

Csuka Antal

[antal.csuka@hotmail.com](mailto:antal.csuka@hotmail.com)

## A FÉNY SZABADTÉRI TERJEDÉSÉNEK ELMÉLETI ÉS GYAKORLATI VIZSGÁLATA

### *Absztrakt*

*A továbbiakban a fény terjedésének elméleti és gyakorlati vizsgálatát mutatom be. Nagy hőmérsékletű sugárzók környezetében a levegő törésmutatója véletlenszerűen változik, ami egy könnyen reprodukálható és megfigyelhető jelenség, ellentétben azokkal a természetben előforduló teljes visszaverődéssel kapcsolatos jelenségekkel, amelyek földön vagy vízen figyelhetők meg. A jelenség leírására a törésmutató és a levegő állapotjelzői közt olyan lineáris egyenletek nem használhatók, mint amilyenekkel a geometriai optikában gyakran találkozunk, mert a jelenség téves leírását, vagy alkalmazását eredményezheti. A levegő összetevőinek hatása és a törésmutató megváltozása közti összefüggés feltárását végezhetjük mérésrel, gázszenzorok segítségével. Olyan monokromatikus sugárzás, mint amilyen a lézerek által előállított fény terjedésének irányváltozásának meghatározásához jól használhatók a levezetett differenciál egyenletek.*

*Theoretical and practical study of light propagation in nonlinear media is described. High temperatures and thermal radiation of sources causes random variation of refraction index in optical media. This is an easy notable and reproducible phenomenon compared to most of natural phenomenon visible on land or at sea. A linear relationships used in geometrical optics between the indicators and refraction index of gases may cause improper application and description of studied phenomena. The influence of components on the variation of refraction index can be measured using gas sensors. Using differential equations or functions instead of empirical relation, the deviation of light produced by monochromatic sources such as laser sources can be calculated relatively easy.*

**Kulcsszavak:** *optika, lézer, fény refrakció, törésmutató, adatátvitel ~ optics, laser, refraction of light, refraction index, data transmission*

### BEVEZETÉS

A rádiófrekvenciás sávok telítettsége, ezzel egyidejűleg az RF szennyezettség (poluáció) gyorsuló ütemben nő. A frekvenciasávok túltelítettsége miatt egyre sürgetőbb új műszaki megoldások megtalálása és kidolgozása, amivel az adat-, és információátvitel tovább fejleszthető, sebessége tovább növelhető. Amennyiben a szükséges biztonsági feltételek adottak, vagy megteremthetők a zavartalan kapcsolat kiépítéséhez és fenntartásához, szabadtéri optikai csatorna létesítésével, olyan nagy kapacitású és nagy sáv szélességű adatátvitel létesíthető rövid idő alatt és viszonylag egyszerű optikai eszközökkel, amivel biztosíthatók a csapatok és vezetési pontok közti összeköttetés. Biztonsági intézkedések alatt azokat az eljárásokat, műszaki megoldásokat értem, amelyek ahhoz szükségesek, hogy az információs csatorna lehallgathatatlan legyen. Különböző modulációs és kódvédelmi eljárások mellett szükség lehet a szabadtéri optikai forrás elrejtésére, álcázására. [1] Ott, ahol lehallgató berendezések folyamatosan pásztázzák, kémlelik a rádiófrekvenciás hullámok tartományát, egy kis nyílásszöggel sugárzó középteljesítményű infra-lézerforrással, kedvező időjárási viszonyok közepette, de még akár gyenge ködben is, olyan optikai csatorna létesíthető, amire az ellenfél nem biztos, hogy azonnal felfigyel.[2]

A hadviselés történetében leleményes megoldásokra több olyan példát is találunk, amikor meglepően egyszerű eszközökkel, megoldások egész sorával a veszteségeket hatékonyan sikerült csökkenteni, emberéletet és technikai eszközöket megvédeni a pusztulástól, megsemmisítéstől. [3]

