



Nyugat-magyarországi Egyetem
Faipari Mérnöki Kar

Légkör hatásainak vizsgálata műholdas lézerkommunikációban

TDK dolgozat

Szerző:

Kiss András
Gazdaságinformatikus, MSc
kissa@gain.nyme.hu

Konzulens:

Bacsárdi László
bacsardi@inf.nyme.hu

2012. április 7.

Légkör hatásainak vizsgálata műholdas lézerkommunikációban

Nyugat-magyarországi Egyetem

Faipari Mérnöki Kar

Informatikai és Gazdasági Intézet

Szerző:

Kiss András
II. évfolyam MSc

Konzulens:

Bacsárdi László
Egyetemi adjunktus

Abstract

In my essay I dealt with the examination of the laser based space communications. I started my work by studying the past and the present of the laser communication. Obviously this is a very promising technique especially if we consider the quantum communication in further opportunities. To analyze a quantum laser channel we have to calculate with many physical parameters. To complete the determination of e.g., the Quantum Bit Error Rate, a series of derived procedures are needed to execute, which has high complexity.

An ideal solution is to place the calculations for simulation software, which issues all of the interpretable information about the properties of the communication channel. The development of the simulation software was also a part of the project. This is a Windows application written in Visual Basic language and it runs on .Net 4.0 framework. The implemented three scenarios are the following: Determination of Quantum Bit Error Rate, Satellite positioning, Sensitivity analysis. Simulations can be run almost on every communication channel type—including Earth-space, space-Earth and space-space channels—and channel length, but in this case the most important channels would be Earth-LEO (Low Earth Orbit), LEO-Earth, LEO-LEO, Earth-GEO (Geostationary Earth Orbit), GEO-Earth and GEO-GEO communication channels. In practical usage of laser communication, my work covers the examination of key distribution procedure by BB84 key distribution protocol.

During my work I learned the necessary physical background, which contains all necessary parameters and regularity of calculations, I planned and developed a unique communication simulator and I presented simulation results, which characterize the working of the key distribution method from physical aspect.

Absztrakt

Dolgozatomban lézer alapú űrtávközlés vizsgálatával foglalkoztam. A munkámat információgyűjtéssel és a lézerkommunikáció múltjának és jelenének meghatározásával kezdtem. Nyilvánvalóan ez a kommunikációs technika nagyon ígéretes, ha figyelembe vesszük a jövőben megjelenő kvantumkommunikációbeli lehetőségeket. Kvantum alapú lézercsatorna analizálásához sok fizikai paraméter felhasználásával kell számításokat végrehajtani. Pl. a bithiba-arány meghatározásához egymástól függő műveletek sorozatát kell végrehajtani, amely magas komplexitású és műveletigényes folyamat.

Ideális megoldást jelent a számításokat rábízni egy szimulációs szoftverre, amely eredményként ad minden értelmezhető adatot a kommunikációs csatorna tulajdonságairól. Szintén a projekt része volt a szimulációs szoftver fejlesztése, amely egy Visual Basic nyelven íródott, .Net 4.0 keretrendszeren működő Windows alkalmazás. Az ennek keretében megvalósított három scenárió a következő: Kvantumbit-hiba arány meghatározása, Műholdak pozicionálása, Érzékenységvizsgálat. A szimuláció szinte bármekkora csatornahosszon és bármilyen csatornatípuson elvégezhető – beleértve a Föld-űr, űr-Föld és űr-űr csatornákat –, de jelen esetben a legfontosabbak a Föld-LEO (Low Earth Orbit), LEO-Föld, LEO-LEO, Föld-GEO (Geostationary Earth Orbit), GEO-Föld és GEO-GEO csatornák. A lézerkommunikáció gyakorlati alkalmazása felől megközelítve a munkám a kulcsszétoztás művelet vizsgálatát fedi le a BB84 kulcsszétoztó protokoll szerint.

A projekt alatt sikerült elsajátítanom a témához tartozó fizikai ismereteket, amely magában foglal minden szükséges paramétert és számítási szabályt, terveztem és fejlesztettem egy egyedi alkalmazást, amely közvetlenül kvantumos lézer alapú űrtávközlési jellemzők vizsgálatához használható és a program felhasználásával generáltam különböző szimulációs eredményeket, amelyek a kulcsszétoztás művelet működését jellemzik fizikai aspektusból.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	5
1. Bevezetés.....	6
2. Szabadtéri lézeres kommunikáció elméleti háttere	8
2.1. Lézer.....	8
2.2. Műholdpályák.....	8
2.3. Befolyásoló tényezők	9
2.3.1. Célzás hibája	9
2.3.2. Nyalábszélesedés.....	9
2.3.3. Detektor hatásfoka.....	10
2.3.4. Zaj.....	11
2.4. Föld-műhold kommunikáció	11
2.4.1. A légkör statikus veszteségei	11
2.4.2. Turbulenciaerősség meghatározása.....	12
2.5. Műhold-műhold kommunikáció.....	12
3. Programozás körülményei.....	13
3.1. Tervezés	13
3.1.1. Szcenáriók	13
3.1.2. Paraméterek	14
3.1.3. Use-case diagram	14
3.2. Fejlesztés	15
4. Szimulációs program bemutatása.....	16
4.1. Kezdőlap.....	16
4.2. Kvantumbit-hiba arány meghatározása	17
4.2.1. Föld-űr, űr-Föld csatorna.....	21
4.2.2. Űr-űr csatorna.....	23
4.3. Műholdak pozicionálása.....	24
4.4. Érzékenységvizsgálat	28
5. Eredmények.....	31
5.1. Lézer hullámhossz.....	31
5.2. Időjárás hatása	33
5.3. Távolság hatása	33
6. Összefoglalás.....	36
Fontosabb rövidítések és jelölések	37
Köszönetnyilvánítás	38
Irodalomjegyzék.....	39

1. Bevezetés

Napjainkban űrtávközlési célok megvalósításához többnyire rádiókommunikációt alkalmaznak. A lézer alapú kommunikáció kevesebb, mint 20 éve jelent meg, de már elegendő bizonyítékot lehet találni arra, hogy több szempontból is előnyösebb technológiát jelent a hagyományos, rádióhullámokkal történő megvalósításokkal szemben.

Az első sikeres Föld-űr lézerkommunikációs kapcsolat létesítése 1992-re tehető, amelynek keretében a Földtől 6 millió kilométerre lévő Galileo űrszonda képes volt érzékelni a küldött lézernyalábot. Itt egy egyirányú kommunikációról volt szó, az űrszonda csak fogadó szerepet töltött be. A kísérlet mégis sikeresnek számított, mivel ez bizonyíték volt arra, hogy az optikai kommunikáció működőképes lehet nagy erejű lézernyaláb használatával. Az 1. ábrán látható a fogadó fedélzeti kamerája által rögzített kép.



1. ábra - Galileo űrszonda által érzékelt lézer impulzusok

A képen függőleges vonalban elrendezve láthatók az érzékelt lézer lézerimpulzusok. Elvileg egymástól egyenlő távolságra és azonos fényerősséggel kellene megjeleníteniük. Adott pontok eltűnését vagy fényerejük csökkenését nagymértékben a Föld légkörében lévő turbulencia okozza. [1]

2006-ban sikerült megjavítani a kommunikációs csatorna hosszával felállított rekordot. A 24 millió kilométerre lévő Messenger űrszondával lett létesítve Föld-űr illetve űr-Föld kapcsolat. Az űrszonda detektorral érzékelt a küldött lézernyalábot, amelyre válaszolt a földi állomásnak, megjavítva a korábbi távolságrekordot lézeres adatátvitelben és detektálásban. Jelenleg az űrtávközlésben többnyire mikrohullámú kommunikációt alkalmaznak. A két megoldás előnyeit és hátrányait összehasonlítva a legnagyobb különbség a lézeres összeköttetés javára abban nyilvánul meg, hogy az időegységenkénti adatátvitel legalább tízszerese a hagyományos rádiós kapcsolatnak. Ez az arány elérheti az ezerszeres értéket is, amely a lézerkommunikációban rejlő lehetőségeket bizonyítja.

Jelenleg a Föld-Mars kapcsolat adatátviteli sebessége kb. 128 Kbps. A 2010-re tervezett Föld-Mars lézerkommunikációs kapcsolat 1-30 Mbps adatátviteli sebességgel működött volna, a két bolygó közötti távolságtól függően. A projekt végül gazdasági problémák miatt nem valósult meg.

A lézerkommunikáció legnagyobb nehézsége, hogy a küldőt nagyon precízen kell pozícionálni a fogadó felé, főleg ha több millió kilométeres csatornahosszról van szó. Létezik ennek egy másik olvasata is, miszerint a lézernek ezt a tulajdonságát igen pontos távolságmérésre lehet hasznosítani. Rádióhullámok esetében ilyenre nincs lehetőség. [2]

Azt, hogy mennyire befolyásolja a Föld-űr vagy űr-Föld csatornában a Föld légkörének különböző hatásai a fogadó által észlelhető jeleket, egy 2008-as kísérlet is bizonyítja. Itt a német TerraSAR-X műhold és az amerikai NFIRE műhold között valósult meg a hibátlan adatátvitel, több mint 5000 kilométeres csatornahosszon. A csatorna sávszélessége közel százszorosa (!) volt a hagyományos rádiós összeköttetés sávszélességének, amely kb. 4Gbps sebességet jelent. [3]

A fentiek kísérleti eredmények voltak, amelyek azt támasztják alá, hogy a lézeres kommunikációt érdemes az űrtávközlésben felhasználni. Dolgozatomban nem a nagyon nagy távolságú kommunikációval foglalkozom, hanem a Föld körül keringő műholdakkal való kapcsolatra koncentrálok.

Egy megfelelően működő optikai kommunikációs csatorna esetében sok tényezőt figyelembe kell venni. A rengeteg fizikai paraméter és számítás hatékony kezelésére ideális megoldást nyújt egy direkt erre a célra kifejlesztett szimulációs szoftver. A munkámban elsősorban földi állomás és műhold között zajló kommunikáció megvalósítására koncentráltam, amelynek egyik legnagyobb befolyásoló tényezője és a legtöbb figyelmet igénylő pontja a Föld különböző légköri hatásainak megértése és az ebből származó fizikai jelenségek megfelelő kezelése.

Minden digitális kommunikációban az egyik legfontosabb jellemző a bithiba arány, vagyis az, hogy az elküldött adatból mennyi a hibás bitek száma. Munkám egy másik megközelítésből ennek a bithiba arány minimalizálására terjed ki.

Dolgozatomban elsőként a lézeres kommunikációhoz kapcsolódó elméleti háttérrel mutatom be (2. Szabadtéri lézeres kommunikáció elméleti háttére), majd az ehhez szükséges szimulációs program tervezéséről és a programozás körülményeiről írok (3. Programozás körülményei). Az ezt követő fejezetben (4. Szimulációs program) bemutatom az alkalmazás felépítését, működését és használhatóságát. Végül ismertetem a szimulációs eredményeket (5. Eredmények).

2. Szabadtéri lézeres kommunikáció elméleti háttere

Ebben a fejezetben ismertetem a szabadtéri lézeres kommunikáció elméleti hátterét. Röviden bemutatom a lézer előnyeit és hátrányait, a különböző műholdpályákat, és a kommunikációt befolyásoló tényezőket.

2.1. Lézer

A lézer egy olyan fényforrás, amely stimulált emissziót használ egybefüggő fénysugár létrehozására. A szó angol megfelelője a Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation rövidítéséből származik. A létrejött fénynyaláb időben és térben összefüggő, a lézer által kibocsátott hullámok fázisa a sugár minden keresztmetszeténél azonos. Kihasználva a viszonylag alacsony nyalábszélesedést, jól alkalmazható nagy távolság összeköttetésére, hálózati oldalról tekintve nagy távolságba történő adatátvitelre. Szabadtéri lézerkommunikáció esetén a fény terjedését befolyásolják többek között az időjárási viszonyok, de sok olyan előnnyel rendelkezik, amelyek pl. egyszerű kábeles összeköttetés esetén nincsenek jelen. Ilyen az egyszerű üzembe helyezés, viszonylag kis távolságon alacsony bithiba arány, ezen kívül a nyaláb terjedését nem befolyásolja a mágneses interferencia, kivitelezhető kétirányú kommunikáció egy időben és a keskeny nyalábnak köszönhetően nagyfokú adatbiztonság van jelen. Ugyanakkor a hátrányai közé tartoznak a különböző időjárási tényezők pl. eső, köd, hó, célzás pontosságának változása szélben, valamint a különböző fizikai hatások, amelyek közé a nyalábszélesedés, abszorpció, erős fény, háttérfény, árnyékolás és a légszennyezettség tartozik.

