

KURILLA Boldizsár  
[kurilla.boldizsar@gmail.com](mailto:kurilla.boldizsar@gmail.com)

## LÉZERES KOMMUNIKÁCIÓT BEFOLYÁSOLÓ LÉGKÖRI TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓS MÓDSZERREL

### *Absztrakt*

*Jelen cikk egy cikksorozat második része, mely egy sor újabb vizsgálatot mutat be a légkör befolyásoló tényezőivel kapcsolatban a lézerfény terjedésére vonatkozólag és egyben egy lehetséges eljárásba ad betekintést a nagy távolságban történő szimpla fotonos kommunikációt illetően. A cikksorozat első része a lézerek alapjaiba és a lézeres kommunikációba adott betekintést, illetve bemutatta a védett kommunikáció vizsgálata érdekében a nemcsomósodó fotonnyaláb<sup>1</sup> kísérleti megvalósításának hátterét. E cikk bemutatja a szerző korábbi törekvéseit, mely a lézeres kommunikációs eljárásnak egy szimulációs programmal kiértékelt eredményeit ismerteti és betekintést ad egy már korábban, igen nagy távolságból megvalósult kommunikációs kísérletbe is.*

*This is the second part of an article series, which presents several recent investigations of atmospheric factors influencing the propagation of laser light and gives insight into a possible procedure for single-photon based communication over a long distance. The first part of this article series introduced the basics of lasers and laser communication and it introduced the experimental implementation background of the antibunching photon based secure communication. This article presents the author's earlier efforts, including the results of a simulation-based evaluation of a laser communication method and an earlier completed laser communication experiment over a very long distance.*

**Kulcsszavak:** *lézer, refrakció, fényelhajlás, lézeres kommunikáció ~ laser, refraction, light, diffraction, laser communication*

---

<sup>1</sup> Lásd a Hadmérnök IX. Évfolyam 1. szám. 2014. március, pp. 217-229.  
[http://hadmernok.hu/141\\_21\\_kurillab.pdf](http://hadmernok.hu/141_21_kurillab.pdf)

## BEVEZETÉS

A lézerfizikai eszközöknek óriási tárháza van, melyeket nem csak laboratóriumi körülmények között alkalmaznak, hanem igen sok terepi alkalmazására is nyílik lehetőség. A legújabb lézertechnológiák és lézerfizikai eszközök különböző optikai továbbfejlesztéseinek alkalmazásával egy sor feladat, probléma lényegesen nagyobb hatékonysággal és korszerűbben megoldható terepen a kommunikációt és adatátvitelt illetően a szélsőségesebb környezetben is, mint ahogy azt sokan elképzelik. Az újdonságokat illetően ígéretes lépések várhatóak a még nem túl széles körben alkalmazott vezeték nélküli lézeres kommunikáció megvalósítására mobil, terepi alkalmazásokban.

A ma használt különböző lézerberendezések, lézeres távolságmérők és egyáltalán a fedélzeti tudományos lézerberendezések többségét tekintve a szélsőséges időjárás negatív hatással lehet a kísérleti alkalmazásukra, a berendezések optikájára, illetve elektronikájára.

A nyílt téri optikai adatátvitel vezeték nélküli biztonságos megvalósításához számos jelenséggel és problémával kell megküzdenünk, amelyek megoldása lényeges lépés lesz a jövő rendszerei közötti kommunikáció megvalósítását illetően. A terepen a lézerfénynek a dinamikusan változó légköri körülményekkel kell megbirkóznia, ellentétben a száloptikával, amely paramétereit adott körülmények között változatlanok. A száloptikai berendezéseket a kommunikáció megvalósításához az optikai szálak tulajdonságaihoz tervezik, míg a nyílt téri kommunikáció megvalósításához a kommunikáció berendezéseinek elektronikáját és optikáját a levegőben történő fényterjedéshez kell optimalizálni.

A rendszer eredményességét több tényező is befolyásolja, mint például a hullámhossz, a nyaláb divergenciája, az adó és a vevő közötti távolság, a vevő optikai fénygyűjtő rendszerének átmérője, a detektor érzékenysége. Ugyanakkor fontosak a már említett időjárási tényezők is, melyek molekuláris abszorpciót, turbulenciát és szóródást is okoznak. A szabadtéri optikai átviteli rendszernek óriási előnye abban áll, hogy nem kell kábeleket lefektetni és nem befolyásolja a kommunikációt semmilyen elektromágneses külső zavaró tényező és gyorsan lehet telepíteni. Ebből az is következik, hogy illetéktelen személyek gyakorlatilag nem tudnak rádiós eljárással ráhangolódni és lehallgatni a kommunikációt.

A jelen cikk célja a terepen történő lézeres kommunikációt befolyásoló légköri tényezők vizsgálata. Az első részben a lézerfény légköri terjedését akadályozó tényezők vizsgálatára kerül sor, a második részben a lézeres kommunikáció alapjainak ismertetése után a nemcsomósodó fotonnyaláb fotonstatisztikai szimulálása és az ezt befolyásoló légköri tényezők bemutatására.

## A LÉZERFÉNY TERJEDÉSE A LÉGKÖRBE

A 20. század második felétől a lézerfizikai eszközök gyorsütemű fejlődése lehetővé tette a lézerberendezések olcsóbbá tételét és széleskörű elterjedését. A berendezések, fejlesztése során sikerült számos olyan optikai problémát kiküszöbölni, melyek addig gátolták a szabadtéri adattovábbítást. A fejlődésnek köszönhetően mára lehetővé vált az adatok légkörben való továbbítása, a rádióhullámok kiváltása. Ugyanakkor folytatni kell a különböző hullámhosszúságú és teljesítményű lézerfénynek az adott közegre gyakorolt hatását tanulmányozni, hogy még hatékonyabban védhessük ki a légkör okozta problémákat.