A fényvezetéssel kapcsolatos első megfigyelések és alkalmazásuk első kísérletei az 1800-as évek közepén kezdődtek. A korabeli kísérleteknek eredményeire alapozottan fejlődött a vezetékes optikai adatátvitel azzá, amilyenek ma azt ismerjük. A fény szabadtéri terjedésével kapcsolatos jelenségek megfigyelések és reprodukálásának hasonlóképpen több száz éves múltja van, de a szabadtéri adat-, és információátvitel ezzel szemben közel sem fejlődött olyan ütemben, mint a vezetékes. Ennek oka az, hogy az a közeg, amelyben a fény terjed, a Föld légköre, és az azt alkotó levegő egy olyan gázelegy, ami jellemzően egy inhomogén, kaotikusan változó, nemlineáris és anizotróp közeg. Szabad térben ennek a gázhalmazállapotú közegnek a jellemzői és állapotjelzői folyamatosan változnak, stabilitása úgy semmiképpen sem biztosítható, mint az optikai szálhoz hasonló szilárd halmazállapotú közeg esetében. A fényforrások fejlődésének ellenére a kommunikációnak ez a formája nem fejlődött, néhány kísérlet és egyedi alkalmazástól eltekintve, háttérbe szorult. Több mint fél évszázad telt el az óta, amióta az ember leküzdve a Föld gravitációs terét, kilépett abból és Föld körüli pályára állította a műholdjait. A Föld légkörét elhagyva, egyáltalán nem, vagy csak kisebb mértékben kell számolnia annak zavaró hatásával megbízhatóbb kapcsolat létesíthető, mint a földfelszín közelében. [4]

A lézerforrások a múlt század hetvenes éveitől kezdődően megtalálhatók különféle mérő-, és diagnosztikai eszközökben. Gyors ütemű fejlődésüknek köszönhetően a nagyteljesítményű változataik fegyver célú alkalmazásán túlmenően, felhasználhatók szabadtéri optikai átvitel létesítésére is. Amennyiben a lézerfény közegjellemzőkre gyakorolt hatása és terjedésének minden részletét sikerül tisztázni, elháríthatók azok az akadályokat, amelyek korábban a felhasználását, felhasználásának kiterjesztését és bővítését akadályozták.

## A FÉNY LÉGKÖRI REFRAKCIÓJA

A fény légköri refrakcióját olyan egyszerűen megfigyelhető és ismert jelenségek igazolják, mint a fény teljes visszaverődése különböző hőmérsékletű vagy összetételű légrétegek határfelületéről, a délibáb, a látóhatár fölé emelkedő napkorong torzulása, a csillagok fényerejének periodikus változása, stb. A fény refrakciója egy érdekes hétköznapi, mondhatni mindennapos jelenség, ha a Nap felkeltére gondolunk, aminek első sugarait már akkor láthatjuk, amikor az még a látóhatár alatt van. Ez csak néhány példa mindazok közül, amelyeket a természetben szabad szemmel is megfigyelhetünk, amennyiben a jelenség létrejöttéhez szükséges feltételek adottak és a megfigyelés körülményei is kedvezőek. Mindemellett léteznek olyan refrakcióval kapcsolatos jelenségek is, amelyek csak mérőműszerekkel vizsgálhatók. Sajnálatos tény, hogy ezeknek a jelenségeknek a legnagyobb része nehezen, vagy csak kiegészítő, erre a célra kifejlesztett optikai eszközökkel, rögzíthető, fényképezhető. Ennek oka a légkör törésmutatója és állapotváltozása közti bonyolult függvénykapcsolat, amihez az is hozzájárul, hogy a levegő, mint optikai közeg és az emberi szem alkotja optikai rendszer és képrögzítő eszközök optikai rendszere (objektívje) közt alapvető különbségek vannak. [5]

