

# Szabadtéri optikai átvitel, realitások

JESZENŐI PÉTER

Matáv Rt., PKI Távközlésfejlesztési Intézet  
jeszenoi.peter@ln.matav.hu

**Kulcsszavak:** FSO, szabadtéri átvitel, optika, légkör, atmoszféra

*A szabadtéri optikai rendszerek (FSO, Free Space Optical Systems) alkalmazhatóságát nagymértékben befolyásolja az átvivő közeg, a légkör viselkedése. Bizonyos éghajlati viszonyok mellett a szabadtéri rendszerek kiválóan és nagy megbízhatósággal használhatók, más helyeken az időjárás befolyás erősen korlátozza a használatot. Magyarország éghajlati viszonyai nem a legkedvezőbbek ebből a szempontból, de ez nem jelenti azt, az FSO rendszerek alkalmazásáról le kellene mondanunk.*

## 1. Bevezetés

A szabadtéri hírközlésnél a korlátokat és a lehetőségeket több tényező mellett, nagymértékben az határozza meg, hogy az információ hogyan terjed az átvivő közegben. A földfelszíni szabadtéri optikai hírközlés esetén a légkör, az atmoszféra az átvivő közeg. A légkör tulajdonságai, zavaró hatása erősen befolyásolja az átvitel minőségét. Cikkünkben röviden áttekintjük a szabadtéri optikai rendszerek működését, de főképpen azokat a légköri tulajdonságokat tekintjük át, amelyek alapvető befolyással vannak a szabadtéri optikai átvitelre. Végül megpróbálunk választ adni arra a kérdésre, hogy a mi, magyarországi éghajlati viszonyaink mellett milyen eredményességgel használhatók az FSO rendszerek.

## 2. Szabadtéri optikai berendezések

A szabadtéri optikai rendszerekben az átvitel nem fényvezető kábeleken történik, hanem szabadon terjedő lézersugarak hordozzák az információt, melyeket lencserendszerek segítségével fókuszálnak és irányítanak a megfelelő helyre. Az információt hordozó (modulált) lézernyalábot egy másik lencserendszer gyűjti össze és fókuszálja a vevőre (detektorra). Természetesen az átvitelhez, a fényterjedés miatt, az adó és a vevő között teljesen szabad átláthatóság szükséges.

A berendezések a nem látható, közeli infravörös hullámhossz tartományban működnek. Az atmoszféra tulajdonságai a hosszabb hullámhosszakon kedvezőbbek ugyan, de arra a tartományra nem állnak rendelkezésre megfelelő árú és minőségű optikai eszközök.

A szabadtéri optikai rendszerekkel folytatott kísérletek nem új keletűek. Katonai alkalmazásokra ilyen berendezéseket már a második világháborúban használtak, de igazi elterjedésük kezdete a hetvenes évekre tehető. Ekkor jelentek meg az első digitális berendezések néhányszor 10 kbit/s-os kapacitással. A legújabb fejlesztésű eszközök már STM-16 (2,5 Gbit/s) kapacitás

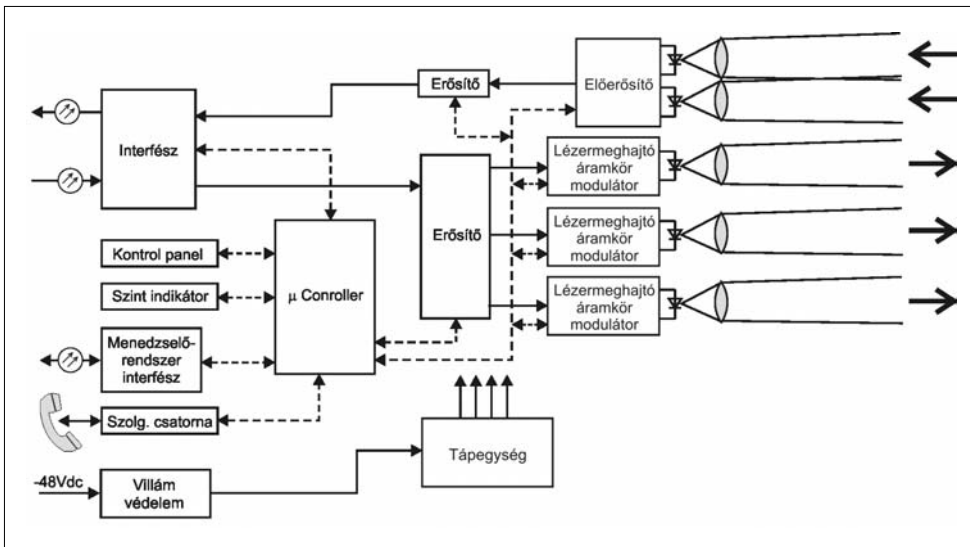
továbbítását ígérik. A katonai alkalmazások fő mozgatórugója a biztonság volt. A jól nyalábolt fénysugarak csak azon a helyen vehetők, ahová azokat irányították. Ez a mai rendszereknél sincs másképp. A vezetékes és a mikrohullámú rendszerek közel sem annyira védettek az illetéktelen hozzáférés ellen, mint szabadtéri optika.