### A fény légkörben való terjedése

A fény légköri refrakcióját számos, szabad szemmel is megfigyelhető optikai jelenség igazolja. Ilyenek a teljes visszaverődés a különböző hőmérsékletű légrétegek közötti határfelületről, a

délibáb, és az égitestekről visszavert vagy onnan egyenesen sugárzott fény színeinek a változása. A légköri refrakcióra az egyik legismertebb jelenség az, amikor a Nap lenyugszik és a korong teljes eltűnése ellenére még mindig látjuk a Nap sugarait. A légkör törésmutatója és állapotváltozása között bonyolult függvénykapcsolat van. [1] Ahhoz, hogy megfelelő pontossággal tudjunk mérni és kommunikálni lézerefény segítségével, a geometriai optika alapos ismeretére van szükség. A természetben zajló folyamatok viszont roppant módon összetettek, ezért ezek modellezése differenciálegyenletekkel nem egyszerű feladat. „*Differenciálgeometriai módszerek felhasználásával levezethetők olyan egyenletek, megalkothatók olyan függvények, függvénykapcsolatok, amelyek esetenként kifejezőbbek és pontosabban írnak le egy jelenséget, vagy folyamatot. Ha erre nincs lehetőség, akkor mérések elvégzésével tapasztalati (empirikus) összefüggéseket kell alkotni.*” [1]

A magas hőmérsékletű égéstermék optikai sűrűsége jóval kisebb, mint a levegőé általában. A háttérből a képrögzítőbe érkező fénysugarak az alacsony sűrűségű térrészekben áthaladva, irányváltozást szenvednek. A gázelegy inhomogénné válik a turbulens áramlásoknak köszönhetően magas hőmérsékleten. Ebből az következik, hogy az onnan kilépő elemi fénysugarak nem lesznek párhuzamosak.[2] A gáz fényáteresztő képessége csökken így a háttérkép elmosódottá válik. Alacsonyabb hőmérsékletű, hősugárzó testek környezetében, vagy gázkéményből kiáramló égéstermék esetén is megfigyelhető ez a jelenség, amikor a levegő állapotjelzőinek nagymértékű lokális megváltozása következik be, viszonylag kis térfogatban. [1]

### **A gázok, illetve a levegő törésmutatójának változása hőmérsékletváltozás hatására**

A törésmutató megváltozása a természetben számos alkalommal megfigyelhető a különböző évszakokban. Elég, ha a hideg télre gondolunk, amikor a levegő optikai sűrűsége megnövekszik, vagy amikor a nyári forróság hatására délibáb figyelhető meg (teljes visszaverődés), azonnal feltűnhet az egyes fényforrások erősségének és tisztaságának megváltozása a saját szemünkből tekintve. A fény terjedési irányának megváltozása a Biot-Arago-Lorenz-, és Snellius-Descartes törvények segítségével írható le: [3], [4]

$$\frac{n_2 - 1}{n_1 - 1} = \frac{p_2}{p_1} * \frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (1)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (2)$$

ahol az első egyenletből az egyes közegekre vonatkozólag az  $n_2$ ,  $n_1$ - a különböző törésmutatókat,  $p_2$ ,  $p_1$ - a nyomásokat (Pa)  $T_1$ ,  $T_2$ - a hőmérsékletek (K), illetve  $\rho_1, \rho_2$ - a sűrűségeket ( $\text{kg/m}^3$ ) jelentik. A második egyenlet azt fejezi ki, hogy a beesési szög ( $\alpha$ ) szinuszának és a törési szög ( $\beta$ ) szinuszának aránya megegyezik a két közeg relatív törésmutatójával ( $n_2, n_1$ ).

Ezen egyenletekből levezethető az a differenciálfüggvény, amely pontosan leírja az inhomogén közegen áthaladó fénysugár szögeltérését.[1] Általában spektroszkópiai és metrológiai méréseket mindig légkörben végeznek, de a törésmutatóval kapcsolatos pontos mérésekhez elengedhetetlen a légkörben való hullámhossz összehasonlítása a vákuumban lévő hullámhosszal, melyet legegyszerűbben a  $\lambda_{\text{vákuum}} = n_{\text{levegő}}$  egyenlettel fejezhetünk ki. Annak érdekében, hogy ezt az átalakítást maximális pontossággal vigyük végbe, az  $n$  törésmutató ismeretére legalább  $1 \times 10^{-8}$  –os pontosságú szinten van szükség a mértékadó hullámhosszhoz viszonyítva. [5]

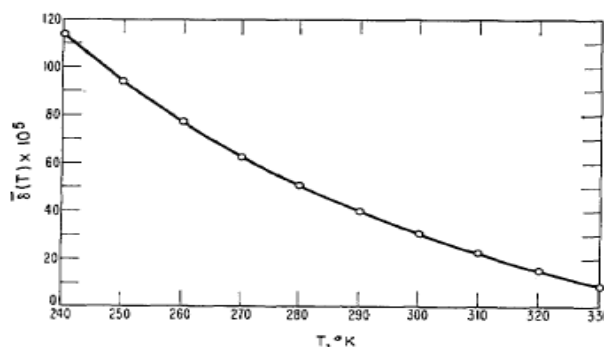
A gyakorlatban igen nehéz ellenőrizni az adott optikai mérési útvonal mentén a levegő teljes összetételét az éppen aktuális törésmutató meghatározását tekintve. A levegő törésmutatóját tekintve pontos képletek meghatározásához a nyomás, a hőmérséklet, a páratartalom és a

hullámhossz pontos ismeretére van szükség. A Lorentz-Lorenz egyenletből a különböző apoláros gázok keverékének törésmutatója a következő: [5]

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \sum_i R_i \rho_i \quad (3)$$

ahol:  $R_i$  - a specifikus refrakció  
 $\rho_i$  a gázkeverék  $i$ -edik komponensének részleges sűrűsége.

Az alábbi grafikon egy elfogadható általános állapotegyenlet paramétereiből megrajzolható a levegő minden egyes fontosabb összetevőinek figyelembe vételével. A görbeillesztés sokkal korábban számított termodinamikai adatok felhasználásával történt. A görbeillesztés kellően pontos lett, így a CO<sub>2</sub> mentes, száraz levegő, a vízpára és a szén-dioxid sűrűségeire kapott eredmények felhasználhatók a törésmutató becslésére  $3 \times 10^{-6}$ -os pontossággal standard körülményekhez viszonyítva 0 és 4 bar (0-400000 Pa) közötti nyomás alatt, 250 K és 320 K között, 0-100 % relatív páratartalomnál és 0-0,017 bar (0-1700 Pa) CO<sub>2</sub> parciális nyomásnál, feltételezve a Lorentz-Lorenz egyenlet érvényességét. [5]



**1. ábra.** Az ideális gázok viselkedésének eltérése száraz levegőnél a hőmérséklet függvényében, (0.4-4 bar nyomás között) [5]

A Földet övező légkör felmelegedését és lehülését közvetlenül befolyásolja a rövidhullámú napsugárzás, amelyre hatással van az ultraibolya sugárzás és ennek egy részét a sztratoszférikus ózon elnyeli. Továbbá hatással van rá a közeli infravörös sugárzás, melynek egy részét a troposzférikus víz, illetve vízgőz és a felhők, valamint a széndioxid nyeli el sávokban. A többi befolyásoló tényező a látható és infravörshöz közeli sugárzás azon része, amelyet a felszín elnyel, vagy visszaverődik az űrbe. Ugyanakkor nem szabad megfeledkeznünk a hosszuhullámú (infravörös) sugárzásról („hűtés”), amely a vízgőz-, szén-dioxid-, és ózonmolekulákról, felhőkről, földfelszínről visszaverődve kerül a levegőbe. [6][7]