Egy olyan kaotikusan változó közegben, mint amilyen a Föld légköre, az abban zajló folyamatok leírásánál gyakran találkozunk a geometriai optikában megszokott egyszerűsítésekkel és lineáris egyenletekkel, ami miatt okkal merül fel a kérdés, hogy azok vajon mennyire pontosak és megbízhatóak. Összetett folyamatok leírásánál, modellezésénél csak az egyszerűsítések vezetnek eredményre, hiszen a természetben zajló összetett folyamatok leírására szolgáló differenciál egyenleteink nagy része megoldhatatlan. A hő és áramlástanban tapasztalati összefüggések egész sorát kénytelenek vagyunk használni. Ott ahol lehetőség van rá, törekednünk kell arra, hogy minél pontosabb összefüggéseket nyerjünk. Amennyiben a fény refrakciójának vizsgálatát ki szeretnénk terjeszteni az ok-okozati összefüggések feltárására, mert többre vagyunk kíváncsiak, mint magára a jelenségre és annak egyszerűsített leírására, akkor olyan összefüggésekre van szükségünk, amelyekből a jelenség további vizsgálatához és eszközfejlesztésekhez szükséges adatok nyerhetők. Differenciálgeometriai módszerek felhasználásával levezethetők olyan egyenletek, megalkothatók olyan függvények, függvénykapcsolatok, amelyek esetenként kifejezőbbek és pontosabban írják le egy jelenséget, vagy folyamatot. Ha erre nincs lehetőség, akkor mérések elvégzésével tapasztalati (empirikus) összefüggéseket kell alkotni. Az utóbbiak pontosságát viszont bizonyos időközönként ellenőrizni kell. A Föld légkörében lejátszódó folyamatok részben az emberi jelenlét, tevékenység és beavatkozás következtében, de sok más tényező hatására is, idővel megváltoznak. Ennek több jele is van és mérések egész sora igazolja, hogy több olyan állapotjelzőhöz kapcsolódó állandót is ismerünk, aminek értéke valójában nem állandó. Egy ilyenre példa a levegő hőegyenértéke, ami földrajzi helyhez kötött ugyan, de aminek értéke idővel megváltozik (pl. a légkör felmelegedésének hatására). Következménye a termikus gradiens értékének folyamatos csökkenése. [6]

## **GÁZOK TÖRÉSMUTATÓJÁNAK MEGVÁLTOZÁSA MAGAS HŐMÉRSÉKLETEN**

A törésmutató megváltozásával kapcsolatos olyan jelenségek, amelyek többnyire magas hőmérsékleten jelentkeznek, könnyebben előállíthatók (reprodukálhatók) és gyakrabban figyelhetők meg, mint azok, amelyekről korábban szó volt és a természetben fordulnak elő. Erre egy szemléletes példa az 1. ábrán látható.

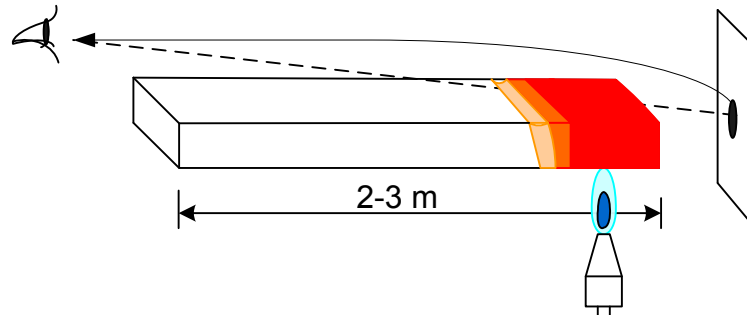


Mikoyan-Gurevich MiG-29OVT

1. kép. A repülőgép hajtóműből kiáramló meleg hatása [7]

