

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 228

ISSN 1213-418X

Otakar Wilfert

**MODELOVÁNÍ ATMOSFÉRICKÝCH
OPTICKÝCH SPOJŮ
SOUČASNÝ STAV,
TRENDY VÝVOJE A VÝUKA**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Doc. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

MODELOVÁNÍ ATMOSFÉRICKÝCH OPTICKÝCH SPOJŮ
Současný stav, trendy vývoje a výuka

THE MODELING OF ATMOSPHERIC OPTICAL LINKS
State of the Art, Trends and Education

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
ELEKTRONIKA A SDĚLOVACÍ TECHNIKA



BRNO 2007

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické komunikace, atmosférické přenosové prostředí, optické bezkabelové spoje, stacionární model spoje, statistický model spoje

KEYWORDS

Optical communications, atmospheric transmission medium, optical wireless links, steady model of the link, statistical model of the link

OBSAH

1 ÚVOD	5
1.1 Historie a současný stav atmosférické optické komunikace	6
1.2 Základní pojmy a vztahy	7
1.3 Atmosférické přenosové prostředí	9
2 STACIONÁRNÍ MODEL	12
2.1 Uspořádání spoje a teoretická východiska pro výkonovou bilanci	12
2.2 Výkonová bilance atmosférického optického spoje	13
3 STATISTICKÝ MODEL	18
3.1 Rozložení hustoty pravděpodobnosti atmosférického útlumu	19
3.2 Rozložení hustoty pravděpodobnosti dob trvání úniků	21
3.3 Pravděpodobnost přerušení spoje s danou dobou trvání	22
3.4 Závěr	23
4 KOMPLEXNÍ MODEL	23
4.1 Systémová rezerva, normovaná linková rezerva a funkce překročení	24
4.2 Nomogram pro výpočet nedostupnosti spoje	24
4.3 Pravděpodobnost doby trvání úniku dané hloubky	25
4.4 Závěr	26
5 LABORATOŘ AOS FEKT VUT V BRNĚ	27
5.1 Výzkumné aktivity	28
5.1.1 Datové spoje pro brněnskou metropolitní síť	28
5.1.2 Implementace technologie AOS do sítě Českého Telecomu	28
5.1.3 Optický spoj pro vlakovou soupravu	29
5.1.4 Atmosférický optický spoj pro municipální síť	31
5.2 Pedagogické aktivity	31
5.3 Popularizace výsledků výzkumu	32
5.4 Závěr	32
Literatura	34
Abstract	39

Otakar Wilfert se narodil v roce 1944 v České Třebové. V roce 1961 absolvoval jedenáctiletou střední školu v Teplicích se všeobecným zaměřením, v roce 1964 Vyšší dělostřelecké učiliště v Martine se zaměřením na radiolokaci a v roce 1971 Vojenskou akademii v Brně, obor elektrotechnické inženýrství. V letech 1971 až 1973 pracoval jako učitel skupiny kybernetiky na Vojenském technickém učilišti v Liptovském Mikuláši a věnoval se analogovým počítačům a mikrovlnné technice. Po vzniku Vysoké vojenské technické školy v Liptovském Mikuláši v roce 1973 učil fyziku na katedře fyziky a ve výzkumné oblasti se zaměřil na laserovou techniku. V roce 1983 byl pověřen založením a vedením katedry mikroelektroniky a laserové techniky. V roce 1984 obhájil na Vojenské akademii v Brně v oboru aplikované fyziky disertační práci s názvem „Efektivní odrazná plocha objektů v optické oblasti spektra“ a získal tak vědeckou hodnost kandidáta technických věd. V roce 1985 byl jmenován docentem pro obor vojenské techniky.

V roce 1990 byl přijat na místo docenta na ústavu radioelektroniky FEI VUT v Brně, zaměřil se na oblast optoelektroniky a optických komunikací a v této oblasti zavedl několik nových předmětů. V rámci programu Sokrates absolvoval několik pobytů na zahraničních univerzitách spojených s přednáškou a spoluprací (Pforzheim University of Applied Science v Německu, 2002 a 2003; University of Cantabria ve Španělsku 2004; Technische Universität Wien v Rakousku, 2006). V roce 2005 předložil na FEKT VUT v Brně habilitační práci s názvem „Optické bezkabelové spoje“, po jejíž úspěšné obhajobě mu byl udělen titul docent.

Za svého pedagogického působení na dvou vysokých školách zavedl do výuky 3 nové předměty na Vysoké vojenské technické škole v Liptovském Mikuláši a 10 nových předmětů na VUT v Brně pro magisterské a doktorské studium i pro nové bakalářské studium. Vybudoval celkem 2 výukové a jednu vědeckou laboratoř a je autorem celkem 10 titulů výukových skript. V současné době Doc. Wilfert na Ústavu radioelektroniky FEKT VUT v Brně vyučuje předměty: „Optoelektronika“ v bakalářském studiu; „Kvantová a laserová elektronika“ a „Fotonika a optické komunikace“ v magisterském studiu a „Současné metody a nové principy optických komunikací“ v doktorském studium. Doc. Wilfert vedl více než 40 diplomových prací, více než 10 bakalářských prací a vedl (vede) 12 doktorandů.

Výzkumná práce Doc. Wilferta je zaměřena na využití atmosférických optických spojů v komunikačních sítích. Je řešitelem jednoho projektu Národního programu výzkumu II, jednoho grantu Grantové agentury České republiky a na řešení několika dalších grantů této agentury spolupracuje. Dále řešil několik grantů Fondu rozvoje vysokých škol a jeden grant VUT v Brně. Spolupracuje na řešení dvou výzkumných záměrů.

V letech 1994 až 1996 byl Doc. Wilfert pověřen vedením detašovaného pracoviště Katedry radioelektroniky na Kraví hoře.

Je členem vědeckých společností SPIE, IEEE, European Optical Society, České a Slovenské společnosti pro fotoniku a vedoucí sekce D „Elektronika a fotonika“ Českého komitétu URSI. Je členem redakční rady vědeckého časopisu „Radioengineering. Od roku 1992 je vedoucí vědeckého týmu věnujícího se atmosférickým optickým spojům.

V roce 2006 byla Doc. Wilfertovi udělena rektorem VUT v Brně stříbrná medaile za celoživotní činnost v pedagogické a vědeckovýzkumné činnosti ve prospěch FEKT VUT v Brně.

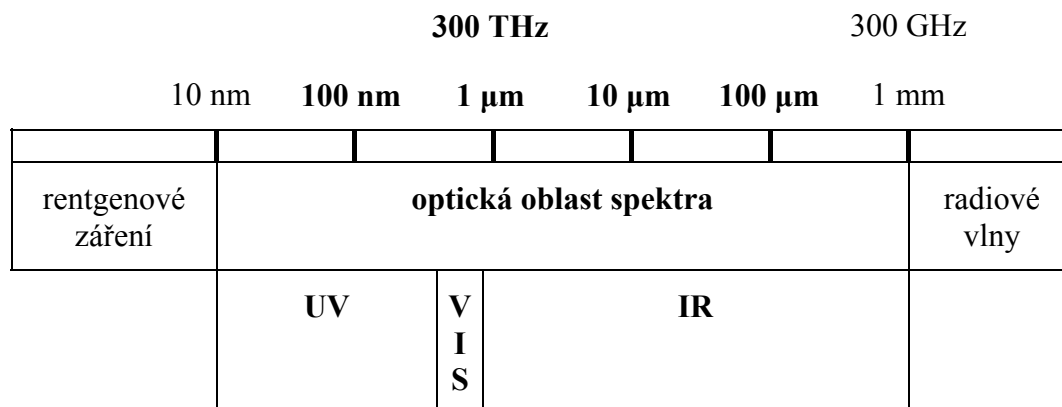
1 ÚVOD

Atmosférickým optickým spojem (AOS) se rozumí komunikační technologie, která přenáší signál v atmosféře pomocí optických svazků. S ohledem na atmosférické podmínky přenosu, dostupnost prvků vláknové optiky použitelných při konstrukci spoje a bezpečnost práce s lasery jsou pro přenos používány vlny v pásmu 850 nm a 1550 nm (obr. 1.1).

AOS jsou zajímavé z několika důvodů:

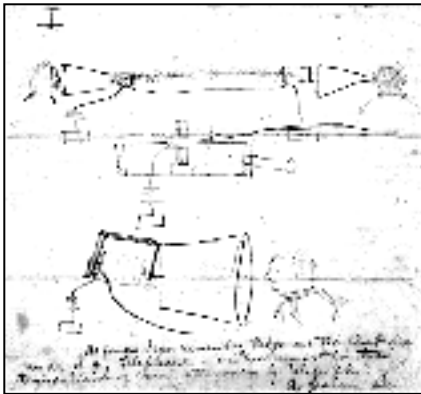
- Jejich použití není v současné době vázáno na licenční řízení.
- Pracují v rozsahu optických vlnových délek a nedochází tedy ke znečišťování životního prostředí vyzařováním elektromagnetické energie na radiových frekvencích.
- Mohou pracovat v takovém rozsahu úrovní optické intenzity, která vyhovuje hygienickým normám a ani při přímém pohledu do vysílače nenastane poškození zraku vyzařovaným optickým výkonem.
- Díky velmi úzkému svazku (řádově miliradiány) mohou být rušeny nebo odposlouchávány jen velmi obtížně. Nemají žádné postranní vyzařování. Případný narušitel musí prakticky vstoupit do svazku, což lze monitorovat.
- Potenciál AOS z hlediska šířky pásma přenosu odpovídá možnostem vláknové optiky, jsou tedy přirozeným článkem moderních kabelových optických sítí.
- Mohou pracovat v režimu jednofotonového přenosu s technikou distribuce kvantových stavů fotonů umožňující aplikaci optické kvantové kryptografie s vysoce zabezpečeným přenosem utajovaných zpráv.

Kromě názvu „atmosférické optické spoje“ (zkráceně AOS), používaného v této přednášce, se v publikacích vyskytují také jiná označení, např. „optické bezkabelové spoje“, anglicky „optical wireless links“ nebo „free-space optical links“ se zkratkou FSO. Poslední uvedený termín má obecnější význam a je používán i pro optické spoje pracující v kosmickém prostoru. Přednáška je zaměřena na spoje umístěné vně budov pracující s jedním nebo více úzkými optickými svazky a k označení spoje bude použita zkratka AOS. Zpravidla se jedná o digitální duplexní spoj s intenzitní modulací typu OOK (on-off keying) a přímou detekcí.



Obr. 1.1 Vymezení optického pásma v kmitočtovém spektru

1.1 Historie a současný stav atmosférické optické komunikace



Obr. 1.2 Bellův „photophone“
(autentický náčrtek)

Vynálezce telefonu Alexander Graham Bell v roce 1880 vynalezl zařízení s názvem „photophone“, které přeneslo lidský hlas pomocí světelného paprsku na vzdálenost několika desítek metrů. Sám Bell si „photophonu“ cenil víc než telefonu. „Photophone“ byl založen na mechanickém chvění zrcadla vyvolaném lidským hlasem (viz autentický náčrtek na obr. 1.2). Zrcadlo bylo nastaveno tak, aby odrazilo sluneční světlo směrem k přijímači, kde bylo absorbováno černou bavlnou. Množství absorbovaného optického výkonu odpovídalo výchylkám zrcadla a způsobilo změny objemu absorbující bavlny vyvolávající zvukové vlny. Tímto způsobem byly změny pohlceného výkonu přeměněny opět na lidský hlas.

Technologie použitá při konstrukci Bellova zařízení nebyla schopna zabezpečit kvalitu komunikace dnešních požadavků, ale jednalo se o první zařízení, na kterém byla předvedena funkce optického spoje, kterému se dnes říká „atmosférický optický spoj“.

V roce 1960 přichází Theodor Harold Maiman s vynálezem laseru. Vynálezem laseru byl odstartován výzkum optických komunikací mezi satelity. V letech 1961, 1962 byly vyvinuty první laserové diody (zde patří prvenství Prochorovovi, Basovovi) a fotodiody. Produkce laserových diod a fotodiody umožnila široký rozvoj optických komunikací ve volném prostoru jak kosmickém, tak pozemském.

Publikace o praktických aplikacích AOS se objevují počátkem devadesátých let 20. století. Významným úspěchem v této oblasti byla demonstrace spoje označeného jako „no-fiber optical data link“ v Bellových laboratořích [78]. Parametry spoje z Bellových laboratoří (přenosová rychlost 2,5 Gb/s a dosah 2,4 km) ukázaly pozoruhodné možnosti této technologie a přitáhly pozornost mnoha vědců, techniků a potenciálních uživatelů AOS.

Dnes vyrábí AOS řada zahraničních firem. K rozvoji a rozšiřování AOS dochází pro jejich typické výhody: vysoce směrový optický svazek zaručující vysokou prostorovou selektivitu přenosového kanálu; vysoká přenosová rychlost umožňující plnohodnotné nasazení AOS ve všech typech přenosových sítí; pásmo optické nosné vlny ležící mimo oblast působnosti ČTÚ.

Nevýhodou AOS zůstává závislost dostupnosti spoje na stavu počasí, nebezpečí přerušení svazku letícím ptákem a potřeba přímé viditelnosti mezi koncovými body (hlavicemi) spoje. Pro zvýšení spolehlivosti AOS se začíná uplatňovat řada nových metod. Některé firmy úspěšně aplikují v hlavicích spojů čistě fotonickou technologii. Jedná se o vyloučení několikanásobného převodu signálu z elektrické oblasti do optické a naopak. Šíření, zesilování a dělení signálu (jak výkonově, tak spektrálně) je prováděno přímo v optické oblasti a zvyšuje se tak spolehlivost a rychlost komunikace. S fotonizací hlavic spojů souvisí aplikace erbiem dotovaných světlovodných zesilovačů (EDFA) a WDM multiplexorů. K výkonovému dělení světla se používají světlovodné prvky, jejichž konce jsou upraveny tak, aby jimi bylo možno přímo ozařovat vysílací optickou soustavu.

Podstatné zvýšení spolehlivosti spoje se dosahuje uspořádáním spojů do tzv. „mesh“ topologie (polygonální uspořádání spojů) se vzájemnou vzdáleností hlavic nepřesahující hodnotu 500 m [1]. Spoje s relativně nízkým požadavkem na dosah jsou cenově velmi příznivé. Zajímavým řešením je doplnění AOS mikrovlnným záložním spojem [2]. Vhodnou kombinací uvedených metod lze dosáhnout dostupnost spoje až 99,99%.

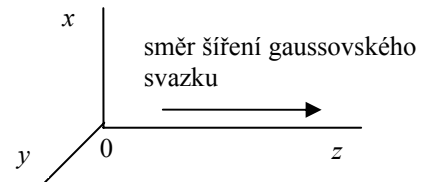
1.2 Základní pojmy a vztahy

Pro AOS je důležitý případ, kdy se optické vlny šíří v úzkém svazku, např. podél osy Oz v souřadnicové soustavě $Oxyz$ (obr. 1.3). Vlny, jejichž normály vlnoploch svírají s osou Oz malý úhel, se nazývají paraxiálními vlnami. Takové vlny musí vyhovovat vlnové rovnici

$$\nabla^2 \dot{E}(\vec{r}) + k^2 \dot{E}(\vec{r}) = 0, \quad (1.1)$$

kde $\dot{E}(\vec{r})$ je komplexní amplitudu elektrického pole a k je vlnové číslo. Důležitým řešením vlnové rovnice pro případ paraxiální vlny je vlna, která se nazývá *gaussovský svazek*.

Optický výkon gaussovského svazku je prakticky soustředěn do úzkého kužele a optická intenzita v rovině kolmé na směr šíření vlny je daná kruhově symetrickou gaussovskou funkcí s maximem I_0 na ose svazku. Osa svazku je totožná se souřadnicovou osou Oz . Kraj svazku je definovaný poklesem optické intenzity na hodnotu I_0/e^2 (obr. 1.5). Vzdálenosti kraje svazku od osy svazku se říká *pološířka svazku* s označením w . Gaussovský svazek je nejužší v místě, kterému se říká *krček svazku*. V krčku svazku se pološířka svazku označuje w_0 .