Évszaktól és napszaktól függően eltérő mértékben mindig változik a levegőburok hőmérséklete. Fontos kiemelni, hogy a légkör sokkal kevesebb hőt nyel el egy nap leforgása alatt, mint a Föld felszíne. A földfelszín eltárolja az elnyelt hőmennyiséget, majd hőátadás és sugárzás útján újra a légkörbe juttatja. Ebből egyértelműen következik, hogy a Föld teljes és egy-egy lokális helyen lévő klímájának változására a földfelszín hőelnyelő képessége hatással van. A magasabban lévő légrétegek sokkal lassabban melegednek fel. Mivel a melegebb levegőnek kisebb a sűrűsége, emelkedni fog és kellő magasságban újra lehül. Légörvények kialakulásához vezet a különböző magasságokban lévő légrétegek részecskéinek a keveredése, így természetes körfolyamat alakul ki. A függőleges hőmérsékleti gradienssel kifejezhető a függőlegesen mért hőmérsékletváltozás. [8]

A hőmérséklet gradiens a légkör statikus egyensúlyi differenciál egyenletéből határozható meg. Ez az egyenlet a következő: [9]

$$\frac{c_p}{A} \cdot \Delta t = -g\Delta z \quad (4)$$

ahol:  $c_p = 1,0003345 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$ , a levegő fajhője állandó nyomás mellett,  
 $A = 9,99915 \cdot 10^{-4} \text{ Js}^2/\text{cm}^2\text{g}$  a termikus egyenérték,  
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  (Átlagosan vesszük ennyinek, de a Föld adott területein ez változó),  
 $\Delta t$  - a hőmérsékletkülönbség,  $^\circ\text{C}$ -ban,  
 $\Delta z$  - szintkülönbség  $m$ -ben.

A (4) differencia egyenletet megoldva és a behelyettesítéseket elvégezve, a hőmérséklet gradienst megadó, összefüggést kapjuk: [9]

$$\frac{\Delta t}{\Delta z} = -\frac{A \cdot g}{c_p} = \frac{2,389 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 \cdot 10^{-2}}{0,239} = -0,974 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m} \quad (5)$$

A gyakorlatban a hőmérsékleti gradiens adiabatikus értéke megközelítően  $-1^\circ\text{C}/100\text{m}$ . Ha a hőmérséklet csökkenése kisebb lesz a magasság növekedésével, mint  $1^\circ\text{C}/100\text{m}$ , akkor a légkörben stabil egyensúlyi állapot áll be. Ha a hőmérséklet csökkenése meghaladja az  $1^\circ\text{C}/100\text{m}$ -t a magasság növekedésével, akkor a felfelé áramló légmozgás felgyorsul. Ez az instabil egyensúlyi állapotnak egy kísérő jelensége. Felszálló légáramlatok esetén a hőmérsékleti gradiens negatív és a minimumot körülbelül dél tájban éri el. A légszennyezésnek és a klímaváltozásnak köszönhetően a hőmérsékleti gradiens folyamatos csökkenése figyelhető meg. Ennek a mértéke természetesen függ a légkör rétegződésétől.

## A páratartalom, mint befolyásoló tényező

A lézerteljesítmény légkörben való terjedésének irányát és mértékét nem csak a hőmérséklet befolyásolja, hanem a légkör páratartalma is. A lézerteljesítmény légkörön keresztül történő csillapítását az exponenciális Beers-Lambert törvény írja le:

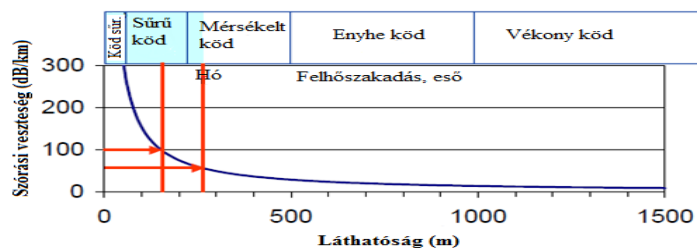
$$\tau(R) = \frac{P(R)}{P(0)} = e^{-\sigma R}, \quad [10] \quad (6)$$

ahol:  $\tau(R)$  = átlátszóság  $R$  távolságban  
 $P(R)$  = lézer teljesítménye  $R$  távolságban  
 $P(0)$  = lézer teljesítménye a forráspontban  
 $\sigma$  = csillapítás, vagy teljes kioltási együttható

Tipikus csillapítási együtthatók:

Tiszta levegő = 0.1 (0.43 dB/km);  
Pára = 1 (4.3 dB/km)  
Köd = 10 (43 dB/km)

A 2. ábrán egy 785 nm hullámhosszú lézerteljesítmény terjedését láthatjuk különböző páratartalmi viszonyok esetén. Az alsó grafikon mutatja a légköri elnyelés mennyiségét a láthatóság függvényében. Tipikus szabadtéri lézeres kommunikációs rendszerek 30-50 dB-s légköri csillapítást mutatnak 500 méteres távolságban, ami megfelel 60-100 dB/km-es csillapítás kezelésének. Ilyen rövid távolságban történő kommunikációban időjárás szempontjából leginkább a köd és a havazás tud komolyabb problémákat okozni.



**2. ábra.** A légköri pára hatása a lézerteljesítmény terjedésére a láthatóság függvényében [10]

## A légkör hatásai a lézeres kommunikációra

Fontos tény, hogy a fény hullámhosszának a függvényében változik a levegő törésmutatója és ezt egy korrekciós tényező segítségével lehet figyelembe venni.

A számítások pontosságát erősen befolyásolhatja a levegőben levő pára fénytörési együtthatója, ezért fontos egy korrekciós érték bevezetése, melyre annak idején Lorentz tett javaslatot. Vízgőz esetében ez az érték:  $\frac{-4,04 \cdot e}{760} \cdot 10^{-4}$ ,

ahol  $e$  a levegő páratartalma Hg mm-ben. A fénytörési együttható pára esetén:  $n_v=1,0002500$ . Szén-dioxid fénytörési együtthatója esetén a korrekciós tényezőt leíró összefüggés már Figyelembe véve azt, hogy a szén-dioxidnak is van saját fénytörési mutatója, a javasolt korrekciós tényezőt leíró összefüggés a következő:  $\frac{+1,6 \cdot k \cdot B}{101,32472} \cdot 10^{-9}$ ,

ahol  $k$  a légköri szén-dioxid százalékos mennyisége és  $B$  a légnyomás Hg mm-ben. Ezek az összefüggések csak  $\lambda=556\text{nm}$  hullámhosszra érvényesek, mely hullámhossz a spektrumon az emberi szem csúcserzékenységen van. [9]

A közegethatárok komplex értelmezése fontos feladat, mert dualitása egy jelen lévő befolyásoló tényező, hisz nincsenek egyértelműen éles határok a légkörben, ahol pontosan meghúzzhatjuk a határvonalat az egyes törésmutatójú rétegek között. Az 1. táblázatban két különböző hullámhosszú lézersugár fényvesztését figyelhetjük meg különböző légrétegeken való áthaladása során.