A repülőgép hajtóművéből kilépő rendkívül magas hőmérsékletű gázok ( $600 - 800^{\circ}C$ ) a környező levegő sűrűségét megváltoztatják. [8] A gázok sűrűsége eleve jóval kisebb, mint a környező levegőé. A háttérből, a képrögztítőbe érkező fénysugarak az alacsony sűrűségű térrészen áthaladva irányváltozást szenvednek. Magas hőmérséklet és turbulens áramlások a gázelegyet inhomogénné teszik, aminek a következtében az egyes térrészekben áthaladó és onnan kilépő elemi fénysugarak, az eltérő és folyamatosan változó törésmutató miatt nem maradnak párhuzamosak, a gáz áttetsző képessége (transzparenciája) csökken, aminek következtében a háttérkép elmosódottá válik. A törésmutató ilyen mértékű megváltozása akkor következik be, amikor a levegő (gáz) állapotjelzői (hőmérséklete, nyomása, sűrűsége, stb.) nagymértékben megváltozik. A jelenség megfigyelhető és előállítható jóval egyszerűbb eszközökkel is. Amennyiben a sugárhajtóműhöz hasonlóan, egy tárgy környezetében a felhevített levegő a törésmutató megváltozását idézi elő, akkor az hasonlóképpen jól megfigyelhető és vizsgálható, mint ahogy az 1. képen látható. Az ehhez szükséges kísérleti eszköz egyszerűsített vázlata az 1. ábrán látható. Egy hosszú fémtárgy, például egy rúd, vagy zártszelvény izzásig felhevített végének ( $kb. 900^{\circ}C$ ) környezetében a levegő törésmutatójának olyan helyi (lokális) megváltozása következik be, ami a takarásban levő háttérkép eltolódásának egyszerű megfigyelését és vizsgálatát teszi lehetővé. Az ábrán látható ernyő és a rajta levő folt csak illusztráció. A törésmutató megváltozásának hatására a képen látható mértékű háttérkép eltolódást nem fogunk tapasztalni, ilyen megoldással ne is kísérletezzünk! Ez egy eltúlzott vázlat, ami a jelenség magyarázatára alkalmas. Ennél jóval finomabb felbontású háttérképre van szükségünk, például egy érdes felület, vagy kőporral szórt falfelület. Ha az egyik szemünket behunyva, a másikkal a hosszú tárgy felülete mentén a háttérképre fókuszálunk, a háttérbe nem illeszkedő kép láthatóvá válik. Az elvi vázlatot

felhasználva megtervezhető olyan mérőeszköz, aminek segítségével a jelenség magas hőmérsékleten vizsgálható. A szemünk érzékenysége és felbontóképessége kellően nagy ahhoz, hogy a jelenséget megfigyeljük, de az említett háttérképben történő változásokat digitális fényképezőgéppel nem sikerült rögzíteni.



1. ábra. (A szerző rajza)

## A FÉNYTERJEDÉS IRÁNYVÁLTOZÁSA GÁZHALMAZÁLLAPOTÚ KÖZEGBEN

Olyan egyszerű alapösszefüggésekből kiindulva, mint a Biot-Arago-Lorenz-, és Snellius-Descartes törvények:

$$\frac{n-1}{n_0-1} = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} = \frac{\rho}{\rho_0}, [9]$$

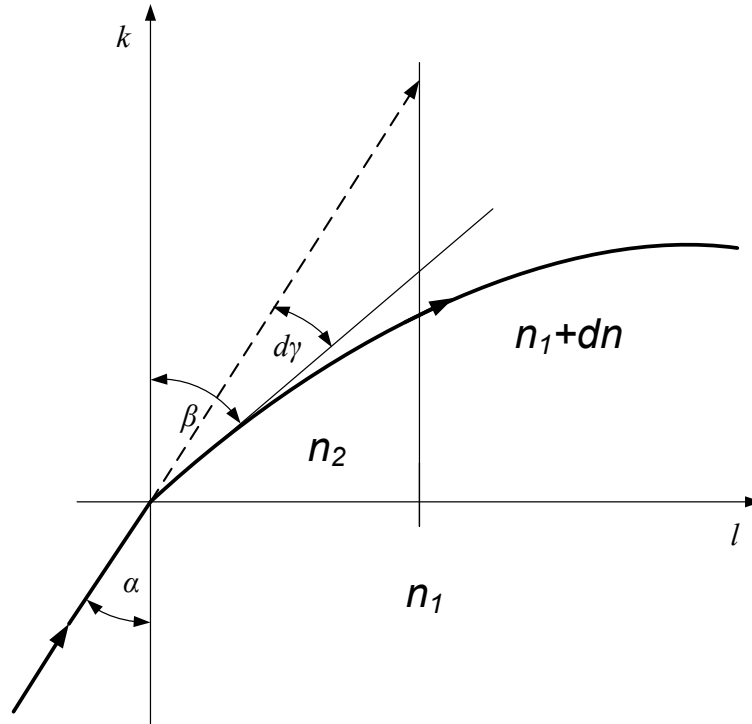
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}, [10] \quad (1)$$

levezethető az a differenciálfüggvény, amely pontosan leírja az inhomogén közegen áthaladó fénysugár  $d\gamma$  szögeltérését, amint az a 2. ábrán látható.

