

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ing. Lucie Dordová

**METODA STANOVENÍ CHARAKTERISTIK ATMOSFÉRICKÉHO
PŘENOSOVÉHO PROSTŘEDÍ V OPTICKÉ OBLASTI SPEKTRA**

**METHOD OF ATMOSPHERIC TRANSMISSION MEDIA
CHARACTERISTICS DETERMINATION IN OPTICAL SPECTRUM**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Elektronika a sdělovací technika

Školitel: Prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické bezkabelové spoje, atmosférické přenosové prostředí, atmosférické turbulence, turbulentní útlum, metoda dostupného výkonu, Rytovova aproximace, Andrewsova metoda, meteorologická viditelnost, Kimova metoda, Kruseova metoda

KEY WORDS

Free space optics, atmospheric transmission media, turbulent atmosphere, turbulent attenuation, method of available power, Rytov's approximation, Andrews's method, meteorological visibility, Kim's method, Kruse's method

OBSAH

OBSAH.....	3
1 ÚVOD.....	5
1.1 Současný stav řešené problematiky	5
1.2 Cíle disertační práce.....	6
2 ATMOSFÉRICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ A OPTICKÝ SVAZEK.....	7
2.1 Útlum v atmosféře.....	7
2.2 Metoda dostupného výkonu	7
2.3 Nerovnoměrné rozložení relativní variance optické intenzity a optimální tvar laserového svazku	13
3 ZÁVĚR.....	17
3.1 Splnění cílů	17
4 PODĚKOVÁNÍ.....	19
5 LITERATURA	20
6 ŽIVOTOPIS.....	22
7 ABSTRACT	23

1 ÚVOD

Tato disertace se zabývá optickými svazky ve volném prostoru a jejich konkrétním využitím – optickými bezkabelovým spoji. V práci se seznámíme s vlivem atmosférických turbulencí na optický svazek. Podrobněji se budeme věnovat nové metodě určování turbulentního útlumu. Rovněž se zaměříme na rozložení relativní variance optické intenzity v intenzitním profilu laserového svazku.

1.1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Přenos informací se stal nedílnou součástí průmyslu, vědy, vzdělání, administrativy, medicíny, bankovní sféry ale i běžných domácností. Neustále rostou požadavky na přenosové rychlosti a dostupnost spojů. Kvalitu stávajících přenosových systémů lze zvyšovat jejich modernizací a nové komunikační systémy musí splňovat předem stanovené požadavky. Optické bezkabelové spoje (OBS) se jeví jako vhodný komunikační systém, který splňuje požadavky na přenosové rychlosti a spolehlivost spoje. Současnými trendy v optických komunikacích se zabývají například publikace [1], [3], [22], [23], [24].

Idea optických bezkabelových spojů je známá již několik desítek let, ale až díky moderním technologiím výroby optických komponent se OBS staly cenově dostupnou technologií. OBS pracují v bezlicenčním pásmu a není potřeba povolení Českého telekomunikačního úřadu pro jejich provoz. Vzdálenost mezi dvěma body optického komunikačního systému může být několik stovek metrů až desítky kilometrů, divergence optického svazku se nastavuje na tři až osm miliradiánů pro kratší spoje, spoje s vyšším dosahem mají divergenci podstatně nižší. Přenosové rychlosti těchto spojů dosahují až deset Gb/s a jejich dostupnost dosahuje hodnoty až 99.99% [13], [15], [25].

Přenos signálu optickým bezkabelovým spojem je ovlivněn atmosférickým přenosovým prostředím. Je nutné vybrat takovou vlnovou délku zdroje optického záření, která spadá do atmosférického okna propustnosti. Optický signál může být krátkodobě nebo dlouhodobě přerušen anebo může být utlumen. Atmosférické turbulence vnímáme jako negativní jev, jelikož může dojít k úniku a fluktuaci úrovně optického signálu. Míru turbulencí je potřeba vyhodnotit a stanovit vliv atmosférických turbulencí na optický signál. Klasicky se úroveň turbulencí vyhodnocuje z časového záznamu úrovně optického signálu. Tato práce se zabývá možností zavedení nové metody určování útlumu atmosférickými turbulencemi, tzv. metodou dostupných výkonů, která vychází z analýzy geometrického profilu optického svazku [11], [12].