A fent említett hátrányok a földközeli kommunikációra vonatkoznak, viszont ezek nagy része kb. 30 km-es magasságtól nincs jelen, ami azt jelenti, hogy már az alacsony Föld körüli pályán keringő műholdak közötti kommunikációban a lézeres adatátvitel egy jól alkalmazható eljárás. Ennek ellenére műhold-műhold kommunikációban is figyelembe kell venni különböző tényezőket.

2.2. Műholdpályák

Ebben a fejezetben szeretnék ismertetni három fontos műholdpályát.

Alacsony Föld körüli pálya

Az alacsony Föld körüli pálya (LEO - *Low Earth Orbit*) az a műholdpálya, amelyen a Föld felszínétől legfeljebb 2000 km távolságra lévő műholdak keringenek. A 200 km-nél alacsonyabb magasságon keringő testek gyorsan veszítenek magasságukból, de a LEO-ra vonatkozó hivatalos alsó határ 160 km. Mivel ezen a pályán keringő műholdak vannak a legközelebb a Földhöz ezért ideális egy itt lévő műholddal kialakítani a Föld-műhold, illetve műhold-Föld kommunikációs kapcsolatot. Ezt figyelembe véve az általam fejlesztett program is alapértelmezett értéként 700 km csatornahosszúsággal számol Földi állomás és műhold közötti kapcsolat esetén.

Geostacionárius pálya

A geostacionárius pálya olyan Föld körüli pálya, amely az Egyenlítő síkjában helyezkedik el és az ezen keringő műholdak keringési ideje megegyezik a Földi nap időtartamával, ami 23 óra, 56 perc, 4,1 másodperc. A pálya magassága a Föld felszínétől számított 35786 km-en található. A geostacionárius pálya ideális a távközlési, műsorszóró és meteorológiai műholdak számára, mivel a Föld felszínéhez képest állandó pozícióban helyezkednek el. Hátránya, hogy Föld-műhold optikai összeköttetés esetén a csatornahosszúság sokkal nagyobb, mint az alacsony Föld körüli pálya esetében, amely nagyobb adatvesztést is jelent.

Közepes Föld körüli pálya

A közepes Föld körüli pálya (Medium Earth Orbit) az alacsony Földi pálya Föld felszínétől számított felső határa és a geostacionárius pálya szintje között, 2000 km és 35786 km között található. Ezen a pályán találhatóak többek között a GPS műholdak 20200 km-re a Föld felszínétől. A keringési idő 2 és 24 óra közé tehető.

2.3. Befolyásoló tényezők

2.3.1. Célzás hibája

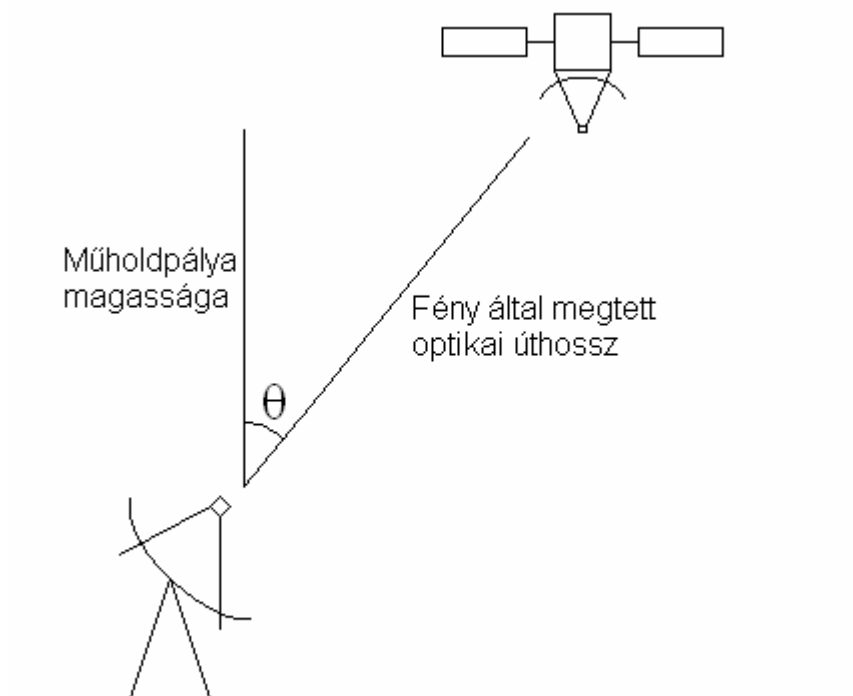
Egy hálózati kommunikációs esetet véve az üzenet küldője legyen Aliz, a fogadó pedig Bob. Célzás hibájáról akkor beszélünk, ha Aliz nem pontosan Bob detektora felé küld fotonokat, vagyis Bob nem tudja őket detektálni. További veszteséget idéz elő, ha a lézernyaláb átmérője nagyobb, mint Bob detektorának tükre. Ilyen esetben a fotonok szintén elhaladnak Bob detektora mellett. A két veszteségforrást geometriai veszteségnek hívjuk.

2.3.2. Nyalábszélesedés

Nyalábszélesedés kétféle közegben alakulhat ki: vákuumban és légkörben. Vákuumban, ha a fókusztávolságot végtelennek vesszük, akkor a nyaláb sugarát meghatározhatjuk a csatorna hosszúságából, lézer hullámszámából és Aliz apertúraátmérőjéből. Itt a lézer hullámszáma átalakítás után meghatározható a hullámhosszból.

Légkörben kétféle hatást kell figyelembe venni: rövidtávú nyalábszélesedést, amely szó szerint a nyaláb szélesedését okozza, és a hosszú távú nyalábszélesedést, amely a nyaláb középpont pozíciójának változását idézi elő. Ez utóbbi a gyakorlatban könnyen korrigálható, ezért a számításokban nincs jelen. Hasonlóan a vákuumbeli nyalábszélesedéshez, figyelembe kell venni a csatorna hosszúságát, lézer hullámszámát, Aliz apertúraátmérőjét. Ezen kívül – mivel légkör tulajdonságait nézzük – számolni kell a turbulencia erősségével, amely különbözőképpen számítandó „uplink”-re és „downlink”-re, vagyis amikor a Földi állomás küld jelet műholdra és műhold Földi állomásra. Továbbá a fény által megtett optikai úthossz meghatározásához figyelembe kell venni, hogy a műhold nem pontosan a Földi állomás felett helyez-

kedik el, hanem a Föld felszínére állított merőlegeshez képest valamekkora fokos eltéréssel van jelen. Ezt határozza meg a 2. ábrán látható zenitszög, amely által meghatározható a fény által megtett optikai úthossz.



2. ábra - Fény által megtett optikai úthossz meghatározása

A turbulencia erősségének számításához szükséges tudni a szélesség értékét és a tengerszint feletti magasságot. A programban a nyalábszélesedés számítását numerikus interpolációval valósítottam meg.

2.3.3. Detektor hatásfoka

A szabadtéri lézeres kommunikáció során más tényezőkhez hasonlóan a detektor tulajdonságait is figyelembe kell venni. 860 nm-es hullámhosszon – amellyel a program alapértelmezett értéként számol – az alkalmazott detektor kvantumhatásfoka, vagyis egy foton detektálásának valószínűsége általában 70%, de elérheti a 76%-ot is. A program alapértelmezett értéként 70%-os hatásfokkal számol. [5]

2.3.4. Zaj

Egy gyakorlatban használt detektor néha képes abban az esetben is jelezni, amikor nem érkezik bele jel, ez a sötétzaj. Előfordulhat olyan eset is amikor valóban érkezik foton, amelyet a detektor érzékel is, csak ez nem Aliztól származik, ez a háttérzaj. A detektorokat általában -20°C -on üzemeltetik, ekkor a sötétzajból adódó hibás beütések aránya: $1:5 \cdot 10^7$. Ez az arány -77°C -on történő üzemeltetés esetén $1:5 \cdot 10^8$ -ra is csökkenthető.

A háttérzaj a sötétzajjal ellentétben nem a detektortól, hanem a környezettől függ. Az üzemeltetés körülményeinek ismerete nélkül csak becslés adható, ami szerint a hamis beütések valószínűsége: $1:2 \cdot 10^7$. [5]

2.4. Föld-műhold kommunikáció

2.4.1. A légkör statikus veszteségei

A légkör statikus veszteségét alapvetően kétféle típusba lehet sorolni: szórási tényező és abszorpciós tényező, amelyek közül a 1. táblázatban látható módon mindegyik lehet molekuláris vagy aeroszolos veszteség. A molekuláris veszteség azt jelenti, hogy a fényt a molekulák elnyelik vagy szétszórják, az aeroszolos veszteség pedig a fény a levegőben lévő porszemek és vízcseppek általi elnyelését vagy szétszórását jelenti.

		Veszteség típusa	
		Szórás	Abszorpció
Veszteség oka	Molekuláris	σ_m	k_m
	Aeroszolos	σ_a	k_a

1. táblázat - Szórási és abszorpciós tényező

A kétféle veszteségből képzett összeget attenuációs együtthatónak hívjuk. Ez természetesen különböző légköri magasságokon különböző értéket vesz fel, valamint figyelembe kell venni a különböző környezeti tényezőket: éghajlat, amelyen található a földi állomás; évszak; időjárás, amely alapján megállapítható, hogy a levegő tiszta vagy ködös. Ezekből az értékekből számított statikus veszteséghez figyelembe kell venni, hogy a fénynyaláb mekkora utat tesz meg a légkörben, amely a 2. ábrán látható módon meghatározható a zenitszög és a magasság ismeretében.

2.4.2. Turbulenciaerősség meghatározása

A programban a turbulenciaerősség számításához a Hufnagel-Valley modellt alkalmaztam [5], amely egy közelítő eredményt ad a tényleges turbulenciaerősséghez. A képlet a tengerszint feletti magasság és a különböző magasságokra integrált átlagos szélsősebesség értékeket alkalmazva határozza meg a közelítő turbulenciaerősség értékeket.

2.5. Műhold-műhold kommunikáció

Űrbeli kommunikáció esetén számítandó transzmittancia nyilván különbözik a Föld-űr kommunikációs esettől, hiszen nincs légkör, amelyben statikus veszteségek hatnának a kommunikációhoz használt fénynyalábra.

A transzmittancia alapvetően – minden esetben – a statikus veszteségek és a dinamikus veszteségek szorzataként írható fel, amelyben jelen esetben a statikus veszteség értéke 1. A dinamikus veszteség meghatározásához figyelembe kell venni Bob apertúraátmérőjét és a teljes szórás mértékét, a teljes szórást pedig a nyalábszélesedés és a célzási hibát felhasználva határozhatjuk meg.

3. Programozás körülményei

Ebben a fejezetben mutatom be a program tervezésekor előfordult scenáriókat, a számításokhoz használt fizikai paramétereket, a program használati módjait, és a fejlesztés alapvető jellemzőit.

3.1. Tervezés

3.1.1. Scenáriók

A bithiba arány meghatározását kvantumbit-hiba arány számításával valósítottam meg. Gyakorlatilag ez a BB84 protokoll alkalmazását jelenti a (2) képletnek megfelelően. Ez lehetőséget ad arra, hogy különböző fizikai hatásokból származtatva, megkapjuk a keresett értéket. [7]

Az alkalmazásban alapvetően háromféle scenárió, forgatókönyvet használva kaphatjuk meg a kívánt eredményeket. Az egyik a kvantumbit-hiba arányának meghatározása szimuláció segítségével. Ebben először egy grafikus felületen szükséges létrehozni földi állomásokból és műholdakból álló hálózatot, majd logikailag ezen kiépíteni egy kommunikációs útvonalat. A létrehozott komponenseket elmenthetjük fájlba – későbbi felhasználás céljából – vagy továbbléphetünk a számítási oldalra. A számítás oldalán a Kvantumbit-hiba arány meghatározása című fejezetben leírtaknak megfelelően állíthatjuk be a szükséges paramétereket. Ezeket felhasználva a hibaarány meghatározásához háromféle csatornát alkalmazunk: Földi állomás-műhold összeköttetés, műhold-műhold összeköttetés, műhold-földi állomás összeköttetés.