Legyen a vizsgált gáznak  $n$  a törésmutatója,  $p$  a nyomása,  $T$  a hőmérséklete és  $\rho$  a sűrűsége, továbbá  $\alpha$  és  $\beta$  a belépő és kilépő fénysugár a határfelület normálisával bezárt szöge,

Amennyiben monokromatikus zöld színű fényforrást használunk és veszünk alapul:

$$n_0 - 1 = 294 \cdot 10^{-6} [9]$$



2. ábra. (A szerző rajza)

Az (1)-be történő behelyettesítés és kiemelés után:

$$\sin\alpha = \frac{n_2}{n_1} (\sin\alpha + dy \cdot \cos\alpha)$$

$$dy \cdot \cos\alpha = \frac{\sin\alpha - \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin\alpha}{\frac{n_2}{n_1}} = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) \cdot \sin\alpha,$$

A törésmutató megváltozását parciális differenciállal kifejezve:

$$n_1 - n_2 = \frac{\partial n}{\partial l} \cdot dl.$$

$$dy \cdot \cos\alpha = \left( \frac{\frac{\partial n}{\partial l} \cdot dl}{n_1} \right) \cdot \sin\alpha = \left( \frac{\partial n}{n_1 \cdot \partial l} dl \right) \cdot \sin\alpha.$$

A hullám terjedésének irányszögének megváltozása a 2. ábrán látható koordinátarendszer l –el jelölt vízszintes tengelyének mentén:

$$dy = \frac{\partial n}{\partial l} \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \frac{l}{n_1} \cdot dl,$$

$\frac{\partial l}{\partial k} = \partial \operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{\cos^2 \alpha}$  felhasználásával, és a láncszabály bevezetésével megkapjuk a törésmutató megváltozását a  $k$  tengely mentén:

$$\frac{\partial n}{\partial k} = \frac{\partial n}{\partial l} \cdot \frac{l}{\cos^2 \alpha}$$

Gázhalmazállapotú közeg esetében a törésmutató és a sűrűség közt az alábbi összefüggés írható fel:

$$n - 1 = (n_0 - 1) \frac{\rho}{3\rho_0} \left[ 1 - \frac{2}{3} (n_0 - 1) \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \right], [11]$$

A Michelson kísérletnél, fehér fény esetében meghatározott érték ( $n=1,000225$ ). [10]

Normál állapotú levegőnél ( $t = 20^\circ \text{C}$ ,  $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ), a törésmutatót  $n=1,0003$ -nak szokás venni. Az inhomogén közeg határára érkező fénysugár szögeltérésére a következő parciális differenciál függvényt kapjuk abban az esetben, ha  $\sin \alpha \cos \alpha \equiv \frac{\sin 2\alpha}{2} \approx \alpha - \frac{2\alpha^3}{3} \approx \alpha$ , és lineáris közelítéskor  $0 - 25^\circ$ -ig a relatív hiba 14% alatt marad:

$$d\gamma \approx \frac{(n_0 - 1) \left[ 1 + \frac{2(n_0 - 1)}{3\rho_0} \cdot (2\rho - \rho_0) \right] \cdot \frac{\partial \rho}{\partial k}}{3\rho_0 + (n_0 - 1)\rho \left[ 1 - \frac{2}{3} (n_0 - 1) \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right) \right]} \cdot \left( \alpha - \frac{2\alpha^3}{3} \right) dl \approx \frac{n_0 - 1}{3\rho_0} \left[ 1 + \frac{2(n_0 - 1)}{3\rho_0} \cdot (2\rho - \rho_0) \right] \cdot \frac{\partial \rho}{\partial k} \cdot \alpha dl$$

A  $\gamma$  szög megváltozását a  $k$  tengely irányában a sűrűség befolyásolja, a szög a  $dl$ -től, mint függő változótól függően egy négyzetes, parabolikus függvény szerint változik, úgy ahogy azt az a 2. ábrán vastag vonallal jelöltem.

A kapott függvény esetében alapul véve az  $n = 1 + 0,000294 \cdot \frac{\rho}{\rho_0}$  (Biot–Arago-Lorenz törvényt), láthatjuk, hogy a  $k$  tengely mentén nagy sűrűségváltozás ( $\frac{\partial \rho}{\partial k}$  - sűrűség gradiens) is csak nagyon kis  $\gamma$  szögeltérést eredményez.