### 2.1. Az FSO berendezések felépítése, működése

A megvalósított berendezések általában egy önálló egységként jelennek meg. A kültéri egység („fej”) tartalmazza a szabadtéri (air) interfészt, és az adó-vevő funkciókat ellátó áramköröket. Az esetek nagy részében ebben az egységben valósítják meg a menedzselő rendszer csatlakoztatását, itt vannak elhelyezve a tápellátás, a berendezés állapotának kijelzésére szolgáló jelzőlámpák, display. A fejegységek általában – a tápellátást nem számítva – csak fényvezető interfésszel rendelkeznek, ez nagyon előnyös villámvédelmi szempontból. A tisztán optikai csatlakozás a kisülések esetén teljes védelmet nyújt a fejegységre csatlakozó egyéb berendezések számára. Nem elhanyagolható szempont az, hogy az optikai hozzávezetés által automatikusan megoldott vezetett zavarok elleni védelem is. A fej tápellátó kábelének villámvédelme viszonylag olcsón és biztonságosan megoldható.

A beltéri egység, ha egyáltalán szükséges az adott rendszerhez, a berendezés menedzseléséhez, a menedzselő rendszer esetleges illesztéséhez, szolgálati telefon végződtetéséhez szükséges áramköröket tartalmazza. A beltéri egység tartalmazhatja azokat a speciális multiplexereket, amelyek az FSO rendszer sokoldalú felhasználhatóságát hivatottak biztosítani. Ilyen lehet például olyan megoldás, amikor egy 100 Mbit/s-os Ethernet átvitel mellett néhány 2 Mbit/s továbbítását is biztosítja a rendszer.

A kültéri egységek vázlatos felépítése látható az 1. ábrán. A fejegység az ábra szerinti esetben szabványos interfésszel csatlakozik a távközlő hálózathoz, vagy egyéb berendezésekhez. Az FSO berendezések nagy része nem alkalmaz kódátalakítót, így adásirány-



1. ábra  
FSO berendezések általános rendszertechnikai felépítése

ban az interfészre érkező jel csak egy jelkódicionáláson esik át, és általában direkt modulációval modulálja az adólézereket. Az adólézerek tipikus hullámhossza 820...850 nm vagy 1550 nm. A kimeneti teljesítmény a lézermeghajtó áramkörökkel fényvisszacsatolás útján stabilizálva van. A kültéri alkalmazás miatt előforduló magas működési hőmérsékletek miatt gyakran a lézereket aktív, Peltier elemes hűtéssel is ellátják. Vételirányban direkt detektálás történik, majd kiszajú előerősítő és egy nagyobb szintű erősítő hajtja meg az interfész áramkört. Általában mindkét erősítő szabályozott, AGC és/vagy limiter fokozatokat tartalmaznak a légkör okozta csillapítás és a turbulenciák okozta fading kiküszöbölésére. Az előerősítők a vételi szinttel arányos feszültséget állítanak elő, mely feldolgozás után működte a szintindikátor kijelzőt, illetve megjelenítődik a menedzselő rendszerben.

A blokkvázlaton ismertetett berendezés nem tartalmaz kód- és bitsebesség függő áramköröket. Így bizonyos határok között tetszőleges kódolású és bitsebességű jelek továbbíthatók a rendszeren. Így a berendezés alkalmas lehet például 20-160 Mbit/s-os sebesség-határok között bináris jelek továbbítására. Az ilyen transzparens átvitelnek műszaki szempontból nagy hátránya, hogy a berendezésben nincs jelregenerálás, a vonalon keletkezett jitter és egyéb nem kívánatos hatások „kilátszanak” a berendezés felhasználói interfészén. A digitális jel torzulásai miatt a gyártók nem is javasolják ilyen megoldású berendezésekből épült linkek sorba kapcsolását. A berendezések használhatóságát (és árát) növeli, ha a berendezésekbe beépül a 3R regenerátor funkció. Ez azt jelenti, hogy a mindkét irányban nem csak erősítés és jelformálás történik, hanem az átvitt jeleket újra is időzítik. Így természetesen csak az adott bitsebességű és kódolású jelek továbbíthatók. További előny lehet, hogy az ismert jelformátum monitorozható, az összeköttetésről PM (Performance Monitoring) adatok kaphatók.

Az 1. ábra blokkvázlatán látható, hogy egy berendezésben több adó és vevő eszköz van elhelyezve. Ez az úgynevezett térdiversity megoldás. Az egymástól 20-30 cm távolságban elhelyezett adók és vevők a légköri turbulenciák káros hatását hivatottak kivédeni. A tér különböző részein haladó nyalábok jó valószínűséggel küszöbölnek ki, vagy legalábbis elviselhető értékre csökkentik a jelentkező gyors fadinget. Az önállóan induló nyalábok a vétel helyén már átlapolódva kerülnek a vevőre.

Diversity alkalmazása esetén a különböző berendezés gyártóknál a legkülönbözőbb variációk fordulnak elő az alkalmazott adók és vevők számát illetően. Nem jellemző, hogy négy adónál vagy négy vevőnél többet alkalmaznának. Rövidebb távolságú és alacsonyabb bitsebességekre készült berendezéseknél elegendő egyetlen adó- és vevőrendszer használata. Így ezek a berendezések lényegesen olcsóbbak.

Az FSO berendezések fejegységei általában robusztus felépítésűek, egyrészt a teljes vízmentesség (IP66 védettség), másrészt a lencserendszerek tökéletes párhuzamosságát biztosítani hivatott nagy merevségű szerkezeti felépítés miatt. A fejegységek stabil mechanikai rögzítése nagy odafigyelést igénylő feladat. Különösen figyelemre méltó ez akkor, ha meggondoljuk, hogy beállításakor a fejegységet tized milliradián pontossággal kell tudnunk irányba állítani. A berendezések telepítés utáni összecélzásának elősegítésére gyakran építenek a fejegységekre közepes nagytávú fegyvertávcsövet, vagy az adott működési hullámhosszra is érzékeny mini kamerát.