Láthatóság (km)	dB/km 785 nm	dB/km 1550 nm	Időjárás
0.05	315	272	Ködös
0.2	75	60	
0.5	29	21	
1	14	9	Pára
2	7	4	
4	3	2	
10	1	0.4	Tiszta
23	0.5	0.2	

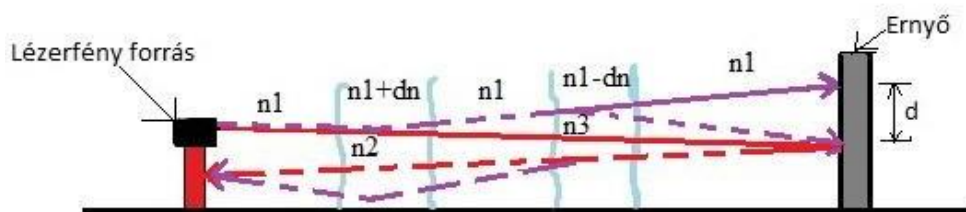
**1. táblázat.** Atmoszférikus veszteségek a láthatóság függvényében 785 és 1550 nm-re számítva [10]

Viszonylag alacsony költségekkel és egyszerű eszközökkel, szabadtéri mérések során vizsgálható a lézertér légtérben való terjedése. Ha veszünk egy ernyőt és egy megfelelő fényforrást, akkor kimutatható a fény légköri refrakciója. A fényfolt megfigyelhetősége érdekében célszerű lézertér forrást használni. Nagyobb távolságok esetén ez különösen fontos. Egy 30-40 mW teljesítményű félvezetőlézertérrel, több száz méter távolságra elhelyezett ernyőn jól kivehető fényfoltot lehet előállítani, amely a fény hullámhosszától függően lehet szabad szemmel látható, vagy láthatatlan. Ha megváltozik a levegő törésmutatója, akkor az ernyőn is meg fog változni a fényfolt helyzete a referenciaponthoz viszonyítva. [12]

Bizonyos esetekben annyira kicsi lehet a fényfolt helyzetének megváltozása, hogy megfelelő műszer nélkül nem lehet érzékelni. Megfelelően érzékeny mérőműszerrel mérhetőek a nagyon kis fényfolt eltolódások is, melyet természetesen célszerű automatizált módszerrel végrehajtani.

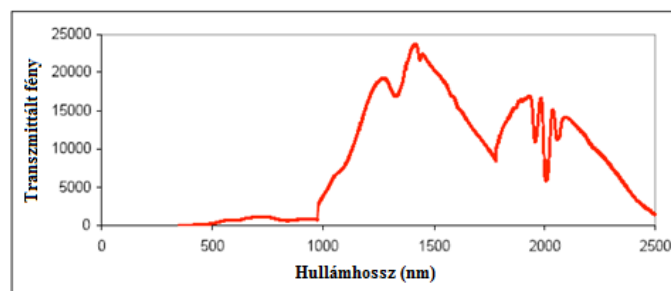
Az olyan állapotváltozások, mint a sűrűség, nyomás és hőmérséklet, a légköri fénytörést befolyásolják. A refrakció kimutatásához mindez azonban nem elég. Fontos, hogy a fényterjedés irányváltozása egy adott térrészben bekövetkezzen. Azonban más hasonló jelenség (mely szintén befolyásolja a fényterjedést) hatásának előjelhelyes összege megadja a fényfolt eltolódásának mértékét ( $d$ ). [12] Az arányosság mellett a légköri folyamatok egy előre meghatározott irányhoz viszonyítva, annak előjelére is hatással vannak. Ha a fényterjedés

görcületének iránya meghatározható, pályája ismert, akkor a mérés ebben az esetben eredményes lehet. Az eltolódás mértéke és a mérés pontossága elvileg arányosan növelhető az ernyő és a forrás közötti távolság növelésével. A forrást és az ernyőt összekötő szakasz mentén különböző légköri képződmények lehetnek, melyek előidézik a törésmutató megváltozását és ez befolyásolja az eltolódás mértékét. A fényfoltnak jóval nagyobb mértékű eltolódására számíthatunk, ha nagyobb távolságra elhelyezett mérővevő esetéről van szó. Ez kétségtelenül megkönnyíti a kiértékelést, de ha a fénysugár hosszú utat tesz meg a Föld légkörében (ami egy jellemzően nemlineárisan, inhomogén közeg), akkor a légköri állapotváltozások, turbulenciák a fény többszöri irányváltozását (refrakcióját) eredményezhetik. Ebből kifolyólag az a helyzet is kialakulhat, hogy a vétel helyén a fény irányváltozása egyáltalán nem lesz kimutatható, így téves következtetésekre is lehet számítani a mérés során kiértékelt adatok alapján. [12] Ennek egyik lehetséges esete az alábbi ábrán, a lila szaggatott vonallal van szemléltetve. A távolság növelésével a többszörös refrakciónak tesszük ki a fényt, így ennek eredményeképpen a mérési hiba is arányosan nő.



**3. ábra.** A szabadtéri mérés elve [12] Készítette: Csuka Antal

A lézerfény terjedése az infravörös tartományban valósulhat meg a legnagyobb távolságban, ha teljesen tiszta légkört veszünk ideális alapon. Természetesen a Föld légkörében számos „szennyezőanyag” van, mint például széndioxid. Az alábbi ábrán jól megfigyelhetjük, hogy körülbelül 1000 nm-es hullámhossz tartománytól kezdve a széndioxid igen jelentős mértékben engedi át a fényt és a transzmisszió 1437 nm-en a legnagyobb. A mérést egy 2,72 m hosszú CO<sub>2</sub> gáz cellában valósították meg. [13]



**4. ábra.** A széndioxid spektrális áteresztőképessége infravörös hullámhossz tartományban [13]

Mivel a légkörben nem csak széndioxid van, hanem más fényterjedést befolyásoló „szennyezőanyag” is, ezért a kommunikációhoz használatos lézerfényt mindenképpen célszerű 2,5  $\mu\text{m}$  hullámhossz tartomány alatt megválasztanunk nagy távolságok esetén. Az adott lézer divergenciája szintén egy fontos tényező, mely a mai optikai technológiákkal nagyon jól lecsökkenthető a nagyobb hatótávolságban történő kommunikáció megvalósításához.