1.2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Práce je především zaměřená na studium a vyhodnocení míry atmosférických turbulencí. V dnešní době se míra turbulencí vyjadřuje nejčastěji strukturním parametrem indexu lomu C_n^2 v jednotkách $[m^{-2/3}]$. Strukturní parametr indexu lomu je číselně roven strukturní funkci indexu lomu vztažené na jednotku délky. S rostoucím strukturním parametrem indexu lomu roste míra turbulencí v atmosféře. Parametr C_n^2 nejčastěji získáváme z časového průběhu úrovně přijatého optického signálu anebo jej získáme z hodnot variance termodynamické teploty a atmosférického tlaku v místě měření. Existuje rovněž scintilometr – zařízení, které měří přímo strukturní parametr indexu lomu v atmosféře. V současnosti používané metody předpokládají pro určení útlumu turbulencemi homogenní rozložení strukturního parametru indexu lomu v celé trase optického svazku a zároveň nezohledňují varianci optické intenzity v intenzitním profilu optického svazku.

V práci je analyzována možnost vyhodnocení míry atmosférických turbulencí pomocí intenzitního profilu optického svazku. Definován je objem dostupného výkonu (PDV) vyjádřený pomocí funkce dostupného výkonu optického svazku. Určení útlumu optického signálu na základě znalosti objemu dostupného výkonu je rovněž jedním z cílů této práce.

Konkrétně výstupem disertační práce bude:

- Model atmosféry zahrnující útlumy atmosférického přenosového prostředí a turbulence v atmosféře.
- Vyhodnocení míry atmosférických turbulencí na základě studia intenzitního profilu laserového svazku pomocí dostupného výkonu optického svazku a nalezení vztahu mezi dostupným výkonem a útlumem optického signálu způsobeným atmosférickými turbulencemi.
- Nalezení vhodného tvaru laserového svazku pro maximální eliminaci negativního vlivu atmosférických turbulencí.

Hlavním přínosem této disertační práce bude představení nové metody určování míry atmosférických turbulencí, která dosud není v technické praxi známá a používaná. Z této metody bude vycházet i návrh vhodné geometrie laserového svazku, který bude v rámci možností maximálně odolný proti rušení turbulentní atmosférou.

2 ATMOSFÉRICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ A OPTICKÝ SVAZEK

Optické bezkabelové spoje využívají ke komunikaci optické svazky ve volném prostoru. Mezi nejvýznamnější atmosférické jevy patří atmosférický útlum, atmosférické turbulence a šum pozadí. Atmosférický útlum je způsoben hlavně hydrometeory, prachovými částicemi a molekulami. Atmosférické turbulence jsou vyvolány oblastmi s nekonstantním indexem lomu prostředí, a šumy. Šum pozadí lze díky vhodné konstrukci vysílací a přijímací části optického bezkabelového spoje minimalizovat a zanedbat. Atmosférický útlum a turbulence budou tedy dominantní jevy, které ovlivní funkčnost optické bezkabelové linky [18], [21].

2.1 ÚTLUM V ATMOSFÉŘE

Existuje několik matematických modelů popisujících útlumy v atmosféře. Vysoce uznávaný a citovaný je Kimův model a Kruseův model. Oba tyto modely pracují s meteorologickou viditelností. Na základě tohoto parametru lze určit útlum atmosféry. Jiné modely již nejsou tak často používány, a to pro jejich omezenou platnost. Tato problematika je publikována [1], [2], [4], [5], [6], [8], [9], [19], [21].

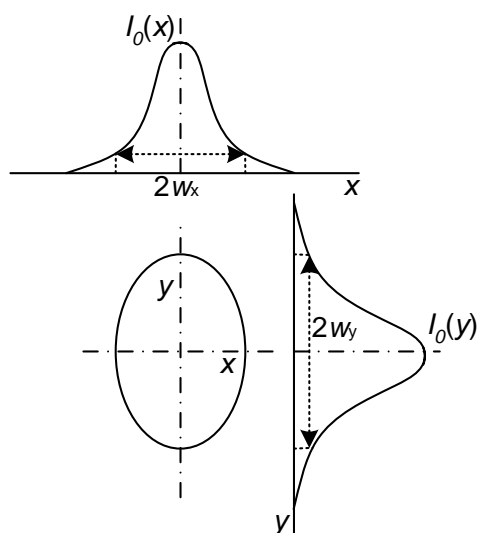
2.2 METODA DOSTUPNÉHO VÝKONU

Míra atmosférických turbulencí se v současné době nejčastěji vyjadřuje strukturním parametrem indexu lomu C_n^2 , který lze určit pomocí relativní variance optické intenzity.