A másik használati mód az érzékenységvizsgálat, amely arra használható, hogy egy adott képletben különböző bemeneti paraméterek értékeit adott intervallumon változtatva milyen változást eredményez a végeredményben. Ilyen módon a következő képleteket engedi vizsgálni a program:

- Nyalábszélesedés vákuumban
- Dinamikus veszteségek
- Teljes szórás
- Turbulenciaerősség
- Kvantumbit-hiba arány meghatározása

A harmadik használati eset a műholdak pozicionálása. Ennek célja adott városok közötti kommunikációs útvonal meghatározása azon alapelv szerint, hogy a teljes csatorna QBER aránya és a műholdak száma is a legkisebb legyen. Mivel ez matematikailag két változót jelent, ezért ezeket súlyozva, a következő képlet eredményeit minimalizálva számol a program:

$$\text{Műholdak száma} * \text{műhold súlyozási értéke} + \text{QBER} * \text{QBER súlyozási értéke} \quad (1)$$

ahol a QBER a teljes kommunikációs útvonal bithiba arányát jelenti. Vagyis n darab csatorna esetén $QBER = 1 - (1 - QBER_1) * (1 - QBER_2) * \dots * (1 - QBER_{n-1}) * (1 - QBER_n)$. Fontos megjegyezni, hogy a program nem veszi figyelembe a műholdak mozgását. Ha a küldő és a fogadó két pontját összekötve, a Föld felszínére (a domborzati magasságkülönbségeket figyelmen kívül hagyva) egy ívet fektetnénk akkor minden műholdra igaz, hogy az adott műhold pozíciója, a földfelszínre fektetett ív egy pontja és a Föld középpontja egy egyenessel összeköthető.

3.1.2. Paraméterek

Természetesen minden képletet meghatározott bemeneti paraméterek által használhatunk, amelyek kiválasztásához, meghatározásához külön figyelmet kellett fordítanom. Összefoglalva, az alkalmazás a 2. táblázatban látható fizikai és időjárási tényezőkből számszerűsített paraméterek felhasználásával határozza meg az eredményeket.

Név	Jelölés	Mértékegység	Tipikus érték/tartomány
Alice apertúra-átmérője	-	m	0,2
Zenitszög	θ	°	0-70
Hullámhossz	-	nm	860; 1160
Célzási szöghiba	$\sigma_{C\acute{E}L}$	μ rad	0,5
Bob tükrőátmérője	-	m	1
Tengerszint feletti magasság	-	km	700
Szélesség	-	m/s	21
Éghajlat	-	-	trópus; mérsékelt
Időjárás	-	-	tiszta; ködös
Évszak	-	-	nyár; tél
Polarizációmérés hibájának valószínűsége	P_{POL}	-	10^{-4}
Detektor határfoka	μ	-	70
Fotonok átlagos száma lézerimpulzusonként	-	-	0,1
Lavina fotodiódák száma	n	-	4
Detektor saját zaja	-	-	$5 \cdot 10^{-6}$
Külső háttérzaj	-	-	$2 \cdot 10^{-4}$
Hőmérséklet	-	°C	-30

2. táblázat - A programban használt fizikai és időjárási tényezők jelölései, mértékegységei és alapértelmezett értékei

3.1.3. Use-case diagram

Felhasználói oldalról megközelítve a 3. ábrán látható, a program egyes használati eseteit ábrázoló diagram.



3. ábra – Használati eset diagram

3.2. Fejlesztés

A projektben komponensalapú fejlesztési modell használatával dolgoztam, amely kifejezetten jól működött a jelen esetben is bemutatott különböző matematikai számításokon alapuló szoftverek fejlesztésében.

A modell a szisztematikus újrafelhasználáson alapul, a komponenseket jelen esetben már létező megvalósítási módszerekből származtattam, amely magában foglalja többek között a képletek alkalmazását és a grafikai szerkesztést és megjelenítést. A modell szerint a szoftvergyártás lépései a következők: komponens analízis; követelmények módosítása; rendszertervezés újrafelhasználással; fejlesztés és integráció.

Az alkalmazás fejlesztéséhez Visual Basic programnyelvet választottam .Net 4.0 keretrendszeren (VB.Net). Szem előtt tartottam, hogy a későbbi továbbfejlesztésekhez célszerű lenne objektumorientált fejlesztést alkalmaznom, amely ezen a módok könnyen megvalósítható. Másik alternatívaként szintén ésszerű döntésnek bizonyult volna Java nyelven írni a programot, de a választás pillanatában VB.Net-ben viszonylag kisebb gyakorlattal rendelkeztem és szerettem volna minél jobban megismerni, hogy egy későbbi projektben, más alkalmazás fejlesztésében vagy a jelen esetben tárgyalt program továbbfejlesztésében tudjam hasznosítani ismereteimet.

4. Szimulációs program bemutatása

Ebben a fejezetben mutatom be a program működését felhasználói oldalról, és ehhez kapcsolva magyarázom a háttérben végrehajtódó műveleteket.

4.1. Kezdőlap

A program indítása után a 4. ábrán látható kezdőlap jelenik meg, amelyen lehetőség van az alapvető technikai paraméterek és a környezeti jellemzők beállítására. A navigációt a fenti menüsor valósítja meg, innen lehet elérni a három alapvető funkciót, ami a szimuláció, műholdak pozicionálása és az érzékenységvizsgálat különböző képletek számításában. A menüsor a program minden oldalán megjelenik, ami azt jelenti, hogy bárhonnan elkezdhető egy másik szcenárió és bárhonnan eljuthatunk a kezdőlapra.

Szabadtéri lézerkommunikáció szimulátor

Kezdőlap Kvantumbit-hiba arány meghatározása Érzékenységvizsgálat

Szabadtéri lézerkommunikáció szimulálása

Paraméterek

Apertúra átmérő (Alice):	0.2	m
Zenit szög (θ):	30	°
Hullámhossz:	860	nm
Célsíri szöghiba:	0.5	μrad
Tükrőátmérő:	1	m
Műholdpálya tengerszint feletti magassága:	700	km
Csatornahossz (műhold-műhold):	1000	km

Környezet

Szélsebesség:	21	m/s
Égőv:	Mérsékelt	
Időjárás:	Tiszta	
Évszak:	Nyár	

Készítette: Kiss András - 2011 - Nyugat-magyarországi Egyetem - Gazdaságinformatikus szak (MSc)

4. ábra – A program indítása után megjelenő kezdőlap

4.2. Kvantumbit-hiba arány meghatározása

A lézeres kommunikáció egyik úttörő alkalmazása a kvantummechanikai elveken alapuló kvantumkommunikáció. Összehasonlítva a klasszikus elvű kommunikációval, sokkal nagyobb sáv szélesség elérését teszi lehetővé, az időegységenként küldött adatmennyiség növelése az úrtáv közlés és a műsorszórás esetében is minőségbeli javulást jelent. Ezen kívül hatékonyan oldja meg a kriptográfiában felmerülő problémákat. [6]

Az egyik széleskörűen ismert, és a fizikai kísérletekben is használt protokoll a BB84 kvantum kulcsszétosztó protokoll, a továbbiakban ezzel a protokollal foglalkozok. [5]

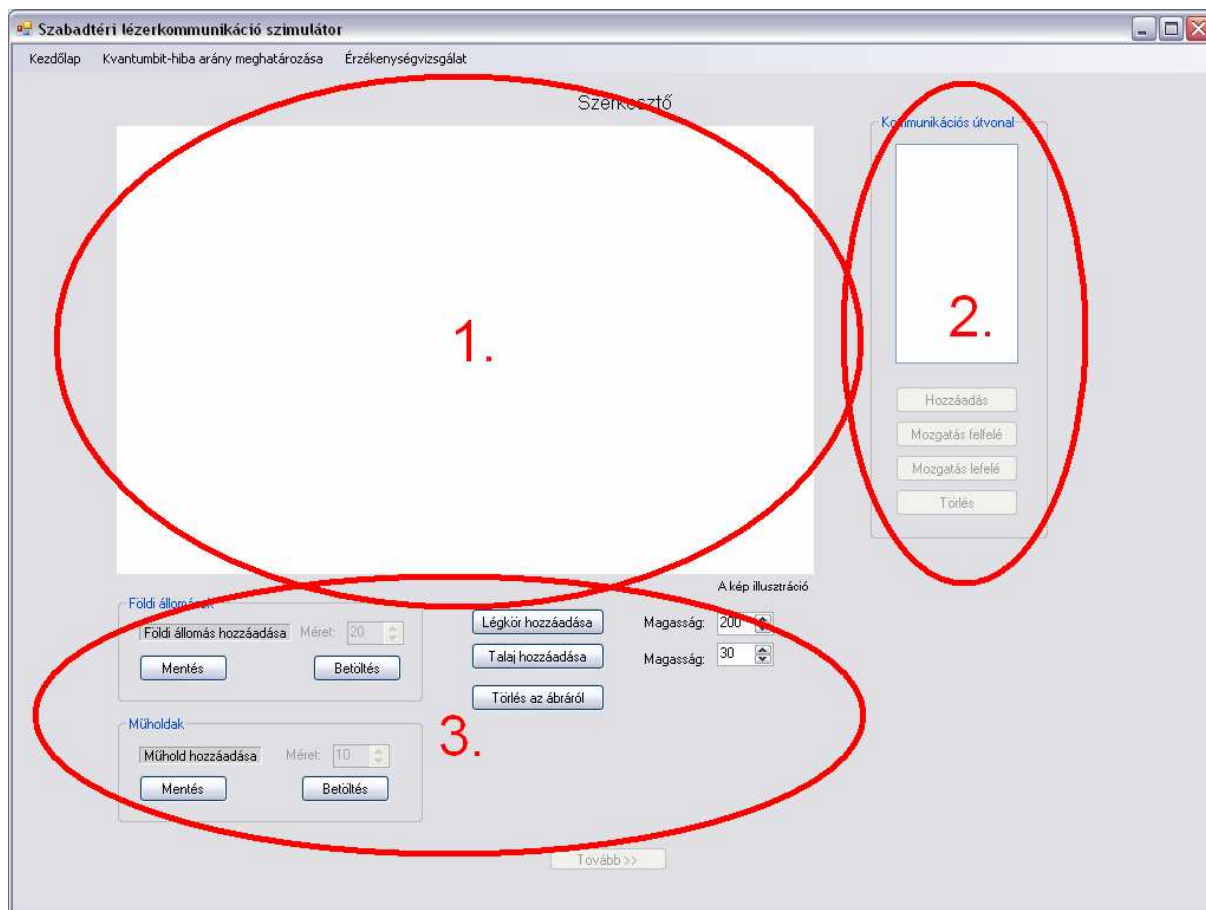
A kvantumbit-hiba arány (QBER, Quatum Bit Error Rate) a következő képlet által határozható meg:

$$QBER = \frac{R_{HIBA}}{R_{ÖSSZ}} = p_{pol} + \frac{p_{dark} \cdot n}{\tau_{link} \cdot \eta \cdot 2 \cdot \mu} \quad (2)$$

ahol

- p_{pol} : a polarizációmérés hibájának valószínűsége
- μ : a detektor hatásfoka, amelynek alapértelmezett értéke 0,7
- p_{dark} : a sötétzaj, ami a detektor saját zajából és a külső háttérzaj összegeként áll elő. A detektor saját zaja alapértelmezetten $5 \cdot 10^{-6}$, a háttérzaj pedig $2 \cdot 10^{-4}$.
- η : az egyes lézerimpulzusokban a fotonok átlagos száma, amelynek alapértelmezett értéke 0,1
- n : Bob detektorában a lavina-fotodiódák száma, alapértelmezett értéke 4
- τ_{link} : a csatorna teljes transzmittanciája [5]

A programban a QBER meghatározására kétféle eljárás is rendelkezésre áll: számítás szimulációval, számítás érzékenységvizsgálattal. Ebben a részben a szimulációs mód működéséről írok. A számítás végrehajtásához először össze kell állítani egy kommunikációs útvonalat, amely Föld-űr, űr-űr vagy űr-Föld csatornákból állhat. Erre a szerkesztő felületen van lehetőség, amely a Kvantumbit-hiba arány meghatározása menüpontból a Szimulációt kiválasztva érhető el. Ezzel az 5. ábrán látható oldalt kapjuk.

