk teljesen iktatni, de ha nem is, akkor is sokat tudunk csökkenteni a negatív hatásukon. A környezeti hatások alapján készítettem egy SWOT elemzést a drónok kvantumkulcsszétosztásra való felhasználásáról.

A negyedik fejezetben bemutattam egy általam készített szimulátor működését és felépítését. Egy felületes betekintést adtam a Qiskit keretrendszer működésébe, aminek segítségével a BB84 kvantumkulcsszétosztó protokollt valósítottam meg. Ezt követően az előző fejezetben már részletesen ismertetett két fő környezeti tényező egy szoftveres megvalósításának módját mutattam be, illetve itt helyeztem le a szimulátor alapkövét adó paramétereket.

Utolsóként pedig az elkészített szimulátor segítségével méréseket végeztem két különböző elrendezésű drón alapú kvantumkulcsszétosztó rendszeren. A rendszerek előnyeit és hátrányait ismertettem, továbbá a szimulátorral kapott eredményeket is közöltem és kiértékeltem. Végezetül az eredmények alapján pedig kijelenthető, hogy ezek a rendszerek szintén alkalmasak kvantumkulcsszétosztásra és megvannak azok az alkalmazási területeik, amik a jövőben biztosan szükségessé válnak.

7 Irodalomjegyzék

- [1] J. C. Alexander, D. Hill, "Drone-based Quantum Key Distribution"
<http://2017.qcrypt.net/wp-content/uploads/2017/09/Tu22.pdf> 2017.
- [2] M. Schirber, "Quantum drones take flight," <https://physics.aps.org/articles/v14/7>
2021 Január 15.
- [3] Xiao-Hui Tian, Ran Yang, "Drone-based quantum key distribution"
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2302/2302.14012.pdf> 2023 Február 27.
- [4] V. P. Zhuravlev, S. E. Perelvaev, B. P. Bodunov and S. B. Bodunov, "New-
Generation Small-Size Solid-State Wave Gyroscope for Strapdown Inertial
Navigation Systems of Unmanned Aerial Vehicle,"
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8769344> 2019 , 2019
- [5] A. Youssef, A. Alatawi , M. Abaza , M. Ashfaq , A. MANSOUR: Atmospheric
turbulence , <https://encyclopedia.pub/entry/22195> , 2022 Április
- [6] Seinfeld, John H. and Pandis, Spyros N. (2006) Atmospheric Chemistry and
Physics, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New Jersey, Chapter 15.1.1
- [7] Wikipedia, "A Rayleigh-szórás szögtől függő intenzitásváltozása" , [[link](#)]
- [8] Qiskit Development Team, "Qiskit Documentation"
<https://qiskit.org/documentation/index.html>
- [9] Qiskit Development Team, "The Qiskit Elements"
https://qiskit.org/documentation/stable/0.24/the_elements.html