

**Kurilla Boldizsár**

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

## A SZABADTÉRI LÉZERES KOMMUNIKÁCIÓ MEGVALÓSÍTÁSÁHOZ SZÜKSÉGES FIZIKAI ISMERETEK ÉS TECHNOLÓGIAI ELŐKÉSZÜLETEK, AVAGY A LÉGKÖR FLUKTUÁCIÓJÁNAK MÉRÉSÉHEZ SZÜKSÉGES ALAPOK

### *Absztrakt*

*Jelen cikk betekintést kínál egy majdani szabadtéri lézerfizikai mérőszorozatra, ahol a légkör fluktuációjának mérésére kerül sor abból a célból, hogy részletesen kivizsgáljuk a lézerfényrel történő kommunikáció befolyásoló tényezőit. A cikk betekintést kínál a légkör fizikájába optikai szempontból és egyben bemutatja a jövőbeni szabadtéri lézerfizikai mérőszorozat technológiai előkészületét, mely részletes betekintést kínál a majdani mérésekhez felhasználandó eszközök működési mechanizmusába. A laboratóriumi próbamérésekhez egy fotoelektron sokszorozóval (PMT) ellátott detektor épült meg, melyhez egy 40 MHz-es, két csatornás SainSmart DDS140 Pro PC alapú, USB-vel ellátott hordozható digitális oszcilloszkóp és egy frekvenciakétszerezett, 532 nm-es, 500-560 mW-os Nd:Yag lézer került felhasználásra. A lézerhez egy tízszeres sugárpárhuzamosító került alkalmazásra a divergencia minimalizálása érdekében.*

*This article introduces an insight to a future outdoor laser physical measurement period, where the measurement of air fluctuation will be done to investigate the influencing factors communication with laser in detail. The article presents the physics of atmosphere from the optical view and also investigates the technological preparation of the future outdoor laser physical measurement series what offers a detailed introduction to the operating mechanism of equipment to be used for the future measurements. A detector with a Photomultiplier tube (PMT) has been constructed for laboratorial measurements, where a 40 MHz, two channelled SainSmart DDS140 Pro PC based USB digital portable oscilloscope and a frequency doubled, 532 nm 500-560 mW Nd:Yag laser have been used. The laser has a tenfold beam expander to minimize the beam divergence.*

**Kulcsszavak:** *légköri fluktuáció, Rayleigh szórás, nyalábpárhuzamosítás, fotoelektron sokszorozó ~ atmospheric fluctuation, Rayleigh scattering, beam expanding, photomultiplier tube*

## BEVEZETÉS

A hőmérsékletváltozás hatására a légkör törésmutatója megváltozhat, ami egy erős befolyásoló tényező a szabadtéri lézeres kommunikációt illetően. Ezzel korábban számos cikk foglalkozott már.[1][2][3][4][5] Az is ismert, hogy a levegő törésmutatója és annak állapotváltozása között bonyolult függvénykapcsolat van.[6] Ezen folyamat megértéséhez mély optikai alapismeretekre van szükség és vizsgálata kifejezetten fontos, hisz a sikeres lézeres kommunikációt nagyban befolyásolják a légköri állapotváltozások. A lézeres kommunikációt befolyásoló légköri fényelnyelésnek több oka is van. A legfőbb okokat a tudósok már a XIX. században felfedezték, amikor is megkérdőjelezték az ég kék színét. Szintén nagyon fontos elnyelődési tényező a légkörben jelenlevő aeroszolok fajtája és mennyisége. Ezek szintén befolyásolják a légkör színét, illetve azt, hogy mennyi fény jut át azon a rétegen. Erre remek példa a vörösés légréteg egy homokvihar következtében.[7][8] Hogy megértsék ezen részecskék fényelnyelésének hátterét, a tudósoknak 1908-ig kellett várniuk, amikor is a Mie-elmélet megszületett.[9] A légkör színeinek a kutatása különböző atmoszférikus modelleken alapszik, immáron több mint 60 éve.[10] Ezek a modellek többnyire megegyeznek abban, hogy alkonyatkor a kék árnyalatok további ózón-elnyelődésre utalnak, amikor a Nap alacsonyan van a horizonton, ugyanis nappal az ég kék színe a Rayleigh-szóródásnak köszönhető.[11-16] A pontos oka annak, hogy az ég színe a horizonton naplementekor vagy napfelkeltekor vörös, az nem csupán a Rayleigh szóródásnak vagy fényelnyelésnek köszönhető bizonyos modellek szerint, hanem a jelen levő aeroszoloknak is. [13][16] A légkör dinamikusan változik. Ezen változások megismerésére, mérésére és elemzésére kell a későbbiekben a legnagyobb hangsúlyt fektetni! Ebből kifolyólag a cél, hogy különböző napszakokban is végrehajtsuk a légkör fluktuációjának mérését, hogy képet kapjunk a lézerefénnyel történő információtovábbítás lehetőségeiről. A mérések tervezett megvalósítására Pécsen kerül sor a Mecseken lévő TV torony és a Tubes kilátó között. A szabadtéri mérések megvalósítása előtt laboratóriumi próbaméréseket hajtottam végre, melyekhez részben saját építésű eszközöket is felhasználtam.