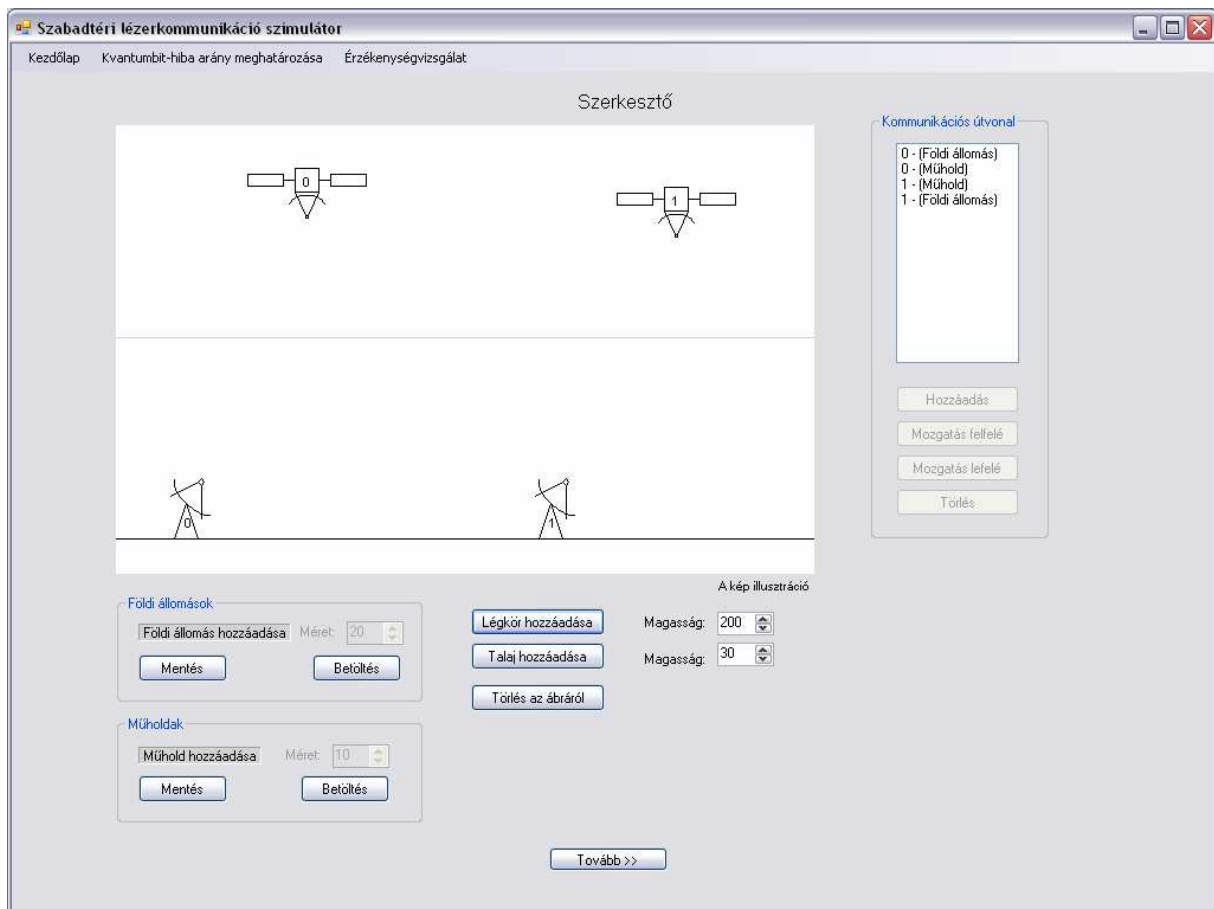


5. ábra – A program szimulációs Kvantumbit-hiba arány meghatározásához használható szerkesztő felülete

A felület az ábrán is láthatóan három fő részből áll: 1. rajzolófelület, 2. kommunikációs útvonal, 3. kezelőszervek. Ezekkel lehet hozzáadni, megjeleníteni, módosítani és törölni a négy komponenst, amelyek: földi állomás, műhold, talaj, légkör. A program minden komponenst tömbben tárol el és az eltárolt értékeknek megfelelően rajzolja ki azokat a felületre. Ebből adódóan minden módosítás logikailag a tömbben hajtódik végre.

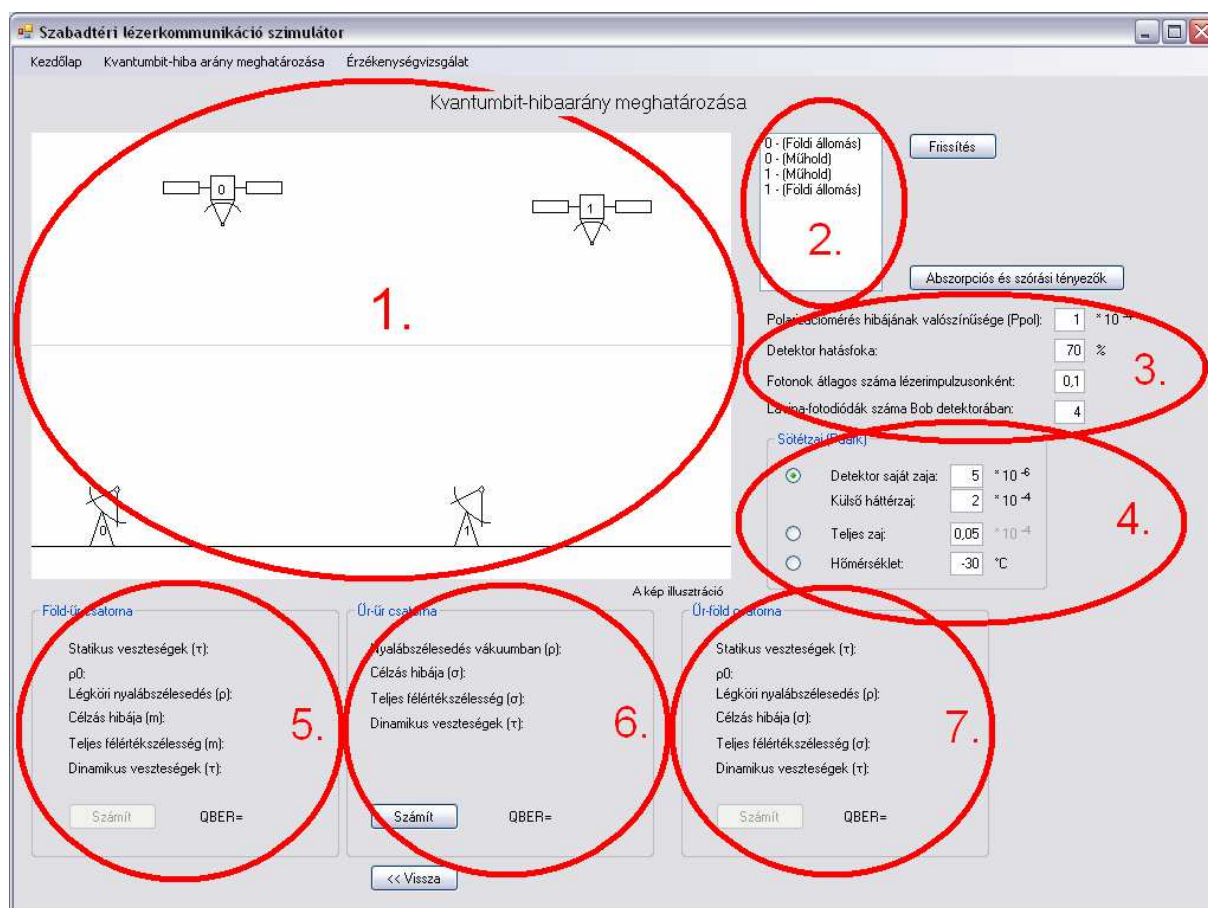
A „Talaj hozzáadása” és „Légkör hozzáadása” gombokkal lehet, amelyek mindkét esetben a gombok mellett található magasságértékekkel fog eltárolódni a komponenseket tároló tömbben és megjelenni a rajzolófelületen. Hasonlóan működik a földi állomás és a műhold hozzáadása, amelyeket méretük beállítása után, földi állomás esetében a „Földi állomás hozzáadása” mezőt, műhold esetében a „Műhold hozzáadása” mezőt kijelölve, majd a rajzoló felületre kattintva adhatunk hozzá. Ezek pozícióit a rajzolófelületen egyszerűen egérrel „drag-and-drop” módon lehet változtatni. További lehetőség a tömbben eltárolt koordináták fájlba mentése, amellyel valójában .csv fájlokat hoz létre a program, a könnyebb megkülönböztethetőség céljából a talajon elhelyezett komponensek koordinátáit .lcg (ami a *laser communication ground* rövidítése), a műholdak koordinátáit pedig .lcs (ami a *laser communication satellites*) kiterjesztésű fájlokban tárolja el. Természetesen ezen fájlok tartalmát a program képes értelmezni és betölteni.

A 2. számmal jelzett terület a kommunikációs útvonal listája, amelynek elsődleges célja a kommunikáció irányának meghatározása. A lista első eleme a küldőt, utolsó eleme a fogadót jelzi. Ezt a sorrendet a felhasználó a lista alatt található gombok segítségével szerkesztheti. Ha egy olyan elrendezés lett összeállítva, amelyben található a program által értelmezhető csatorna pl. Föld-űr, űr-űr vagy űr-Föld akkor a képernyő alján található „Tovább >>” gomb aktívvá válik. Ilyen a 6. ábrán látható eset.



6. ábra - A program szimulációs Kvantumbit-hiba arány meghatározásához használható szerkesztő felülete létrehozott kommunikációs útvonallal

Fontos megjegyezni, hogy a rajzolófelületen megjelenített ábra egy illusztráció, vagyis méretarányosságot és egyéb tulajdonságokat nem vesz figyelembe. A kommunikációs útvonal listájában az elemek neve előtt megjelenő szám az azonosító, amely a rajzolófelületen megjelenő földi állomásokat és műholdakat is azonosítja. A „Tovább” gombra kattintva a 7. ábrán megjelenő oldalra jutunk.



7. ábra – Szimulációs üzemmódban a kvantumbit-hibaaarány meghatározásához használható eredményjelző felület

A képernyőn az 1. számmal jelzett rajzolófelület és a 2. számmal jelzett kommunikációs útvonal lista megegyezik a szerkesztőn leírtakkal. A különbség annyi, hogy ebben az esetben csak megjelenít a program, komponens hozzáadására, módosítására, törlésére nincs lehetőség. A 3. számmal jelzett bemeneti paraméterhalmaz a polarizációmérés hibájának valószínűsége, detektor hatásfoka, fotonok átlagos száma lézerimpulzusonként és a lavina-fotodiódák száma a fogadó detektorában. Ezek bemeneti paraméterek és a program csak a QBER képletében használja fel őket. A 4. számmal jelzett bemeneti értékek mind a sötétzajt határozzák meg. Erre többféle számítási mód is létezik, ezért a program is többféleképpen képes ezt kiszámolni:

- detektor saját zaja és a külső háttérzaj összegeként
- teljes zaj megadásával
- hőmérséklet alapján

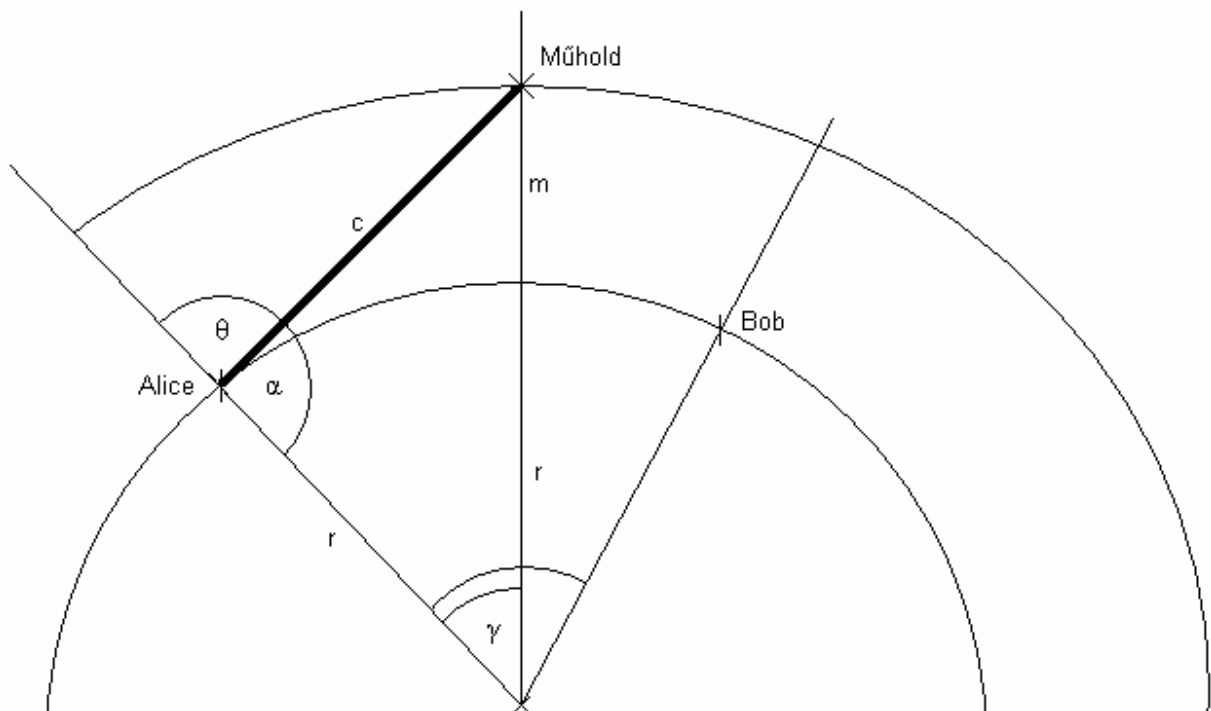
Értelemszerűen a mezők neve mellett található rádiógombokkal lehet kiválasztani, hogy melyik bemeneti paraméter alapján számol a program.