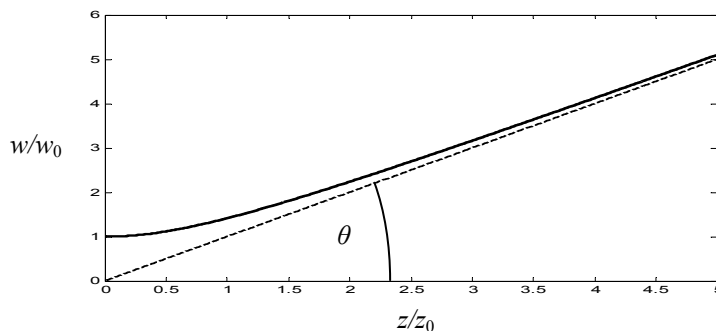
Obr. 1.3 Souřadnicová soustava $Oxyz$ a směr šíření gaussovského svazku

Do průsečíku osy svazku s rovinou krčku svazku se klade počátek souřadnicové soustavy $Oxyz$. Krček svazku leží v rovině xOy . Pološířka svazku na obě strany od počátku pomalu narůstá. Z praktického hlediska má smysl uvažovat pouze svazek pro kladné hodnoty souřadnicové osy Oz (viz obr. 1.4).

Podrobnou analýzou (viz např. [3], [4]) lze dospět k důležitým parametrům a charakteristikám gaussovského svazku. Závislost pološířky svazku na souřadnici z je vyjádřena vztahem

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1.2)$$

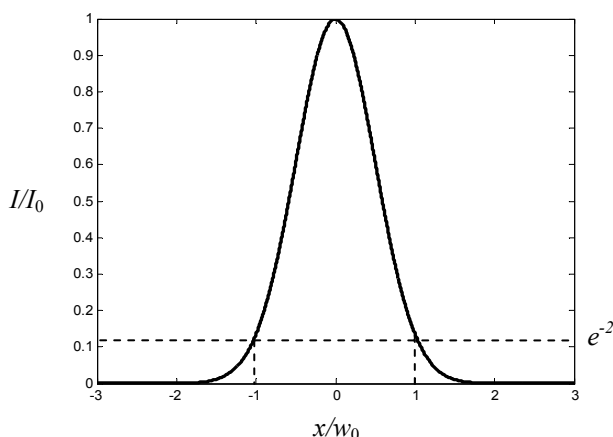
kde $z_0 = \frac{kw_0^2}{2}$ je *Rayleighova vzdálenost* (také *hranice blízké a vzdálené zóny záření*). Ve vzdálenosti z_0 od počátku je pološířka svazku daná vztahem $w(z_0) = w_0 \sqrt{2}$. Graf závislosti normované pološířky svazku w/w_0 na bezrozměrné souřadnici z/z_0 má tvar hyperboly (obr. 1.4).



Obr. 1.4 Závislost normované pološířky svazku na bezrozměrné souřadnici z/z_0

Úhel θ , který svírá asymptota hyperboly s osou svazku, se nazývá *úhel divergence*. Pro úhel divergence platí

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z} = \frac{2}{kw_0}. \quad (1.3)$$



Obr. 1.5 Normovaná optická intenzita jako funkce bezrozměrné souřadnice x/w_0 ; (pro $z = 0$)

Řešením vlnové rovnice pro komplexní amplitudu elektrického pole gaussovského svazku $\dot{E}(x, y, z)$ vychází po příslušných úpravách tvar

$$\dot{E}(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{w^2(z)} \left(1 + j \frac{z}{z_0}\right)} e^{-j \left[kz + \varphi(z) - \frac{\pi}{2} \right]}, \quad (1.4)$$

kde E_0 je reálná amplituda.

Pro optickou intenzitu gaussovského svazku pak platí

$$I(x, y, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 e^{-2 \frac{x^2+y^2}{w^2(z)}}, \quad (1.5)$$

kde I_0 je optická intenzita na ose svazku v počátku ($x = y = z = 0$). Rozložení normované optické intenzity v příčné rovině Oxy je znázorněno na obr. 1.5.

Celkový optický výkon přenášený gaussovským svazkem je daný integrálem

$$P = \int_0^{\infty} I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho, \quad (1.6)$$

kde ρ je radiální vzdálenost $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ od osy svazku. Po integraci je

$$P = \frac{1}{2} I_0 \pi w_0^2. \quad (1.7)$$

Výkon P_w přenášený v příčné rovině ($z = \text{konst.}$) vnitřkem kružnice o poloměru w lze vyjádřit integrálem

$$P_w = \int_0^{\rho=w} I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho \approx 0,86P. \quad (1.8)$$

Ve svazku omezeném krajem definovaným vztahem (1.2) se tedy přenáší přibližně 86 % celkového vyzářeného výkonu.

1.3 Atmosférické přenosové prostředí

Atmosférické jevy vyvolávají útlum, přerušování a fluktuaci přenášeného optického výkonu. Dochází k tzv. únikům různých hloubek a dob trvání (viz kap. 3). Příliš vysoká úroveň záření pozadí snižuje rozsah dynamiky přijímače spoje, popřípadě vyvolá jeho saturaci. Konzoly hlavic spoje ozařované Sluncem se deformují a způsobují odklon svazku. Na nehomogenitách indexu lomu atmosféry velkých rozměrů nastává (zejména v letních nočních hodinách) odklon svazku v důsledku tzv. refrakce. Obecně je útlum přenášeného optického výkonu, fluktuace optické intenzity v rovině apertury přijímače a přerušování svazku vyvoláno navzájem závislými náhodnými atmosférickými jevy a modelování tohoto procesu je značně náročné.

Útlum atmosféry

Útlum atmosféry je vyvolán absorpcí a rozptylem světla na molekulách plynů a aerosolech přítomných v atmosféře. Společné důsledky absorpce a rozptylu lze charakterizovat jako tzv. *extinkce* (zeslabení optické intenzity) pro kterou platí Beerův zákon [5]

$$dI(z, \lambda) = -\alpha_e(z, \lambda)I(z, \lambda)dz, \quad (1.9)$$

kde $dI(z, \lambda)$ je elementární úbytek optické intenzity $I(z, \lambda)$ na spektrální složce λ při průchodu záření elementární vrstvou atmosféry dz ve vzdálenosti z od zdroje a $\alpha_e(z, \lambda)$ je *koeficient extinkce* (v $[m^{-1}]$). Lze-li předpokládat konstantní hodnotu koeficientu extinkce na celé trase délky L , dostane se integrací vztah

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) \exp[-\alpha_e(\lambda)L], \quad (1.10)$$

kde $I_2(\lambda)$ je optická intenzita na konci vrstvy a $I_1(\lambda)$ je optická intenzita na začátku vrstvy L . Koeficient extinkce je veličinou aditivní a lze ho vyjádřit jako součet dílčích složek odpovídajících jednotlivým atmosférickým jevům.

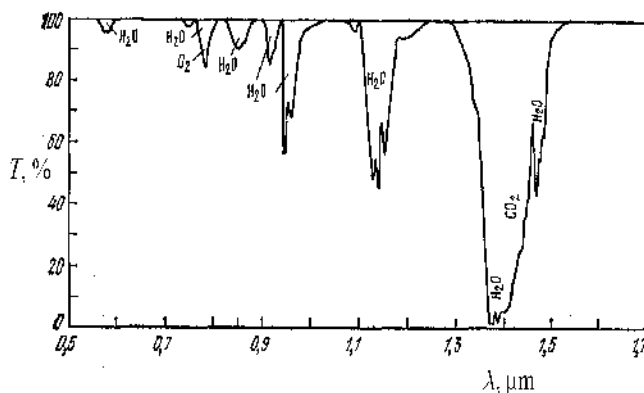
Pro energetickou bilanci AOS je významná veličina *meteorologická viditelnost*, která je definovaná pro $\lambda = 555$ nm jako délka trasy v atmosféře L , při níž člen $\exp[-\alpha_e(\lambda)L]$ nabývá hodnoty 0,02. Mezi meteorologickou viditelností V_M a koeficientem extinkce α_e platí definiční vztah

$$0,02 = e^{-\alpha_e V_M} \quad (1.11)$$

a po úpravě

$$\alpha_e = \frac{3,91}{V_M}; \quad (\lambda = 555 \text{ nm}). \quad (1.12)$$

Na obr. 1.6 je pro orientaci uveden graf propustnosti „čisté“ atmosféry na úrovni mořské hladiny při délce trasy 1 km. Šířka spektrální čáry optického vysílače byla 1,5 nm [6].



Obr. 1.6 Propustnost „čisté“ atmosféry na úrovni mořské hladiny při délce trasy 1 km (podle [6])

Délka vlny nosné se u AOS předpokládá ve spektrálních oknech 780 nm, 850 nm a 1550 nm. Pro vyjádření koeficientu extinkce lze pak použít obecnější vztah [79]

$$\alpha_e(\lambda) \approx \frac{3,91}{V_M \left(\frac{555}{\lambda} \right)^q}; \quad [\text{km}^{-1}; \text{km}, \text{nm}], \quad (1.13)$$

kde $q = 0,16 V_M + 0,34$ pro $1 \text{ km} < V_M < 6 \text{ km}$; (opar)
 $q = V_M - 0,5$ pro $0,5 \text{ km} < V_M < 1 \text{ km}$; (střední mlha)
 $q = 0$ pro $V_M < 0,5 \text{ km}$; (silná mlha)

Zeslabení optické intenzity v atmosféře je možno charakterizovat pro určitou trasu L a určitou délku vlny λ také koeficientem útlumu $\alpha_{1,part}$ definovaným vztahem

$$\alpha_{1,part} = \frac{-1}{L} 10 \log \frac{I_2}{I_1}. \quad (1.14)$$

(Označením „*part*“ se zdůrazňuje, že se jedná o útlum na částicích.) Vztah mezi koeficientem extinkce α_e v $[\text{km}^{-1}]$ a koeficientem útlumu $\alpha_{1,part}$ v $[\text{dB}/\text{km}]$ je možno odvodit ve tvaru

$$\alpha_e^{[\text{km}^{-1}]} = 0,23 \alpha_{1,part}^{[\text{dB}/\text{km}]}. \quad (1.15)$$

V tab. 1 je uveden přehled hodnocení stavu atmosféry podle hodnot koeficientu útlumu $\alpha_{1,part}$ a meteorologické viditelnosti V_M .

Tab. 1 Přehled číselných hodnot V_M a $\alpha_{1,part}$ při různých stavech atmosféry

V_M [km]	$\alpha_{1,part}$ [dB.km ⁻¹]	stav atmosféry
< 0,05	> 340	silná mlha
0,2 až 0,5	85 až 34	střední mlha
1,0 až 2,0	14 až 7,0	slabá mlha nebo silný déšť
2,0 až 4,0	7,0 až 3,0	opar
10 až 23	1,0 až 0,5	„čistá“ atmosféra

Z tab. 1 je vidět, že hlavním činitelem způsobujícím útlum světla v atmosféře je mlha. V porovnání s mikrovlnnými spoji jsou AOS méně citlivé na déšť, ale více citlivé na mlhu. Pro „čistou“ standardní atmosféru se uvádí hodnota koeficientu útlumu 0,5 dB/km (s označením $\tilde{\alpha}_{1,atm}$).

Turbulence atmosféry

V důsledku teplotních nebo mechanických vlivů dochází v atmosféře k proudění vzduchu. Za určitých podmínek laminární proudění vzduchu přechází do chaotického stavu, tzv. turbulence [7]. V turbulentní atmosféře vznikají vzdušné víry o různých rozměrech od největšího L_0 (vnější měřítko turbulence) po nejmenší l_0 (vnitřní měřítko turbulence). Důsledkem je vznik fluktuací indexu lomu, tzv. *optická turbulence*.

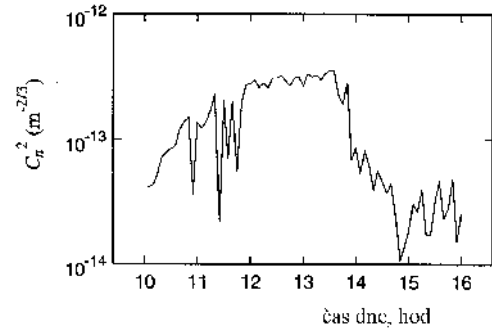
Optickou turbulenci lze charakterizovat Kolmogorovým zákonem „dvou třetin“ [8]

$$\left\langle [n(A,t) - n(B,t)]^2 \right\rangle_{time} = C_n^2 \rho^{\frac{2}{3}}; \quad \rho \in (l_0 - L_0), \quad (1.16)$$

kde výraz na levé straně rovnice představuje *strukturní funkci indexu lomu*; A, B jsou body prostoru; t je čas; ρ je vzájemná vzdálenost bodů AB a C_n^2 je *strukturní parametr indexu lomu* v $[m^{-2/3}]$. Strukturní parametr indexu lomu je veličina, která je mírou optické turbulence. Číselné hodnoty C_n^2 leží obvykle v intervalu mezi $10^{-14} m^{-2/3}$ a $10^{-12} m^{-2/3}$. Příklad rozložení C_n^2 v průběhu dne je uveden na obr. 1.7. Pro „klidnou“ standardní atmosféru se uvádí hodnota strukturního parametru indexu lomu $10^{-14} m^{-2/3}$ (s označením \tilde{C}_n^2).

Důsledkem optické turbulence je několik jevů [9]:

- rozšiřování svazku (náhodné změny divergence svazku přesahující čistou difrakci a způsobující náhodný pokles přijímaného optického výkonu),
- bloudění svazku (náhodné úhlové odklony svazku od přímočarého směru),
- fluktuace úhlu dopadu (náhodný pohyb optické skvrny v rovině aktivní plochy fotodiody),
- scintilace (fluktuace optické intenzity v průřezu svazku zhoršující poměr signálu k šumu v přijímači a vyvolávající hluboké úniky),
- ztráta prostorové koherence původně koherentní optické vlny.



Obr. 1.7 Příklad rozložení C_n^2 v průběhu dne na Floridě během zimního období (podle [7])

Frekvence časových změn optického výkonu způsobených turbulencí má hodnotu řádu do stovek Hz.

Za předpokladu homogenní ($C_n^2 = konst$) a slabé ($C_n^2 \approx 10^{-14} m^{-2/3}$) turbulence lze odvodit relativní varianci optické intenzity (tzv. *scintilační index*) ve tvaru

$$\sigma_{I,rel}^2 = K_I C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}, \quad \text{pro } \sigma_{I,rel}^2 < 1 \quad (1.17)$$

kde L je délka trasy optického svazku a K_I je konstanta:

$$\begin{aligned} K_I &= 1,23 && \text{pro rovinnou vlnu} \\ K_I &= 0,50 && \text{pro sférickou vlnu} \end{aligned}$$

Relativní variance optické intenzity je definovaná vztahem

$$\sigma_{I,rel}^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \quad (1.18)$$

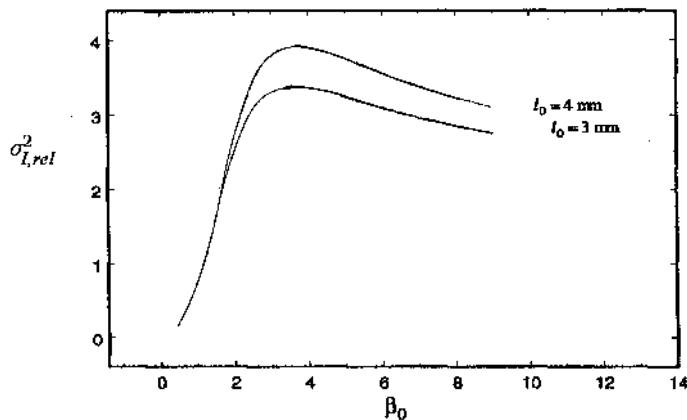
kde I je optická intenzita a závorky $\langle \rangle$ vyjadřují časově střední hodnotu příslušné veličiny.