## A LÉZERFIZIKAI ESZKÖZÖK TELEPÍTÉSI FELTÉTELEI A NYÍLT TÉRI KOMMUNIKÁCIÓ MEGVALÓSÍTÁSÁHOZ

Ebben a fejezetben ismertetem a lézeres kommunikáció alapjait és a nemcsomósodó fotonyaláb fotonstatisztikai szimulálását.

Nem csak a frekvenciasávok túltelítettsége, vagy az impulzusmodulált, kódolt adásmódok még kevésbé ismert élettani hatásai miatt egyre sürgetőbb új információtovábbításra alkalmas megoldások és eljárások kidolgozása, hanem ez ma a kommunikáció továbbfejlesztéséből fakadó igény is egyben. A szükséges védelmi intézkedések mellett ott ahol lehet, a vezetékes rendszerek mellett, *nagy kapacitású szabadtéri optikai adatátvitellel* az említett, jövőképet beárnyékoló problémák egy része megszüntethető. [11][14] A védelmi intézkedések alatt azokat az eljárásokat és műszaki megoldásokat értem, amelyekkel az optikai információs csatorna lehallgatása megakadályozható és a *lézerforrások* alkalmazásával együtt járó veszélyek kiküszöbölhetőek.

Korszerű kommunikációs eszközök nélkül a csapatok és a vezetési pontok közti információcsere elképzelhetetlen. Ott ahol automatikus kereső és lehallgató berendezések folyamatosan pásztázzák a rádiófrekvenciás tartományokat, az információvédelmet biztosító technikai eljárások jelentik esetenként az egyedüli megoldást és védelmet. A mai rádiórendszerek esetében kiforrott kódolási technikák biztosítják ezt, de az információtechnológia korábban említett gyorsütemű fejlődése miatt, egyáltalán nem kizárt, hogy új adat-, és információtovábbítási, védelmi eljárások, módszerek és eszközök kidolgozása válik szükségessé. A jövő információvédelmi és titkosítási eljárásának egyike lehet a „kvantum-kriptográfia”, [15] melynek célja az üzenetek titkosságának, védettségének és hitelességének biztosítása algoritmikus módszerekkel.[16] Gondoljunk az egyes fotonokkal történő információtovábbításra!

### A lézeres kommunikáció alapjai

Szabadtéri optikai adat- és információátvitel céljára a kis nyílásszögben sugárzó lézerek, infra-lézer források használhatók a legeredményesebben. Ennek oka az, hogy egy meghatározott teljesítménykülöbség fölül a lézerfény egészségkárosító hatása jelentős (rövid expozíció esetén is vakságot okozhat), másrészt azért, mert a rádióhullámokhoz hasonlóan a fény esetében is kialakulhat az interferencia, lebegés, ami zavaróan hat.[17]

Szabadtéri optikai adat-, és információátvitelre alkalmas eszközeink, időjárástól-, és a légköri állapotoktól függően, esetenként több tíz km távolság áthidalására is alkalmasak lehetnek, de a szakirodalmi források ennél nagyobb távolságon végrehajtott kísérletekről is beszámolnak.

Ahogy a bevezetőben már szó volt róla, a szabadtéri optikai adatátvitel alapelve hasonló a száloptikai átvitel elvéhez, a különbség abban van, hogy míg a nyílt téri kommunikáció berendezéseinek elektronikáját és optikáját a levegőben való fényterjedéshez, addig a száloptikai berendezéseket az optikai szálak tulajdonságaihoz optimalizálják. Jelen esetben fontos kiemelni, hogy az adó és vevő között nincs galvanikus összeköttetés. A nyílt téri optikai kommunikációs rendszernek az összekötendő két vagy több (A és B) végponton egy-egy lézerfejet, kültéri tápegységet, valamint beltéri hálózati egységet kell tartalmaznia. Az ilyen rendszer alkalmas számítógép hálózatok közötti egyidejű, akár nagy adatátviteli sebességű pont-pont összeköttetés létesítésére.

A szabadtéri lézeres kommunikáció megvalósításához elengedhetetlen az olyan szempontok figyelembe vétele is, mint például a szabad rálátás, a szilárd rögzítés, a tájolás és a pontos távolságmérés. Annak ellenére, hogy a vevő árnyékoló burkolat alatt foglal általában helyet, és fényszűrővel is el van látva, hogy a detektort védje a nem kívánt fényhatásoktól, a közvetlen



napfény telítésbe viszi a diódát, ami egy időre lehetetlené teszi a megfelelő működést. A Nap járásának köszönhetően előfordulhat, hogy az év bizonyos időszakában, a napok meghatározott óráiban a kommunikáció megbénul. Ez a probléma a lézerfejek megfelelő tájolásával a legtöbb esetben elkerülhető.

Pont-pont összeköttetésű szabadtéri optikai kommunikációs rendszerek, nagy hatótávolságú lézerfegyverek, lézeres célzó és irányzó eszközök, ballisztikai-, és geodéziai mérések mérőműszerei, műholdak és földfelszíni bázisállomások közti lézeres kapcsolatok csak néhány kiragadott példa mindazok közül, amelyek esetében az energiaátvitel határfokának növelése és stabilitásának a biztosítása elsődleges feladatnak tekinthető.

### **A nemcsomósodó fotonnyaláb előállításának kísérleti szimulálása**

Ami régóta ismert, hogy bizonyos fényforrásokból kilépő fotonok között kölcsönös összefüggés, úgynevezett korreláció van. Tehát a klasszikus fényforrásból kilépő fotonok párokban, úgynevezett csomókban érkeznek. Ha egy koherens fényforrást veszünk alapul (pl. a lézert), akkor ott a kilépő fotonok között nincs időbeli korreláció. A nemcsomósodó fotonnyaláb előállítására olyan fényforrást kell alkalmazni, ahol a fotonok nem párokban, de nem is rendezetlenül emittálódnak, hanem egymástól időben egyenletes távolságra érkeznek. Ennek megvalósítása egy elektronikusan vezérelt optikai késleltető egységgel lehetséges. Ennek az eljárásnak a legnagyobb előnye a kvantumtitkosításban rejlik.

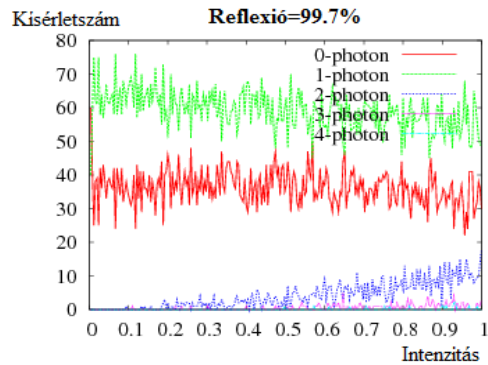
A késleltető optikai berendezés különböző optikai elemeinek reflexiós és transzmissziós értékeit egy szimulációs program segítségével beállíthatjuk. Az erre a kísérletre készített foton szimulációs program a fenti elrendezésnek megfelelően szimulálja, hogy hány foton lép ki a rendszerből egyszerre egy adott intenzitásnál és a felhasznált optikai elemek megfelelően beállított transzmisszióinak esetén.