## FIZIKAI ALAPOK A LÉZERES SZABADTÉRI MÉRÉSEKHEZ

Ahhoz, hogy érdembeli, eredményes szabadtéri méréseket hajtsunk végre lézerral, vagy különböző optikai eszközökkel, egy bizonyos szinten mindenképpen meg kell ismernünk a Föld légkörének jellemzőit. Ahhoz, hogy megértsük az ég színét és fényességét, valamint a felhők fényerejét, ahhoz a többszörös szórás ismeretét kell igénybe vennünk: egy tömegben lévő részecskék a beeső napfény hatására nemcsak direkt a beeső napfényt szórják, hanem azt a fény mennyiséget is, melyek magukról a részecskékről szóródva haladnak át a többi részecskén, mellyel újabb fényszórások keletkeznek. Egy részecskecsoporthoz optikai tulajdonságai nem feltétlenül a részecskék egyéni számától függ. A délibáb a levegő molekuláinak a koherens szórásának (fénytörés) a térbeli változásának következménye, míg az úgynevezett „zöld villanás” mind a molekulák és részecskék általi koherens szórásnak és az inkohereus szórásnak köszönheti létét. A fényszórást hívhatjuk egy fajta sugárzásnak is, melyet egy adott anyag bocsájt ki külső gerjesztő hatására. Ha a forrás megszűnik, akkor a fényszórás is megszűnik, természetesen megkülönböztetve ettől azokat az anyagokat, melyek maguktól bocsájtanak ki fényt külső forrás gerjesztése nélkül. Egy részecske az elegendően sok molekulának az aggregációja, melyekhez makroszkopikus tulajdonságok tulajdoníthatók, mint például a hőmérséklet és törésmutató. A legnagyobb részecskék mérete elérheti a 10–3  $\mu\text{m}$ -t. [17] A különböző hullámhosszúságú fotonok eltérő energiával rendelkeznek. Az eltérő energiájú fotonok a különböző közegekben tovaterjedve különböző optikai jelenségeket eredményeznek. A jelenségek leginkább a diszperzióra, fénytörésre és az interferenciára

orientálódnak. A légkörben a fénytöréssel kapcsolatos jelenségek akkor keletkeznek, ha az adott irányú fény eltérő sűrűségű, hőmérsékletű és összetételű levegőrétegeken halad keresztül. A fény a különböző törésmutatójú levegőrétegek határán megtörik és a beesési szöghöz képest eltérő törési szögben folytatja útját. A különböző légrétegeken áthaladó fény folytonosan változtatja az irányát és a légrétegek fénytörési együtthatóinak eltérő értékei miatt görbék mentén halad. A jelenség pontos vizsgálatára csak úgy van lehetőség, ha az adott tér esetén sikeresen kitanulmányozzuk a mikro-klimatikus viszonyokat. A levegőt alkotó fő elemek nem befolyásolják erőteljesen a levegő fénytörési együtthatóját a hőmérséklethez, a nyomáshoz és a páratartalomhoz képest. A mi esetünkben azonban a megbízható kommunikáció megvalósítása a cél. Ebben az esetben rendkívül fontos a légköri fluktuáció alapos kivizsgálása. A fluktuáció erősen függhet az adott földrajzi helytől, a magasságtól, az éghajlattól és magától az évszaktól is. Az 1. táblázat a Föld légkörét alkotó különböző gázok eloszlásának arányát mutatja be. Természetesen ezek az értékek a Föld különböző részein eltérhetnek, hisz a légszennyezés mértéke és a zöld övezetek sűrűsége nem mindenhol azonos.

Összetétel	Térfogat százalék (%)
Nitrogén (N <sub>2</sub> )	78,084
Oxigén (O <sub>2</sub> )	20,95
Argon (Ar)	0,93
Szén-dioxid (CO <sub>2</sub> )	0,03
Vízgőz (H <sub>2</sub> O)	0,0044
Neon (Ne)	0,002
Hélium (He)	0,00052
Metán (CH <sub>4</sub> )	0,00015
Kripton (Kr)	0,000114
Hidrogén (H <sub>2</sub> )	0,0001
Nitrogén dioxid (NO <sub>2</sub> )	0,00006
Szén-monoxid (CO)	0,00002
Ózon (O <sub>3</sub> )	0,000005
Xenon (Xe)	0,000009

1. táblázat. A Föld légkörét alkotó különböző gázok eloszlásának aránya [18]