### 3. Az légkör tulajdonságai, zavaró hatása a szabadtéri optikai jelátvitelre

Amikor a fény egy közegen áthalad, energiája elnyelődés, visszaverődés és szóródás következtében csökken. Ez távközlési szempontból azt jelenti, hogy a fény-sugár a forrás és a nyelő között csillapítást szenved. A légkör csillapítása a különböző összetevők együttes hatásaként jelentkezik:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a$$

ahol:

- $\alpha_m$  molekuláris elnyelés (abszopció),
- $\alpha_a$  aeroszol elnyelés (abszopció),
- $\beta_m$  molekuláris vagy Rayleigh szórás,
- $\beta_a$  aeroszol vagy Mie szórás.

A csillapítás mellett a légköri turbulenciák is erős negatív hatást fejtenek ki.

### 3.1. Fényelnyelés

Fényelnyelésről, abszorpcióról akkor beszélünk, ha az atom vagy molekula a beérkező fotont elnyeli, s hatására magasabb energiájú állapotba kerül. Ez lehet egy elektron energiaszint átmenete, vagy egy atom vagy atomcsoport kezd intenzívebb rezgő mozgást végezni. A fotonnak az így átadott energiája a szomszédos atomokkal való ütközések során fokozatosan szétterjed az egész anyagban, és hővé alakul. Megkülönböztethetünk molekuláris és aeroszol elnyelést.

Az atmoszférikus átvitel szempontjából a „legkárosabb” hatást kifejtő anyagok: a széndioxid, az ózon és a vízgőz. A 0,7-4,0 μm-es tartományban a vízgőz jelenléte jelenti a legnagyobb problémát. 4,0 μm hullámhossz felett a CO<sub>2</sub> abszorpció is jelentős. A 2. ábrán a látható a közeli infravörös tartományra, a 3. ábrán pedig a távoli infravörös tartományra jellemző atmoszféra „átlátszóság”. A számos abszorpciós maximum között található „ablakok” azok a sávok, melyek különösen alkalmasak atmoszférikus hírközlésre.

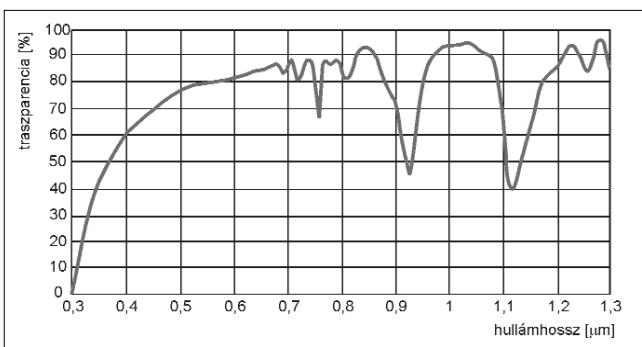
A légköri aeroszolak egy része természetes úton, más része a különböző ipari szennyezések következtében kerül a levegőbe. A részecskék jellemző mérete 0,1-10 μm közötti. Sajnos a légkörben jelenlévő aeroszolak mintegy 80%-a földfelszín feletti 1 km magasságú térrészben található, vagyis, ahol az FSO rendszereket használjuk.

### 3.2. Szórás

Szórásról (scattering) akkor beszélünk, ha a fénysugár az útjába kerülő részecske hatására irányt változtat. Ha a szóró részecskék mérete lényegesen kisebb,

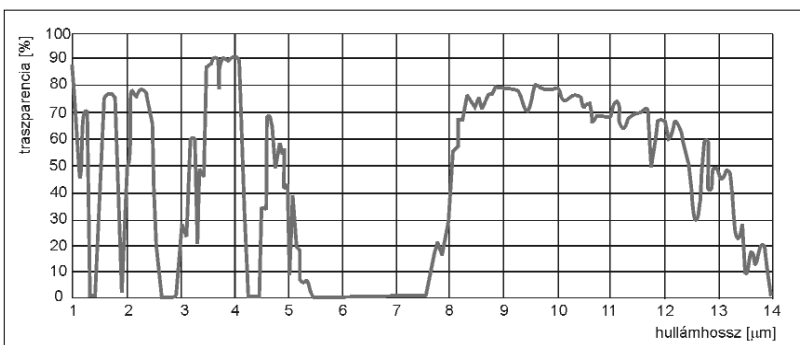
2. ábra

A légkör átlátszósága a közeli infravörös tartományban



3. ábra

A légkör átlátszósága a távoli infravörös tartományban



mint a fény hullámhossza akkor beszélünk Rayleigh-szórásról. A hullámhosszal nagyságrendileg azonos részecskék okozzák a Mie-szórás. A hullámhossznál lényegesen nagyobb részecskeméret esetén (például esőcsepp, hó) takaró hatás lép fel.

A Rayleigh-szórás a légkört alkotó, főleg nitrogén és oxigén gázok miatt állandóan jelen van, és egy hullámhosszfüggő csillapítást hoz létre. Jellezője, hogy a szórt és a teljes beeső fény intenzitásviszonya a fény hullámhosszának negyedik hatványával fordítottan arányos, tehát a hosszabb hullámhosszúságú fény jóval kisebb mértékben szóródik, mint a rövidebb.

A Mie-szórásnál megváltozik a polarizációviszony és az irányeloszlás is: jóval több fény szóródik előre, mint hátra. A szóródás változatlanul hullámhosszfüggő, de már nem annyira, mint a Rayleigh-szórásnál. Itt is fennáll a nagyobb hullámhosszak tartományában való kisebb szórási jelleg.