Ezeket a paramétereket beállítva már lehetőség van a QBER számítására, de csak űr-űr csatornán, mivel a légköri adatokat ilyen esetben nem kell figyelembe venni. A légkör statikus veszteségei az abszorpciós és szórási tényezőkből származnak. Számítással ez csak nehezen lenne meghatározható, ezért közelítő számítást alkalmazva, a program a értékeit használja. Az értékeket eltároló fájlt a „Abszorpciós és szórási tényezők” gombbal lehet kiválasztani és az eltárolt értékeket betölteni. Ezután a program már képes meghatározni a Föld-űr és űr-Föld csatornák esetén előforduló statikus veszteségeket és ebből adódóan a QBER értéket. Amikor

a számításhoz minden adat rendelkezésre áll, akkor az adott csatornához tartozó „Számít” gomb aktívvá válik és erre kattintva hajtódnak végre a különböző részeredmények, majd a végeredmény meghatározása.

4.2.1. Föld-űr, űr-Föld csatorna

A programban a számítás természetesen a paraméterek inicializálásával kezdődik, amelyek a felhasználói felületen lettek beállítva. Elsőként a fény által megtett optikai úthossz számítása hajtódik végre, ez a csatorna a 8. ábrán a c-vel jelölt szakasznak felel meg.



8. ábra - Fény által megtett optikai úthossz

Ehhez a műhold m-mel jelölt tengerszint feletti magasságát és a θ -val jelölt zenitszöget kell ismerni. Ha a tengerszint feletti magasság kisebb, mint 1000 kilométer, akkor a következő képlet szerint számol a program:

$$\text{Fény által megtett optikai úthossz} = \frac{\text{Tengerszint feletti magasság}}{\cos(\theta)} \quad (3)$$

Ha a tengerszint feletti magasság nagyobb, mint 1000 kilométer, akkor figyelembe kell venni a Föld görbületét és ehhez a következő képlet szerinti számítást alkalmaztam:

$$\begin{aligned} \text{Fény által megtett optikai úthossz} = & -\text{Föld sugara} \cdot \cos(\theta) + \\ & + \sqrt{\text{Föld sugara}^2 \cdot \cos^2(\theta) + 2 \cdot \text{Föld sugara} \cdot \text{Tengerszint feletti magasság} + \text{Tengerszint feletti magasság}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

A Föld légkörében megjelenő abszorpciós és szórási tényezőkön kívül a lézernyaláb terjedésére hatással van a légköri turbulencia. Ennek a tengerszinttől számítva kb. 30 kilométeres magasságig van nagy jelentősége és ezen a tartományon belül meglehetősen változó a turbulencia erőssége. Mivel magasságtartományról van szó ezért a teljes csatornahosszt 5000 szakaszra bontja fel a program és tárolja el egy tömbben, vagyis ezer kilométeres csatornahossz esetén 200 méteres szakaszokról van szó.

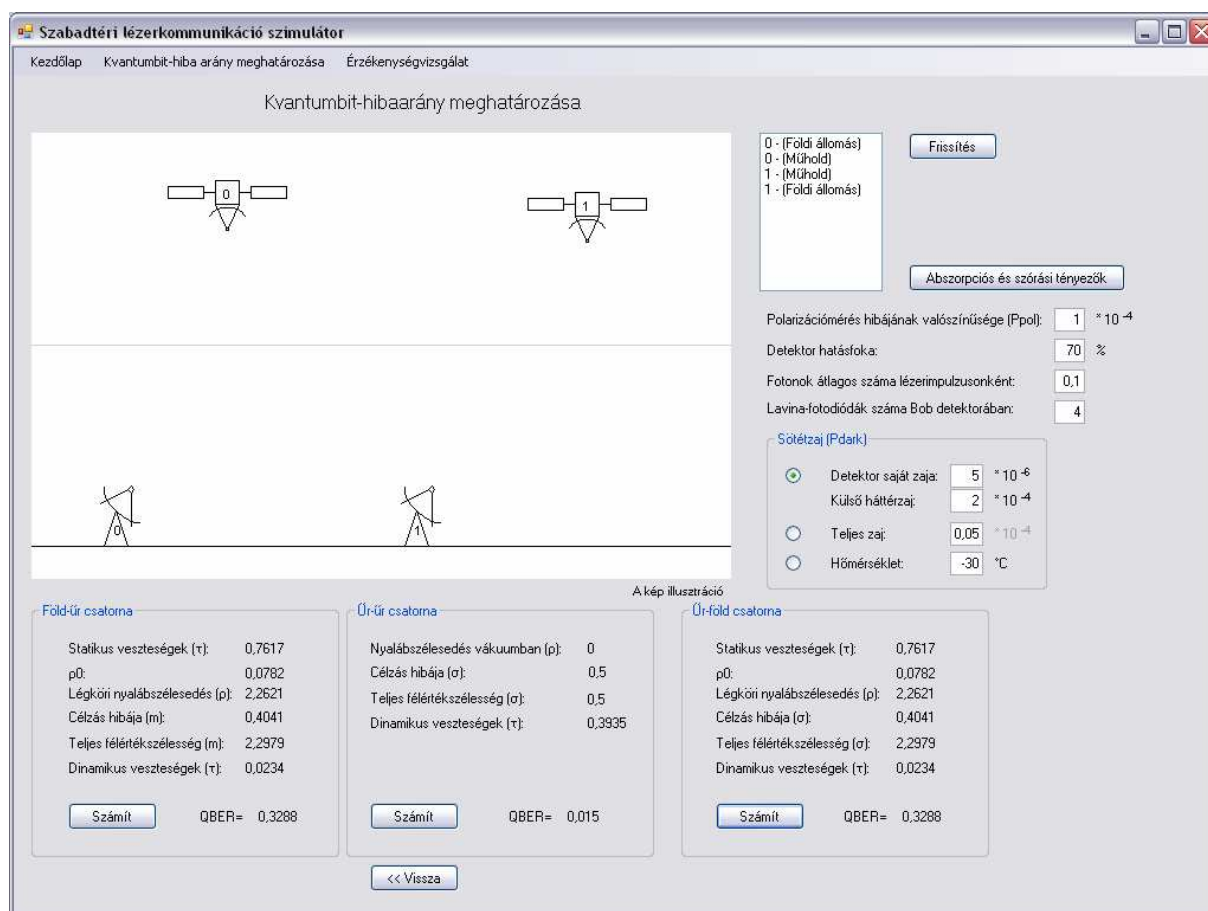
A fenti paraméterek meghatározása után számolja ki a program a QBER képlethez szükséges transzmittancia értéket, amely a következő befolyásoló tényezőktől függ:

- Statikus veszteség
- Nyalábszélesedés
- Célzás hibája
- Teljes szórás
- Dinamikus veszteségek

A statikus veszteségeket számító függvény bemeneti paraméterei a korábban beolvasott fájlban eltárolt molekuláris szórás, molekuláris abszorpció, aeroszolos szórás és aeroszolos abszorpció értékek különböző tengerszint feletti magasságokra; valamint a csatorna szakaszait eltároló tömb és a csatornához tartozó zenitszög.

A nyalábszélesedésre meg lehet határozni légköri nyalábszélesedést és vákuumbeli nyalábszélesedést. Mivel most nem űr-űr csatornát vizsgálunk ezért figyelembe kell venni a légköri nyalábszélesedést, amely eredményét a hullámhossz, tengerszint feletti magasság, fény által megtett optikai úthossz, szélesség és a küldő apertúraátmérője paraméterek alapján határozza meg a program.

A valóságban Föld-űr és űr-Föld csatornákra meghatározott nyalábszélesedés különbözik, Föld-űr esetében lesz nagyobb mértékű. A programban ez azonos számítással hajtódik végre és nyilván az eredmény is egyenlő lesz, ezért figyelembe kell venni, hogy a kapott eredmények nem teljesen a valóságot tükrözik. Következő lépésként a program a célzás hibáját számítja ki a bemeneti paraméterként megadott célzási szöghiba és a számított optikai úthossz alapján. Az így kapott eredményt és a nyalábszélesedés értékét használja fel a program a teljes szórás meghatározásához. A teljes szórás és a fogadó tükörsugarának mérete által így kiszámítható a csatorna dinamikus vesztesége. A statikus veszteségek és a dinamikus veszteségek szorzatát képezve a program kiszámolja a transzmittancia értékét, majd ezt behelyettesítve a QBER képletébe – minden más szükséges paraméterrel együtt – meghatározza a QBER értékét. A számított részeredményeket és végeredményt a program a 9. ábrán látható módon jeleníti meg.



9. ábra - Szimulációs üzemmódban a kvantumbit-hibaaarány meghatározásához használható eredményjelző felület mindhárom csatorna eredményeinek megjelenítése után

4.2.2. Űr-űr csatorna

A Föld légkörében sok tényezőt figyelembe kell venni, amelyek mind a lézernyaláb gyengítését eredményezik. Ha a kommunikációs csatorna nem halad keresztül a légkörön, akkor a kevesebb gyengítő tényező kisebb QBER értéket eredményez. Programozásban a részeredmények számítását hasonlóan valósítottam meg, mint légkörön áthaladó csatorna esetében. A különbség annyiban nyilvánul meg a Föld-űr vagy űr-Föld csatornákhöz képest, hogy mivel jelen esetben nincs légkör ezért a statikus veszteségeket értelemszerűen 1 lesz.

Ennek meghatározása után ugyanazok a függvények hajtódnak végre, mind légköri csatorna esetében, amelyek a célzás hibája, teljes szórás és a dinamikus veszteségek számítását jelentik. Végül a QBER képletbe behelyettesítve a megfelelő változókat, a program kiszámítja a végeredményt.

4.3. Műholdak pozicionálása

A műholdak pozicionálása funkcióban a számítás arra ad választ, hogy adott két város között milyen kommunikációs útvonalat lehet kiépíteni. Nyilván azt szeretnénk, hogy minden csatornára összességében minél kisebb legyen a QBER arány. Ez könnyen megoldható lenne úgy, hogy egyszerűen sok műholdat használunk, így a rövid csatornahosszokból adódóan megfelelően alacsony QBER értéket kapnánk eredményként. Egyetlen hátránya, hogy ez egy költséges megoldás, ezért egy olyan számításra van szükség, amely a műholdak számát is minimalizálja. A program ehhez az (1) képletet használja:

$$\text{Műholdak száma} * \text{műhold súlyozási értéke} + \text{QBER} * \text{QBER súlyozási értéke}$$

A felhasználó a műholdakra és a QBER arányra is meghatározhat súlyozási értékeket, és a a képlet minimumát a program egy algoritmusban számítja ki.

A műholdak pozicionálása oldal a program Kvantumbit-hiba arány meghatározása menüpontján belül a Műholdak pozicionálását kiválasztva érhető el. Ezzel a 10. ábrán látható oldalt kapjuk.