Összefoglalva, három fő tényező befolyásolja a fénysugár kioltását tiszta légrétegen való áthaladása során: A Rayleigh-, illetve aeroszol kioltások és az ózon általi elnyelődés. Ahogyan már fentebb volt róla szó, a fény terjedését a légkörben Rayleigh-szórás aktívan befolyásolja. Egy adott légrétegen keresztül megfigyelt napfény  $S_0$  spektruma elnyelődési tényezője a következő:

$$\frac{S}{S_0} \propto T = \frac{1}{\lambda^4} \cdot e^{-\frac{a}{\lambda^4}} \cdot e^{-\frac{b}{\lambda^p}} \cdot e^{-N_{O_3} \sigma_{O_3}} \quad (1)$$

ahol a Nap spektruma  $\propto T S_0$  a légkör bármely pontjában. Az első egyenletben az exponenciálisok a Rayleigh elnyelődésre vonatkoznak a nitrogén, aeroszol és ózon csillapítási, és elnyelési képességeiből kifolyólag.[19]  $N_{O_3}$  az ózon oszlop sűrűsége a napfény útjának mentén, és  $\sigma_{O_3}$  a hullámhosszfüggő ózon abszorpciós keresztmetszet.

Az aeroszolok adják az egyenletnek az  $e^{-\frac{b}{\lambda^p}}$  mibenlétét és b adja az aeroszolok oszlopsűrűségét a napfény haladási útvonala mentén, az atmoszférán túlról a megfigyelési pontig. Az aeroszolok szóró és kioltási képessége az  $1/\lambda^p$  kifejezéssel adható meg, ahol  $p \approx 1,3$ . [19][20][21]

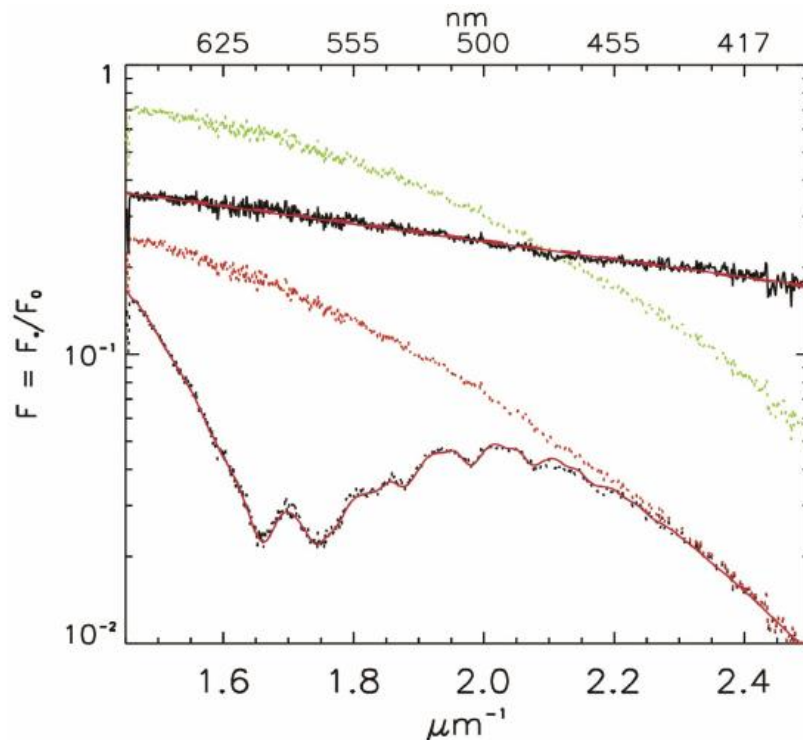
Először Rayleigh volt az, aki 1871-ben a légkörben való részecskéknek tulajdonította a napfény szórását (a látható hullámokkal összehasonlítva) és kimutatta, hogy a törési törvény  $1/\lambda^4$  arányban kell, hogy változzon. [22] Rayleigh azt is kimutatta, hogy a Naptól direktbe besugárzott fény és a légkörön át a részecskéknek köszönhetően szórva érkező fény a következő arányban mutatkozik:

$$\frac{I}{I_0} \propto R = \frac{1}{\lambda^4} \cdot e^{-\frac{a}{\lambda^4}} \quad (2)$$

Rayleigh később arra a következtetésre jutott, hogy a napfény terjedését befolyásoló kis részecskék valójában a levegőben lévő molekulák. Ez a megállapítása 1899-ben látott napvilágot. [23] Az aeroszol szórással ellentétben a Rayleigh szórás kvázi izotróp. Az (1)-es és (2)-es egyenletekben az a együttható átalakítható a nitrogén oszlopsűrűségévé a következőképpen: [24]

$$N_{N_2}/a \approx 2.45 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2} \quad (3)$$