Az aeroszolak olyan kolloidális, kvázistabil, diszperz rendszerek, amelyekben a diszpergáló fázis gáz, a diszpergált anyag pedig vagy folyadék, vagy szilárd. Speciális, korunkra, a nagyvárosi levegőre igen jellemző aeroszolfajta a fotokémiai szmog. Bizonyos mesterséges eredetű légszennyező anyagok (például a kipufogógázok) a Nap sugarainak hatására átalakulnak, és úgynevezett peroxi-acetilén-nitrát (PAN) és más N-tartalmú részecskék képződnek, amelyekre a 0,5 μm körüli méret a jellemző.

A tapasztalatok szerint a nyalábc sillapítás legnagyobb részét a légkörben lévő vízgőz, vagyis a köd okozza. A természetben ködről akkor beszélünk, ha a látástávolság 1000 m alatti.

A Mie-szórás csillapítási tényezője tapasztalati képlettel közelítőleg számítható [1]:

$$\beta_a = \frac{3,91}{V} \left( \frac{\lambda}{550nm} \right)^{-\delta}$$

ahol

V látótávolság [km]

λ hullámhossz [nm]

δ részecskék méreteloszlása

δ = 1,6 ha a látótávolság V > 50 km,

δ = 1,6 ha látótávolság 6 km < V < 50 km,

δ = 0,585V<sup>1/3</sup> ha a látótávolság V < 6 km

A másik tapasztalati képlet közvetlenül csillapításértéket szolgáltat dB/km egységben [5]:

$$a = \frac{17}{V} \left( \frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,195V}$$

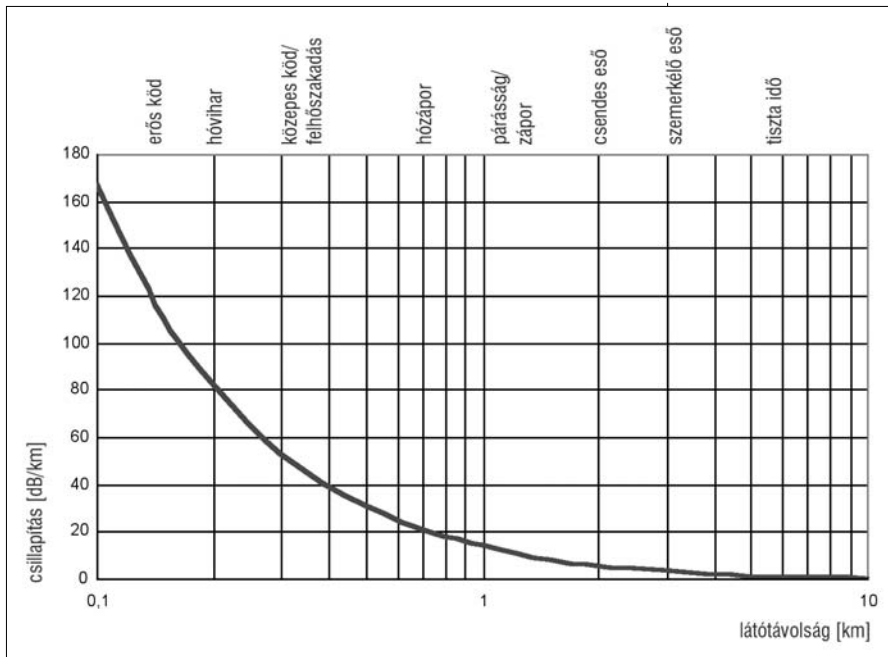
ahol

V látótávolság [km]

λ hullámhossz [μm]

A túloldali, 4. ábrán a csillapítás alakulását láthatjuk látótávolság függvényében 850 nm-re.

Az ábrán feltüntettük a jellemző időjárási viszonyokat is.



4. ábra  
Az atmoszféra csillapítása a látótávolság függvényében

Az 1. táblázat az „International Visibility Codes for Weather Conditions and Precipitation” táblázat alapján készült és a jellemző időjárási viszonyok mellett fellépő légkörscillapítást szemlélteti.

### 3.3. Turbulencia

Az atmoszférikus optikai hírközlést jól átlátszó légkör esetén a legjobban sújtó probléma a különböző sűrűségű, ezáltal különböző törésmutatójú levegőrészek keveredéséből adódó gyorsan változó, moduláló hatás, melynek következtében az információt hordozó fény intenzitása nagy sebességgel, nagy tartományban változik. Az eltérő törésmutatójú turbulens atmoszféraszakaszok lencseként viselkedve eltérítik, szétszórják a nyalábot, különösen akkor, ha a hullámhossz és a nyalábátmérő a turbulens magok méreténél kisebb. A jelenség csak statisztikai úton írható le, és számos tényező befolyásolja: hullámhossz, nyalábátmérő, éghajlati viszonyok, napszak, évszak, földfelszín hőelnyelő

és hőleadó képessége, mesterséges hőforrások jelenléte.

A létrejövő nyalábátmérővel azonos, vagy nagyobb méretű turbulenciák elsősorban nyalábvándorlást okoznak. A nyalábvándorlás véletlenszerű változási sebessége jellemzően 1 kHz alatti. Hosszú, 1 kilométernél hosszabb szakaszok esetén, szélső esetben ez teljes kiesést is okozhat egy diversityt nem alkalmazó rendszernél. Hosszabb hullámhosszknál a nyalábvándorlás jelensége kisebb mértékben jelentkezik, így az 1550 nm-es rendszereket kevésbé befolyásolja.