Při šíření světla mezi hlavicemi AOS má z praktického hlediska smysl uvažovat šíření *sférické vlny*. V případě sférické vlny bývá výraz na pravé straně rovnice (1.17) označen symbolem β_0^2 s názvem *Rytova variance*; $\left(\beta_0^2 = K_1 C_n^2 (2\pi/\lambda)^7 L^{\frac{11}{6}} \right)$.

Při slabé turbulenci ($\sigma_{I,rel}^2 < 1$) roste $\sigma_{I,rel}^2$ lineárně s $(C_n^2 L^{\frac{11}{6}})$, avšak při silné turbulenci $\sigma_{I,rel}^2 > 1$ dochází k jevu nasycení a scintilační index při dalším zvětšování míry turbulence C_n^2 nebo při zvětšování délky trasy L zůstává přibližně konstantní. V případě silné turbulence platí pro scintilační index vztah [7]

$$\sigma_{I,rel}^2 = 1 + \frac{2,73}{(\beta_0^2)^{2/5}} \quad \text{pro } \sigma_{I,rel}^2 > 1. \quad (1.19)$$

Grafické znázornění závislosti scintilačního indexu $\sigma_{I,rel}^2$ na veličině β_0 s uvážením vztahů (1.17) a (1.19) je uvedeno na obr. 1.8.



Obr. 1.8 Graf závislosti scintilačního indexu na veličině β_0 (podle [7])
(l_0 – vnitřní měřítka turbulence)

2 STACIONÁRNÍ MODEL

Při návrhu a energetické bilanci AOS se používá matematický model, který je tvořen *výkonovou bilanční rovnicí a výkonovým úrovnovým diagramem*. Veličiny použité ve výkonové bilanční rovnici a ve výkonovém úrovnovém diagramu vystupují jako *střední hodnoty*.

2.1 Uspořádání spoje a teoretická východiska pro výkonovou bilanci

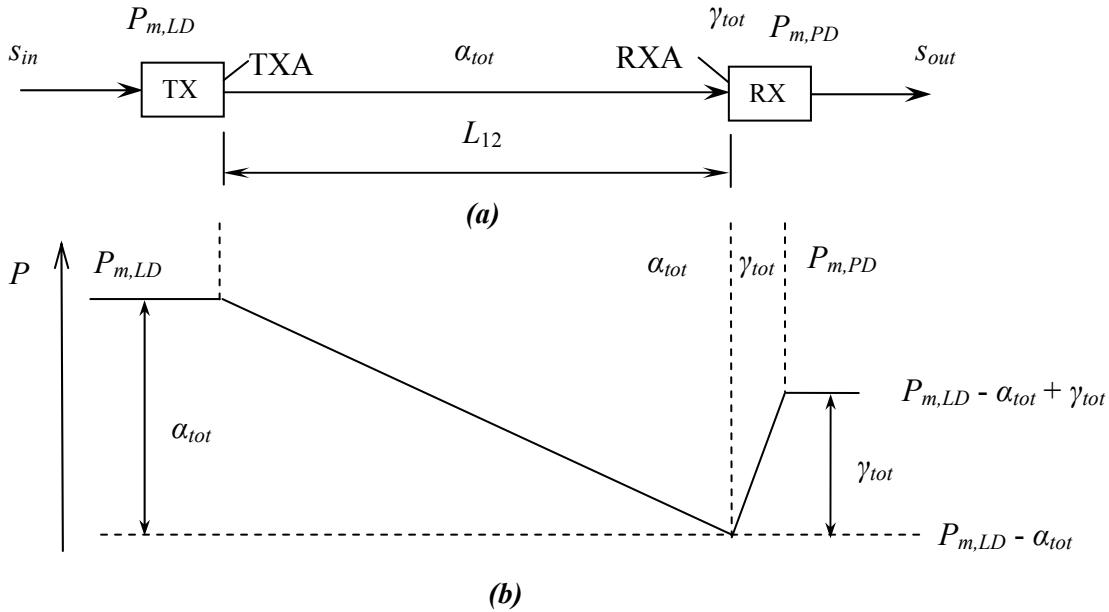
Základní uspořádání jedné cesty AOS spolu s výkonovým úrovnovým diagramem je uvedeno na obr. 2.1. S přihlédnutím k uspořádání spoje znázorněném na obr. 2.1 (a) lze sestavit jednoduchou výkonovou bilanční rovnici ve tvaru [10]

$$P_{m,PD} = P_{m,LD} - \alpha_{tot} + \gamma_{tot}, \quad (2.1)$$

jejíž grafické znázornění formou výkonového úrovnového diagramu je uvedeno na obr. 2.1 (b).

Při modelování spoje se předpokládá, že signál je přenášen *gaussovským svazkem*. Základními parametry svazku pro energetickou bilanci spoje jsou: pološířka svazku v rovině vysílací apertury w_{TXA} , úhlová šířka svazku (kraj – kraj) φ_t a délka vlny λ . Je výhodné předpokládat, že v rovině TXA je šířka svazku rovna právě průměru vysílací čočky. (Tento předpoklad lze snadno splnit.) Při energetické bilanci spoje se předpokládá standardní „čistá

a klidná“ homogenní a stacionární atmosféra, jejímiž parametry jsou koeficient útlumu $\tilde{\alpha}_{1,atm} \approx 0,5 \text{ dB/km}$ a strukturní parametr indexu lomu $\tilde{C}_n^2 \approx 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$.



Obr. 2.1 (a) Základní uspořádání jedné cesty AOS

(b) Výkonový úrovnňový diagram spoje

(ve vysílači se předpokládá laserová dioda a v přijímači lavinová fotodioda)

(s_{in} – vstupní signál; s_{out} – výstupní signál; $P_{m,LD}$ – střední výkon laserové diody; $P_{m,PD}$ – střední výkon na fotodiodě; TX – hlavice s vysílačem; RX – hlavice s přijímačem; TXA – výstupní apertura; RXA – vstupní apertura; α_{tot} – celkový útlum; γ_{tot} – celkový zisk; L_{12} – vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem)

2.2 Výkonová bilance atmosférického optického spoje

Celkový útlum na spoji α_{tot} se při podrobné analýze dělí na útlum vzniklý ve vysílacím systému $\alpha_{\Sigma,t}$, útlum šířením α_{12} , útlum vyvolaný atmosférickými jevy α_{atm} a útlum vzniklý v přijímacím systému $\alpha_{\Sigma,r}$. V decibelové míře pak platí

$$\alpha_{tot} = \alpha_{\Sigma,t} + \alpha_{12} + \alpha_{atm} + \alpha_{\Sigma,r}. \quad (2.2)$$

Útlum šířením α_{12} je určen poměrem optických intenzit na ose svazku v místě přijímače a vysílače (viz obr. 2.2). Divergentní gaussovský svazek lze ve vzdálené zóně záření aproximovat sférickou vlnou a pro útlum šířením lze pak snadno odvodit vztah

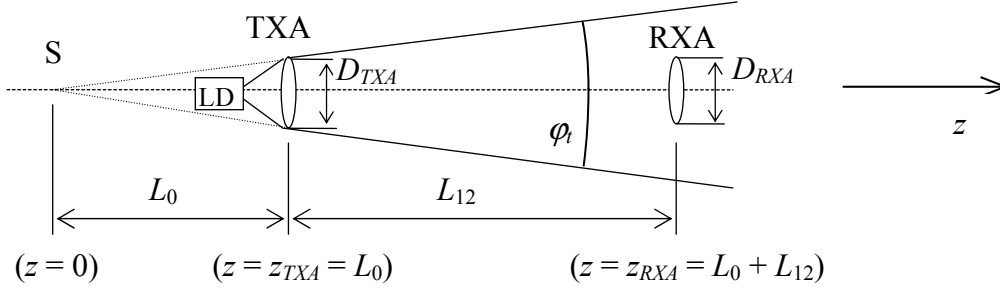
$$\alpha_{12} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{12}} \right| \text{ [dB]}, \quad (2.3)$$

kde L_0 je tzv. pomocná délka [11]. K vyjádření L_0 je třeba znát průměr vysílací optické soustavy D_{TXA} a plošnou úhlovou šířku vysílaného svazku φ_t . S předpokladem, že velikost D_{TXA} je rovna právě šířce svazku $2w_{TXA}$ v rovině apertury TXA pro pomocnou délku L_0 platí

$$L_0 \approx \frac{D_{TXA}}{\varphi_t}. \quad (2.4)$$

Po dosazení vztahu (2.4) do (2.3) lze pro výpočet útlumu šířením získat výraz

$$\alpha_{12} = \left| 20 \log \frac{D_{TXA}}{D_{TXA} + \varphi_t L_{12}} \right| \approx \left| 20 \log \frac{D_{TXA}}{\varphi_t L_{12}} \right| \text{ [dB]}. \quad (2.5)$$



Obr. 2.2 Znárodnění významu pomocné délky L_0
(S – virtuální zdroj kulové vlny; D_{RXA} – průměr přijímací čočky)

Celkový útlum atmosféry na spoji α_{atm} se dělí na útlum vyvolaný částicemi α_{part} a útlum vyvolaný turbulencí α_{turb} . (V decibelovém měřítku $\alpha_{atm} = \alpha_{part} + \alpha_{turb}$.) Za předpokladu homogenní a stacionární atmosféry lze útlum částicemi na celé délce trasy pro danou délku vlny laserového záření vyjádřit vztahem

$$\alpha_{part} = \alpha_{1,part} L_{12} \text{ [dB]}, \quad (2.6)$$

kde $\alpha_{1,part}$ je koeficient útlumu charakterizující vliv částic.

Útlum, který odpovídá turbulenci atmosféry lze vyjádřit jen přibližně pomocí empirických poznatků. Na základě modelu slabě turbulentní atmosféry (relativní variance optické intenzity v místě přijímače jsou menší než 1) lze pro odhad útlumu vyvolaného pouze turbulencí použít přibližný vztah

$$\alpha_{turb} \approx \left| 10 \log \left(1 - \sqrt{\sigma_{r,l}^2} \right) \right| \text{ [dB]}, \quad (2.7)$$

kde $\sigma_{r,l}^2$ je relativní variance optické intenzity v místě přijímače, pro kterou platí (viz [7])

$$\sigma_{r,l}^2 = 0,5 C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} L_{12}^{11/6}. \quad (2.8)$$

Po dosazení (2.8) do (2.7) vychází pro odhad útlumu vyvolaného pouze turbulencí výraz

$$\alpha_{turb} \approx \left| 10 \log \left(1 - \sqrt{0,5 C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} L_{12}^{11/6}} \right) \right|. \quad (2.9)$$

Vliv fluktuace optické intenzity v rovině RXA na fluktuace celkového výkonu přijímaného celou čočkou lze snížit dostatečně velikou přijímací aperturou (jev *průměrování*). V praxi se volí

$$D_{RXA}/2\rho_0 \approx 7, \quad (2.10)$$

kde ρ_0 je *poloměr koherence svazku*, pro který platí (viz [7])

$$\rho_0 = \left(0,55 C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 L_{12} \right)^{-3/5}. \quad (2.11)$$

Celkový zisk přijímače γ_{tot} lze rozdělit na *zisk přijímací optické soustavy* γ_{RXA} (daný poměrem velikostí apertur RXA a TXA) a *zisk přídavný* γ_{add} (daný rozdílným rozložením optické intenzity na vysílací a přijímací apertuře). V decibelové míře pak platí

$$\gamma_{tot} = \gamma_{RXA} + \gamma_{add}. \quad (2.12)$$

Zisk přijímací optické soustavy γ_{RXA} je definovaný poměrem velikosti přijímací a vysílací apertury. V decibelové míře je

$$\gamma_{RXA} = \left| 20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{TXA}} \right| \text{ [dB]}. \quad (2.13)$$

Je-li rozložení optické intenzity na vysílací apertuře gaussovské se šířkou svazku $2w_{TXA}$ totožnou s průměrem vysílací čočky D_{TXA} a je-li rozložení optické intenzity na přijímací čočce přibližně konstantní, dostává se přídavný zisk $\gamma_{add} = 3,67$ dB [12]. Pro celkový zisk γ_{tot} tedy platí

$$\gamma_{tot} = \gamma_{RXA} + \gamma_{add} = \left| 20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{TXA}} \right| + 3,67 \text{ [dB]}. \quad (2.14)$$

Přídavný zisk γ_{add} obecně závisí na vzdálenosti L_{12} . Konstantní rozložení optické intenzity na přijímací čočce bude například v situaci, kdy šířka svazku v rovině přijímací apertury je mnohem větší než průměr přijímací čočky.

V decibelové míře jsou útlum i zisk aditivními veličinami a útlum šířením α_{12} a zisk přijímací optické soustavy γ_{RXA} lze sdružit do jedné veličiny, která se nazývá *geometrický útlum* s označením α_{geom} a platí

$$\alpha_{geom} = \alpha_{12} - \gamma_{RXA} = \left| 20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{TXA} + \varphi_t L_{12}} \right| \text{ [dB]}, \quad (2.15)$$

kde součin $(\varphi_t L_{12})$ vyjadřuje šířku svazku v rovině přijímače.

Do úplné výkonové bilance je třeba zahrnout ještě útlum vysílací a útlum přijímací optické soustavy. V celkovém útlumu vysílací optické soustavy ($\alpha_{\Sigma,t}$) je zahrnut útlum vazby „laserová dioda – vysílací čočka“ (α_{LD-TL}), útlum vysílací čočky (α_{TL}), útlum krycího skla vysílače (α_{TW}) a útlum vzniklý nedokonalým zaměřením vysílače i přijímače (α_{al}):

$$\alpha_{\Sigma,t} = \alpha_{LD-TL} + \alpha_{TL} + \alpha_{TW} + \alpha_{al}. \quad (2.16)$$

V celkovém útlumu přijímací optické soustavy ($\alpha_{\Sigma,r}$) je zahrnut útlum krycího skla přijímače (α_{RW}), útlum přijímací čočky (α_{RL}), útlum optického filtru (α_{IF}) a útlum vazby „přijímací čočka – fotodioda“ (α_{RL-PD}):

$$\alpha_{\Sigma,r} = \alpha_{RW} + \alpha_{RL} + \alpha_{IF} + \alpha_{RL-PD}. \quad (2.17)$$

Útlum α_{LD-TL} , který nastává při navazování optického výkonu $P_{m,LD}$ z laserové diody do vysílací čočky, lze vyjádřit vztahem

$$\alpha_{LD-TL} = \left| 10 \log \frac{P_{m,TL}}{P_{m,LD}} \right| \text{ [dB]}, \quad (2.18)$$

kde $P_{m,TL}$ je optický výkon dopadající na aktivní plochu vysílací čočky.

Při soustředění výkonu přijímací čočkou na aktivní plochu fotodiody se projeví otvorová vada čočky, která způsobí, že rovině aktivní plochy fotodiody vznikne ploška konečné velikosti (tzv. „skvrnka“), která může přesahovat aktivní plochu fotodiody. Útlum, který takto může nastat lze vyjádřit vztahem

$$\alpha_{RL-PD} = \left| 10 \log \frac{P_{m,PD}}{P_{spot,PD}} \right| \text{ [dB]}, \quad (2.19)$$

kde $P_{spot,PD}$ je optický výkon ve „skvrnce“ a $P_{m,PD}$ je ta část optického výkonu, která je fotodiodou skutečně přijímaná. Je-li velikost „skvrnky“ menší než velikost aktivní plochy fotodiody, je $\alpha_{RL-PD} = 0$ dB.

Útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_{al} je způsoben různými vlivy: nezkušeností obsluhy při zamířování, mechanickými deformacemi úchyty hlavice při aretaci, teplotními deformacemi konzol a pod. Empiricky bylo zjištěno, že útlum α_{al} nepřevyšuje hodnotu 1,5 dB.