Pro záření optických zdrojů (laserové diody, LED anebo lasery), které vyzařují optický svazek s Gaussovským rozložením, platí v dané rovině $z = \text{konst.}$ obecně následující vztah mezi optickým výkonem P a optickou intenzitou $I(x,y)$ [7]:

$$P = \int_S I(x,y) dS = \int_S I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w_x}\right)^2} e^{-2\left(\frac{y}{w_y}\right)^2} dS, \quad (2.1)$$

kde I_0 je hodnota optické intenzity v počátku souřadnicových os, x, y jsou souřadnice na příslušných souřadnicových osách, w_x, w_y představují pološířky svazku a dS je element plochy. Na (Obrázek 2.1) je zobrazen eliptický Gaussův svazek a jeho profily [10], [17].



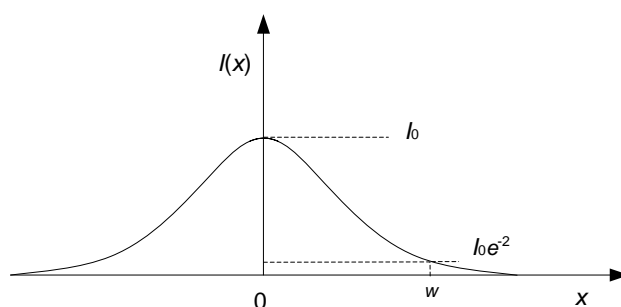
Obrázek 2.1 Eliptická stopa optického svazku a její intenzitní profil pro $I_0(x) = I_0(y)$

V případě výskytu turbulencí v atmosférickém přenosovém prostředí dojde k fluktuaci úrovně optické intenzity ve svazku. Pro zjednodušení nyní uvažujme, že stopa Gaussovského svazku je kruhová. Pak můžeme napsat, že vztah mezi celkovým optickým výkonem P a maximální optickou intenzitou ve středu svazku I_0 je [7]

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w}\right)^2} dS = 0,5 \cdot I_0 \pi \cdot w^2, \quad (2.2)$$

kde x je radiální vzdálenost od středu svazku a w je pološířka kruhového optického svazku.

Pokud optický kruhový svazek není ovlivněn atmosférickými turbulencemi, pak profil laserového svazku (Obrázek 2.2) odpovídá profilu ideálního Gaussova svazku [16].

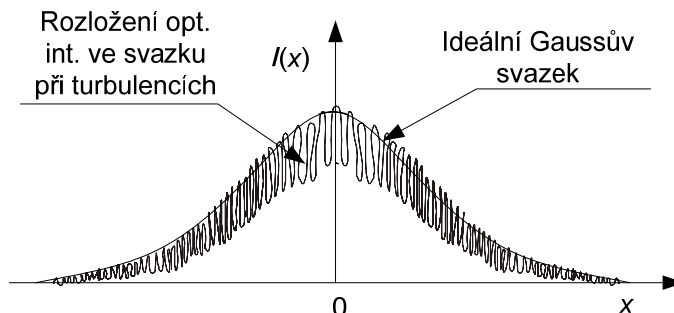


Obrázek 2.2 Ideální kruhově symetrický Gaussov svazek

Optickou intenzitu $I(x)$ profilu svazku v případě atmosféry bez turbulencí můžeme vyjádřit vztahem

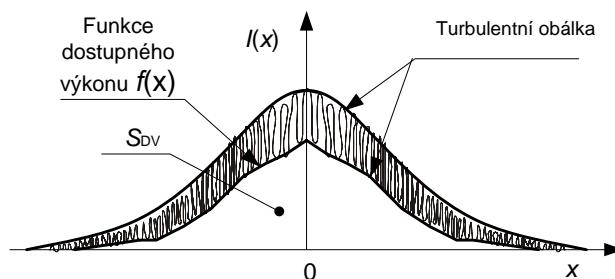
$$I(x) = I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w}\right)^2} . \quad (2.3)$$

V případě, že je optický svazek ovlivněn atmosférickými turbulencemi, dochází k fluktuaci úrovně optické intenzity (Obrázek 2.3) [14]



Obrázek 2.3 Fluktuace úrovně optické intenzity při průchodu svazku turbulentní atmosférou bez útlumu na aerosolech

Fluktuace optické intenzity signálu způsobená atmosférickými turbulencemi vytváří určitou tzv. turbulentní obálku, která je omezena turbulentními hraničními křivkami zespoda i shora. Spodní hranice turbulentní obálky (spodní turbulentní hraniční křivka) vyjadřuje funkci dostupného výkonu $f(x)$ [14].