A nyaláb törésmutató átmenetknél előforduló fázisfront változásai – amit a kicsi méretű, néhány centiméteres turbulens magok

okoznak – a vevőben intenzitás ingadozásoként jelentkeznek. Ez látható fénytartományban is jó megfigyelhető villódzás vagy szcintilláció. A nyalábvándorláshoz hasonlóan itt is a hosszabb hullámhosszakon némileg jobb a helyzet, a szcintilláció hatása kevésbé jelentkezik. A szcintillációt a földfelszín közelében fokozottan érvényesül, ezért a földfelszíntől, nagyobb sugárzó felületektől lehetőleg minél magasabbra célszerű telepíteni az összeköttetéseket.

### 3.4. Környezeti fény, háttérsugárzás

A rádió hírközlésben a háttér sugárzása csak különlegesen nagy érzékenységű vevők és földre vagy napra néző antenna esetén jelent problémát. Az optikai sávban ennél jóval nagyobb teljesítményű zavar sugárzásra számíthatunk, mely közvetve, a vevő sajátzaj növelésén keresztül csökkenti az érzékenységet. A közeli infravörös tartományban a napsugárzás, a nappali fény jelent problémát, de a távolabbi infravörös sávokat is zavarja a környezet háttérsugárzása.

Különös veszélyt jelent, ha a vevő közvetlenül a napba „néz”. Ez azon túl, hogy néhány percre meghiú-

1. táblázat Csillapítási értékek

Időjárási kondíció	Csapadék forma		Mennyiség [mm/óra]	Látótávolság	Csillapítás [dB/km]
Nagyon sűrű köd				0...50 m	270
Sűrű köd	hó			200 m	60
Erős köd	hó			500 m	21
Köd	hó	felhőszakadás	100,0	770...1000 m	12,5...9,2
Gyenge köd	hó	zápor	25,0	1,9...2 km	4,2...3,9
Páráság	hó	eső	12,5	2,8...4 km	2,6...1,6
Gyenge páráság	hó	gyenge eső	2,5	5,9...10 km	1...0,45
Tiszta idő	hó	szemerkélés	0,25	18,1...20 km	0,24...0,22
Nagyon tiszta idő				23...50 km	0,19...0,06

sítja az információtovábbítást, a vevő komoly fizikai károsodását is okozhatja. A földrajzi hely, és a telepítési irányszögek esetén kiszámítható, hogy fenn áll-e ez a veszély vagy sem. Ha igen, akkor a telepítési hely praktikus megválasztásával lehet védekezni ellene, például úgy, hogy a berendezéseket épület, vagy egyéb tereptárgy takarásában helyezzük el.

### 3.5. A nyaláb stabilitása

Az optikai sávban kis méretek esetén is különlegesen nagy antennanyereség érhető el, az optikai nyaláb jól koncentrálható. Az így adódó kis nyalábdivergencia rendkívül hasznos a teljesítményviszonyok és a geometriailag korlátozott összeköttetés miatt, viszont új problémát vet fel: a nyalábstabilitás kérdését. A nyalábvándorlást a rögzítés instabilitása is okozhatja, ezért minden esetben vizsgálni kell egy adott rendszer telepítési lehetőségeit stabilitás szempontjából a nyalábdivergencia ismeretében. A kis divergencia (1 mrad alatt) miatt már problémát jelent a kapcsolatfelvétele is. A mechanikai instabilitás mellett nyalábvándorlást okoz az atmoszféra rétegződése miatt keletkező nyalábhajlás is, mely általában napszakváltásoknál jelentkezik.

### 3.6. A zavaró hatások elleni védekezés

A felsorolt nehézségek leküzdésére számos technikai megoldás alkalmazható, melyek közül az első (berendezés-) tervezési szempont a megfelelő hullámhossz kiválasztása, és ennek összevetése a technikai lehetőségekkel. Az 2. és 3. ábra atmoszféra átlátszóssági karakterisztikái alapján megállapítható, hogy kedvező, kis csillapítású ablakok találhatóak a GaAlAs lézerek, LED-ek 820-850 nm-es változatainál, a NdYAG lézer 1,06  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszán, 1550 nm felett, és a CO<sub>2</sub> lézer 10,6  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszán. További szempontok: a modulálhatóság, a nyalábképzés egyszerűsége, a felhasználható optikai anyagok minősége (lencse, prizma, ablak), az eszköz élettartama, és az adott hullámhosszon használható fényforrások, detektorok elérhetősége, minősége. Az atmoszféra tulajdonságai miatt a legkedvezőbb lenne a 10,6  $\mu\text{m}$ -en, a CO<sub>2</sub> lézer hullámhosszán dolgozni, a turbulencia, porok, ködök, csapadék hatása itt kevésbé zavaró, és nagy teljesítményű adóeszköz is áll rendelkezésre. Az optikai elemek anyaga és a vevőeszköz szempontjából a hossz-hullámú infravörös tartomány nem túl kedvező.

A minden hullámhosszon zavaró környezeti fény, a háttérsugárzás elleni védekezés módszerei a következők: kis sávzélességű vevőszűrő alkalmazása, a vevőlátószög korlátozása, az optikai rendszer belső reflexiója miatt keletkező szórt fény kizárása.