Po zahrnutí celkových útlumů vysílací a přijímací optické soustavy do výkonové bilance spoje, bude *výkonová bilanční rovnice* vyjadřovat podrobný vztah mezi výkonem laserové diody a výkonem dopadajícím na aktivní plochu fotodiody (předpokládá se „čistá a klidná“ atmosféra:

$$P_{m,PD} = P_{m,LD} - \alpha_{\Sigma,t} - \alpha_{12} - \tilde{\alpha}_{part} - \tilde{\alpha}_{turb} + \gamma_{RXA} + \gamma_{add} - \alpha_{\Sigma,r}. \quad (2.20)$$

Celkový útlum vysílací optické soustavy $\alpha_{\Sigma,t}$ a celkový útlum přijímací optické soustavy $\alpha_{\Sigma,r}$ lze souhrnně označit α_{Σ} a platí

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma,t} + \alpha_{\Sigma,r}. \quad (2.21)$$

Základní parametry optického přijímače jsou: výkon ekvivalentní šumu NEP , citlivost přijímače $P_{0,PD}$ a úroveň saturace $P_{sat,PD}$. Výkon ekvivalentní šumu (na **optickém vstupu** fotodiody zatížené předzesilovačem) je definován vztahem

$$NEP = \frac{P_{m,PD} \sqrt{\sigma_u^2}}{u_{m,PD} \sqrt{B}} \text{ [W.Hz}^{-1/2}\text{]}, \quad (2.22)$$

kde $P_{m,PD}$ je střední optický výkon na vstupu fotodiody vyvolávající na výstupu předzesilovače napěťovou odezvu $u_{m,PD}$; σ_u^2 je variance šumového napětí na výstupu předzesilovače a B je šířka pásma předzesilovače.

NEP tedy závisí na šířce pásma předzesilovače (přenosové rychlosti), typu použité fotodiody a šumových parametrech obvodů předzesilovače. Pro lavinovou fotodiodu (APD) a přenosovou rychlost $v_l = 155$ Mbit/s bývá hodnota NEP v decibelové míře rovna přibližně -57,6 dBm.

Minimální poměr signálu k šumu SNR_0 zabezpečující požadovanou kvalitu spojení se stanovuje v závislosti na typu modulace. Pro intenzitní modulaci typu OOK a chybovost spoje $BER = 10^{-9}$ je $SNR_0 = 15,6$ dB [13].

Citlivost optického přijímače je definovaná výrazem

$$P_{0,PD} = NEP + SNR_0 \quad (2.23)$$

a bude-li např. optický přijímač osazený lavinovou fotodiodou pracovat s přenosovou rychlostí $v_I = 155$ Mbit/s ($NEP = -57,6$ dBm) a chybovostí $BER = 10^{-9}$ ($SNR_0 = 15,6$ dB), vychází pro jeho citlivost podle (2.23) hodnota $P_{0,PD} = -42$ dBm. Citlivost přijímače vyjadřuje takovou úroveň optického výkonu na aktivní ploše fotodiody, která zabezpečuje požadovanou úroveň chybovosti spoje.

Dalším důležitým parametrem energetické bilance spoje je úroveň přijímaného výkonu na aktivní ploše fotodiody, při které dochází k saturaci přijímače $P_{sat,PD}$. Oblast dynamiky přijímacího systému Δ je v decibelové míře definovaná výrazem

$$\Delta = P_{sat,PD} - P_{0,PD} \quad (2.24)$$

Je výhodné vztáhnout přijímaný optický výkon k rovině apertury přijímače RXA. Potom je dynamika přijímače vyjádřena vztahem

$$\Delta = P_{sat,RXA} - P_{0,RXA} \quad (2.25)$$

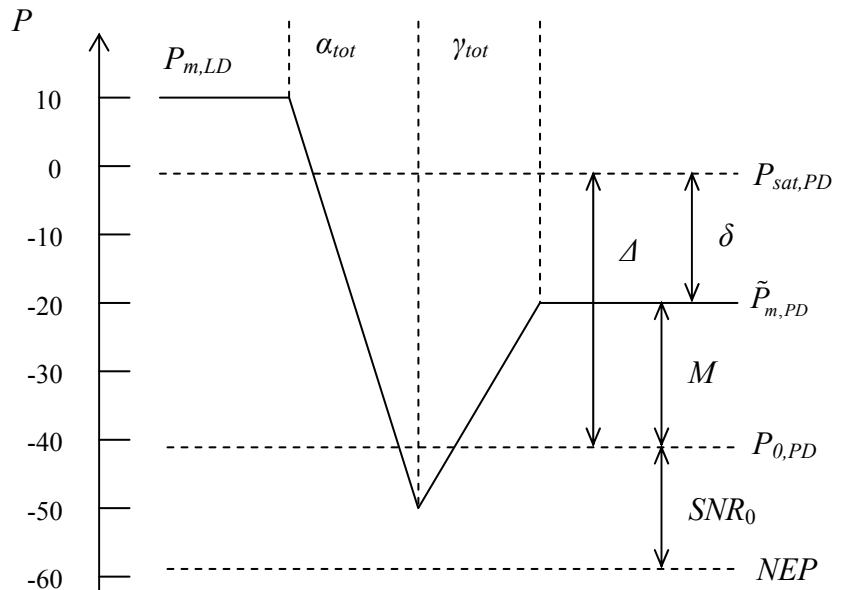
Oblast dynamiky přijímacího systému je vzhledem k vysoké míře fluktuace přijímaného optického výkonu při návrhu AOS významnou veličinou. Její číselná hodnota v decibelové míře bývá $\Delta \cong 40$ dB.

Výkonové poměry na spoji lze přehledně znázornit pomocí výkonového úrovněvého diagramu (obr. 2.3), který ukazuje vztah mezi veličinami vyjádřenými absolutně ($P_{m,LD}$, $P_{sat,PD}$, $\tilde{P}_{m,PD}$, $P_{0,PD}$, NEP) v [dBm] a veličinami vyjádřenými relativně (α_{tot} , γ_{tot} , Δ , M , SNR_0) v [dB]. Na obr. 2.3 je pro jednoduchost součet všech útlumů na spoji vyjádřen veličinou $\alpha_{tot} = \alpha_{\Sigma,t} + \alpha_{\Sigma,r} + \alpha_{l2} + \tilde{\alpha}_{atm}$. (Vlnovky nad veličinami $\tilde{\alpha}_{atm}$ a $\tilde{P}_{m,PD}$ vyjadřují, že přenos probíhá v podmínkách „čisté a klidné“ atmosféry.)

Uváží-li se pro *linkovou rezervu* definiční vztah (viz obr. 2.3)

$$M \approx P_{m,RXA} - P_{0,RXA} + 20 \log \frac{D_{RXA}}{\varphi_t} - 20 \log L_{12} + \gamma_{add}(L_{12}) - \tilde{\alpha}_{atm}(L_{12}), \quad (2.26)$$

Ize závislost linkové rezervy spoje M na dálce L_{12} vyjádřit grafem na obr. 2.4 [14].

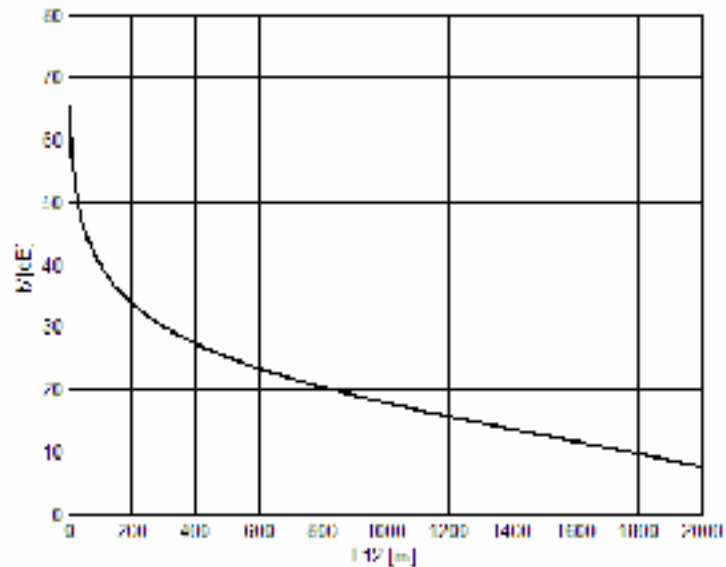


Obr. 2.3 Výkonový diagram spoje.

(δ – odstup úrovně výkonu saturující přijímač od středního přijímaného výkonu; M – linková rezerva)

V reálné situaci bude přijímaný výkon v důsledku náhodných změn útlumu atmosféry fluktuovat. Problémem je jak často a v jakých časových intervalech se přijímaný výkon bude nalézat mimo rozsah dynamiky přijímače.

V další kapitole bude pojednáno o statistickém modelu AOS, které zahrnuje náhodné projevy atmosféry a umožňuje stanovit dostupnost spoje a pravděpodobnost přerušení spojení.



Obr. 2.4 Závislost linkové rezervy M na dálce L_{12} ($P_{m,LD} = 10$ dBm; $D_{TXA} = 9$ mm; $\varphi_t = 9$ mrad; $D_{RXA} = 289$ mm; $P_{0,PD} = -42$ dBm; $\alpha_\Sigma = 9$ dB)

3 STATISTICKÝ MODEL

Při ohodnocování spolehlivosti AOS se používá statistický model, ve kterém vystupují přijímaný výkon a útlum na spoji jako náhodné veličiny a jejich fluktuace se vyhodnocuje statistickými metodami. S ohledem na požadavek služby je třeba přihlídnout nejen k náhodným změnám úrovně výkonu a útlumu, ale také k náhodným změnám časových intervalů, vyjadřujících dobu, po kterou spoj nepracoval v požadované kvalitě (byl ve stavu tzv. *úniku*).

Přerušení spoje (únik) nastává, když hodnota přijímaného výkonu klesne pod úroveň citlivosti přijímače nebo převyší úroveň saturace. Celková doba přerušení T_{un} je tedy dána součtem časů jednotlivých úniků. Pravděpodobnost takové události je možno empiricky vyjádřit jako

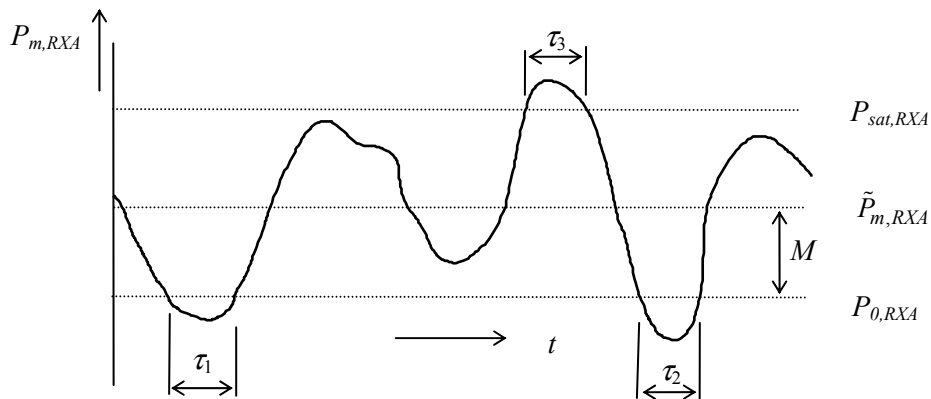
$$P_{un} = \frac{T_{un}}{T}, \quad (3.1)$$

kde T je celková délka sledovaného období.

Dílčí přerušení spoje je individuální událostí s určitou hloubkou a dobou trvání. Základem matematického řešení pravděpodobnosti přerušení spoje je předpoklad, že frekvence změn atmosférického útlumu jsou mnohem pomalejší než obvyklá přenosová rychlost spoje. Za tohoto předpokladu lze náhodný přídatný útlum atmosféry považovat za pomalou modulaci chybovosti spoje. Konkrétní vztah mezi chybovostí BER a poměrem signálu k šumu SNR_0 je možno pro používaný typ intenzitní modulace svazku najít např. v [13].

Doba trvání únikové události závisí na její příčině a rozdílným způsobem ovlivňuje službu poskytovanou spojem. Krátké úniky přispívají k celkové chybovosti spoje, dlouhodobé potom k celkové době nedostupnosti spoje. Např. v doporučení ITU-T G.826 je spoj deklarován jako nedostupný po 10 po sobě jdoucích sekundách se silnou chybovostí [15], [16].

Náhodný charakter přijímaného výkonu $P_{m,RXA}$ na spoji s úniky je znázorněn na obr. 3.1 [17].

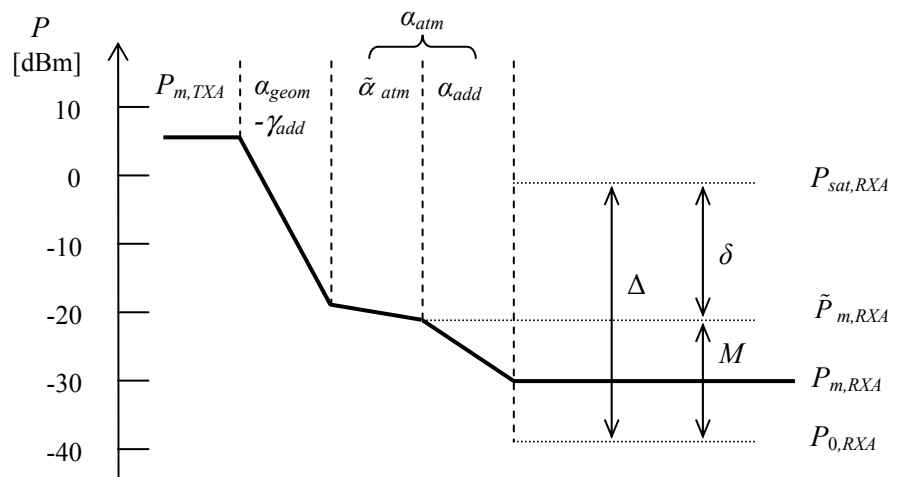


Obr. 3.1 Znárodnění charakteru přijímaného výkonu na spoji s úniky

(τ_1 , τ_2 a τ_3 – časové intervaly, kdy úroveň optického výkonu na RXA je menší než citlivost přijímače nebo převyšuje úroveň saturace; M – linková rezerva ukazující maximální hloubku úniku nezvyšující požadovanou chybovost BER)

Vliv náhodných ztrát na energetiku spoje je možno ukázat na upraveném stacionárním modelu (obr. 3.2) [14].

Přijímaný optický výkon je vhodné sledovat na aperturách TXA a RXA. Výkon na TXA se označí $P_{m,TXA}$ a výkony na RXA se označí podle významu: saturační úroveň $P_{sat,RXA}$, úroveň s uvážením přítomnosti jen „čisté a klidné“ atmosféry $\tilde{P}_{m,RXA}$ a úroveň odpovídající citlivosti přijímače $P_{0,RXA}$. Střední výkon na RXA je roven právě $\tilde{P}_{m,RXA}$, v případě, kdy náhodný přídavný útlum atmosféry α_{add} má nulovou hodnotu.



Obr. 3.2 Grafické znázornění vlivu náhodných útlumů na energetiku spoje.