Hartley és Chappuis egy alternatívát javasolt Rayleigh elméletéhez, az ózon abszorpciót. Chappuis 1882-es emlékiratában kvázi folytonos ózonabszorpciót azonosított 500 nm és 660 nm között. Ma ezeket Chappuis sávoknak nevezzük. [25] Alacsony felbontású spektroszkópiai mérésekkel Moore, Melvin és Wulf kimutatták a Chappuis sávok jelenlétét 1934-ben a kék égben alkonyatkor, de fényes nappal csak nagyon gyengén sikerült észlelni őket. [26] Az 1. ábrán a csillagfedés spektrumát láthatjuk egy sokkal nagyobb légtömegben keresztül, mint amit a napsugarak tapasztalnak, amikor a Nap a horizont fölött van. A látható hullámhossz tartományban napközben a napsugarak kioltása a légkörben sokkal gyengébb: A Chappuis sávok  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  és néhányszor  $10^{19} \text{ cm}^{-2}$  oszlopsűrűség között észrevehetetlenek. A Rayleigh elnyelődés általi spektrumdőlés modifikációja kicsi, az  $N_{N_2}$  nem haladja meg a  $10^{32} \text{ cm}^{-2}$ . [19]

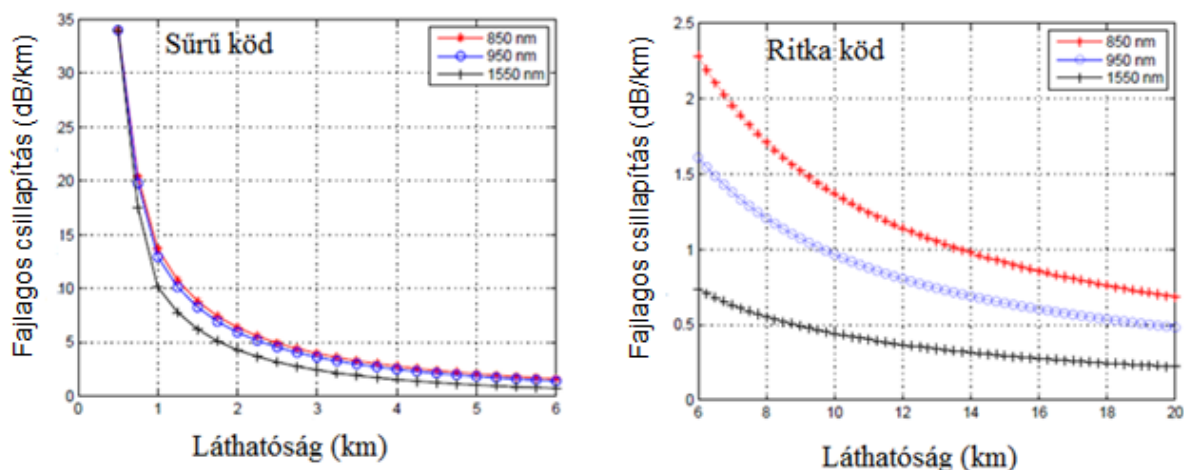


1. ábra. A Szíriusz csillag GOMOS (Global Ozone Monitoring Occultation of Stars) csillagfedési spektruma 14780 m-es érintő magasságban.

(Alul a pontozott spektrum a Szíriusz spektrumának  $F/F_0$  aránya, melyet a légkörön keresztül és azon kívül figyeltek meg. A sima piros görbe a csillagfedés illesztése (ózon + Rayleigh + aeroszol kioltás). Az aeroszol kioltás ( $e^{-\frac{b}{\lambda^p}}$ ,  $p \approx 1.3$ ,  $b \approx 0.45$ ) a spektrum lejtését finoman változtatja (fekete nyomvonal fent). A zöld pontozott rész mutatja önmagában a Rayleigh elnyelődés hatásfokát, ami  $N_{N_2} \approx 2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}$ ,  $a=0,075$ . A vörös pontozott nyomvonal  $F/F_0$  korrigált az ózón abszorpcióra vonatkozólag. ) [19]

Mindez akkor valósul meg, ha a Nap közel van a horizonthoz, amikor is az ózón elnyelődés elég nagy ahhoz, hogy nagy depressziót produkáljon 1,4 és 2,2  $\mu\text{m}^{-1}$  között. Az ózón oszlopsűrűsége a napsugarak optikai útvonala mentén fel tud emelkedni akár 1020  $\text{cm}^{-2}$ -re is. [19][27] A másik fontos hatás a Rayleigh-kioltás az ( $e^{-\frac{a}{\lambda^4}}$  az első egyenletben), mely a spektrum kék oldalát meghajlítja (az első ábrán a zöld nyomvonal). Az aeroszol kioltás úgy viselkedik, mint egy emelőkar, mely változtatja a spektrum átlagos dőlését (fekete exponenciális nyomvonal az első ábrán). Azonban ez a változás csekély (ahogyan ez a zöld és piros pontozott nyomvonalak összehasonlításán is látszik az 1. ábrán), ami nem módosítja olyan szinten a Nap spektrumát, mint a Rayleigh-kioltás vagy az ózón abszorpció. A gyakorlatban és önmagában az aeroszol kioltást a spektrum szempontjából nehéz kibontani a Rayleigh-kioltásból mindaddig, amíg nem elég nagy ahhoz, hogy az módosítsa a spektrum lejtését alacsony hullámszámoknál. [19]

A 2. ábrán a szabadtéri optikai kommunikációra láthatunk összehasonlítási példát, ahol különböző hullámhosszokon figyelhetjük meg a fény elnyelődését a távolság függvényében sűrű és ritkán ködös időjárási viszonyok között.