A turbulencia okozta villódzás a mikrohullámú összeköttetéseknel már ismert jelenség, az ott alkalmazott centiméter nagyságrendű hullámhossz, és az általában 1 m-nél nagyobb nyalábátmérő mellett a turbulencia csupán 1 dB nagyságrendű gyors fadingot okoz. A szabadtéri optikai átvitelnél is csak akkor jelentkeznek súlyos problémák, ha az adóból kilépő nyalábátmérő a turbulens magok méreténél kisebb. 0,4-0,5 m-

nél nagyobb nyalábátmérő esetén már enyhébb problémát jelent a turbulencia, de ebben az esetben is úgy kell a vevőelektronikát tervezni, hogy a vevő elviselje a viszonylag mély gyors fadiagot (limiter lánc, gyors AGC). A nyalábtágítással azonos hatás érhető el egy megfelelően kialakított térdiversity alkalmazásával is.

A nyalábstabilitás problémájának megoldása a stabil, szilárdan rögzített telepítés és a nem túl kicsi adási kúpszög (nyalábszéttartás, divergencia). Nagy adási kúpszög ugyan előnyös lenne a stabilitás szempontjából, azonban nagy teljesítményvesztéssel jár. Az 1 mrad körüli stabilitáskövetelménynek az antennatornyok általában nem felelnek meg, ezért az iránytartáshoz követő rendszerrel kell kiegészíteni az optikai berendezést, alkalmazása szinte teljes mértékben megoldja a nyalábvándorlást, elhajlás problémáját és automatikus célzást, keresést tesz lehetővé.

## 4. FSO rendszerek alkalmazási korlátai

Az alkalmazási korlátok között első helyen kell említeni a közvetlen rálátás szükségességét, és a légkör zavaró hatását az összeköttetésre, mely káros hatás az áthidalandó távolsággal hatványozottan növekszik. Hátányos, hogy bár nagyon ritkán, de a berendezések karbantartást igényelnek, vagyis az optikai felületeket időnként meg kell tisztítani, és célszerű egyúttal ellenőrizni az berendezések beállítását is.

Van egy eddig még nem említett, nem az atmoszféra viselkedésével összefüggő korlátozó tényező is. Ez a lézertbiztonság. A kisugárzott infravörös nyalábokat az emberi szem nem érzékeli, így a szem „blendéje” nem reagál, nem húzódik össze, a nagy fényteljesítmény a retinára vetülve szemkárosodást okozhat. Ezért kisugárzott fényteljesítményt nem lehet minden határon túl növelni. Az MSZ EN 6825-12 szabvány pontosan meghatározza a megengedhető határértékeket. 1550 nm hullámhosszon lényegesen kedvezőbb alakul a helyzet a 850 nm-hez képest, ugyanis ezek a hullámhosszak szétszóródnak, elnyelődnek a szemlencsében, nem tudnak a retinára fókuszálódni. Lényegesen nagyobb kisugárzott teljesítmények engedhetők meg, nagyobb távolságok hidalhatók át.

### 4.1. Időjárási hatások térségünkben

Megfelelő részletességgel bemutattuk az egyes légköri jellemzők szabadtéri optikai rendszerekre kifejtett hatását. A külön-külön tárgyalt jellemzők hatásaazonban együtt jelentkezik. Bár számos következtetést vonhatunk le a különböző időszakos tényezők zavaró hatásának ismeretéből, az atmoszférikus optikai hírközlés szempontjából lényeges kérdés csupán az, hogy ezek a zavaró jelenségek milyen valószínűséggel fordulnak elő egy adott időjárási övezetben.

Közép-Európát, Magyarországot az időjárási sokszínűség jellemzi. Ez nem kedvező a szabadtéri optikai átvitel szempontjából. Az eső és a hóesés kevésbé növeli meg a légkörcsillapításértékeit, az igazi „ellenség” a köd.

A Mie-szórás tárgyalásánál láttuk, hogy a látótávolsággal jól összefüggésbe hozhatók a légköri csillapítás viszonyok. A látótávolságot naponta többször rögzítik az ország számos pontján meteorológiai megfigyelések. Ezek kis kivételtől eltekintve szubjektív megfigyelések, és csak a nappali órákra vonatkoznak. Műszeres, objektív látótávolság méréseket jellemzően repülőtereken végeznek, de több közútkezelő, autópálya üzemeltető is rendelkezik ilyen műszerezettséggel. A látótávolság mérő műszerek akár közvetlenül transzparenciát mérnek, akár reflexiós elven működnek 550 nm hullámhosszon esetleg fehér fényvel végzik a méréseket. Az eredményeket korrigálni kell az FSO rendszerek 850 vagy 1550 nm-es hullámhosszára.

A hosszú időn át (5-10 év) rögzített látótávolság adatok feldolgozása, még a szubjektív megfigyelések is, egy jó áttekintést nyújthatnak, arról, hogy az egyes területeken milyen valószínűséggel kell olyan körülményekkel számolnunk, amely olyan csillapítás viszonyokat eredményez, hogy a szabadtéri optikai átvitel lehetetlenné válik. Néhány FSO berendezéseket gyártó cég megvásárolja ezeket az (jellemzően repülőtéri) adatokat, és felhasználja az összeköttetések használhatósági értékeinek becslésére.