($\tilde{\alpha}_{atm}$ – útlum „čisté“ atmosféry, α_{add} – náhodný přídavný útlum reálné atmosféry)

3.1 Rozložení hustoty pravděpodobnosti atmosférického útlumu

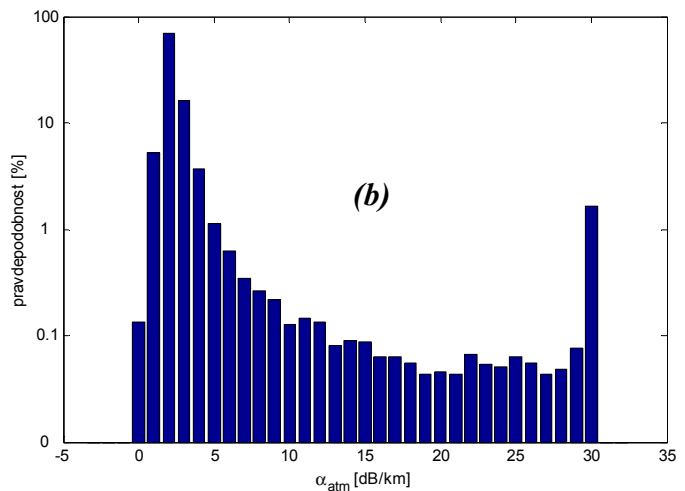
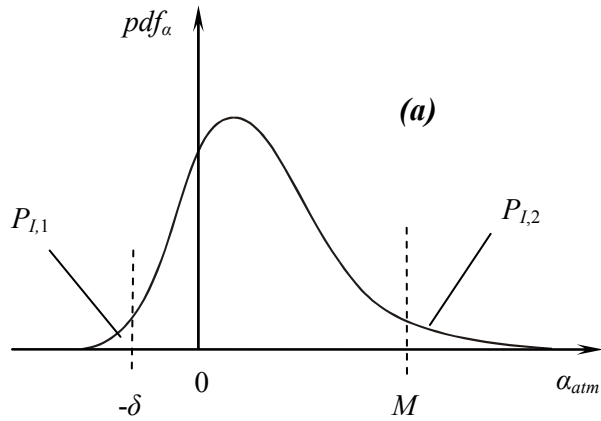
Útlum v atmosféře α_{atm} můžeme rozdělit na dvě složky: konstantní útlum v hypotetické „čisté“ atmosféře $\tilde{\alpha}_{atm}$ a náhodný přídavný útlum reálné atmosféry α_{add} .

Největší kladná hodnota α_{add} , která nezpůsobí pokles přijatého výkonu pod úroveň citlivosti přijímače je rovna M (rezerva spoje) a největší záporná hodnota α_{add} , která nezpůsobí vzrůst přijatého výkonu nad saturační úroveň je rovna $-\delta$ (viz obr. 3.2). Záporné hodnoty α_{add} (jakýsi „zisk z turbulence“) mohou teoreticky nastat v důsledku konstruktivní interference vln v turbulentní atmosféře. Tento jev je však velmi málo pravděpodobný.

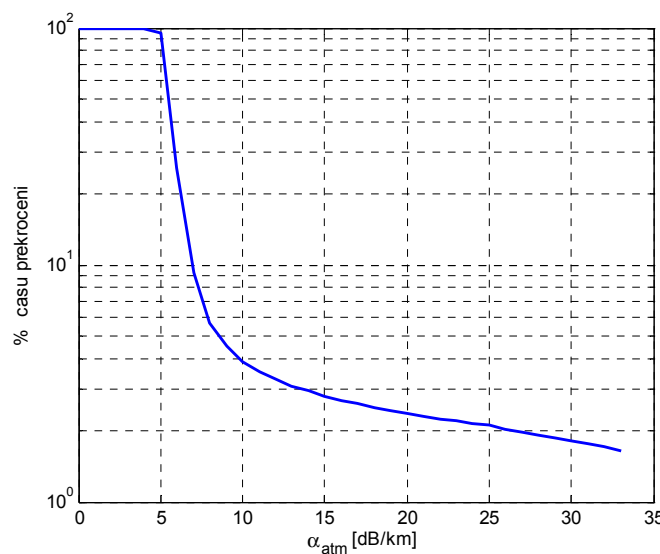
Výzkum statistických vlastností optického spoje je možné provádět na základě vlastností náhodného útlumu α_{atm} . Charakter rozložení hustoty pravděpodobnosti pdf_α náhodného útlumu α_{atm} odpovídá charakteru rozložení hustoty pravděpodobnosti přijímaného výkonu a teoretický odhad tvaru typického rozložení pdf_α zahrnujícího jak dlouhodobé, tak krátkodobé úniky je uveden na obr. 3.2 (a). Histogram náhodných útlumů získaný měřením je ukázán na obr. 3.2 (b). Konkrétní empiricky získaná charakteristika rozložení závisí samozřejmě na zeměpisné lokalitě umístění spoje, vzájemné vzdálenosti hlavic a celkové době měření.

Na obr. 3.3 je zobrazena odpovídající distribuční funkce překročení určité hodnoty koeficientu útlumu α_{atm} tak, jak je zvykem v oblasti radiových spojů [18]. Tato veličina udává pravděpodobnost, že náhodný útlum α_{atm} přesáhne určitou danou hodnotu α_i : $E_\alpha(\alpha_i) = P(\alpha_{atm} \geq \alpha_i)$. Vztah ke „klasické“ distribuční funkci $D_\alpha(\alpha_i)$ (viz [19]) je zřejmý

$$E_\alpha(\alpha_i) = 1 - P(\alpha_{atm} < \alpha_i) = 1 - D_\alpha(\alpha_i). \quad (3.2)$$



Obr. 3.2 (a) Teoretický tvar pdf_α [11];
(b) Změřený histogram rozložení útlumů



Obr. 3.3 Distribuční funkce překročení určité hodnoty koeficientu útlumu α_{atm}

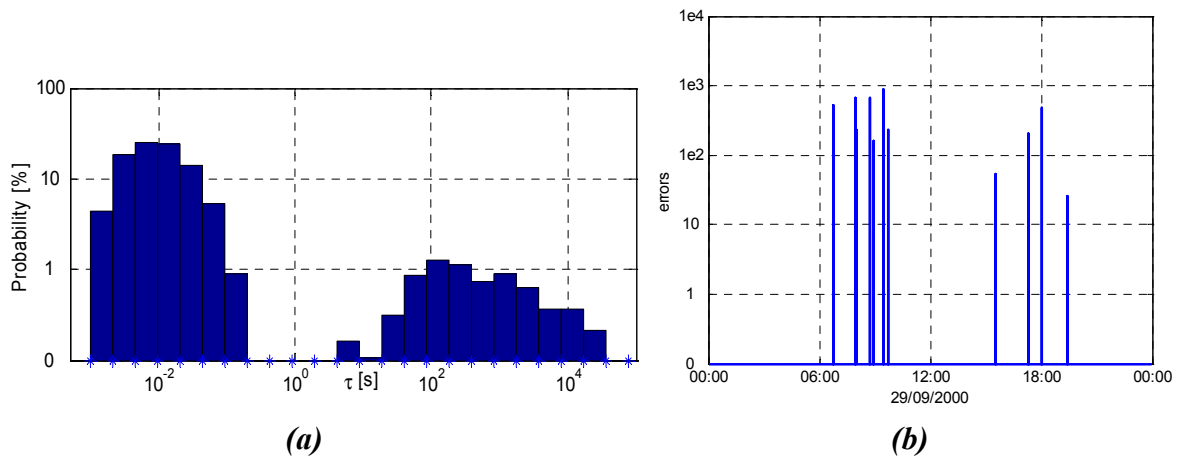
3.2 Rozložení hustoty pravděpodobnosti dob trvání úniků

K přerušení spoje dochází, když přijímaný optický výkon vybočí z dynamického rozsahu přijímače. Tato událost nastane s pravděpodobností (viz obr. 3.2 a)

$$P_{un} = P_{un,1} + P_{un,2} = 1 - \int_{-\delta}^M pdf_{\alpha}(\alpha_i) d\alpha_i = 1 + E_{\alpha}(M) - E_{\alpha}(-\delta) \approx \frac{T_{un}}{T}. \quad (3.3)$$

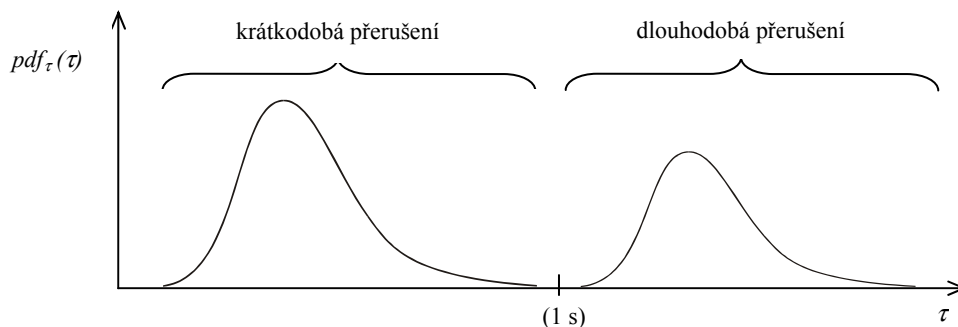
Je zřejmé, že doby trvání úniku mohou být značně rozdílné (v praxi se jedná o několik dekadických řádů). Reakce používané služby bude pochopitelně na tyto úniky rozdílná. Kratší úniky (s dobou trvání několika milisekund) budou přispívat k celkové chybovosti nebo vůbec nemusí být uživatelem zaregistrovány. Delší úniky pak budou započítány do celkové doby nedostupnosti spoje.

Je proto nutné stanovit časové rozdělení dob trvání úniků. Délky jednotlivých úniků tvoří časovou statistickou řadu [20]. Měřicí zařízení testovacího řetězce musí být schopné zachytit krátkodobá přerušení s dobou trvání nad 1 ms. Histogram náhodných dob trvání úniků pro zvolenou hloubku úniku 17 dB je uveden na obr 3.4 (a) [14].



Obr. 3.4 (a) Změřené rozložení hustoty pravděpodobnosti dob trvání úniků $pdf_{\tau}(\tau)$
(b) Příklad krátkodobých registrovaných chyb

Teoretický odhad tvaru typického rozložení hustoty pravděpodobnosti pdf_{τ} náhodné doby trvání úniku τ je prezentovaný na obr. 3.5. Oblast relativně krátkodobých přerušení (kratších než 1 s) odpovídá vlivu ptáků, turbulenci atmosféry, vibracím konzol apod. a oblast relativně dlouhodobých přerušení (delších než 1 s) odpovídá přítomnosti aerosolů v atmosféře (zejména mlze).



Obr. 3.5 Teoretický odhad rozložení hustoty pravděpodobnosti $pdf_{\tau}(\tau)$

Rozložení hustoty pravděpodobnosti $pdf_{\tau}(\tau)$ na obr. 3.4 (a) ukazuje překvapivě, že velmi krátkodobé úniky jsou více pravděpodobné než úniky dlouhodobé. Tato skutečnost souvisí s přítomností ptáků, jejichž hustota se v různých lokalitách liší. Jedná se ovšem o jev, který není možné v příměstských oblastech s množstvím zeleně ignorovat. Obr. 3.4 (b) ukazuje typický chybový záznam způsobený přelety ptáků. Na obr. 3.6 je pak taková sekvence zachycena.



Obr. 3.6 Průlet ptáka optickým svazkem spoje

3.3 Pravděpodobnost přerušení spoje s danou dobou trvání

Uvažujme celkovou dobu sledování spoje T . Součet časů všech úniků vyjadřuje celkovou dobu přerušení spoje T_{un} [14]

$$T_{un} \doteq \sum_i n_i \tau_i, \quad (3.4)$$

kde n_i je počet přerušení spoje právě po dobu nacházející se v intervalu $\langle \tau_i - \Delta\tau/2; \tau_i + \Delta\tau/2 \rangle$, kde $\Delta\tau$ je třídní interval. Je-li N celkový počet přerušení spoje a P_i pravděpodobnost třídy, lze počet přerušení spoje n_i vyjádřit vztahem

$$n_i = NP_i \quad (3.5)$$

a pro celkovou dobu nedostupnosti spoje platí

$$T_{un} = N \sum_i P_i \tau_i = N \bar{\tau}, \quad (3.6)$$

kde $\sum_i P_i \tau_i$ vyjadřuje celkovou střední dobu přerušení spoje $\bar{\tau}$.

Redukovaná doba přerušení spoje T'_{ab} způsobená přerušováním spoje právě v daném rozsahu časových intervalů $\tau_i \in \langle \tau_a; \tau_b \rangle$ je daná výrazem

$$T'_{ab} = N \sum_a^b P_i \tau_i = N \bar{\tau}_{ab}. \quad (3.7)$$

Po dosazení (3.6) do (3.7) a úpravě lze redukovanou dobu nedostupnosti spoje T'_{ab} vyjádřit vztahem

$$T'_{ab} = T_{un} \frac{\bar{\tau}_{ab}}{\bar{\tau}}. \quad (3.8)$$

Při přechodu ke spojitým veličinám ($\Delta\tau \rightarrow d\tau$) se redukovaná doba T'_{ab} vyjádří pomocí integrálů a pro pravděpodobnost přerušení spoje $P_{un,ab}$ vyvolané únikem s hloubkou M a dobou trvání v intervalu $\langle \tau_a; \tau_b \rangle$ platí

$$P_{un,ab} = \left[1 - \int_{-\delta}^M pdf_{\alpha}(\alpha_i) d\alpha_i \right] \frac{\int_{\tau_a}^{\tau_b} \tau_i pdf_{\tau}(\tau_i) d\tau_i}{\int_0^{\infty} \tau_i pdf_{\tau}(\tau_i) d\tau_i} \approx \frac{T'_{ab}}{T}, \quad (3.9)$$

kde pdf_{α} je hustota pravděpodobnosti náhodného útlumu α a pdf_{τ} je hustota pravděpodobnosti výskytu přerušení s dobou trvání τ . Rovnice (3.9) umožňuje ohodnotit pravděpodobnost přerušení spoje vyvolaného únikem s určitou hloubkou a určitým intervalem doby trvání. Toto ohodnocení spočívá ve znalosti hustot pravděpodobností pdf_{α} a pdf_{τ} , rozsahu dynamiky přijímače (hodnoty $-\delta$ a M) a volbě hodnot τ_a a τ_b .

3.4 Závěr

Modely uvedené v kap. 2. a kap. 3 (stacionární a statistický model AOS) jsou východiskem jak pro návrh spoje, tak pro ohodnocení základních kvalitativních parametrů komunikace (dostupnosti spoje a pravděpodobnosti přerušení spoje). Zatímco samotný spoj je zejména reprezentován stacionárním modelem, lokalitu umístění spoje dostatečně charakterizuje statistický model. Modelování AOS je dále vedeno snahou o spojení stacionárního a statistického modelu do jednoho komplexního modelu. O syntéze stacionárního a statistického modelu pojednává následující kapitola.

Nejdůležitějšími matematickými nástroji pro další postup jsou:

- závislost linkové rezervy spoje na vzájemné vzdálenosti hlavic (vztah 2.26 a obr. 2.4); plyne ze stacionárního modelu,
- distribuční funkce překročení určité hodnoty koeficientu útlumu atmosféry (vztah 3.2 a obr. 3.3); plyne ze statistického modelu a
- pravděpodobnost přerušení spoje vyvolaného únikem s určitou hloubkou a určitou dobou trvání (vztah 3.9); plyne rovněž ze statistického modelu spoje.

Podstatné výsledky z této oblasti výzkumu byly publikovány v [23] až [37].

4 KOMPLEXNÍ MODEL

Komplexní model AOS vzniká syntézou stacionárního a statistického modelu. Při vytváření komplexního modelu je stacionární model reprezentován linkovou rezervou spoje jako funkcí vzájemné vzdálenosti hlavic (vztah 2.26). Statistický model je reprezentován dvěma funkcemi charakterizujícími lokalitu umístění spoje: funkcí překročení určité hodnoty koeficientu útlumu atmosféry (3.2) a pravděpodobností přerušení spoje vyvolané únikem určité hloubky a určité doby trvání (3.9). Pro vlastní syntézu bude potřebné nejdříve zavést některé nové veličiny a provést určité úpravy výchozích vztahů. Těmto zásahům je věnovaná následující podkapitola.

4.1 Systémová rezerva, normovaná linková rezerva a funkce překročení

V kap. 2 bylo uvedeno, že mezi nejdůležitější parametry energetické bilance spoje patří linková rezerva M a rozsah dynamiky Δ . Linkové rezerva spoje M byla vyjádřena vztahem (2.26)

$$M \approx P_{m,RXA} - P_{0,RXA} + 20 \log \frac{D_{RXA}}{\varphi_t} - 20 \log L_{12} + \gamma_{add}(L_{12}) - \tilde{\alpha}_{atm}(L_{12}),$$

kde první tři členy reprezentují výkonové parametry a uspořádání hlavic samotného spoje. Jedná se o parametry, které nezávisí na atmosféře ani na vzájemné vzdálenosti hlavic spoje a pro charakterizování samotného spoje je tedy vhodné použít právě tyto tři parametry a pomocí nich definovat jediný parametr, tzv. *systémovou rezervu* M_S

$$M_S = P_{m,TXA} - P_{0,RXA} + 20 \log \frac{D_{RXA}}{\varphi_t}, \quad (4.1)$$

která z hlediska modelování plně charakterizuje daný spoj.