10. ábra - Műholdak pozicionálása funkció kezelőfelülete pozicionálás megkezdése előtt

Az 1. számmal jelölt területen találhatók a kommunikáló felek adatai, amely magában foglalja a küldő városát és a fogadó városát. Mindkét esetben a legördülő menüből a követke-

zó lehetőségeket ajánlja fel a program: Puynormand (Franciaország), Peking (Kína), Portland (Egyesült Államok), Fokváros (Dél-afrikai Köztársaság), Perth (Ausztrália), Mendoza (Argentína). A városok kiválasztásakor azt vettem figyelembe, hogy ha a Földet, mint geometriai testet vesszük, akkor ennek felületén minél egyenletesebben elosztott pontokat legyen képes kezelni a program, elkerülve azt az esetet, hogy egy adott méretű területre túl kevés vagy túl sok – és ez által felesleges – pontok lennének kiválasztva. Természetesen a program koordinátákkal számol, valós városokat csak azért lettek kijelölve, hogy az így felépített kommunikációs útvonalat könnyebb legyen elképzelni. A program által kezelt városok koordinátáit a 3. táblázat tartalmazza.

Város	Szélesség	Fok	Perc	M.perc	Hosszúság	Fok	Perc	M.perc
Puynormand	Északi	44	59	01	Keleti	0	00	01
Peking	Északi	39	54	15	Keleti	116	24	26
Portland	Északi	45	31	24	Nyugati	122	40	34
Fokváros	Déli	33	55	29	Keleti	18	25	47
Perth	Déli	31	57	08	Keleti	115	51	32
Mendoza	Déli	32	53	24	Nyugati	68	50	38

3. táblázat – A program által kezelt városok és koordinátáik

A városok kiválasztása után a legördülő menük alatti mezőkben megjelennek a kiválasztott városok koordinátái a beviteli mezőkben. Ez azt jelenti, hogy a koordináták felülírhatók, és bármely két pontot ki lehet jelölni, hogy egy teljesen egyedi útvonalra hajtódjon végre a számítás.

Az „Abszorpciós és szórási tényezők” gombbal a légkörre vonatkozó molekuláris szórás, molekuláris abszorpció, valamint aeroszolos szórás és aeroszolos abszorpció értékeket lehet betölteni fájlból. Ez ugyanúgy működik, ahogy a Kvantumbit-hiba arány meghatározása alfejezetben olvasható.

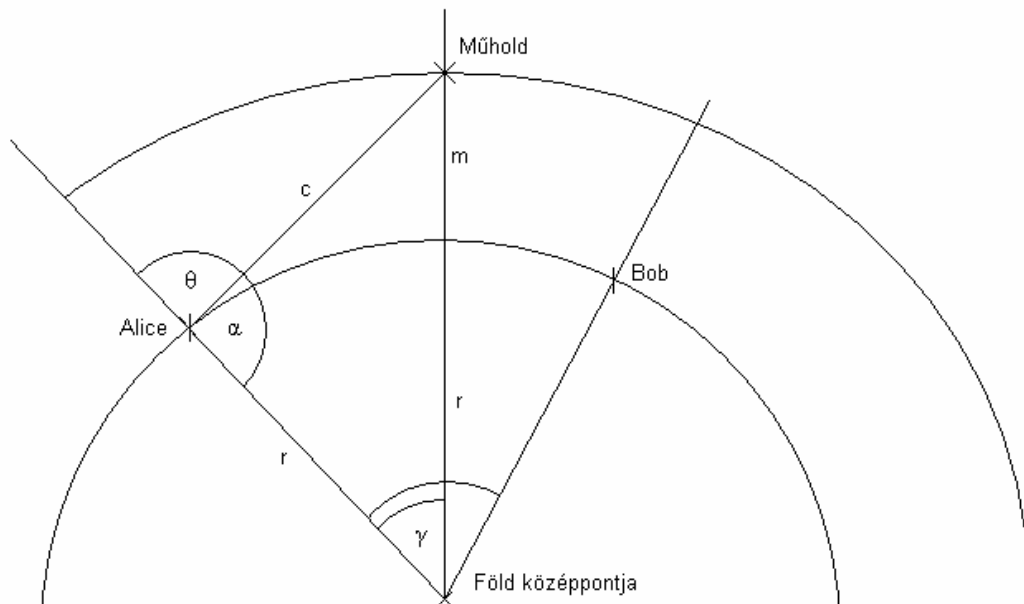
A 2. és 3. számmal jelzett területen lehet beállítani a technikai, valamint a légkörrel és időjárással kapcsolatos adatokat. A 4. számmal jelzett mezőben találhatók a minimalizáláshoz használt számítási adatok, más néven súlyozási értékek. Itt állíthatjuk be, hogy a műholdak számának és az útvonal csatornahosszainak meghatározásához mennyire legyen nagy szerepe a QBER értéknek és mekkora a műholdak számának. Értelmszerűen minél nagyobb a beállított érték, annál nagyobb súllyal fog megjelenni a számításban. Végrehajtható olyan számítási mód, amelyben csak a QBER arány vagy csak a műholdak száma alapján szeretnénk végrehajtani a pozicionálást, ekkor egyszerűen csak 0 értéket kell beállítani annak a tényezőnek a súlyozási értékeként, amelyet ki szeretnénk hagyni a számításból.

A számításhoz szükséges paraméterek és az aeroszolos és abszorpciós tényezők beállítása után a „Számol” gomb aktívvá válik, amellyel elindítható a számítás.

A végrehajtás a paraméterek inicializálásával kezdődik, amelyek a felhasználói felületen lettek beállítva. Miután minden bemeneti paraméter betöltődött, a program kiszámítja a küldő és a fogadó koordinátái alapján a két pont közötti távolságot a Haversine formula segítségével, amelyre az általános képlet a következő:

$$\begin{aligned}
\Delta\text{lat} &= \text{lat}_2 - \text{lat}_1 \\
\Delta\text{long} &= \text{long}_2 - \text{long}_1 \\
a &= \sin^2(\Delta\text{lat} / 2) + \cos(\text{lat}_1) \cdot \cos(\text{lat}_2) \cdot \sin^2(\Delta\text{long} / 2) \\
c &= 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \\
d &= R \cdot c
\end{aligned}
\tag{5}$$

Következő lépésként a program meghatározza a 11. ábrán látható, Alice – Föld középpontja és Bob – Föld középpontja szakaszok által bezárt szöget. A dokumentum további részében ezt az AB szög jelöli.



11. ábra - Alice – Föld középpontja és Bob – Föld középpontja szakaszok által bezárt szög

A pozicionáló algoritmus megkezdéséhez még szükséges kiszámítani a maximális űr-űr csatorna hosszát. Ez nyilván csak akkor kerül felhasználásra, ha az útvonalon kettő vagy több műhold található. Azért szükséges ezt figyelembe venni, mert túl nagy műhold-műhold távolság esetén eredményként kaphatunk akkora csatornahosszt, amely az adott műholdpályán csak úgy fordulhat elő, ha keresztülhalad a Földön, vagy a Föld légkörén. Ha a lézernyaláb csak a légkörön halad keresztül az sem járható út, mert az így számított, légköri hatások által befolyásolt tényezők nem adnának pontos értéket.

Miután a származtatott változókat is meghatározta a program, végrehajtódik a műholdakat pozicionáló algoritmus, amelynek pseudo kódja a következő:

```

Eredmény = végtelen
For (műholdak száma = 1 To 3){
  Ha (műholdak száma == 1){
    For (i = 0 To AB){
      Föld-űr csatornahosszt számít i-re
      Zenitszöget számít
      Ha (Zenitszög > 70 °){következő iterációval folytat}
      QBER-t számít
      Űr-Föld csatornahosszt számít AB-i-re
    }
  }
}

```

```

Zenitszöget számít
Ha (Zenitszög > 70 °){következő iterációval folytat}
QBER-t számít
Teljes QBER-t számít
Ha (MuholdSuly * MuholdakSzama +
TeljesQBERSuly * TeljesQBER < Eredmeny){
    Eredmény = MuholdSuly * MuholdakSzama + TeljesQBERSuly * TeljesQBER
}
}
Ha (műholdak száma == 2){
    For (i = 0 To AB){
        Föld-űr csatornahosszt számít i-re
        Zenitszöget számít
        Ha (Zenitszög > 70 °){Következő iterációval folytat}
        QBER-t számít
        For(j = i+1 To AB){
            Űr-űr1 csatornahosszt számít j-i-re
            Ha (Űr-űr1 csatornahossz > MaxCsatornahossz){
                Következő iterációval folytat
            }
            QBER-t számít
            Űr-Föld csatornahosszt számít AB-j-re
            Zenitszöget számít
            Ha (Zenitszög > 70 °){Következő iterációval folytat}
            QBER-t számít
            Teljes QBER-t számít
            Ha (MuholdSuly * MuholdakSzama +
            TeljesQBERSuly * TeljesQBER < Eredmeny){
                Eredmény = MuholdSuly * MuholdakSzama + TeljesQBERSuly *
                TeljesQBER
            }
        }
    }
}
Ha (műholdak száma == 3){
    For (i = 0 To AB){
        Föld-űr csatornahosszt számít i-re
        Zenitszöget számít
        Ha (Zenitszög > 70 °){Következő iterációval folytat}
        QBER-t számít
        For(j = i+1 To AB){
            Űr-űr1 csatornahosszt számít j-i-re
            Ha (Űr-űr1 csatornahossz > MaxCsatornahossz){
                Következő iterációval folytat
            }
            QBER-t számít
            For(k = j+1 To AB){
                Űr-űr2 csatornahosszt számít k-j-re
                Ha (Űr-űr2 csatornahossz > MaxCsatornahossz){
                    Következő iterációval folytat
                }
                QBER-t számít
                Űr-Föld csatornahosszt számít AB-k-ra
                Zenitszöget számít
                Ha (Zenitszög > 70 °){Következő iterációval folytat}
                QBER-t számít
            }
        }
    }
}

```

```

        Teljes QBER-t számít
        Ha (MuholdSuly * MuholdakSzama +
        TeljesQBERSuly * TeljesQBER < Eredmeny){
        Eredmeny = MuholdSuly * MuholdakSzama + TeljesQBERSuly *
        TeljesQBER
        }
    }
}

```

A program ez alapján határozza meg az Eredmény nevű változó minimumát. Ezen kívül, amikor az Eredmény változó új értéket kap, akkor eltárolódik a műholdak száma, a teljes útvonalra vonatkozó QBER, a Föld-űr csatorna QBER értéke, az űr-Föld csatorna QBER értéke és az űr-űr csatornák QBER értékei, amelyek nyilván csak kettő vagy több műhold esetén léteznek. Az így kapott eredményeket jeleníti meg a program, amely a 12. ábrán látható. Az értékek értelmezéséhez meg kell jegyezni, hogy a kommunikációs útvonalon minden műhold rendelkezésre állt az igénybevétel teljes időtartama alatt.