Abból kell kiindulni, hogy összesen 25 ns-ot (programon belül változtatható mennyiség) tud a rendszer késleltetni, ezért felosztjuk ezt a 25 ns-ot 250 időablakra, azaz 100 ps-os szélességű cellákra, hogy a lezajló folyamatról minél pontosabb képünk legyen. Minden egyes időablakban meghatározhatjuk, hogy hány foton érkezzon, és ezt úgy tudjuk megvalósítani, hogy vesszük a 0 és 1 közötti intervallumot, amit felosztunk a Poisson-eloszlásnak megfelelő szakaszokra, valamint generálunk egy 0 és 1 közé eső véletlen számot. Ezután meghatározzuk, hogy a generált szám melyik szakaszba esik, magyarul hány foton jut az időablakba. Például, ha az intenzitás értéke  $\lambda=0,004=1/250$ , azaz 250 cellára maximum egy foton jut, és a generált szám értéke például 0,123 akkor az adott időablakban 0 foton van.

Az időablakok vizsgálata legkésőbb addig történik, amíg nullától különböző számot kapunk a fotonszámra. Az egyes ablakokban különböző ideig kell késleltetni, ami szerint különböző ágakra kell elküldeni a fotonokat, ezért minden egyes időablakhoz különböző áteresztő képesség tartozik (transzmisszió). Azonban feltételeznünk kell ezen elv működéséhez, hogy az egyes optikai elemek áteresztőképessége soha nem fogja elérni a 100%-os értéket. Ez ugyan szimulálható, de fizikailag ez megvalósíthatatlan. Ismételten generálhatunk véletlen számot 0 és 1 között mivel tudjuk, hogy az egyes időablakok esetén mekkora a végleges transzmisszió (0 és 1 között). Ezt össze lehet hasonlítani, hogy az említett áteresztőképességnél kisebb vagy nagyobb. Ha kisebb, akkor a foton áthalad, magyarul beleesik abba a szakaszba, ahol a fotonok áthaladnak. Ha nagyobb, akkor a foton elnyelődik. Előfordulhat, hogy a vizsgált időablakban akár több foton is érkezhethet. Ekkor mindegyikre külön végrehajtjuk ezt a vizsgálatot, ill. összehasonlítást. Az egész folyamatot a program az általunk beállított kísérletszámnak megfelelő alkalommal végzi el. Ezt érdekesebb minél magasabbra állítani, hogy pontosabb statisztikát kapjunk.

A következőkben néhány statisztikai eredményt mutatok be. A függvény az adott kísérletszámnak megfelelően kimutatja, hogy hány foton érkezését észleltük az intenzitás függvényében.

Ha a szimulációt lefuttatjuk a programmal úgy, hogy az optikai elemek egyes felületeinek transzmissziója és reflexiója (tükrök és nyalábosztók) egységesen 99.7 %, akkor 35% körüli a valószínűsége annak, hogy egyáltalán nem jön ki foton. Ugyanezt a szimulációt lefuttattuk 99.9%-os reflexiós és transzmissziós értékekkel is. Így már 65 %-ról 75 %-ra nőtt a rendszeren áthaladt egyes fotonok száma. Fizikailag ezt úgy tudjuk megvalósítani, hogy a kísérleti elrendezésben szereplő optikai elemekre antireflexiós réteget helyezünk párologtatással vagy az optikai illesztés módszerét alkalmazzuk.

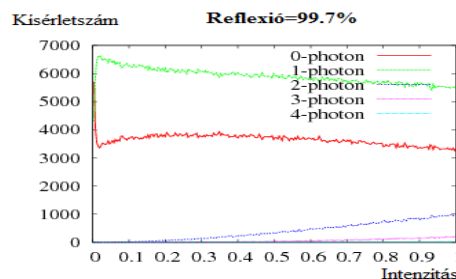


**5. ábra.** Fotonok érkezése az intenzitás függvényében adott kísérletszámnak megfelelően

Intenzitás	0foton	1foton	2foton	3foton	4foton
0.00392156862745	60	40	0	0	0
0.0078431372549	41	59	0	0	0
0.01176470588235	25	75	0	0	0
0.0156862745098	38	62	0	0	0
0.01960784313725	39	61	0	0	0
0.0235294117647	25	75	0	0	0
0.02745098039215	42	58	0	0	0
0.0313725490196	36	64	0	0	0
0.03529411764705	43	57	0	0	0
0.03921568627451	39	61	0	0	0
0.04313725490196	33	67	0	0	0
0.04705882352941	38	62	0	0	0

**2. táblázat.** A függvényhez tartozó fotonstatisztika

Ugyanílyan reflexiós beállításokkal sok ezres kísérletszám esetén az eredmény:



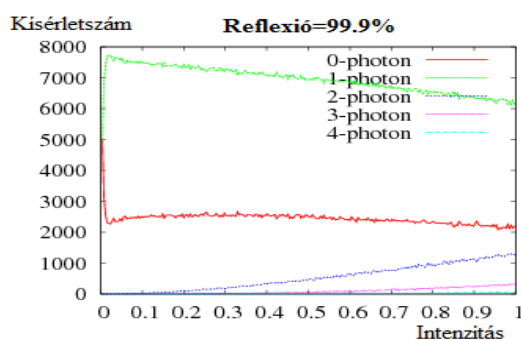
**6. ábra.** Fotonok érkezése az intenzitás függvényében adott kísérletszámnak megfelelően.

Jól megfigyelhetjük, hogy hétezeres kísérletszám körül már jóval pontosabb foton statisztikát kapunk.

Intenzitás	0foton	1foton	2foton	3foton	4foton
0.00392156862745	5700	4300	0	0	0
0.0078431372549	4046	5954	0	0	0
0.01176470588235	3537	6462	1	0	0
0.0156862745098	3410	6590	0	0	0
0.01960784313725	3356	6642	2	0	0
0.0235294117647	3438	6560	2	0	0
0.02745098039215	3530	6467	3	0	0
0.0313725490196	3501	6498	1	0	0
0.03529411764705	3476	6522	2	0	0
0.03921568627451	3502	6496	2	0	0
0.04313725490196	3611	6384	5	0	0
0.04705882352941	3496	6504	0	0	0

**3. táblázat.** A függvényhez tartozó fotonstatisztika

Most vizsgáljuk meg a statisztikát 99.9%-os reflexióval és transzmisszióval bíró optikai elemek esetén.