Ve vztahu (2.26) vyjadřujícím závislost linkové rezervy M na dálce L_{12} se předpokládá přítomnost standardní „čisté a klidné“ atmosféry s koeficientem útlumu $\tilde{\alpha}_{1,atm}$ a strukturálním parametrem indexu lomu \tilde{C}_n^2 . Uváží-li se přítomnost reálné atmosféry, uplatní se náhodný přídavný útlum α_{add} a koeficient útlumu atmosféry $\alpha_{1,atm}$ bude vykazovat fluktuace mající vliv na dostupnost spoje.

K provedení syntézy stacionárního a statistického modelu je užitečné definovat tzv. *normovanou linkovou rezervu*, která umožní ztotožnit stacionární parametr spoje M_1 s náhodným parametrem atmosféry $\alpha_{1,atm}$ (viz následující podkapitola 4.2). Normovaná linková rezerva M_1 se definuje vztahem

$$M_1 = \frac{M}{L_{12}}. \quad (4.2)$$

V komplexním modelu je funkcí $M_1 = f(L_{12})$ charakterizovaný spoj pracující v atmosféře („čisté a klidné“), zatímco systémovou rezervou M_S je charakterizovaný samotný spoj (nezávisle na atmosféře). Pro charakterizování atmosférických podmínek *lokality umístění* spoje je určena funkce překročení $E_\alpha(\alpha_i)$ vyjádřená v kap. 3 vztahem (3.2)

$$E_\alpha(\alpha_i) = 1 - P(\alpha_{atm} < \alpha_i) = 1 - D_\alpha(\alpha_i).$$

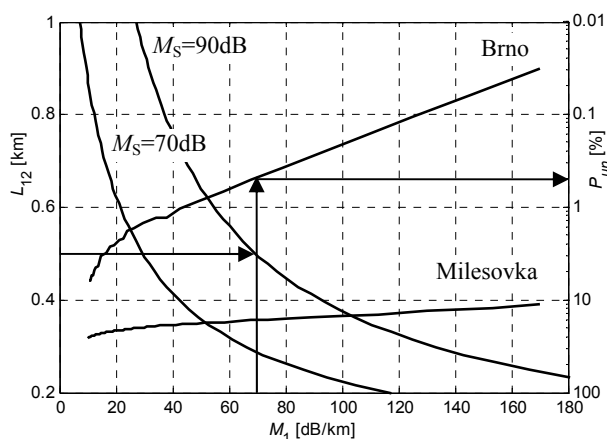
Funkce překročení $E_\alpha(\alpha_i)$ je empiricky získaná charakteristika samotné lokality umístění spoje a slouží k odhadu *nedostupnosti spoje*. Postup odhadu nedostupnosti spoje pomocí veličin M_S , L_{12} , M_1 a E_α bude objasněn v následující kapitole.

4.2 Nomogram pro výpočet nedostupnosti spoje

Nedostupnost spoje s označením P_{un} je definovaná jako pravděpodobnost, že bude překročena taková hodnota koeficientu útlumu atmosféry $\alpha_{1,atm}$, která je číselně rovna normované rezervě spoje M_1 a platí tedy $P_{un} = E_\alpha(\alpha_{1,atm})$. K určení nedostupnosti spoje slouží nomogram (viz obr. 4.1). Závislost $M_1 = f(L_{12})$ je z praktických důvodů na nomogramu zobrazena tak, aby nezávisle proměnná dálka L_{12} byla na vertikální souřadnicové ose vlevo a závisle proměnná M_1 na

horizontální ose dole. Jak bylo uvedeno, platí $\alpha_{1,atm} = M_1$ a závislost $P_{un} = f(\alpha_{1,atm})$ je v nomogramu uvedena tak, že nezávisle proměnná $\alpha_{1,atm}$, je ztotožněna s veličinou M_1 a na vertikální souřadnicové ose vpravo je umístěna už přímo nedostupnost spoje P_{un} . Postup stanovení nedostupnosti spoje je následující:

- Nejdříve se pro danou systémovou rezervu M_S a zvolenou vzdálenost L_{12} nalezne normovaná linková rezerva M_1 , která současně reprezentuje maximální hodnotu koeficientu atmosféry $\alpha_{1,atm}$, která nesmí být překročena, má-li být spoj dostupný. Na nomogramu jsou uvedeny dvě charakteristiky lišící se parametrem M_S . Spoj se systémovou rezervou 90 dB lze považovat za relativně velmi kvalitní, zatímco spoj se systémovou rezervou 70 dB lze považovat za relativně málo kvalitní. (Např. spoj testovaný pro tuto přednášku byl ohodnocen kvalitou $M_S = 75$ dB.)
- V následujícím kroku se pro zvolenou lokalitu umístění spoje vybere odpovídající funkce překročení E_α . Na nomogramu jsou uvedeny dvě takové funkce – pro lokalitu Brno a pro lokalitu Milešovka. Z nomogramu je vidět, že stejným spojem se stejnou systémovou rezervou a stejnou vzájemnou vzdáleností hlavic lze v lokalitě Brno dosáhnout menší nedostupnosti (resp. větší dostupnosti) než v lokalitě Milešovka. Lokalita Brno je tedy z hlediska dostupnosti spoje příznivější než lokalita Milešovka. Obecně platí, že s rostoucí nadmořskou výškou se podmínky pro dostupnost AOS zhoršují. (Např. pro spoj s $M_S = 75$ dB umístěný v brněnské lokalitě vychází při $L_{12} = 500$ m nedostupnost spoje $P_{un} = 0,8$ %. Této hodnotě odpovídá dostupnost spoje 99,2 %.)



Obr. 4.1 Nomogram pro stanovení nedostupnosti spoje

Jedna z možných cest, jak získat funkci $P_{un} = E_\alpha(\alpha_{1,atm})$ pro vybranou lokalitu, je založena na dlouhodobém monitorování atmosférického útlumu v této lokalitě. Další způsob, který je technicky i časově méně náročný, spočívá ve využití meteorologických dat získaných v minulosti pozorováním počasí ve vybrané lokalitě. K tomuto účelu je možné využít archivy profesionálních meteorologických stanic. Poměrně velká hustota těchto stanic vytváří předpoklad k věrohodnému zohlednění místních podmínek, avšak je potřebné zvážit, zda profesionální meteorologická stanice je umístěna dostatečně blízko plánovanému umístění spoje a zda jsou data zaznamenána s dostatečnou jemností.

4.3 Pravděpodobnost doby trvání úniku dané hloubky

Úniky na spoji mají nejen různou hloubku, ale také různou dobu trvání. Časové intervaly τ_i trvání úniků mají náhodný charakter a tvoří posloupnost $\{\tau_i\}$, jejíž statistické vlastnosti jsou vedle nedostupnosti P_{un} důležitými parametry AOS. Pro charakteristiku náhodného projevu dob úniků je vhodné použít podmíněnou funkci překročení [22]

$$P(\tau \geq \tau^* | \alpha_{1,atm} \geq M_1) = E_{\tau|\alpha}(\tau^* | M_1) \quad (4.3)$$

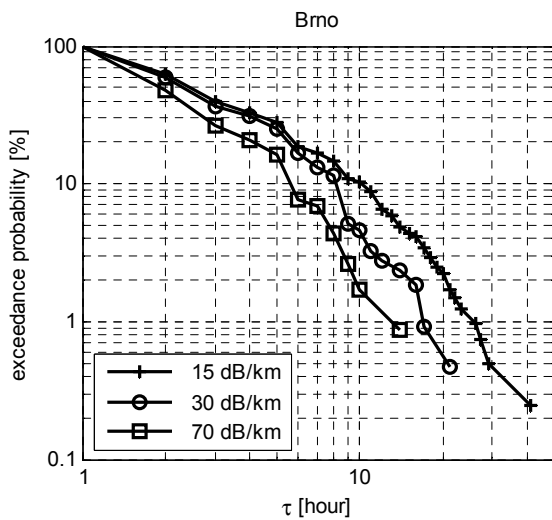
vyjadřující pravděpodobnost, že únik je delší než τ^* v případě, že hloubka úniku je větší než M_1 . Pro stanovení podmíněné funkce překročení $E_{\tau|\alpha}$ je možno použít vztah

$$E_{\tau|\alpha}(\tau^* | M_1) \approx \frac{n_{\tau_i \geq \tau^*}}{N}, \quad (4.4)$$

kde $n_{\tau_i \geq \tau^*}$ je počet úniků delších než τ^* a N je celkový počet úniků hlubších než M_1 . Funkce překročení pro sjednocení ($\tau \geq \tau^* \wedge \alpha_{1,atm} \geq M_1$) se odvodí ve tvaru

$$\begin{aligned} P(\tau \geq \tau^* \wedge \alpha_{1,atm} \geq M_1) &= \\ &= P(\tau \geq \tau^* | \alpha_{1,atm} \geq M_1) P(\alpha_{1,atm} \geq M_1) = \\ &= E_{\tau|\alpha}(\tau^* | M_1) E_{\alpha}(M_1) \end{aligned} \quad (4.5)$$

a vyjadřuje pravděpodobnost, že v daný okamžik bude na spoji únik, který je delší než τ^* a hlubší než M_1 .



Obr. 4.2 Podmíněná funkce překročení doby trvání úniky pro různé hodnoty M_1

Pro lokalitu Brno je na obr. 4.2 uveden graf podmíněné funkce překročení doby trvání úniku pro různé hodnoty M_1 . K dispozici byl měřicí řetězec schopný zaznamenat pouze dlouhodobé úniky, tj. úniky vyvolané aerosoly (např. mlhou). Pro záznam krátkodobých úniků vyvolaných např. turbulencí atmosféry by bylo nutné provádět záznamy s periodou řádu 1 ms. V souladu s očekáváním závisí graf podmíněné pravděpodobnosti na parametru M_1 .

4.4 Závěr

Komplexní model spoje zahrnuje tři dílčí modely:

1. Stacionární model, který je založený na znalosti parametrů samotného spoje vyjádřených systémovou rezervou M_S a který je reprezentovaný charakteristikou, v níž vystupuje závislost normované linkové rezervy M_1 na vzájemné vzdálenosti hlavic spoje L_{12} .
2. Statistický model hloubky úniků, který je založený na znalosti statistických parametrů koeficientu útlumu atmosféry $\alpha_{1,atm}$ v dané lokalitě instalace spoje a který je reprezentovaný funkcí překročení E_{α} určující nedostupnost spoje P_{un} .
3. Statistický model doby trvání úniků, který je založený na znalosti statistických parametrů časových intervalů trvání úniků určité hloubky v dané lokalitě instalace spoje a který je reprezentovaný podmíněnou funkcí překročení $E_{\tau|\alpha}$ určující v dané lokalitě pravděpodobnost překročení určité doby úniku τ^* hlubšího než linková rezerva spoje M_1 .

Nejdůležitější výsledky z této oblasti výzkumu byly publikovány v [38] až [46].

5 LABORATOŘ AOS FEKT VUT V BRNĚ

Atmosférickými optickými spoji, jejich modelováním, testováním a optimalizací jsem se začal zabývat v roce 1993. Ve spolupráci s Vojenskou akademií v Brně a Masarykovou universitou v Brně byly v roce 1993 – 1995 vykonány první experimentální práce ověřující model a funkci AOS v městské počítačové síti. Vybrané publikace výsledků výzkumu z tohoto ranného období jsou uvedeny v [47] až [55].

Po úspěšně provedených experimentech a navázané spolupráci mezi VUT, Vojenskou akademií a Masarykovou universitou jsem se na VUT snažil vytvořit zázemí pro pokračování spolupráce na výzkumu AOS. Díky finanční podpoře FRVŠ, který se rozhodl financovat projekt č. 0726/1996 *Připojení vybraných detašovaných pracovišť vysokých škol v Brně na metropolitní akademickou počítačovou síť pomocí atmosférických optických spojů*, jsem mohl založit Laboratoř atmosférických optických spojů, jejíž význam se potvrdil hned při řešení dalšího finančně podporovaného projektu FRVŠ č. 0244/1998 T.o.3. *Vybudování dvou vysokorychlostních komunikačních mostů pomocí laserových směrových spojů v rámci metropolitní akademické počítačové sítě v Brně*.

Laboratoř AOS v sobě soustřeďuje doktorandy a diplomanty, kteří mají hluboký zájem o řešení aktuálních problémů modelování, testování a vývoje AOS. V současné době pracují na projektech laboratoře 4 doktorandi v prezenční formě studia, 6 diplomantů (z toho jeden z University of Cantabria, Španělsko) a několik mladších studentů. Řešen je projekt GAČR (č. 102/05/0571 *Metody zvyšující spolehlivost optických směrových spojů*), projekt NPVII (č. 2C06012, 2006 *Bezpečné optické bezkabelové spoje pro municipální sítě*) a několik grantů FRVŠ podporující inovaci výuky.

Z hlediska materiálního vybavení sestává laboratoř z několika měřičů optického výkonu, dvou optických spektrálních analyzátorů, měřicího řetězce pro dlouhodobé monitorování kvalitativních parametrů AOS a meteorologické stanice pro monitorování stavu atmosféry. Laboratoř je dále vybavena několika speciálními mechanicky odtlumenými optickými stoly k proměřování a sestavování hlavic spojů. Speciální CCD kamera a příslušný software slouží pro snímání optické intenzity a počítačové vyhodnocení intenzitního profilu optického svazku. Pro elektronická měření je laboratoř vybavena základními přístroji, včetně sady budičů laserových diod a sady předzesilovačů k fotodiodám PIN a APD. Patří sem např. 1 GHz optovláknový přijímač.

Laboratoř AOS je jediným pracovištěm v České republice zabývajícím se dlouhodobě systematicky atmosférickou optickou komunikací jak v praktické, tak v teoretické oblasti. Vybrané výsledky v praktické oblasti jsou prezentovány v následující podkapitole 5.1. V teoretické oblasti získala Laboratoř AOS renomé, které přivádí do laboratoře odborníky a studenty také ze zahraničních institucí a universit. V současné době je spolupráce rozvinuta s universitami Pforzheim University of Applied Sciences v Německu a University of Cantabria ve Španělsku a rozvíjí se spolupráce s universitou Technische Universität Wien v Rakousku a ústavem Institut für Kommunikation und Navigation DLR v Německu.

Jak hardwarové tak softwarové vybavení laboratoře je postupně rozšiřováno a průběžně modernizováno. Provoz laboratoře je plně financován z grantových projektů, na jejichž řešení se členové laboratoře podílejí. Aktivita laboratoře můžeme rozdělit do tří skupin – jsou to aktivity výzkumné, aktivity pedagogické a aktivity směřující k popularizaci výsledků výzkumu a vývoje.

5.1 Výzkumné aktivity

Výzkumné aktivity laboratoře AOS reprezentují následující vybraná realizovaná inženýrská díla:

5.1.1 Datové spoje pro brněnskou metropolitní síť

V počátcích rozvoje metropolitní sítě v Brně byly problémy se spolehlivostí linek a s malým počtem optických kabelů mezi propojenými pracovišti. Ve spolupráci s firmou RAMET CHM a brněnskou pobočkou CESNETU bylo vyvinuto a úspěšně nasazeno v letech 1996 – 2000 několik typů atmosférických optických spojů. S postupným rozvojem kabelové infrastruktury se tyto spoje začaly využívat spíše pro záložní účely.

Za vyzdvižení stojí spoj mezi Dětskou nemocnicí, Údolní 39 a Nemocnicí, Obilní trh [56]. Spoj umožnil využívání diagnostických databází na obou pracovištích. Další spoje byly použity např. pro připojení Ústavu veřejného a soudního veterinárního lékařství Vysoké školy veterinární v Brně, planetária M. Koperníka v Brně a Astronomického ústavu Katedry teoretické fyziky a astrofyziky PřF MU v Brně [57].