Obrázek 2.4 Rozložení optické intenzity svazku v případě turbulentní atmosféry

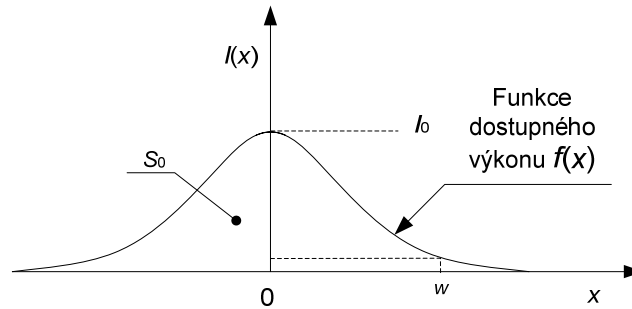
Pokud určíme velikost plochy omezenou funkcí dostupného výkonu $f(x)$ a osou x , získáme plochu dostupného výkonu S_{DV} . Tato plocha dostupného výkonu je tedy dána vztahem [14]:

$$S_{DV} = \int_x f(x) dx . \quad (2.4)$$

Pro optický svazek, který není ovlivněn atmosférickými turbulencemi, platí, že rozložení optické intenzity je Gaussovské a plocha dostupného výkonu je maximální S_0 . Maximální plochu dostupného výkonu S_0 matematicky vyjádříme

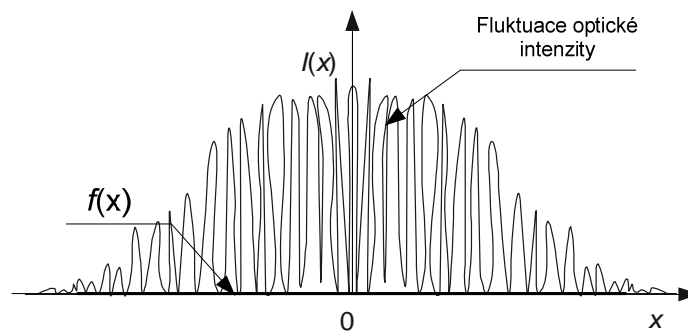
$$S_0 = \int_x I_0 e^{-2\left(\frac{x}{w}\right)^2} dx. \quad (2.5)$$

Tato plocha S_0 je zobrazena na následujícím obrázku (Obrázek 2.5), kde je patrné, že funkce dostupného výkonu je formálně identická s ideální křivkou nenarušenou atmosférickými turbulencemi.



Obrázek 2.5 Plocha dostupného výkonu u svazku, který není ovlivněn atmosférickými turbulencemi

V případě velmi vysokých atmosférických turbulencí může dojít k situaci, kdy úroveň optické intenzity bude v profilu svazku fluktuovat do té míry, že signál bude nepoužitelný. Funkci dostupného výkonu určíme díky zjištění minimálních hodnot optických intenzit v každém bodě intenzitního profilu laserového svazku při dostatečně dlouhém čase pozorování (řádově desítky sekund až minuty) intenzitního profilu svazku. Na následujícím obrázku je uveden mezní případ (Obrázek 2.6).



Obrázek 2.6 Rozložení optické intenzity ve svazku při velmi vysoké úrovni atmosférických turbulencí

V tomto mezním případě bude funkce dostupného výkonu $f_{min}(x)$ nabývat nulovou hodnotu pro jakékoliv x

$$\lim_{I(x) \rightarrow 0} f_{min}(x) = 0. \quad (2.6)$$

Plocha dostupného výkonu S_{DV} pak bude nabývat minimální hodnotu $S_{DV,min}$, kterou vyjádříme

$$S_{DV,\min} = \int_x f_{\min}(x) = 0. \quad (2.7)$$

Samozřejmě může existovat i vyšší míra atmosférických turbulencí než je schopná určit minimální funkce dostupného výkonu. Metoda určování atmosférických turbulencí pomocí plochy dostupného výkonu má omezenou platnost, a to je právě hranice minimální funkce dostupného výkonu a minimální plocha dostupného výkonu.