2. ábra. A fény szabadtéri terjedése különböző hullámhossztartományban sűrű és ritka ködben [28]

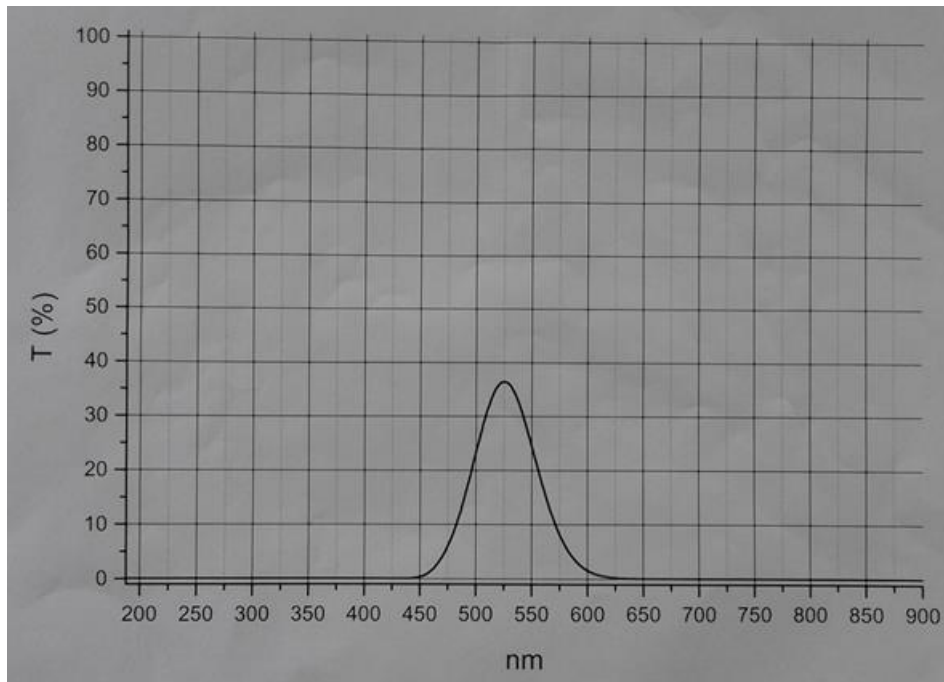
## A mérésekhez felhasználandó eszközök és eljárások technikai részletei

A mérésekhez elengedhetetlenül szükség volt pár speciálisan kivitelezett technikai felszerelésre. Mindezek közül az egyik legfontosabb egy feszültségerősítővel, stabilizátorral és PMT-vel ellátott, hordozható detektor. Ennek megépítése és tesztelése hosszú folyamat volt. A PMT egy olyan eszköz, mely képes nagyon gyenge fényt is felerősíteni. Ez egy fotoemisszív eszköz, ahol egy foton elnyelése egy elektron kibocsátásával jár. Ezek a detektorok úgy működnek, hogy az eszközben lévő fotokatód által generált elektronok felerősítésével egy fotonáram jön létre. A PMT belsejében a fotokatódból kibocsájtott fotoelektronok előrehaladva ráfókuszálódnak az első dinódára és úgynevezett szekunder elektronok jönnek létre. Bár nem minden egyes elektron csapódik rá az első dinódára vagy tér el a szokásos pályájáról, így azok értelemszerűen nem lesznek sokszorozva. [29] Fontos szempont volt a detektor hordozhatóságának kivitelezése, hisz szabadtéri mérések elvégzése a cél. Ebből kifolyólag két db 18650-es típusú, 3,7 V-os lítium akkumulátoron keresztül szolgáltatom az áramot, melyek sorba vannak kötve. Így 7,4 V-ot kapunk. Az akkumulátorok tölthetők anélkül, hogy kiszednénk őket a detektorból. A PMT működéséhez azonban 1000-1500 V-ra van szükség, ezért szükség volt egy feszültségerősítőre. Erre a célra egy EMCO E30CT típusú, nagyfeszültségű DC/DC konverter került a detektorba, hogy működésbe lehessen hozni az eszközt. A stabil feszültséghez és megbízható működéshez szükség volt még egy feszültség-stabilizátorra is. Az 1. képen a detektorba épített DC/DC konverter látható.