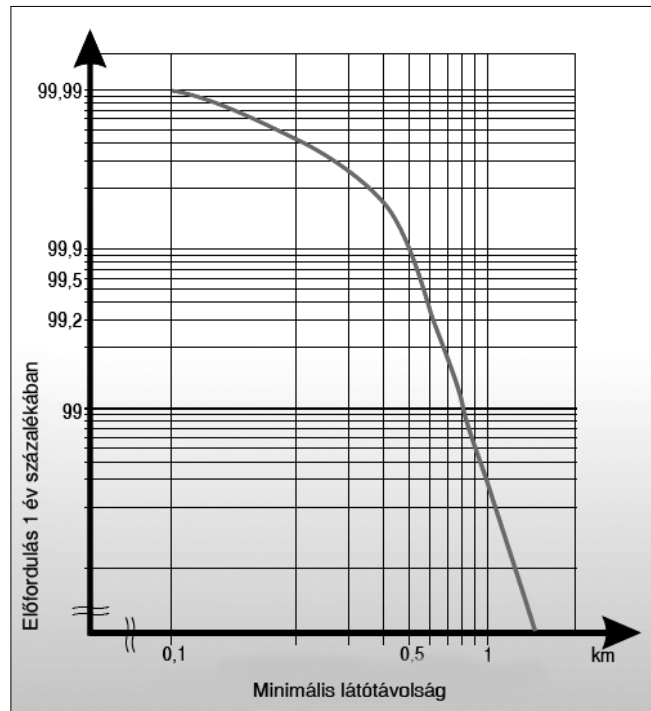
#### 4.2. Látótávolság és a szabadtéri optikai összeköttetések használhatóságának kapcsolata

A látótávolság, az a legnagyobb távolság, melyről a szem felbontóképességének értékénél ( $0,3^\circ$ ) nagyobb szög alatt érzékelhető tárgy – az atmoszféra elnyelő hatása ellenére is – a kontraszt-különbség folytán a háttértől vizuálisan megkülönböztethető. Ez a definíció látótávolságra egy meglehetősen leegyszerűsített interpretáció, hiszen a látótávolságot a megvilágítás, a háttér színe stb. befolyásolja. A meteorológiai észlelési utasítások írják le részletesen ezt a fogalmat.

Irodalmi adatok találhatóak arra vonatkozóan, hogy közép-európai városokban éves viszonylatban, az idő százalékában kifejezve hogyan alakul minimális látótávolság mértéke [5]. Ezt szemlélteti az 5. ábra. Feltétlen le kell szögezni, hogy a fenti diagramban ábrázoltaktól a helyi viszonyok akár lényegesen is eltérhetnek mindkét irányban.

Több mint ezer FSO link mérési tapasztalatai alapján a közép-európai éghajlati viszonyokra a 6. ábrán látható rendelkezésre állási (availability) értékek érhetőek el a szakasz hossz függvényében [5].

Az ábra üzenete egyértelmű: ha a távközlési szolgáltatótól minimálisan elvárt 99,5-99,9%-os rendelkezésre állási elvárások esetén 500-600 méternél nagyobb szakasztávolságokkal nem számolhatunk. Modern, nagy dinamikatartományú FSO rendszereknél megfigyelt gyakorlati tapasztalat, hogy az összeköttetések a hibamentes működéséhez a látótávolságnak legalább a szakasz hossz 65-75%-át el kell érnie.



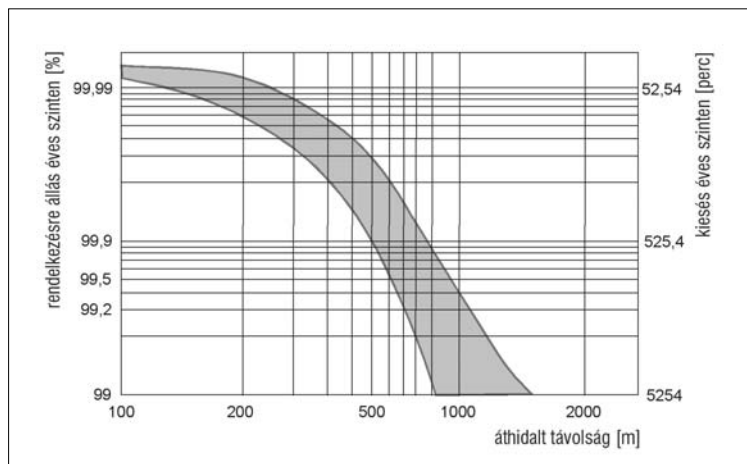
5. ábra  
Látótávolság (km) százalékos eloszlása éves viszonylatban