## A TÖRÉSMUTATÓ ÉS A GÁZÖSSZETÉTEL KAPCSOLATA

A levegő egy olyan gázkeverék, aminek az összetétele ismert és viszonylag állandónak tekinthető. Jellemzője, hogy a legtöbb összetevő százalékos aránya csak kismértékben változik az állapotjelzők megváltozásának hatására. Hő közléssel a levegő hőmérséklete és térfogata növekszik, sűrűsége csökken, törésmutatója a következő függvény szerint változik:

$$n - 1 = \frac{p}{101,32472} \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{0,0002923}{1 + 0,00368 \cdot t} + 0,0000016 \cdot k \right) - 0,0004041 \cdot \frac{e}{760} \quad (2)$$

ahol;  $n$ - a levegő törésmutatója,  $t$ - hőmérséklete,  $p$ - nyomása,  $e$ - a páratartalom, és  $k$ - a szén-dioxid tartalom százalékos aránya. A nyomást a továbbiakban  $p$ -vel jelölöm. Az (1)-el jelölt összefüggést megjelölt forrásból átvett függvény átrendezésével,- és kiemeléssel kaptam. [5]

Az állapotjelzők, gázösszetevők hatását a függvény parciális differenciálásából nyert parciális differenciálegyenletből kapjuk. Az (2)-ből, a hőmérséklet szerinti parciális derivált a következő:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -0,7839 \cdot \frac{p}{t^2} \cdot 10^{-6},$$

A törésmutató nyomás szerinti parciális deriváltja:

$$\frac{\partial n}{\partial p} = \left( 2,8848 + \frac{783,8858}{t} + 0,0158 \cdot k \right) \cdot 10^{-9} \quad (3)$$

ahol;  $p$ - a levegő nyomása Pa -ban,  
 $t$ - a hőmérséklete °C -ban,  
 $k$  – a széndioxid tartalom százalékos aránya.

Amikor a Föld légkörében, mint optikai közegben, olyan fényterjedéssel kapcsolatos jelenségeket vizsgálunk, amelyek a törésmutató megváltozásával valamiképpen összefüggnek, annak széndioxid tartalmának százalékos arányát és hőmérsékletét nem hagyhatjuk figyelmen kívül, azt mérni vagy számolni kell. Ilyen jelenség a fény terjedésének irányváltozása, azaz refrakciója is. Kézenfekvő megoldásnak tűnik tehát, hogy amennyiben a fény refrakcióját, avagy terjedésének irányváltozását szeretnénk meghatározni számítással és méréssel a hőmérsékletet, vagy a gáz komponenseinek, összetevőinek arányát vegyük figyelembe, vagy változtassuk meg.

Az általánosan elfogadott összetétel szerint a széndioxid koncentráció átlagosan 3000-7000ppm közt változik. Ezzel szemben a szénmonoxid aránya alig több, mint 20ppm-nek felel meg. A nitrogén - 78,084, az oxigén - 20,95, az argon - 0,93 térfogatszázaléknak megfelelő arányban van jelen a levegőben. Az utóbbiak kiugróan magas aránya annak téves látszatát keltheti, hogy inkább ezek arányát kellene vizsgálni, akkor, amikor a törésmutató mérését