Nyní budeme normovat plochu dostupného výkonu [16]. Jak již bylo zmíněno výše, maximální možná plocha dostupného výkonu je S_0 , tedy

$$S_{DV,norm} = \frac{S_{DV}}{S_0}. \quad (2.8)$$

Bude platit, že při atmosféře bez turbulencí ($S_{DV} = S_0$) bude normovaná plocha dostupného výkonu $S_{DV,norm}$ rovna

$$S_{DV,norm} = \frac{S_0}{S_0} = 1. \quad (2.9)$$

V případě, že turbulence budou velmi vysoké a nastane mezní stav, kdy funkce dostupného výkonu $f_{\min}(x)$ bude rovna nule, pak

$$S_{DV,norm} = \frac{S_{DV,\min}}{S_0} = \frac{0}{S_0} = 0. \quad (2.10)$$

Pro ostatní atmosférické turbulence se bude normovaná plocha dostupného výkonu $S_{DV,norm}$ nalézat v intervalu (0,1).

V technické praxi musíme počítat s trojrozměrným laserovým svazkem, který nebude ideálně kruhově symetrický. Nyní se tedy zaměříme na optický svazek, u kterého budeme brát v úvahu rozměry x , y a $I(x, y)$. V tomto případě nebudeme již hovořit o ploše dostupného výkonu, ale o objemu dostupného výkonu, nebo zkráceně o dostupném výkonu. Dostupný výkon tedy můžeme vyjádřit analogicky jako [26]

$$V_{DV} = \iint_{x,y} f(x, y) dx \cdot dy, \quad (2.11)$$

kde $f(x, y)$ představuje funkci dostupného výkonu v případě reálného svazku.

V atmosférickém přenosovém prostředí bez výskytu turbulence bude dostupný výkon roven optickému výkonu nezarušeného Gaussova svazku s Gaussovským rozložením optické intenzity $f_0(x, y)$

$$V_0 = \iint_{x,y} f_0(x, y) dx \cdot dy. \quad (2.12)$$

V případě velmi vysoké míry atmosférických turbulencí bude funkce dostupného výkonu $f_{min}(x, y)$ totožná s rovinou x, y a minimální hodnota dostupného výkonu tak dosáhne nulové hodnoty stejně, jak tomu bylo u plochy dostupného výkonu. Minimální dostupný výkon je tedy roven

$$V_{DV, \min} = \iint_{x, y} f_{\min}(x, y) dx \cdot dy = 0. \quad (2.13)$$

Opět pro zjednodušení situace zavedeme normovaný objem dostupného výkonu (stručně normovaný dostupný výkon) vztahem

$$V_{DV, \text{norm}} = \frac{V_{DV}}{V_0}. \quad (2.14)$$

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že v případě atmosférického přenosového prostředí bez výskytu turbulencí bude normovaný dostupný výkon roven hodnotě 1, jak vyplývá z následujícího vztahu

$$V_{DV, \text{norm}} = \frac{V_0}{V_0} = 1. \quad (2.15)$$

V limitním případě při výskytu vysokých turbulencí bude normovaný dostupný výkon roven hodnotě 0.

$$V_{DV, \text{norm}} = \frac{V_{DV, \min}}{V_0} = 0. \quad (2.16)$$

Cílem je vyjádřit útlum optického svazku procházejícího turbulentní atmosférou. Když tedy analyzujeme vzniklou situaci, pak dojdeme k závěru, že v případě normovaného dostupného výkonu $V_{DV, \text{norm}} = 1$ nebude vznikat žádný turbulentní útlum a v případě, že normovaný dostupný výkon dosáhne hodnoty nula, pak turbulentní útlum dosáhne nekonečné hodnoty. Rovněž podstata normovaného dostupného výkonu (poměr dvou dostupných výkonů) nám napovídá, jak stanovit tento útlum. Turbulentní útlum vyjádříme ze znalosti normovaného dostupného výkonu podle následujícího vztahu

$$\alpha_{DV} = 10 \cdot \log V_{DV, \text{norm}}. \quad (2.17)$$

Jelikož metoda dostupných výkonů pročitá s funkcí dostupného výkonu, která je definovaná jako spodní část turbulentní obálky (Obrázek 2.4), pak je potřeba si uvědomit, že funkce dostupného výkonu představuje nejhorší případ turbulentního útlumu. Toto můžeme považovat za velkou výhodu oproti ostatním metodám, které udávají průměrný turbulentní útlum. Při kalkulaci parametrů optického bezkabelového spoje je však vhodné znát i nejhorší možný útlum, čímž se zpřesní návrh spoje.