Jednalo se o spoje:	DAOS-4	10 Mb/s	dosah 400 m
	DALS-1000	10 Mb/s	dosah 1 000 m
	ATMO-155	155 Mb/s	dosah 2 000 m



Obr. 3.5 Ukázka instalace spoje ATMO 155 mezi budovami fakult FEKT a FSI

5.1.2 Implementace technologie AOS do sítě Českého Telecomu

V rámci projektu Českého Telecomu byly vypracovány technické podmínky pro nasazení atmosférických optických spojů jako dočasného přenosového prostředku digitální hierarchie Českého Telecomu (v dnešní době Telefonica O2) [58]. Prostředky pro bezkabelový optický přenos vykazují specifické vlastnosti, kterými se odlišují od prostředků využívající optické vlákno (jitter, krátkodobé i dlouhodobé přerušování komunikace). Tato specifika nebyla samozřejmě

uvažována při tvorbě standardních přenosových protokolů. Proto byly zmapovány vlastnosti současné technologie AOS a z nich vyplývající možnosti jejich nasazení do sítě.

Na základě měření vlastností zařízení od několika předních světových výrobců se ukázalo potřebné vyvinout speciální polohovací plošinu pro stávající přenosové vozy Českého Telecomu. Plošina byla úspěšně instalována do přenosových vozů VW Transporter. K ověření tuhosti celé soustavy byl vyvinut optický měřič vibrací a odchylek [59].



Obr. 3.5 Ukázka instalace hlavice AOS na přenosovém vozu

5.1.3 Optický spoj pro vlakovou soupravu

Při tradičním způsobu přenosu signalizace mezi vagóny vlakové soupravy se používá metalických kabelů spojovaných velmi robustními konektory odolnými vůči znečištění i mechanickému namáhání. Při přechodu na komunikaci pomocí optických vláken není možné takto robustní konektory použít. Proto v rámci projektu byl vyvinut bezkabelový spoj, jehož jednotky budou umístěny na čelech vagónu. Navázání spojení nastane pouhým sestavením vlakové soupravy [60].

V rámci projektu byla vyvinuta na pracovišti FEKT optická část vysílače a přijímače. Vysílač tvoří pole několika LED (viz obr. 3.6), přijímač pak fotodioda s vhodnou optikou. Konstrukce zajišťuje existenci spojení i pro nejhorší možný případ vyplývající z maximální povolené nerovnosti kolejí při současném průjezdu vlakové soupravy zatáčkou.

Katalogový list spoje vystavovaného na veletrhu Innotrans 2004 v Berlíně je uveden na obr. 3.7.

Obr. 3.6 Vysílací část spoje s několika LED diodami



ITR-OCU

1. Aplikace

Optická komunikační jednotka je určena pro vzájemný bezdrátový přenos dat do vzdálenosti několika kilometrů a při nízké ceně vzhledem k použití jednoduché optické komunikace. Jedna ITU je určena k optickému přijetí a druhá k optickému vysílání. Přijímá a vysílá data v rychlosti až 100 Mb/s. Jedna z jednotek je vybavena konektorem RS-485.

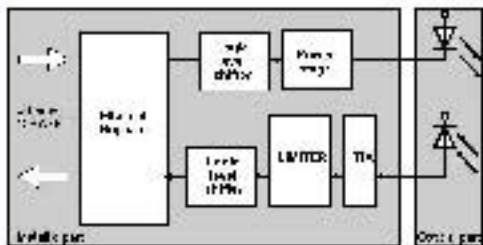
2. Popis řešení

Společnost ITR nabízí řešení ITR-OCU, které je založeno na optické komunikaci pomocí optických vláken. Jedná se o řešení, které umožňuje přenos dat rychlostí až 100 Mb/s.

Optická komunikační jednotka ITR-OCU je určena pro přenos dat rychlostí až 100 Mb/s. Jedná se o řešení, které umožňuje přenos dat rychlostí až 100 Mb/s. Jedná se o řešení, které umožňuje přenos dat rychlostí až 100 Mb/s.

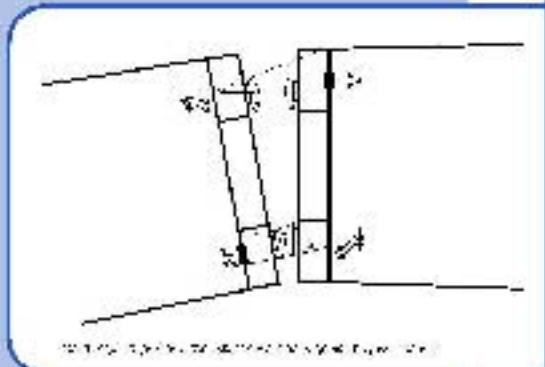


Obr. 3.7.1 Optická komunikační jednotka



Obr. 3.7.2 Blokové schéma optické komunikační jednotky

Optická komunikační jednotka ITR-OCU je určena pro přenos dat rychlostí až 100 Mb/s. Jedná se o řešení, které umožňuje přenos dat rychlostí až 100 Mb/s. Jedná se o řešení, které umožňuje přenos dat rychlostí až 100 Mb/s.



Obr. 3.7.3 Technická kresba optické komunikační jednotky

Pro umístění jednotky ITR-OCU je nutné použít speciální držák, který je součástí dodávky.

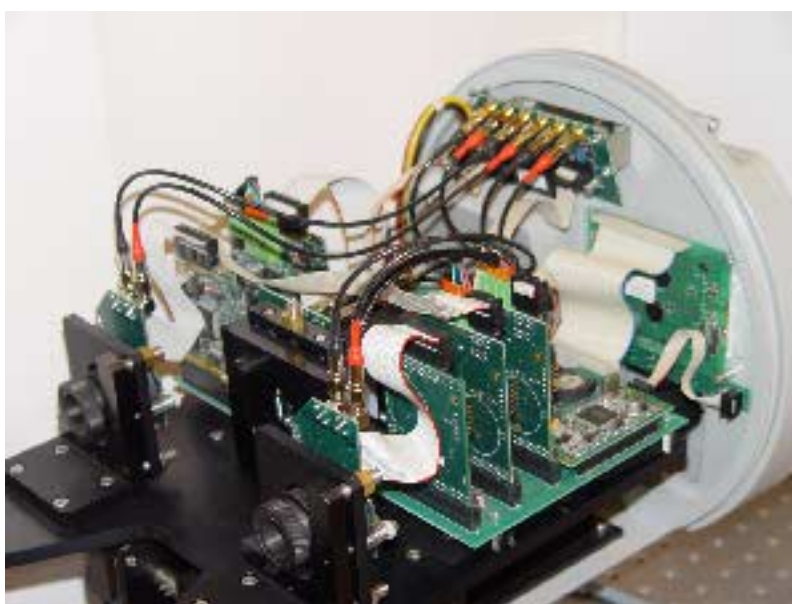
Společnost ITR nabízí řešení ITR-OCU, které je založeno na optické komunikaci pomocí optických vláken. Jedná se o řešení, které umožňuje přenos dat rychlostí až 100 Mb/s. Jedná se o řešení, které umožňuje přenos dat rychlostí až 100 Mb/s.

Obr. 3.7 Katalogový list spoje vystavovaného na veletrhu Innotrans 2004 v Berlíně

5.1.4 Atmosférický optický spoj pro municipální síť

AOS představují perspektivní prostředek pro datovou komunikaci. Po počátečním nadšení v 90. letech se nyní ukazuje, že vývoji takového spoje musí předcházet hlubší analýza optického atmosférického prostředí. Prvním výsledkem společného projektu mezi FEKT a českým průmyslovým podnikem Miracle Group je optický spoj Orcave. Při návrhu spoje byly zhodnoceny výsledky dlouholetého teoretického i experimentálního výzkumu skupiny optoelektroniky na FEKT [61]. Hlavice spoje obsahuje dva lasery a umožňuje jako jeden z mála výrobků tohoto druhu dálkové směřování a dohled. Spolupráce s Miracle Group je zastřešena společným projektem v rámci Národního programu výzkumu II (projekt č. 2C06012, 2006 *Bezpečné optické bezkabelové spoje pro municipální síť*).

Spoj Orcave snese srovnání se zahraničními výrobky s očekávaným ekonomickým přínosem.



Obr. 3.8 *Pohled na elektronickou část hlavice spoje*

5.2 Pedagogické aktivity

Výzkum Laboratoře AOS je spojen s výukovou činností jednak přímo (studenti pracují v rámci diplomových a disertačních prací na dílčích problémech řešených projektů) a jednak nepřímo (nové poznatky jsou postupně integrovány do výuky předmětů v bakalářském, magisterském a zejména doktorském studiu).

Ve výuce optických komunikací musí být zdůrazněna nejen aplikační oblast, ale i oblast fyzikálních základů a východisek. Potíže totiž nastávají v okamžiku, kdy se studenti při své práci setkají s „neklasickými“ jevy, které musí umět nějakým způsobem ve svém uvažování akceptovat, interpretovat a aplikovat. Je potřebné překonat určitou nesnáz plynoucí z objasňování „neklasických“ jevů a principů, jakými jsou např. dualismus částic, pravděpodobnostní charakter mikrosvěta, statistický přístup k modelování makrosystémů apod.

Při výuce optických komunikací se ukazuje potřebné uvádět zkoumané jevy v souvislostech s *paradigmatem současné vědy* a zdůrazňovat moderní aspekty. Potěšující je konstatování (např. v [62]), že na oboru EST FEKT VUT v Brně je výuce optických komunikací věnovaná náležitá pozornost a výuka zde má ucelený charakter. S výukou optických komunikací máme dobré zkušenosti jak v teoretické, tak v praktické oblasti. V současné době probíhá výuka ve třech předmětech:

Optoelektronika (3. ročník bakalářského studia)

Kvantová a laserová elektronika (1. ročník magisterského studia)

Fotonika a optické komunikace (2. ročník magisterského studia)

Výsledky pedagogické aktivity byly publikovány v [63] až [70].

5.3 Popularizace výsledků výzkumu

Zavádění výsledků vlastního výzkumu do výuky je nedílnou součástí práce univerzitního učitele. Z hlediska celé společnosti je důležité, aby vysoká škola informovala o výsledcích své práce nejširší veřejnost. Informování široké veřejnosti je pro školu významné tím, že takto může přilákat pozornost talentovaných maturantů a získat je pro studium.

K popularizaci vědecké práce Laboratoře AOS byla využita řada vyzvaných přednášek na zahraničních i domácích univerzitách a pracovištích. Jednalo se o popularizaci nejen aktuálních projektů, ale také o popularizaci oblasti optických komunikací jako celku v přehledových přednáškách a referátech.

Významnými událostmi v této oblasti byly pobyty v rámci programu Sokrates spojené s přednáškou a spoluprací:

2002: Pforzheim University of Applied Sciences, Pforzheim, Německo
přednáška: *Steady and Statistical Model of Optical Wireless Communication*

2003: Pforzheim University of Applied Sciences, Pforzheim, Německo
přednáška: *The Advanced Technical Concept of Optical Wireless Links*

2004: University of Cantabria, Santander, Španělsko
přednáška: *Free Space Laser Communications*

2006: Technische Universität Wien, Wien, Rakousko
přednáška: *Estimation of Free Space Optical Link Availability*

Další vybrané publikace týkající se popularizace výsledků výzkumu jsou uvedeny v [71] až [77].

5.4 Závěr

Laboratoř AOS FEKT VUT v Brně je jediným pracovištěm v České republice zabývajícím se dlouhodobě systematicky atmosférickou optickou komunikací. Výzkumné práce v této laboratoři jsou podporovány několika grantovými projekty a výsledky, které zde byly dosaženy, nacházejí uplatnění v praxi. Z mezinárodního hlediska patří Laboratoř AOS k renomovaným pracovištím s ohlasem, který přivádí do laboratoře odborníky a studenty ze zahraničních institucí a universit. Činnost laboratoře je každým rokem prezentována na několika významných evropských a světových konferencích, ve vědeckých časopisech a samozřejmě jsou příspěvky na domácích konferencích.

V Laboratoři AOS byly formou grantových projektů vytvořeny inspirující laboratorní úlohy předmětů *Kvantové a laserové elektroniky*, *Optoelektroniky* a *Fotoniky a optických komunikací* a některé byly převzaty do výuky jinými vysokými školami v Česku i na Slovensku. Systém výuky fotoniky a optických komunikací podporovaný praktickou výukou prováděnou v Laboratoři AOS byl publikovaný na řadě konferencí s vysoce pozitivním ohlasem a patří k nejlépe propracovaným systémům výuky v této oblasti na technických univerzitách v České republice.

O práci Laboratoře AOS je zájem jak mezi studenty, tak mezi odbornou veřejností. Vzhledem k renomé laboratoře se daří získávat významnou finanční podporu z grantových projektů, což skýtá záruku dalšího rozvoje.

Literatura

- [1] KIM, I. I., KOREVAAR, E. Availability of Free Space Optics (FSO) and Hybrid FSO/RF Systems. In: *Proc. of Optical Wireless Communications IV, 4530*. Denver (USA, CO): SPIE, 2001, p. 84 – 95.
- [2] ACOMPORA, A. S. A Broadband Wireless Access Network Based on Mesh-Connected Free-Space Optical Links. *IEEE Personal Communications*. Atlanta: IEEE, 1999, p.62–65.
- [3] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. *Fundamentals of Photonics*. New York: Wiley, 1991.
- [4] MAITLAND, A., DUNN, H. *Laser Physics*. London: North-Holland Publishing, 1969.
- [5] ZUJEV, V. E., KABANOV, M. V. *Perenos optičeskich signalov v zemnoj atmosfere*. Moskva: Sovjetskoje radio, 1977.
- [6] Handbook of lasers with selected data on optical technology. Editor: R. J. Presley. Cleveland: Chemical Rubber Co, 1971.
- [7] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L., HOPEN, C. Y. *Laser Beam Scintillation with Applications*. Washington: SPIE PRESS, 2001.
- [8] Laser Beam Propagation in the Atmosphere. Editor: J. W. Strobe. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
- [9] Wireless LAN Systems. Editors: A. Santamária, F.J. López-Hernández. London: Artech House, 1994.
- [10] WILFERT, O., BIOLKOVÁ, V., BIOLEK, D. Fiberless Optical Communication Technology. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Systems, Signals, Control and Computers SSCC'98*. Durban (Jihoafriická republika) 1998, Vol. II, p. 138-141.
- [11] Principles of Modern Optical Systems. Vol.2. Editors: D. Uttamchandani, I. Andonovic. London: Artech House, 1992.
- [12] HOVOŘÁK, P., WILFERT, O. Improvement of Free Space Optics Model by Using Correction Curves. In: *Proc. of 14th International Czech – Slovak Scientific Conference Radioelektronika 2004*. Bratislava: SUT, 2004.
- [13] BENNETT, W. R., DAVEY, J. R. *Data Transmission*. New York: McGraw-Hill, 1965.
- [14] WILFERT, O., KOLKA, Z. Statistical model of free-space optical data link. In: *Proc. of The International Symposium on Optical Science and Technology. Conference 5550*. Denver: SPIE, 2004, p. 203-213.
- [15] Standard ITU-T G.826: *Error performance parameters and objectives for international, constant bit rate digital paths at or above the primary rate*. Geneva: ITU, 1999.
- [16] BURDA et al. *The Planning and Design Method of Digital RR Links*. Praha: VÚS, 1990.
- [17] LAMBERT, S. G., CASEY, W. L. *Laser Communications in Space*. London: Artech House, 1995.
- [18] Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ku-band and Above. Editor: B. A. Arbesser-Rastburg. Vol. I. COST 255 Final Workshop, Bech, Lucemburg, 1999.