Eredmények:	
Teljes QBER:	0,9617
QBER (uplink):	0,776
QBER (1. űr-űr csatorna):	0,1216
QBER (2. űr-űr csatorna):	0,1307
QBER (downlink):	0,776
Szükséges műholdak száma:	3

12. ábra - Műholdak pozicionálásának eredményei

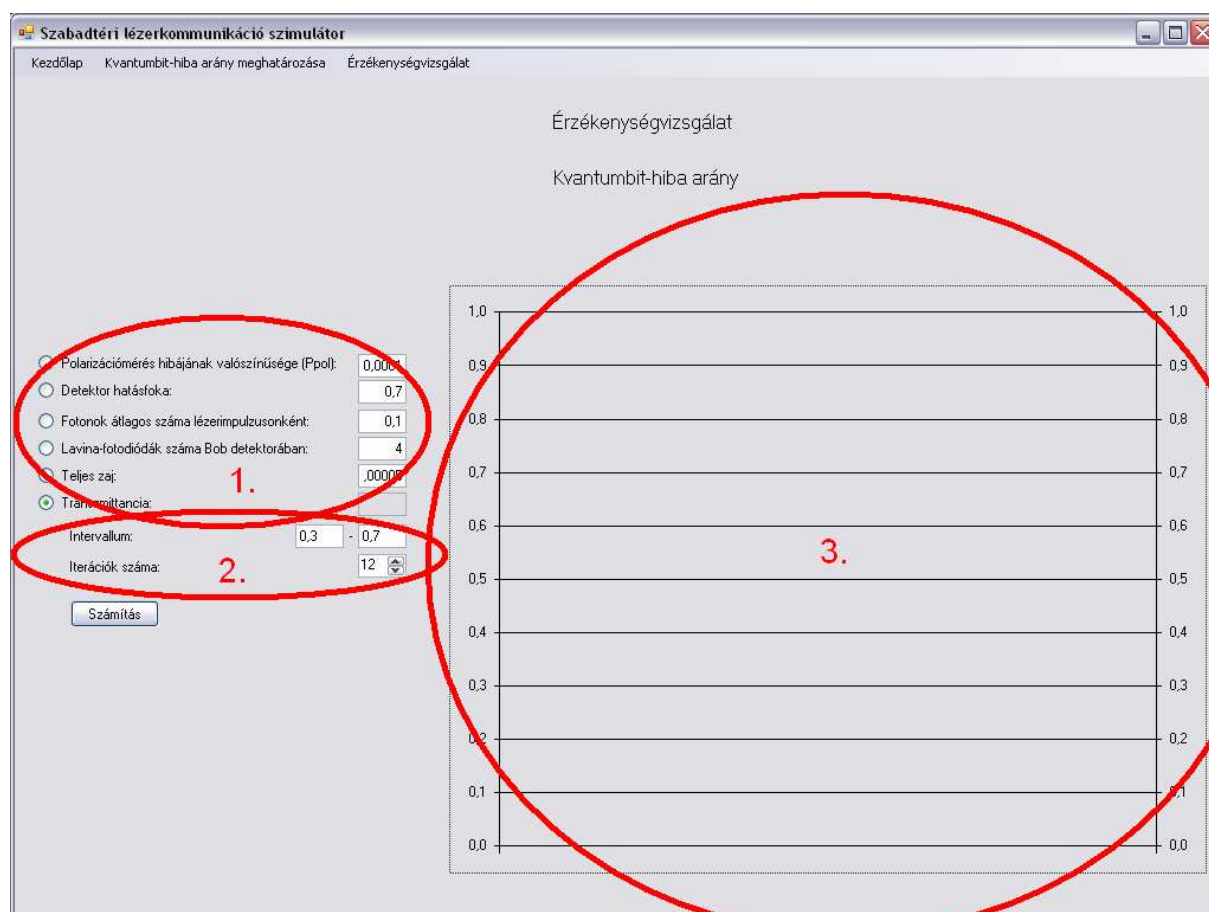
4.4. Érzékenységvizsgálat

Az érzékenységvizsgálat funkcióban a program QBER számításához és a transzmittancia meghatározásához használt képleteket vizsgálhatjuk olyan formában, hogy egy adott bemeneti paramétert értékét változtatása milyen változást eredményez a képlet eredményében. Ebben a szcenárióban a 4. táblázatban összefoglalva láthatók a program által vizsgálható függvények és a hozzájuk tartozó bemeneti paraméterek.

Függvények	Bemeneti paraméterek
Nyalábszélesedés vákuumban	Csatornahossz, hullámhossz, aperturaátmérő
Dinamikus veszteségek	Teljes szórás, tükrösugár
Teljes szórás	Célzási szöghiba, nyalábsugár
Turbulenciaerősség	Tengerszint feletti magasság, szélsébség
Kvantumbit-hiba arány	Polarizációmérés hibájának valószínűsége, detektor hatásfoka, fotonok átlagos száma lézerimpulzusonként, lavina fotodiódák száma Bob detektorában, teljes zaj, transzmittancia

4. táblázat - Érzékenységvizsgálat függvényei és bemeneti paraméterei

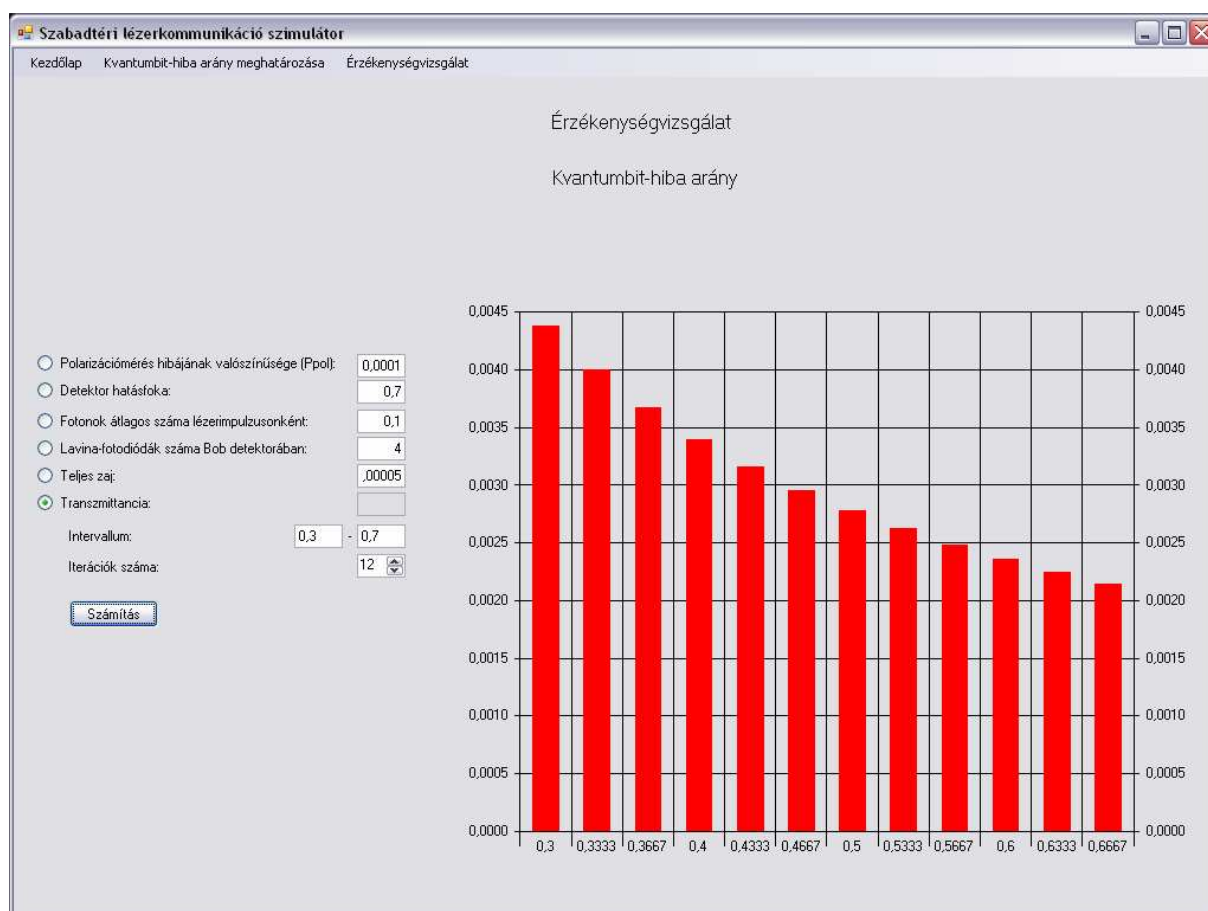
Mivel a program felhasználói felületén minden függvény esetében ugyanazzal az elrendezéssel jelennek meg a képi elemek ezért csak egy példán keresztül mutatom be a működést. Minden vizsgálandó függvény felületéhez legegyszerűbben az „Érzékenységvizsgálat” menüpontból, az adott függvény nevét kiválasztva juthatunk el a megfelelő oldalra. A Kvantumbit-hiba arány kiválasztása esetén a 13. ábrán látható kép jelenik meg.



13. ábra – Kvantumbit-hiba arány érzékenységvizsgálatának felhasználói felülete vizsgálat előtt

Az 1. számmal jelölt területen találhatók a bemeneti paraméterek. Vizsgálatot mind-egyikre végre lehet hajtani, amelyiket kiválasztjuk azt a megfelelő rádiógombbal kell kijelölni. Az összes többi paraméter mellett található beviteli mezőben szükséges megadni az értékeket, amelyekkel számolni fog a program. Miután kiválasztottuk a vizsgálandó változót, a 2.

számmal jelzett mezőben meg kell adni a változó intervallumát és az iterációk számát, vagyis azt, hogy mekkora értéktartományra vizsgálja a program a kiválasztott paraméter különböző értékeit, valamint, hogy mennyi vizsgálatot végezzen. A 3. számmal jelzett területen jeleníti meg a program a megfelelő képletből számított eredményeket oszlopdiagram formájában. Minden érték beállítása után a „Számítás” gombbal indítható a sorozatos végrehajtás, miközben a vizsgált változó értékét mindig a megfelelő értékkel növeli a program. Az eredményként meghatározott értékek és az ezek alapján megjelenített oszlopdiagram a 14. ábrán láthatók.



14. ábra - Kvantumbit-hiba arány érzékenységvizsgálatának felhasználói felülete vizsgálat után

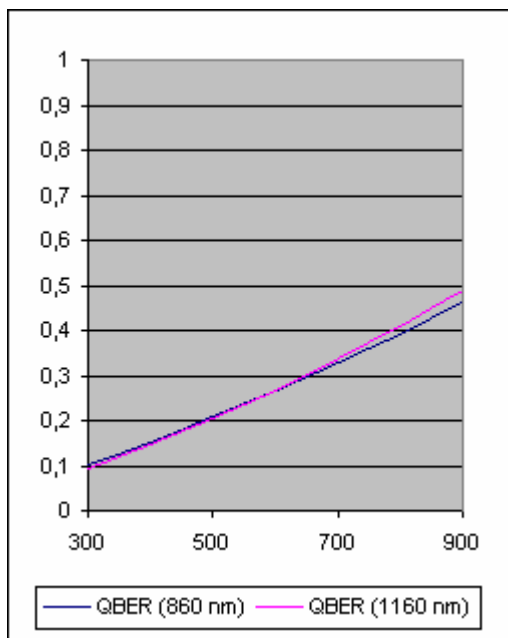
5. Eredmények

Ebben a fejezetben a program által számított QBER értékek alakulását mutatom be kiemelve a Föld légkörében található befolyásoló tényezőket évszak és időjárás szerint. Ezen kívül külön figyelmet fordítok a 860 nanométeres és az 1160 nanométeres lézernyaláb összehasonlítására.

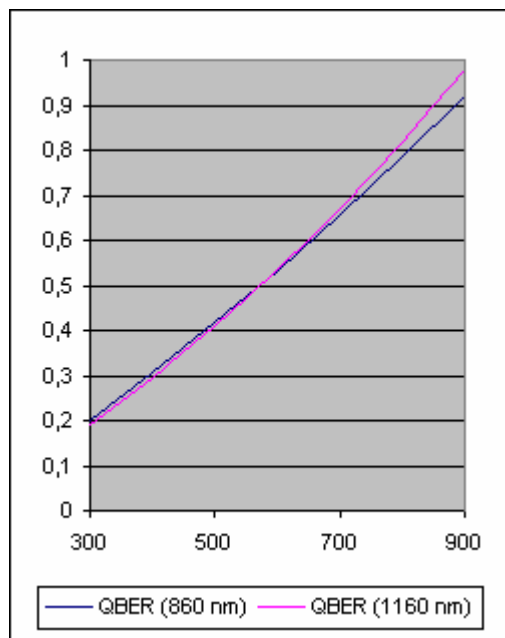
5.1. Lézer hullámhossz

A lézer hullámhosszára vonatkozó vizsgálatban a mérsékelt égöv tulajdonságait vettem figyelembe. Minden esetben egy Földi állomás és egy műhold közötti csatorna QBER értékeit határoztam meg úgy, hogy a műholdpálya magasságát 300 kilométértől 900 kilométerig változtattam és 30°-os zenitszöggel számolt a program. A 860 nanométeres és az 1160 nanométeres lézer használatából adódó QBER értékek figyelhetők meg az évszak és az időjárás befolyásolásával.

A 15. ábrán látható a nyári, tiszta időben történő használat eredménye. A QBER érték 0,1-től közel 0,5-ig terjed, de a legérdekesebb tulajdonság, hogy kb. 500 kilométeres magasságig az 1160 nanométeres lézer, felette pedig a 860 nanométeres eredményez alacsonyabb QBER értéket. A 16. ábrán nyári évszakban és ködös időben történő alkalmazás eredménye látható. A két görbe egymás keresztezése itt is jelen van, de a legnagyobb különbség a tiszta idő hatásához képest a közel kétszeresére emelkedett QBER.