2.3 NEROVNOMĚRNÉ ROZLOŽENÍ RELATIVNÍ VARIANCE OPTICKÉ INTENZITY A OPTIMÁLNÍ TVAR LASEROVÉHO SVAZKU

V literatuře a odborných publikacích se setkáváme s předpokladem rovnoměrného rozložení relativní variance optické intenzity $\sigma_{I,rel}^2$ v intenzitním profilu laserového svazku. Na základě vlastních experimentálních měření se však předpoklad rovnoměrného rozložení relativní variance optické intenzity v intenzitním profilu laserového svazku nepotvrdil.

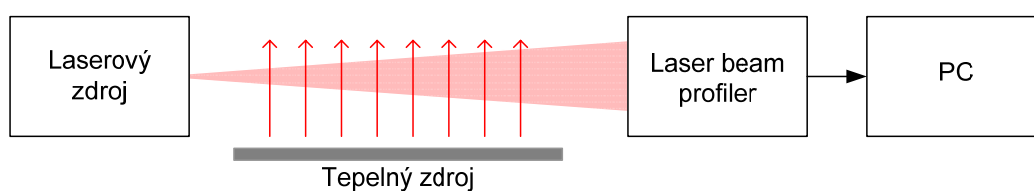
Na základě snímaných intenzitních profilů laserového svazku po průchodu turbulentním atmosférickým přenosovým prostředím byly vyhodnoceny relativní variance optické intenzity ve všech měřených bodech v profilu laserového svazku. Výsledná závislost relativní variance optické intenzity $\sigma_{I,rel}^2$ na směrnici k křivky intenzitního profilu laserového svazku měla narůstající charakter. Zvolila jsem tedy exponenciální funkci pro popis dané charakteristiky z důvodu větší univerzálnosti, kdy nulové směrnici odpovídala relativní variance optické intenzity daná Rytovovou aproximací. S rostoucí směrnici k narůstala i relativní variance optické intenzity. Matematicky lze danou závislost vyjádřit následovně

$$\sigma_{I,rel}^2(k) = f(k) \cdot \sigma_{I,rel}^2 = f(k) \cdot 0,5 \cdot C_n^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda}\right)^{7/6} \cdot L^{11/6}, \quad (2.18)$$

kde $f(k)$ představuje funkci směrnice, pro kterou platí $f(k) \geq 1$ a lze ji uvést obecně v podobě

$$f(k) = a^{k+b} + c, \quad (2.19)$$

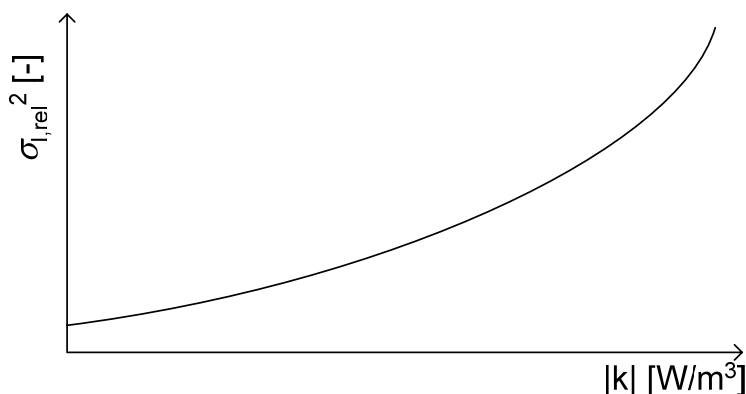
kde parametry a , b , c jsou závislé na strukturním parametru indexu lomu C_n^2 , vlnové délce optického záření λ a vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem L .



Obrázek 2.7 Schéma pracoviště pro určení míry atmosférických turbulencí

Na základě experimentálních měření bylo zjištěno, že relativní variance optické intenzity je závislá na směrnici k . Exaktní stanovení závislosti relativní variance optické intenzity na směrnici křivky intenzitního profilu nebylo podrobně studováno. Dané problematice není v této práci věnována další pozornost. Rozhodující je, že.

Pro stanovení optimálního tvaru laserového svazku je podstatné zjištění, že experimenty indikují rostoucí trend – s rostoucí směrnicí k roste $\sigma_{I,rel}^2$. Díky tomuto poznatku lze stanovit optimální tvar laserového svazku s ohledem na minimalizaci vlivu atmosférických turbulencí projevujících se turbulentním útlumem optického výkonu.