**7. ábra.** Fotonok érkezése az intenzitás függvényében adott kísérletszámunk megfelelően

Intenzitás	0foton	1foton	2foton	3foton	4foton
0.00392156862745	5010	4990	0	0	0
0.0078431372549	3127	6872	1	0	0
0.01176470588235	2557	7443	0	0	0
0.0156862745098	2302	7697	1	0	0
0.01960784313725	2286	7713	1	0	0
0.0235294117647	2266	7728	6	0	0
0.02745098039215	2352	7648	0	0	0
0.0313725490196	2447	7550	3	0	0
0.03529411764705	2340	7655	5	0	0
0.03921568627451	2350	7647	3	0	0
0.04313725490196	2357	7638	5	0	0
0.04705882352941	2436	7554	10	0	0

**4. táblázat.** A függvényhez tartozó fotonstatisztika

Mindezen eredményekből megállapítható, hogy nagyon magas szintű (99,9 %-os) reflexiónál az egyes fotonok aránya 75 % feletti. Ez az arány tovább javítható a levegő-üveg átmenetek számának csökkentésével.

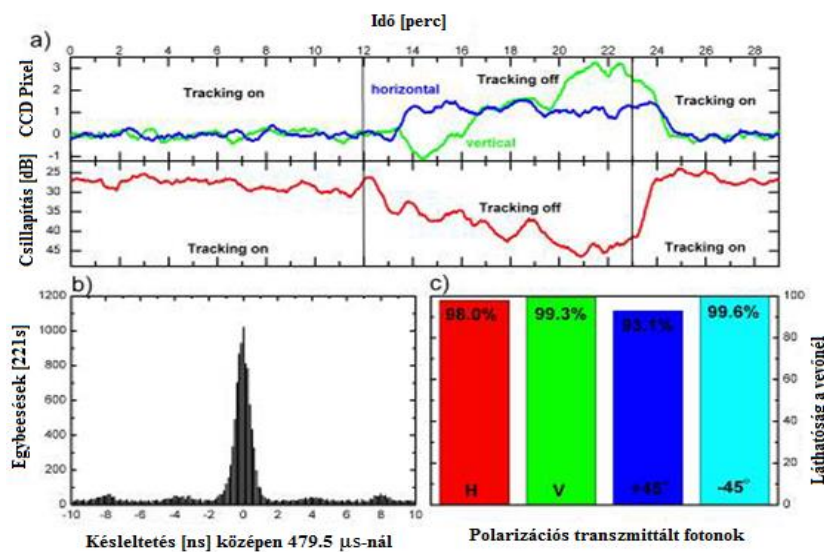
### Az egyes fotonok légkörben való terjedésének lehetséges irányvonalai

A kvantumkriptográfia jelenleg az egyik legígéretesebb technológiai eljárás az egyes fotonokkal történő információátvitelre. Egy korábban megvalósult kísérletben már bemutatták, hogy az egyes fotonokkal történő szabadtéri kommunikáció megvalósítható akár

több, mint 100 km-es távolságból is [21]. Ez a távolság több, mint egy teljes nagyságrenddel meghaladja az összes eddigi szabadtéri kísérletet és kihasználja a földi nyílt téri kommunikáció lehetséges határait. A távolság emellett demonstrálja a kvantum kommunikáció jövőbeni lehetőségét a Föld körül keringő objektumok között, mely magában foglalja az egyes műholdak, avagy a Nemzetközi Űrállomással történő kommunikációt is.

A kvantumelmélet azt mutatja, hogy a kvantumfennakadáson alapuló összefüggések tetszőleges távolságra fenntarthatók. Mindeddig a kvantummechanikának ezen jóslatát 13 km-es távolságra tudták ezelőtt igazolni szabadtéri légtéri összeköttetések révén polarizált fotonokkal. [18],[19],[20]

Az egyes fotonokkal történő kommunikációs kísérletet 100 km-es távolság felett a Kanári szigetek La Palma és Tenerife szigetein valósították meg, melyeken az egyes kommunikációs kísérleti berendezések egymástól pontosan 144 km-re helyezkedtek el. [21] A 8. ábra a kvantumkommunikáció szabadtéri megvalósításának teljes folyamatának jellemzését mutatja.



8. ábra. A kvantumkommunikációs útvonal teljes jellemzése [21]

#### Főbb megállapítások:

1. Az ábra egyrészt egy 808 nm-es tesztelő lézerek sugárának a teljesítményét mutatja, melyet Tenerife szigetén mértek. Másrészt az adó teleszkóp CCD kameráján mintázott nyomkövető lézerek az eltérést mutatja, mint az idő függvényét. Az átlagos mutató irányába lassú változások bekövetkezhetnek a légtéri hőmérsékleti változások hatására.
2. Az ábra az események eloszlásának egybeesését mutatja a két sziget között. A két detektálási helyszín között a repülési idő kb. 487  $\mu$ s. A tiszta csúcs a beérkező kevert fotonoknak köszönhetően jelenik meg az egybeesési időablak 0.8 ns-os időintervallumában. Az oldalsó csúcsok 4 ns-os periódussal jelennek meg a foton forrás pulzáló természetének köszönhetően (249 MHz).
3. Az ábra a láthatóságokat mutatja, mely eredményeket egy 808 nm-es polarizált tesztelő lézerek felhasználásával kaptak, amint azt a 144 km-es útvonalon átvettették. A polarizációt egy négy-csatornás polarizációs analízátorral mérték Tenerife szigetén 10 perces időintervallumban. A polarizáció kompenzáció után a fennmaradt láthatóság jelenik meg és az állandó. Ez azt mutatja, hogy a polarizáció sodródik, és a depolarizáló hatás jelen esetben elhanyagolható. [21]

A tudományos kísérlet megvalósításához polarizált foton párokat állítottak elő úgy, hogy nagy teljesítményű UV lézerrel pumpáltak  $\beta$ -bárium-borát kristályt. Az egyik foton helyileg La Palma szigetén mérték, míg a másikat egy 15 cm-es adóvevő lencsén keresztül továbbították 144 km-es távolságba egy 1 m átmérőjű tükör teleszkópba Tenerife szigetére. Az összekötő útvonalat egy Tenerife-ből La Palma-ba vetített 532 nm-es nyomkövető lézersugárral tartották aktívan stabil állapotba, melyet egy másik lencse lefókuszált egy CCD-re. A tudományos kísérlet megvalósításához szükség volt nyalábosztókra, fél-hullámlemezre és polarizációs nyalábosztókra.