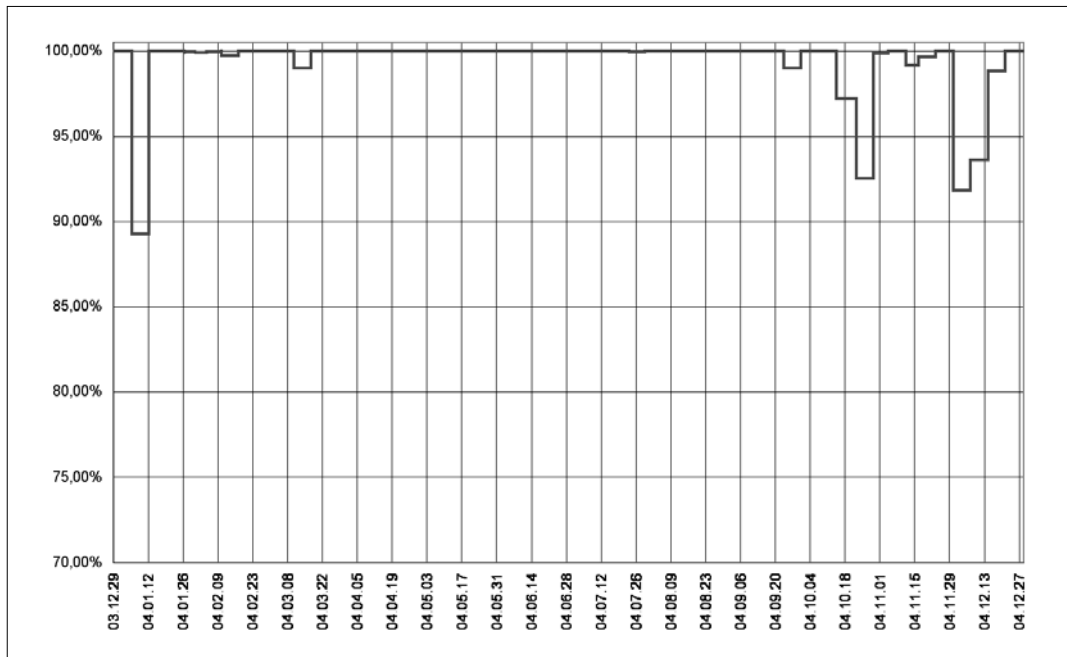
#### 4.3. Mérési eredményeink

Végezetül két egy Budapesten üzemelő 1280 méter szakasz hosszúságú STM-1 link rendelkezésre állását mutatjuk meg az elmúlt két évre vonatkozóan (7. és 8. ábra).

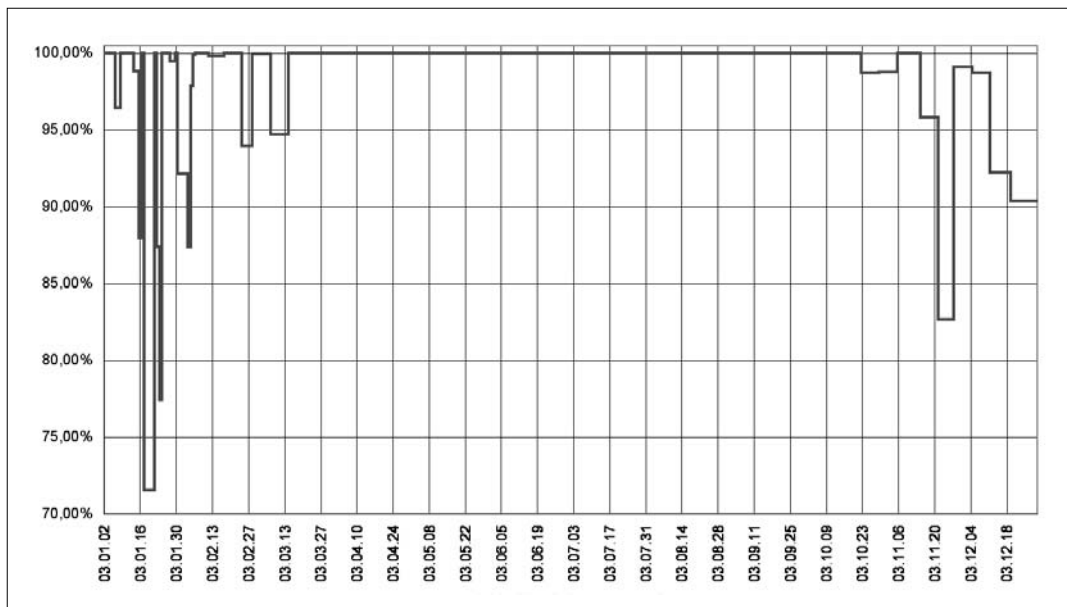
A vizsgált rendszer dinamikatartománya hozzávetőlegesen 30 dB. A bemutatott eredmények egyértelműen mutatják, hogy a késő ősztől, kora tavaszig terjedő időszak a kritikus. Ebben az időszakban fordul elő gyakran köd, erősen párás idővel együtt hulló csapadék. Nyári időszakban is tapasztaltunk olyan mértékű ködöt – főleg a kora reggeli órákban – amelynek hatására történt megszakadás, de ezek a megszakadások nagyon rövid idejűek és nagyon ritkák voltak.

6. ábra  
Rendelekezésre állás a szakasz hossz függvényében közép-európai éghajlaton





7. ábra  
Rendelkezésre állás alakulása 2003-ban



8. ábra  
Rendelkezésre állás alakulása 2004-ben

## 5. Összegzés

Az egyes FSO eszközöket gyártó cégek referenciái, alkalmazási példái, valamint az elmúlt időszakban szerzett saját tapasztalataink azt mutatják, a magyarországi időjárási viszonyok mellett is van létjogosultsága az FSO rendszerek alkalmazásának.

Nem állnak sajnós rendelkezésre azok az adatbázisok, amelyekkel jó közelítéssel meg lehetne mondani, hogy az egyes konkrét földrajzi helyeken milyen minőségi paraméterekkel, milyen várható használhatósági értékekkel üzemeltethetünk szabadtéri optikai rendszereket. Általában elmondhatjuk, hogy 99,9%-os, vagy jobb rendelkezésre állást „szembiztos” teljesítmény tartományban üzemelő, 100-155 Mbit/s átvitelét biztosító FSO rendszerekkel 500 méternél nagyobb távolságok esetén nem lehet biztosítani.

A rendszerek használhatósága, rendelkezésre állása a távolság növelésével drasztikusan csökken, ami nem jelenti azt, hogy akár éves viszonylatban is nem fordulhatnak elő kiugróan jó használhatósági eredmények.

## Irodalom

- [1] Dr. Heinz Willebrand, Baksheesh S. Ghuman: Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks; SAMS Indianapolis, USA, 2001
- [2] <http://www.freespaceoptics.org/.../WhitePapers>
- [3] <http://www.fsona.com/.../TechnicalFAQ>
- [4] <http://www.laserbit.net/products.php>
- [5] <http://www.cbl.de/.../WhitePapers>
- [6] Jeszenői Péter: Szabadtéri optikai átvitel; PKI Tudományos Napok kiadvány, 2002.