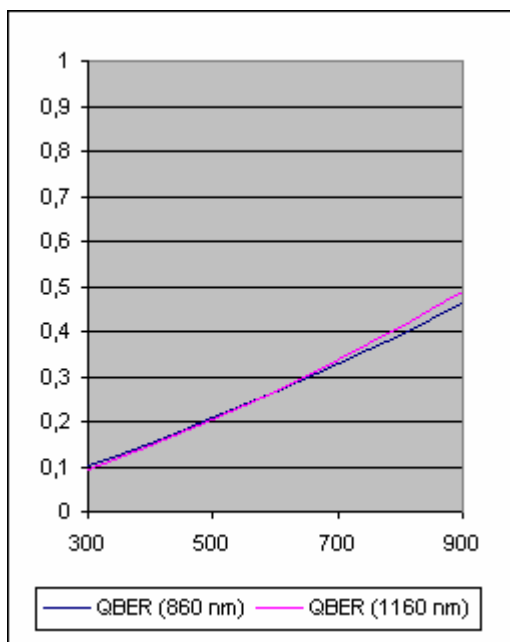
15. ábra – QBER értékek nyáron, tiszta időben



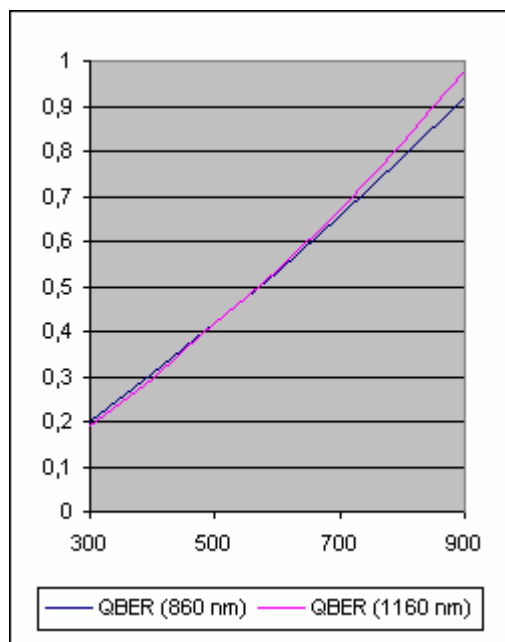
16. ábra - QBER értékek nyáron, ködös időben

A 17. ábrán a tiszta időbeni téli használat eredménye figyelhető meg. Az évszak változása alig észrevehető különbséggel jelenik meg a különböző magasságokra értelmezett QBER

értékekben. A 18. ábrán látható a téli és ködös időben történő alkalmazás eredménye. A tiszta időhöz hasonlóan az évszak változása itt is minimális hatással van a végeredményre.



17. ábra - QBER értékek télen, tiszta időben

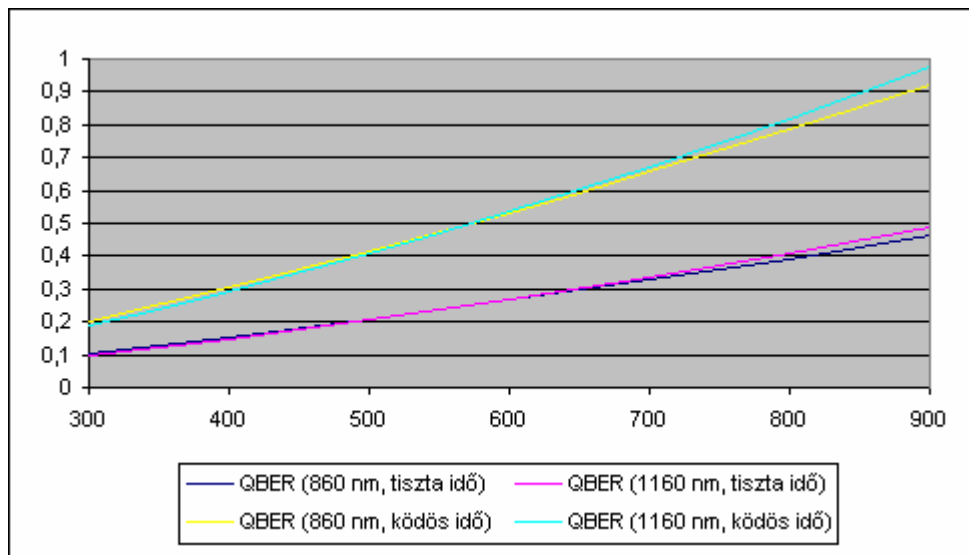


18. ábra - QBER értékek télen, ködös időben

Megfigyelhető, hogy a különböző hullámhosszal rendelkező lézerek QBER értékei csak kis mértékben függenek az évszaktól, és jelentős mértékben függenek az időjárástól. Mind a négy vizsgált esetben észrevehető, hogy az 500-600 kilométeres magasságig az 1160 nanométeres lézer eredményez alacsonyabb QBER értéket és felette a 860 nanométerest ajánlatosabb használni.

5.2. Időjárás hatása

A 19. ábrán láthatók összefoglalva a nyári évszakban alkalmazott 860 nanométeres és az 1160 nanométeres lézerből származó QBER értékek különböző műholdpálya magasságokra és különböző időjárási tényezőkre. A legnagyobb hatást a tiszta és a ködös idő különbsége idézi elő.



19. ábra - Hullámhossz és időjárás szerinti összehasonlítás nyári évszakban

5.3. Távolság hatása

Ebben az alfejezetben a program műhold-pozicionáló funkciójára alkalmazott példák eredményeit mutatom be. Valós városok között zajló kommunikációról van szó, a küldő minden esetben a francia Puynormand város, a fogadó pedig Peking, Portland, Fokváros, Perth és Mendoza városok. A QBER értékét mindig csak két város közötti útvonalra kell értelmezni. A program végeredményként a két város távolságától, műhold súlyozási értékétől és a QBER súlyozási értékétől függő Teljes QBER értéket és az ehhez szükséges műholdak számát adja. Az 5. táblázatban látható eredmények mérsékelt égöv, nyári évszak, tiszta idő, valamint 700 kilométeres műholdpálya magasság alkalmazásával jöttek létre.

Fogadó	Távolság (km)	Műhold súlyozási értéke	QBER súlyozási értéke	Teljes QBER	Szükséges műholdak száma
Peking	8645	2	8	0,6904	2
Portland	8484	2	8	0,6805	2
Fokváros	8969	2	8	0,5599	3
Perth	14397	2	8	0,8305	3
Mendoza	11092	2	8	0,6625	3
Peking	8645	0	1	0,5449	3
Portland	8484	0	1	0,5402	3
Fokváros	8969	0	1	0,5599	3
Perth	14397	0	1	0,8305	3
Mendoza	11092	0	1	0,6625	3
Peking	8645	1	0	0,9234	2
Portland	8484	1	0	0,994	2
Fokváros	8969	1	0	0,7388	3
Perth	14397	1	0	0,9825	3
Mendoza	11092	1	0	0,7806	3

5. táblázat - Műholdak pozicionálása funkcióra végrehajtott példa eredményei 700 kilométeres műholdpálya magasság esetén

Látható, hogy a küldő és a fogadó közötti távolság nagymértékben befolyásolja a QBER értéket. A 700 kilométeres műholdpályán történő alkalmazás geometriailag kivitelezhető 70°-ra maximalizált zenitszöggel és olyan űr-űr csatornákkal, amelyen nem haladnak keresztül a Föld légkörén. A probléma a QBER értékben jelenik meg. A jelen esetben használt paraméterekkel történt számítások szerint mind az öt városra végrehajtott vizsgálat azt mutatja, hogy az időegységre eső összes bitből több mint a fele hibás, vagyis valós kommunikációban ez nem lenne járható út.

Megfigyelhető, hogy kis távolságok esetén viszonylag alacsony QBER értéket kapunk, viszont ehhez a 700 kilométeres műholdpálya magasság feleslegessé válik. Ha csak 330 kilométeres magasságot veszünk – amelyen a Nemzetközi Űrállomásnak is kering – a 6. táblázatban leírtaknak megfelelően jobb QBER eredményt kapunk, ha a küldő és a fogadó közötti távolság legfeljebb 9000 kilométer körüli.

Fogadó	Távolság (km)	Műhold súlyozási értéke	QBER súlyozási értéke	Teljes QBER	Szükséges műholdak száma
Peking	8645	2	8	0,4758	2
Portland	8484	2	8	0,4616	3
Fokváros	8969	2	8	0,49	3
Perth	14397	2	8	-	-
Mendoza	11092	2	8	-	-
Peking	8645	0	1	0,4758	3
Portland	8484	0	1	0,4616	3
Fokváros	8969	0	1	0,49	3
Perth	14397	0	1	-	-
Mendoza	11092	0	1	-	-
Peking	8645	1	0	0,4824	3
Portland	8484	1	0	0,4712	3
Fokváros	8969	1	0	0,4943	3
Perth	14397	1	0	-	-
Mendoza	11092	1	0	-	-

6. táblázat - Műholdak pozicionálása funkcióra végrehajtott példa eredményei 330 kilométeres műholdpálya magasság esetén

Az eredmények alapján 11000 kilométeres, vagy annál nagyobb küldő-fogadó távolság esetén a kommunikáció három műholddal is megvalósíthatatlan lenne, mivel a lézernyaláb vagy keresztülhaladna a Föld légkörén, ami további QBER növekedést eredményezne, vagy a műholdak a Föld által takarásba kerülnének. Összességében a vizsgálat szerint, ha a küldő és a fogadó között a Föld felszínén legfeljebb 9000 kilométer a távolság, akkor a 330 kilométeres műholdpálya magasság alkalmazásával megvalósított kommunikációban az elküldött bitekből időegységenként kevesebb, mint a fele lesz hibás.

6. Összefoglalás

Dolgozatomban műholdas lézerkommunikációval foglalkoztam, ezen belül a légköri hatások vizsgálatával. A megfelelő szintű elméleti háttér megismerése után terveztem és fejlesztettem egy szimulációs szoftvert, amely a különböző használati esetekben megnyilvánuló kvantumbit-hiba arány számításán túl képes összetett fizikai képletek érzékenységvizsgálatára, valamint valós Földi városok között virtuális kommunikációs útvonal tervezésére a felhasználó által megszabott paraméterek és fontosnak tartott szempontok figyelembevételével. A program segítségével vizsgálatot hajtottam végre, amelyből kimutattam, hogy milyen hatással vannak a környezeti, időjárási tényezők a kvantumbit-hiba arány értékének alakulására. Ezen kívül a fejlesztett alkalmazás segítségével kimutattam, hogy valós városok közötti kommunikációs csatornákat adott szempontok függvényében milyen feltételekkel lehet megvalósítani.

Fontosabb rövidítések és jelölések

LEO	alacsony Föld körüli pálya (Low Earth Orbit)
QBER	kvantum-bithiba arány (Quantum Bit Error Rate)

- P_{pol} : a polarizációmérés hibájának valószínűsége
- μ : a detektor hatásfoka, amelynek alapértelmezett értéke 0,7
- P_{dark} : a sötétzaj, ami a detektor saját zajából és a külső háttérzaj összegeként áll elő. A detektor saját zaja alapértelmezetten $5 \cdot 10^{-6}$, a háttérzaj pedig $2 \cdot 10^{-4}$.
- η : az egyes lézerimpulzusokban a fotonok átlagos száma, amelynek alapértelmezett értéke 0,1
- n : Bob detektorában a lavina-fotodiódák száma, alapértelmezett értéke 4
- τ_{link} : a csatorna teljes transzmittanciája

Köszönetnyilvánítás

A munkám folyamán a különböző fizikai paraméterek, képletek megértésében, illetve ezek megfelelő alkalmazásában nagy segítséget nyújtott Galambos Máté, akinek ezúton is szeretnék köszönetet mondani.

Irodalomjegyzék

- [1] W7FTT <http://www.w7ftt.net/gopex1.html> (Utolsó látogatás: 2011. április 6.)
- [2] Space.com <http://www.space.com/1900-record-set-space-laser-communication.html> (Utolsó látogatás: 2011. április 6.)
- [3] ScienceDaily <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/05/080513104004.htm> (Utolsó látogatás: 2011. április 6.)
- [5] Galambos Máté, Műholdas kommunikáció modellezése és vizsgálata kvantuminformatikai alkalmazásokhoz (BME, 2009)
- [6] Bacsárdi László, Galambos Máté, Imre Sándor, Kvantumcsatorna a műhold-Föld és a műhold-műhold kommunikációban., HÍRADÁSTECHNIKA LXV:(3-4.) pp. 23-29. (2010)
- [7] S. Imre, B. Ferenc, 'Quantum Computing and Communications: An Engineering Approach', (Wiley, 2005)