1. kép. A detektorba épített nagyfeszültségű DC/DC konverter (Szerző saját felvétele)

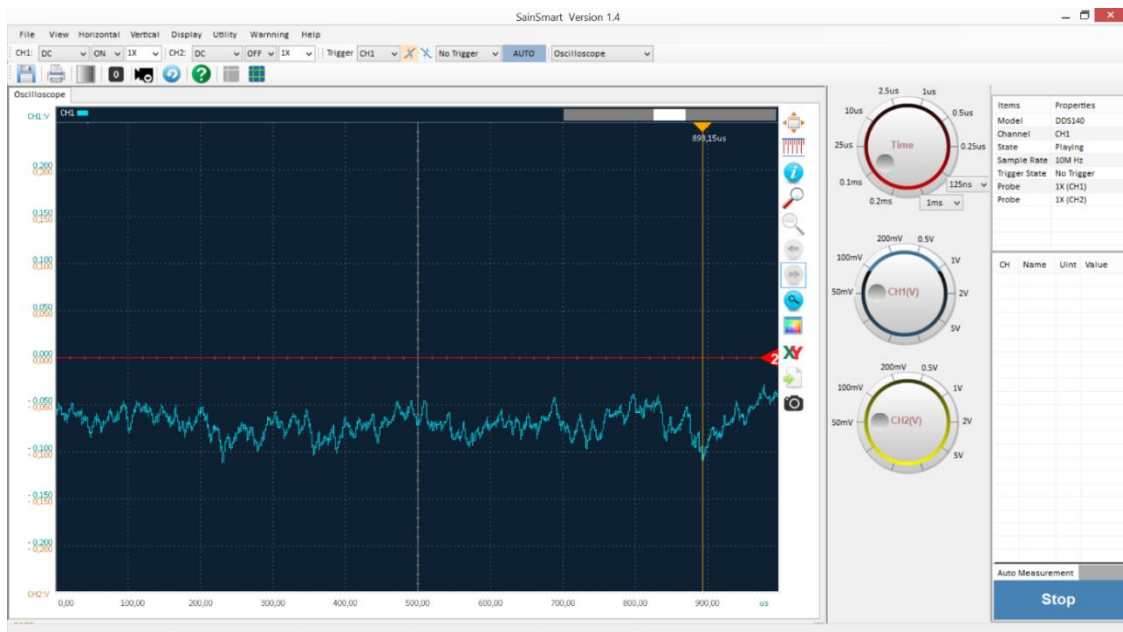
Fontos tudnunk, hogy a PMT rendkívül érzékeny eszköz, ezért a biztonságos működés érdekében szűrőket alkalmaztam a próbamérések elvégzéséhez. Az első szűrő egy speciális zöld szűrő, mellyel a nem kívánt infravörös tartományú hullámhosszakat ki tudjuk szűrni és csak a zöld tartományban engedjük át a fényt. Természetesen egy 0.5 W-os teljesítménynél további szűrőkre van szükség, hogy a detektort ne tegyük végleg tönkre. Ebből a megfontolásból 10 db szűrő került alkalmazásra. A szűrők átfúrt, kör alakú alumínium lemezekre lettek felragasztva és behelyezve a detektor hengerébe, melyben a PMT van. Megfelelő mennyiségű és képességű szűrővel le lehet gyengíteni annyira a lézerfényt, hogy az ne tegyen kárt a detektorban. Természetesen a többi szűrő esetében szürke szűrőt kell alkalmazni, ugyanis a szabadtéri mérések esetén a természetes fényt is le kell szűrni. A szűrők egyszerűen cserélhetők és a detektor bemenetén egy biztonsági zár is van. A detektor bekapcsolt állapotát egy egyszerű sárga Led jelzi. A 3. ábrán az első szűrő transzmissziós képessége látható a hullámhossz függvényében.



3. ábra. A zöld szűrő átteresztő képessége a hullámhossz függvényében (Készítette: A szerző)