Obrázek 2.8 Závislost relativní variance optické intenzity na směrnicí křivky profilu laserového svazku

Pro stanovení optimálního tvaru laserového svazku je tedy nutné znát směrnice křivky intenzitního profilu. Z pohledu teorie dostupných výkonů se jedná o derivaci funkce dostupného výkonu podle příslušné souřadnice.

Abychom objektivně zhodnotili rozdíly mezi plochami dostupných výkonů jednotlivých intenzitních profilů laserových svazků určených při rovnoměrném a nerovnoměrném rozložení relativní variance optické intenzity v intenzitním profilu laserového svazku, pak vyčíslíme tento rozdíl pomocí parametru $\Delta(k)$. Tento parametr určíme následovně

$$\Delta(k) = S_{DV, norm} - S_{DV, norm}(k), \quad (2.20)$$

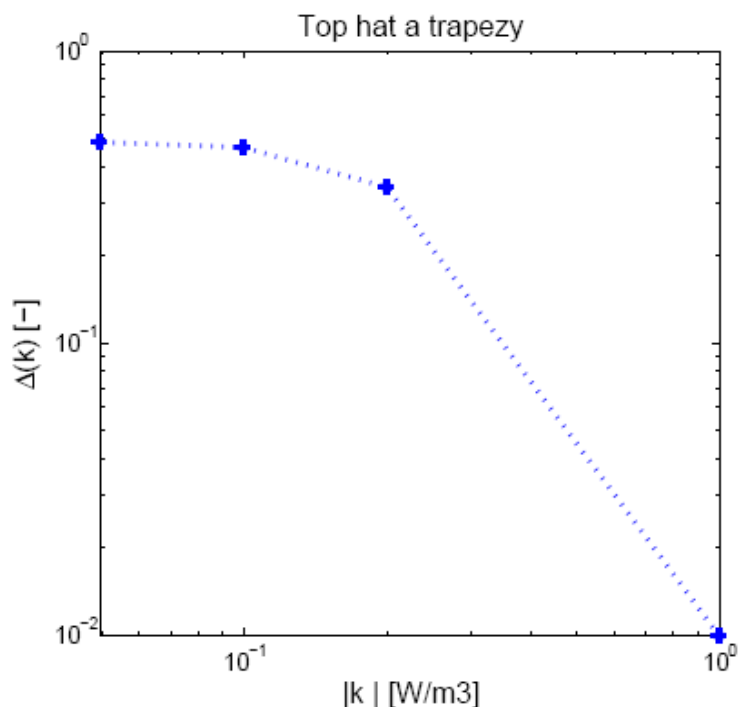
kde $S_{DV, norm}$ představuje plochu dostupného výkonu při rovnoměrném rozložení relativní variance optické intenzity a $S_{DV, norm}(k)$ je plocha dostupného výkonu při nerovnoměrném rozložení relativní variance optické intenzity.

Výsledné parametry $\Delta(k)$ závislé na k jsou pro Top hat a trapézové tvary optických svazků uvedeny v následující tabulce (Tabulka 2.1). Trapéz 1 má nejméně nakloněná ramena, trapéz 3 nejvíce.

Tabulka 2.1 Vztah parametru $\Delta(k)$ na směrnicí křivky intenzitního profilu

Typ svazku	Top hat	Trapéz 1	Trapéz 2	Trapéz 3
k [W/m ³]	1	0,2	0,1	0,05
$\Delta(k)$ [-]	0,01	0,34	0,46	0,49

Grafické znázornění závislosti parametru $\Delta(k)$ na směrnici přímky těchto čtyř intenzitních profilů je zobrazeno na (Obrázek 2.9). Z výsledku je zřejmé, že s klesající směrnici přímky k narůstá parametr $\Delta(k)$, který v sobě obsahuje informaci o odolnosti daného tvaru svazku proti atmosférickým turbulencím. S rostoucím náklonem hran trapézového tvaru svazku klesá jeho odolnost proti turbulencím. Ze všech tvarů optických svazků je Top hat nejvhodnější. Pro porovnání v další části uvedeme tabulku s přehledem dalších tvarů svazků a jejich parametr $\Delta(k)$.



Obrázek 2.9 Závislost parametru $\Delta(k)$ na směrnici křivky intenzitního profilu u vybraných typů optických svazků

Kromě Gaussova svazku, Top hat svazku a trapézových intenzitních profilů jsem zkoumala i energeticky ekvivalentní svazky se sinusovými profily (Tabulka 2.2) a s profilem x^2 , x^4 , x^6 , x^8 a x^{10} (Tabulka 2.3).