## ÖSSZEGZÉS, KÖVETKEZTETÉSEK

Legyen szó természetes vagy koherens, azaz monokromatikus fényforrásról, de ezek érzékelésekor bekövetkező hibák és pontatlanságok a légkörben való kisebb-közepes távolságok esetén számtalan mérést figyelembe véve sok műszerben nem jelentenek súlyos mérési problémát.

Azonban a nagy pontosságú mérések esetében, ahol esetleg titkosított lézeres kommunikációt szeretnének megvalósítani és ahol a fény hullámhosszával, vagy a különböző elemi részecskék méretével összemérhető eltérések a mérési eredményeket nagyban meghamisítják, a pontosságnak nagyon nagy szerepe van.

A szimulációs számításokból megállapítottam, hogy 99,9 % reflexiónál az egyes fotonok aránya 75 % feletti. Az ennél jobb transzmisszióhoz csökkenteni kell a lézerfizikai eszközön belül a levegő-üveg átmenetek számát (optikai illesztéssel) vagy egy megadott hullámhosszra még jobb reflexió mentesítő réteget kell csináltatni.

A jelen cikk célja volt a lézeres kommunikációt befolyásoló légköri tényezők vizsgálata, a nemcsomósodó fotonnyaláb előállításának, mint szimpla fotonokkal történő lézeres kommunikációs eljárásnak kísérleti szimulálása és a szimpla fotonokkal, nagy távolságban történő kommunikációs kísérletbe való betekintés kínálata.

## Felhasznált irodalom

- [1] Csuka Antal: A fény szabadtéri terjedésének elméleti és gyakorlati vizsgálata, in Hadmérnök, VII. évfolyam 4.szám, pp 111, 2012 december  
[http://hadmernok.hu/2012\\_4\\_csuka.pdf](http://hadmernok.hu/2012_4_csuka.pdf), letöltés ideje: 2014.02. 25
- [2] E. Ngo Nyobe, E. Pemha: „Propagation of laser beam through a plane and free turbulent heated air flow: determination of the stochastic characteristics of the laser beam random direction and some experimental results”, Progress In Electromagnetics Research, Pier, 53, pp31-53, 2005
- [3] Dr. Grúber J.-Ifj. Szentmártony T: Gázdinamika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1952, pp 90-91
- [4] Dr. Ábrahám Gy.: Optika; Panem Kft kiadó Budapest, 1997; ISBN 963 545 144 X; p 26,29, 286, 292
- [5] James C. Owens: Optical Refractive Index of Air: Dependence on Pressure, Temperature and Composition, 1967
- [6] SZ.N.: [A légkör kémiája, www2.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/folia05.pdf](http://www2.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/folia05.pdf), letöltés ideje: 2014.04.14
- [7] Jonathan F. Schonfeld: The Theory of Compensated Laser Propagation through Strong Thermal Blooming URL:

- [http://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol05\\_no1/5.1.7.compensatedlaser.pdf](http://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol05_no1/5.1.7.compensatedlaser.pdf),  
letöltés ideje: 2014. 03.18
- [8] Csuka A: A Föld légkörének hatása a lézernyaláb terjedésére és a továbbított fénytjeljesítményre, Szolnoki Tudományos Közlemények XV., 2011. nov. 10.  
[http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Csuka\\_Antal.pdf](http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Csuka_Antal.pdf),  
ISSN2060-3002, 2012.07.01
- [9] K. Horváth: Investigation of refraction in the low atmosphere, Periodica Polytechnica, Vol.14, Technical University, Budapest, 1970 pp31-41
- [10] Isaac I. Kim, Bruce McArthur, and Eric Korevaar: Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications,
- [11] Phyliph Dykstra: Free Space Laser Communications,  
[http://www.powershow.com/view/1d90bc-Y2I3N/Free\\_Space\\_Laser\\_Communications\\_powerpoint\\_ppt\\_presentation](http://www.powershow.com/view/1d90bc-Y2I3N/Free_Space_Laser_Communications_powerpoint_ppt_presentation),  
letöltés ideje: 2014.03.26.
- [12] Csuka Antal: A lézerefény terjedése nemlineáris inhomogén közegben, kísérő jelenségek, összefüggések feltárása, elemzése matematikai módszerekkel és kísérleti eszközökkel, Doktori (PhD) értekezés tervezet, 2014  
[hbk.uni-nke.hu/uploads/media\\_items/ertekezes-tervezet-10.original.pdf](http://hbk.uni-nke.hu/uploads/media_items/ertekezes-tervezet-10.original.pdf),  
letöltés ideje: 2014.06.08
- [13] Jordan Werbe-fuentes, Michael Moody, Oriana Korol, Tristan Kading: Carbon Dioxide Absorption in the Near Infrared,  
[jvarekamp.web.wesleyan.edu/CO2/FP-1.pdf](http://jvarekamp.web.wesleyan.edu/CO2/FP-1.pdf), letöltés ideje: 2014. 05.12
- [14] H. Hemmati: Optical Systems for free-space laser communications,  
<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/38461/1/03-1910.pdf>,  
letöltés ideje: 2014.04.12.
- [15] Cesare Barbieri, Gianfranco Cariolaro: „Qspace project: Quantum cryptography in space”, Springer, 1995, pp43-54, URL:  
[http://www.utdallas.edu/~zweck/Papers/Optics/TIWDC\\_1.pdf](http://www.utdallas.edu/~zweck/Papers/Optics/TIWDC_1.pdf),  
letöltés ideje: 2014.04.15
- [16] Gyöngyösi László: Kvantumkriptográfia I., pp 21,  
<http://www.mcl.hu/quantum/foiak/kvantumkript1.pdf>, letöltés ideje: 2014.04.16
- [17] Nyílt téri lézeres összeköttetés létesítése LB-PINTO-0400TC100 típusú optikai kommunikációs rendszerrel,  
[http://arek.uni-obuda.hu/opto/Opto\\_folia/index.htm](http://arek.uni-obuda.hu/opto/Opto_folia/index.htm), letöltés ideje: 2014.04.12
- [18] Aspelmeyer, M. et al. Long-Distance Free-Space Distribution of Entangled. Photons. Science 301, 621-623 (2003).
- [19] Resch, K. J. et al. Distributing entanglement and single photons through an intra-city, free-space quantum channel. Opt. Express 13, 202-209 (2005).
- [20] Peng, C.-Z. et al. Experimental Free-Space Distribution of Entangled Photon Pairs over a Noisy Ground Atmosphere of 13km. Phys. Rev. Lett. 94, 150501 (2005).
- [21] R. Ursin, F. Tiefenbacher et al. Free-Space distribution of entanglement and single photons over 144 km, European Space Agency, 2007, arxiv.org/pdf/quant-ph/0607182,  
letöltés ideje: 2014.03.28