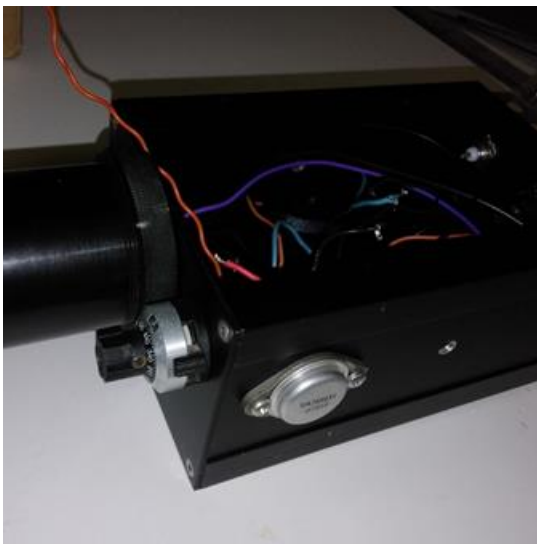
A potenciométer segítségével szabályozható, hogy mekkora feszültséggel működtessük a detektort. Ennek segítségével könnyebb megtalálni a legtisztább jelet a kétsatornás USB-s oszcilloszkóphoz tartozó szoftveren keresztül. A szoftver segítségével kezelhető az oszcilloszkóp mindkét csatornája, és állítható, hogy melyik csatornán mekkora sebességgel akarunk dolgozni. A mi esetünkben egyszerre természetesen csak egy csatornát használunk, viszont a két csatorna együttes alkalmazásával lehetőség nyílik két különböző detektor összehasonlítására, mely a Pécsi Tudományegyetem lézer laboratóriumában meg is valósult. Ez azt a célt szolgálta, hogy megbízható képet kapjunk saját detektorunk működésének stabilitásáról és érzékenységről. A detektor teszteléséhez többféle fényforrást is felhasználtam egy másik detektor szinkronban való alkalmazása közben. A tesztelés a természetes fény mellett TEA Nitrogén lézerrel impulzus üzemmódban (kezdetben 337 nm) 580 nm körüli hullámhosszon valósult meg egy külön aktív közeggel egy külön optikai rezonátorban, majd végezetül 532 nm-es hullámhosszon az Nd:Yag lézerrel. Maga az oszcilloszkóp jelgenerátorként és logikai analizátorként is alkalmazható. A 2. képen az 532 nm-es Nd:Yag lézer tesztelése látható az oszcilloszkóphoz tartozó szoftveren keresztül.





2. kép. Az oszcilloszkóphoz tartozó szoftver a lézer saját fluktuációjának tesztelése közben laboratóriumi körülmények között (Szerző saját felvétele)

A 3. képen bal oldalt a detektorra szerelt feszültség stabilizátor és a potenciométer látható. Az előbbire a megbízható és stabil működés érdekében volt szükség, még utóbbira azért, hogy könnyebb legyen a tiszta jel befogása. A jobb oldalt a már kész detektor látható laboratóriumban, mely csatlakoztatva van az oszcilloszkóphoz.



3. kép. A detektorra épített feszültség stabilizátor és a potenciométer (bal oldalt) és a már kész detektor csatlakoztatva az oszcilloszkóphoz (jobb oldalt) (Szerző saját felvétele)

A próbamérésekhez használt és a majdani mérésekhez használandó frekvenciakétszerezett Nd:Yag lézer csúcsteljesítménye elérheti az 560 mW-ot, átlagteljesítménye mintegy 500 mW. Mivel frekvenciakétszerezett, ezért a lézerbe egy infravörös filter is helyt kapott, meggátolva az 1064 nm-es hullám kijutását. A stabil működéshez a berendezés hűtőventilátorral lett ellátva, elkerülve ezzel a túlmelegedést és lehetővé téve a folytonos használatot. A lézer hálózati adapterrel és akkumulátorokkal is működtethető, így a szabadtéri mérés könnyedén megoldható. A lézer divergencia 0,8 mrad, viszont a sugárpárhuzamosítót alkalmazva ez

lecsökkenthető 0,08 mrad-ra, lehetővé téve ezzel lényegesen precízebb méréseket sokkal nagyobb távolságokból is. A pécsi TV torony és a Tubes kilátó közötti távolság légvonalban mintegy 1800 m. Ebben a távolságban ilyen paraméterek mellett a mérés relatíve könnyedén megoldható, ugyanakkor jelentős információmennyiséget kaphatunk a két pont közötti légköri mozgásokból és állapotváltozásokból. A 4. képen az 560 mW-os frekvenciakétszerezett, sugárpárhuzamosítóval ellátott Nd:YAg lézer látható állványra szerelve.



4. kép. A mérésekhez használt 532 nm-es lézer sugárpárhuzamosítóval (beam expander) ellátva (Szerző saját felvétele)

## Összegzés, következtetések

Jelen cikkben a szabadtéri mérésekhez felhasználandó eszközök és a szabadtéri optikai kommunikációhoz szükséges fizikai alapok kerültek bemutatásra. A laboratóriumi körülmények között épített, PMT alapú detektor megfelelő működését feszültség stabilizátorral és nagyfeszültségű DC/DC konverterrel sikerült megvalósítani. A relatíve kis méretnek és az akkumulátoros áramellátásnak köszönhetően a szabadtéri mérések lehetővé váltak. A mérést a légköri tényezőkön kívül egyéb tényezők is befolyásolhatják, melyek még további vizsgálatokat igényelnek. További feladat lesz kivizsgálni, hogy maga a lézer mennyire fluktuál, és ez miben befolyásolja a kommunikációt. A végső cél viszont az, hogy kivizsgáljuk a fluktuációs mérésekkel mindazon zavarási tényezőknek, zajnak a mértékét, melyek befolyással vannak a lézerfényvel történő kommunikációra és a mérésekből egy statisztikai összegrést hajtunk végre.