- [19] HÁTLE, J., LIKEŠ, J. *Základy počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky*. Praha: SNTL, 1972.
- [20] VENTCELOVÁ, J.: *Teória pravdepodobnosti*. Praha: SNTL, 1973.
- [21] GAGLIARDI, R.M., KARP, S. *Optical Communications*. New York: Wiley, 1995.
- [22] GOLODHIRSH, J., VOGEL, W. J. *Handbook of Propagation Effects for Vehicular and Personal Mobile Satellite Systems*, 1998, <http://www.utexas.edu/research/mopro/>
- [23] WILFERT, O., PROKEŠ, A., BIOLKOVÁ, V. Úniky na optickém směrovém. In: *Sborník národní vědecké konference O.K. '96*. Praha: TECH-MARKET, 1996, s.94-97.
- [24] WILFERT, O., PROKEŠ, A., BIOLKOVÁ, V. Measurement of the Fading on the Optical Directional Link in Region 850nm. In: *Sborník konference Radioelektronika '96*. Brno: VUT Brno, 1996, Vol.2, p.342-345.
- [25] WILFERT, O., NĚMEČEK, J. The Transmitting Optical System of the Atmosphere Optical Link. In: *Sborník 6. národní vědecké konference s mezinárodní účastí Radioelektronika 96*. Brno: VUT v Brně, 1996, Vol.2, s. 204 – 207.
- [26] WILFERT, O., PROKEŠ, A. Metodika výpočtu útlumového diagramu optického směrového spoje. In: *Sborník přednášek celostátní konference s mezinárodní účastí TELEKOMUNIKACE '97*. Brno: VUT v Brně, 1997, s. 154-156.
- [27] WILFERT, O., PROKEŠ, A. Počítačová rekonstrukce a zpracování monitorujícího signálu k ohodnocení kvality optického směrového spoje. In: *Sborník vědecké konference Nové směry v spracování signálů IV*. Liptovský Mikuláš: VA v Liptovskom Mikuláši, 1998, s. 31-34.
- [28] WILFERT, O.-BIOLKOVÁ, V. Kvalita přenosu optickým směrovým spojem. In: *Sborník příspěvků celostátní konference Optické komunikace O.K. '98*, Praha: TECH-MARKET, 1998, s. 80-84.
- [29] WILFERT, O., BIOLKOVÁ, V. Network Communication by Optical Directional Link. *Radioengineering*. 1999, Vol. 8, No. 1, p. 38-40.
- [30] WILFERT, O., KOLKA, Z., BIOLKOVÁ, V. Optical directional links for transmission of information. In: *Proc. of the 9th Czech-Slovak Conf. RADIOELEKTRONIKA 99*. Brno: VUT v Brně, 1999, p. I-1 – I-11.
- [31] WILFERT, O., BÁRTA, J., BIOLKOVÁ, V., HLAVÁČ, D. Využití lavinových fotodiód pro detekci signálů v optických komunikacích. In *Sborník příspěvků celostátní konference Optické komunikace O.K. '2000*. Praha: TECH-MARKET, 2000, s. 138-142.
- [32] WILFERT, O., KOLKA, Z. Optical Free – Space Communication Link Modeling. In *Proceedings of the 10th International Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2000*. Bratislava: STU, 2000, p. P-98 – P-99.
- [33] BIOLKOVÁ, V., WILFERT, O., BIOLEK, D. Optical Free-Space Communication Link. In *Proceedings of the 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference AP-RASC '01*. Tokyo (Japan) 2001, p. 119-122.
- [34] WILFERT, O., KOLKA, Z., HLAVÁČ, D., BIOLKOVÁ, V. Statistický model optického směrového spoje. In: *Sborník příspěvků celostátní konference Optické komunikace O.K. '2001*. Praha: TECH-MARKET, listopad 2001, s. 71-75.

- [35] BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V., WILFERT, O. Reliability of Optical Wireless Links. In *Proceedings of the 2002 International Conference on Electronics, Control & Signal Processing*. Singapore 2002, p. 83 – 87.
- [36] NĚMEČEK, J., BIOLKOVÁ, V., BIOLEK, D., WILFERT, O. Reliability Improvements of Optical Wireless Links. *ElectronicsLetters.com* - <http://www.electronicsletters.com>, roč. 2002, č. #9/11/2002, p. 1 - 3.
- [37] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Modeling of Gaussian Beam for Terrestrial Optical Wireless Link. In *Proceedings of the Northern Optics 2006*. Bergen (Norway): IEEE, LEOS, 2006, p. 182 – 183.
- [38] KOLKA, Z., WILFERT, O. FIŠER, O. Achievable Qualitative Parameters of Optical Wireless Links. . *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2007. (přijatý článek)
- [39] KOLKA, Z., WILFERT, O., BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V. Availability Model of Free-Space Optical Data Link. *International Journal of Microwave and Optical Technology (www.ijmot.com)*, 2006, Vol. 1, č. 2, s. 612 - 616. ISSN 1553-0396, 2006.
- [40] WILFERT, O., KOLKA, Z. FIŠER, O., FIŠÁK, J., PEŠICE, P. Wireless Optical Link - First Measurement in CZ. In *Proceedings of workshop Radiowave Propagation Modelling and Measurement for SatCom and SatNav Systems*. Noordwijk: ESA, 2005, p. 11 – 24.
- [41] WILFERT, O., KOLKA, Z., BIOLKOVÁ, V. Model of Beam Interruptions for Free Space Optical Systems. In *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied Informatics and Communications AIC'05*. Malta: WSEAS, 2005, p. 279 - 282, ISBN 960-8457-13-0.
- [42] WILFERT, O., KOLKA, Z., NĚMEČEK, J., BIOLKOVÁ, V. Estimation of FSO link availability in central European localities. In *Proceedings of Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation II*. San Diego: SPIE, 2006, p. 63030R-1 – 63030R-7. ISSN 0277-786X
- [43] KOLKA, Z., WILFERT, O., BIOLKOVÁ, V. Availability Assessment of Optical Wireless Links. In *Proc. of the 5th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSE 06)*. Tenerife: World Scientific and Engineering Academy and Society, 2006, p. 1 – 4. (in print)
- [44] FIŠER, O., WILFERT, O. Novel processing of tipping-bucket rain gauge records - examples from Czech Republic. In *Proceedings of workshop "Precipitation in urban areas". The 7th International Workshop on Precipitation in Urban Area*. Zurich: ETH, 2006, p. 1 – 3. (in print)
- [45] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Gain of FSO-Link Receiver. In *16th International Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2006*. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2006, p. 274 – 277. ISBN 80-227-2388-6
- [46] WILFERT, O., NĚMEČEK, J. The Availability of Optical Wireless Links in some Localities of the Czech Republic. In *Proceedings of the 1th International Scientific and Technological Conference on Special Technology 2006*. Bratislava: Ministry of Defence of the Slovak Republic, 2006, p. 408 – 413. ISBN 80-8075-128-5
- [47] RAIDA, Z., WILFERT, O. Modelování tras pro optický spoj. In: *Sborník odborného semináře „Radioelektronika '92*. Brno: FEI VUT v Brně, 1992, s. 80.
- [48] WILFERT, O., NĚMEČEK, J. Měření fluktuací směru laserového svazku. In: *Sborník vědeckého semináře Metrologie a měření*. Brno: VA, 1992, s. 48-52.

- [49] WILFERT, O., NĚMEČEK, J. Measurement of Laser Beam Wavefront Angle-of-Arrival Dispersion and Determination of Index of Diffraction Structure Parametr. In: *Proc. of the International Conference CATE'93*. Brno: VA. 1993, p. 295-298.
- [50] WILFERT, O., NĚMEČEK, J. Fluktuace intenzity záření a úhlu dopadu Gaussovy vlny v silně turbulentní atmosféře. In: *Sborník odborného konference Radioelektronika '93*. Brno: FEI VUT v Brně, 1993, p. 139-141.
- [51] WILFERT, O. Atmospheric Optical Link in Pure Turbulent Atmosphere. *Turkish Journal of Physics*. 1994, vol. 18, no. 9, p. 863 – 869. ISSN 1300-0101
- [52] VLČEK, Č., WILFERT, O. Digitální optický směrový spoj. In: *Sborník přednášek Radiokomunikace '94*. Pardubice: České radiokomunikace a.s., 1994, s. 96-101.
- [53] WILFERT, O. Atmospheric Optical Communications. *Radioengineering*, 1994, Vol. 3, No. 3, p. 15-17.
- [54] VLČEK, Č., WILFERT, O. Atmosférické optický spoj v síti MAN. In: *Sborník příspěvků konference OK '95*, Praha: TECH-MARKET, 1995, s. 75-76.
- [55] WILFERT, O., VLČEK, Č. Atmosférické optické spoje. In: *Sborník mezinárodní konference ELEKTRO '95*. Žilina: VŠDS, 1995, s. 232-235.
- [56] WILFERT, O., BIOLKOVÁ, V., NĚMEČEK, J., PROKEŠ, A. *Připojení vybraných detašovaných pracovišť vysokých škol v Brně na metropolitní akademickou počítačovou síť pomocí atmosférických optických spojů*. Závěrečná zpráva k řešení grantového projektu č.0726/1996 T.o.3 Fondu rozvoje VŠ. Brno: UREL FEI Brno, prosinec 1996. 12 s.
- [57] WILFERT, O., BIOLKOVÁ, V., KOLKA, Z. *Vybudování dvou vysokorychlostních komunikačních mostů pomocí laserových směrových spojů v rámci metropolitní akademické počítačové sítě v Brně*. Závěrečná zpráva k řešení grantového projektu č.0244/1998 Fondu rozvoje VŠ. Brno: UREL FEI, prosinec 1998.
- [58] WILFERT, O., KOLKA, Z., BIOLKOVÁ, V. *Protokol č. 4/03 o měření technologie FSO pro digitální televizi*. Zpráva o měření tuhosti a vibrací přenosového vozidla spolu s polohovací plošinou, měření parametrů polohovací plošiny pro FSO a měření vybraných parametrů hlavice FSO pro Český Telecom, a.s., Praha 2003.
- [59] WILFERT, O., KOLKA, Z. Multiple Laser Spot Tracking with Position Sensitive Detectors. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Signals and Electronic System. ICSES'04*. Poznan: Institute of Electronics and Telecommunications, Poznan University of Technology, 2004, p. 593-595. ISBN 83-906074-7-6
- [60] WILFERT, O., KOLKA, Z. Spatially Unsteady Optical Wireless Link. In: *Proc. of International Symposium on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE 2004)*. Linz: URSI, 2004, electronic proceedings. ISBN 3-9501491-3-9
- [61] WILFERT, O., KOLKA, Z., BIOLKOVÁ, V. *Metody zvyšující spolehlivost optických směrových spojů*. Zpráva o řešení grantového projektu GAČR GA102/05/0571 za rok 2006.
- [62] TOMÁNEK, P. Fotonika na Vysokém učení technickém v Brně. *Inf. bulletin ČSSP*, 2001, No 30 s. 2.
- [63] ČERHOHORSKÝ, D., RAIDÁ, Z., WILFERT, O., VALÁŠEK, V. CAE in Optoelectronics. *IEEE Transactions on Education*, 1999, vol. 42, no. 3, p. 220-224. ISSN 0018-9359

- [64] WILFERT, O., KOLKA, Z. Education in Optoelectronics at Brno University of Technology. In *Conference Proceedings 18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications ICECom 2005*. Dubrovnik (Croatia): IEEE, 2005, p. 429 – 432. ISBN 953-6037-44-0
- [65] WILFERT, O. Experiences with photonics education at IREL of the FEI VUT in Brno. In: *Proc. of the 8th Czech-Slovak Conf. RADIOELEKTRONIKA 98*. Brno: VUT v Brně, 1998, p. 336-339. ISBN 80-214-0983-5
- [66] WILFERT, O. Optical Systems for Transmission on Information Courses at IREL Brno University of Technology. In: *Proceedings of the 9th International Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 99*. Brno: VUT v Brně, 1999, p. 317-320. ISBN 80-214-1327-1
- [67] RŮŽIČKA, B., WILFERT, O. Practical education of semiconductor laser frequency stabilization by linear absorption. In *Proceedings of the 13th International Czech – Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2003*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003, p. 308 – 311. ISBN 80-214-2383-8
- [68] WILFERT, O., KOLKA, Z. Teaching Methods of Photonics and Paradigm of Present-day Science. In: *Proc. of 14th International Czech – Slovak Scientific Conference Radioelektronika 2004*. Bratislava: SUT, 2004, p. 288 – 291. ISBN80-227-2017-8
- [69] WILFERT, O., KOLKA, Z., FROEHLING, K. Photonics and Paradigm of Present Day Science and Teaching. In *Proceedings of the conference New Trends in Physics, NPT 2004*. Brno: BUT FEED, 2004, p. 361 – 364. ISBN 80-7355-024-5
- [70] WILFERT, O. Příklady použití laseru pro demonstrace jevů vlnové optiky. In: *Sborník semináře Využití laserů ve výuce fyziky*. Brno: Dům techniky ČS VTS, 1991, s. 98-103.
- [71] WILFERT, O. a KASAL, M. Interoperabilita optických a družicových spojů. In *Sborník příspěvků celostátní konference Multimediální radiokomunikace*. Pardubice: Dům techniky Pardubice, 2000, s. 29-48. ISBN není
- [72] WILFERT, O. Optické bezkabelové spoje. In: *Sborník příspěvků celostátní konference TELEINFORMATIKA 2001*. Praha: WIRELESSCOM, s.r.o., 2001, s. 41-45. ISBN není.
- [73] WILFERT, O., VODILOVÁ, A. História vzniku laseru a jeho využitie při výučbe fyziky 1. *Rozhledy matematicko-fyzikální*, 68, 1989/90, č. 9, s. 394-402.
- [74] WILFERT, O. Přenos informace optickým směrovým spojem. *Slaboproudý obzor*, 2002, roč. 59, č. 1, s. 6 - 8. ISSN 0037-668X
- [75] WILFERT, O. *Skladba a model optického bezkabelového spoje*. Vyžádaná přednáška programovým výborem mezinárodní konference Jemná mechanika a optika 2003. Přerov: Meopta – optika, s.r.o., 2003.
- [76] WILFERT, O. *Směr vývoje optických bezkabelových spojů*. Vyžádaná přednáška programovým výborem seminářů na ÚPT AVČR. Brno: ÚPT AVČR, 2004.
- [77] WILFERT, O. *Optická komunikace volným prostorem*. Vyžádaná přednáška programovým výborem konference Optické komunikace 2004. Praha: TECH-MARKET, 2004.
- [78] <http://www.bell-labs.com/news/1998/november/10/1.html>
- [79] http://www.freespaceoptic.com/WhitePapers/Comparison_Of_Beam_in_Fog.pdf

Abstract

The lecture “The Modeling of Atmospheric Optical Links” deals with a very interesting and important area of communications. The atmospheric optical links (AOLs) are interesting for a number of reasons:

- AOLs are not subject to licensing procedures.
- AOLs use optical carriers ranging from 850nm to 1500nm, which do not pollute the environment with electromagnetic energy radiation on radio frequencies.
- AOLs transmit optical power that conforms to the respective international standards. The systems are designed to be eye-safe even at the transmitting aperture.
- Thanks to a very narrow beam of several milliradians it is very hard to jam or tap the AOL. Its transmitters do not exhibit any side lobes. A potential intruder must virtually enter the beam which can be detected.
- The AOLs bandwidth potential corresponds to that of fiber optics. The AOL technology is then a natural complement of modern broadband fiber networks.

In the introduction, we bring a historical overview of the development of AOLs, basic concepts and relations used in the modeling of AOLs and description of the atmospheric effects. In the following chapters, the steady, statistical and complex models of AOLs are introduced. The most important part of the lecture deals with the complex model of AOLs.

The complex model of AOL is based on the synthesis of two models: the power-budget model of a given link (steady model) and the model of the installation site (statistical model). The steady model is usually represented by a power balance equation and a power level diagram. The statistical model consists in the knowledge of cumulative exceedance probability of random atmospheric attenuation coefficient and cumulative conditional exceedance probability of fade durations for different values of normalized link margin. The complex model of AOL is expressed by a nomogram for estimation of link availability.

In the fifth and final section, the Laboratory of AOLs at the Faculty of Electrical Engineering and Communication is introduced. Achievements of the Laboratory are evaluated from the point of view of research, teaching activities and popularization of the university development.