szeretnénk elvégezni, vagy erre alkalmas mérési eljárást szeretnénk kidolgozni. Függetlenül, attól, hogy milyen térfogatarányban fordulnak elő az egyes összetevők, egyáltalán nem biztos, hogy a magasabb százalékarányt képviselő gázösszetevőt kell alapul venni, annak arányát vizsgálni és mérésére eljárást, módszert kidolgozni. Mindig az a gázösszetevő, avagy komponens, a meghatározó, amelyik megváltozása nagyobb hatással van a vizsgált jellemzőkre. Nem utolsó szempont az érzékelők mérési tartománya és linearitása sem. Ma alig van olyan egy, vagy kétatomos gáz, aminek a vizsgálatára ne lenne könnyen beszerezhető szenzor. [12] Az árak tekintetében nagyon nagyok lehetnek a különbségek. A levegőt alkotó gázok százalékos aránya és a mérésére alkalmas szenzorok árai közt nehéz felismerni valamilyen kapcsolatot. Míg egy szénmonoxid szenzor ára néhány ezer forint, addig egy széndioxid szenzor ára több tízezer forint is lehet. Ha a fényterjedés irányváltozásával kapcsolatos méréseket végezzük és az optikai közeg a levegő, akkor a (3) differenciálegyenlet figyelembevételével a levegő széndioxid tartalmának mérésére külön eljárást kell kidolgozni. A másik összetevő az oxigén, aminek megváltozását érdemes vizsgálni. A mérésére gyártott szenzorok ára magas, de érdekes összefüggések feltárásához járulhat hozzá.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A lézerforrások fejlődésével egyre több olyan alkalmazásról tudunk, ahol ezek a monokromatikus, koherens hullám-, és energiaforrásoknak egyre nagyobb szerepe van, legyen az irányított energiájú fegyver, vagy egy vegyi támadást ért terület biztonságos távolságból végzett vegyelemzése, lézerforrást használó mérőműszer segítségével. A fény légköri terjedésben bekövetkező hibák és pontatlanságok, ma még nem minden eszköz működésében okoznak számottevő hibát. Olyan nagy pontosságú mérések esetében azonban, ahol a fény hullámhosszával, vagy atomok-, molekulák méretével összemérhető eltérések a mérési eredményeket meghamisítják, a pontosságnak nagyon nagy szerepe van.

Az ismertetett összefüggések segítségével számolhatók a várható hibák, kidolgozhatók azok a mérési eljárások és megalkothatók azok a pontos mérőműszerek, amelyekkel tovább vizsgálható a jelenség és további összefüggések tárhatók fel.

## Felhasznált irodalom

- [1] Csuka Antal.: Információvédelem, merre tovább?, ZMNE Kommunikáció 2008 Konferencia kiadványa 2008 október 7., ISBN 978-963-7060-57-1
- [2] Haig Zsolt- Kovács László- Makkay Imre- Seebauer Imre- Vass Sándor- Ványa László: Az információs társadalom veszélyforrásai, A kormányzat szerepe a védelem és ellentétekenység műszaki és szervezeti megoldásaiban, Tanulmány. MEH Informatikai Kormánybiztosság, 2002- Magyar Narancs- URL: <http://www.manacs.hu/index.php?gcPage=/Public/hirek/hir.php&id=14820>; (letöltve 2007.június 30.)
- [3] Bokor Imre: Rádióelektronikai harc korunk háborúiban, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1989, 5-146 pp.
- [4] URL: <http://www.origo.hu/tudomany/20070216lezeres.html>; (letöltve: 2012.12.13)
- [5] Csuka Antal: A Föld légkörének hatása a lézernyaláb terjedésére és a továbbított fénytjeljesítményre, Szolnoki Tudományos Közlemények XV., 2011. nov. 10. URL: [http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Csuka\\_Antal.pdf](http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Csuka_Antal.pdf); (2012.07.01) ISSN 2060-3002,
- [6] Monks P.S.-Garnier C.: Atmospheric Composition Change-Global and regional air quality, Atmospheric Environment, 43, 5268-5350 (2009),

- [7] URL: <http://www.slideshare.net/inexplicable/russian-air-show-2007#btnNext>;  
(2012.12.10)
- [8] URL: [http://www.zmne.hu/hadmernok/kulonszamok/robothadviseles6/vass\\_rw6.pdf](http://www.zmne.hu/hadmernok/kulonszamok/robothadviseles6/vass_rw6.pdf);
- [9] Dr. Grüber J.-Ifj. Szentmártony T: Gázdinamika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1952, pp 90-91
- [10] Dr. Ábrahám Gy.: Optika; Panem Kft kiadó Budapest, 1997; ISBN 963 545 144 X; p 26,29, 286, 292,
- [11] Prof.rer.nat.habil.W. Brunner: Wissenspeicher Lasertechnik, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1982, 28-29pp,
- [12] URL:  
<http://www.figaro.co.jp/en/product/index.php?mode=search&kbn=1&type=30&id=213080>; (2012.12.10)