## Felhasznált irodalom

- [1] Kurilla Boldizsár: Lézeres kommunikációt befolyásoló légköri tényezők vizsgálata szimulációs módszerrel, in Hadmérnök, IX. Évfolyam 2. szám - 2014. június
- [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] Prof.rer.nat.habil.W. Brunner: Wissenspeicher Lasertechnik, VEB FachbuchverlagLeipzig, 1982, 28-29pp.
- [7] P. Brimblecombe, “Aerosols and Air Pollution in Art,” Proceedings of the Symposium on the History of Aerosol Science, Wien, 31 August-2 September 2000, pp. 11-24.
- [8] R. B. Husar, “Atmospheric Aerosol Science before 1900,” Proceedings of the Symposium on the History of Aerosol Science, Wien, 31 August-2 September 2000, pp. 25-36.
- [9] H. C. van de Hulst, “A Historical Sketch of Light Scat-tering by Small Particle,” Proceedings of the Symposium on the History of Aerosol Science, Wien, 31 August-2 September 2000, pp. 69-76.
- [10] R. L. Lee, W. Meyer and G. Hoeppe, “Atmospheric Ozone and Colors of the Antarctic Twilight Sky,” Applied Optics, Vol. 50, No. 28, 2011, pp. 162-171.
- [11] E. O. Hulburt, “Explanation of the Brightness and Color of the Sky, Particularly the Twilight Sky,” Journal of the Optical Society of America, Vol. 43, No. 2, 1953, pp. 113-118.
- [12] G. V. Rozenberg, “Twilight: A Study in Atmospheric Optics,” Plenum Press, New York, 1966.
- [13] J. V. Dave and C. L. Mateer, “The Effect of Stratospheric Dust on the Color of the Twilight Sky,” Journal of Geo-physical Research, Vol. 73, No. 22, 1968, pp. 6897-6913.
- [14] C. N. Adams, G. N. Plass and G. W. Kattawar, “The In-fluence of Ozone and Aerosols on the Brightness and Color of the Twilight Sky,” Journal of Atmospheric Sci-ence, Vol. 31, No. 6, 1974, pp. 1662-1674.
- [15] E. J. McCartney, “Optics of the Atmosphere,” John Wiley and Sons, New York, 1976.
- [16] C. F. Bohren and A. B. Fraser, “Color of the Sky,” Phys- ics Teacher, Vol. 23, No. 5, 1985, pp. 267-272.
- [17] Craig F. Bohren, Atmospheric Optics,Url: [www.wiley-vch.de/books/sample/3527403205\\_c01.pdf](http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527403205_c01.pdf), letöltés ideje: 2016.04.21

- [18] HEMMATI Hamid: Deep space optical Communications, Jet Propulsion Laboratory – California Institute of Technology p142-144, 170-202
- [19] Frederic Zagury: The color of the sky, Atmospheric and Climate Sciences, 2012, 2, 510-517
- [20] A. Ångström, “Techniques of Determining the Turbidity of the Atmosphere,” *Tellus*, Vol. 13, No. 2, 1961, pp. 214-223.
- [21] G. E. Shaw, J. A. Reagan and B. M. Herman, “Investigations of Atmospheric Extinction Using Direct Solar Radiation Measurements Made with a Multiple Wavelength Radiometer,” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 12, No. 2, 1973, pp. 374-380.
- [22] L. Rayleigh, “On the Light from the Sky, Its Polarization and Color,” *Philosophical Magazine*, Vol. 41, 1871, pp. 107-120.
- [23] L. Rayleigh, “On the Transmission of Light through an Atmosphere Containing Small Particles in Suspension
- [24] M. Snee and W. Ubachs, “Direct Measurement of the Rayleigh Scattering Cross Section in Various Gases,” *Journal of Quantitative and Spectroscopic Radiative Transfer*, Vol. 92, No. 3, 2005, pp. 293-310.
- [25] J. Chappuis, “Etude Spectroscopique de l’Ozone,” *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, Vol. 11, No. 2, 1882, pp. 137-186.
- [26] O. R. Wulf, A. F. Moore and E. H. Melvin, “Note: The Atmospheric Ozone Absorption in the Visible Spectrum,” *Astrophysical Journal*, Vol. 79, 1934, pp. 270-272.
- [27] F. Zagury and F. Goutail, “Spectral Analysis of Extinguished Sunlight,” *New Astronomy*, Vol. 8, No. 6, 2003, pp. 537-548.
- [28] Hemani Kaushal and Georges Kaddoum, *Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques*, 2015, Url: <http://arxiv.org/abs/1506.04836>, letöltés ideje: 2016.05.10
- [29] Kurilla Boldizsár, *Second Harmonic Generation in the Background of Photon Counting*, *AARMS* Vol. 13, No. 4 (2014) 557–570.