Tabulka 2.2 Parametry $\Delta(k)$ pro svazky se sinovým rozložením optické intenzity

Typ svazku	$\sin x$	$\sin 2x$	$\sin 3x$	$\sin 4x$	$\sin 5x$	$\sin 6x$
$\Delta(k)$ [-]	0,56	0,76	0,92	1,06	1,19	1,31

Tabulka 2.3 Parametry $\Delta(k)$ pro svazky s kvadratickým rozložením optické intenzity

Typ svazku	x^2	x^4	x^6	x^8	x^{10}
$\Delta(k)$ [-]	0,49	0,37	0,34	0,32	0,29

Výsledné parametry $\Delta(k)$ ukazují vhodnost použití jednotlivých intenzitních profilů v turbulentním atmosférickém přenosovém prostředí. Nejnižší hodnotu $\Delta(k)$

vykazuje svazek Top hat, nejvyšší hodnotu z uvedených svazků vidíme u svazku s profilem $\sin 6x$.

Z výše uvedených parametrů $\Delta(k)$ můžeme usoudit, že svazky, které vykazují rovnoměrné rozložení optické intenzity v profilu laserového svazku, jsou vhodné pro využití v optických bezkabelových komunikacích. Nevhodné jsou naopak svazky s „ostrými“ a „strmými“ intenzitními profily.

3 ZÁVĚR

Tato disertace se obecně zabývá optickými bezkabelovými spoji a jevy v atmosférickém přenosovém prostředí, které významně ovlivňují provoz optické linky. Blíže se pak práce zaměřuje na atmosférické turbulence a jejich vliv na optické svazky ve volném prostoru.

Během dosavadního studia jsem se seznámila a prozkoumala v současnosti používané modely určování atmosférických turbulencí a turbulentního útlumu. Tyto modely se nezabývají a nezohledňují intenzitní profil optického svazku. Rozhodla jsem se proto zaměřit se na studium intenzitního profilu laserového svazku v turbulentní atmosféře. Výsledkem mé dosavadní práce je metoda dostupných výkonů a tvrzení, že relativní variance optické intenzity je nerovnoměrně rozložená v intenzitním profilu laserového svazku. Rovněž jsem definovala metodiku určování parametrů atmosférického přenosového prostředí spjatých s optickými bezkabelovými spoji.

3.1 SPLNĚNÍ CÍLŮ

Metoda dostupných výkonů umožňuje stanovit míru atmosférických turbulencí na základě analýzy intenzitního profilu laserového svazku procházejícího turbulentním atmosférickým přenosovým prostředím. Díky metodě založené na analýze intenzitního profilu jsme schopni stanovit nejhorší možný turbulentní útlum pro daný stav atmosféry. V této práci jsem matematicky popsala tuto metodu dostupného výkonu a jednoduchým experimentem jsem ji ověřila.

Díky experimentálním měřením jsem si uvědomila, že relativní variance optické intenzity v intenzitním profilu laserového svazku není rovnoměrně rozložena, jak se doposud předpokládalo, ale rozložení této variance je nerovnoměrné a závisí na směrnici křivky intenzitního profilu. Díky znalosti tohoto poznatku jsem stanovila optimální tvar optického svazku pro minimalizaci vlivu turbulentní atmosféry. V optimálním případě bychom měli pro optické přenosy v turbulentní atmosféře používat široké svazky typu Top hat. Tyto svazky mají v ideálním případě nulovou směrnici křivky intenzitního profilu uvnitř stopy svazku. Je naopak naprosto nevhodné používat úzký laserový svazek se „strmým“ intenzitním profilem. Funkce směrnice křivky intenzitního profilu, která určuje závislost relativní variance optické intenzity na směrnici křivky intenzitního profilu, není doposud přesně definována a je zde proto prostor pro další práci na této problematice.

Výstupem této práce je rovněž metoda určení charakteristik atmosférického přenosového prostředí, která v sobě zahrnuje určení jak útlumu atmosféry způsobeného hydrometeory a prachovými částicemi, tak turbulentního útlumu. Na

základě znalosti parametrů vysílaného svazku můžeme díky této metodice stanovit, jaký optický svazek bude s největší pravděpodobností detekován.

4 PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému školiteli panu prof. Wilfertovi za odborné vedení, velmi cenné rady a pomoc při práci na této disertaci.

Rovněž děkuji akademickým pracovníkům Ústavu radioelektroniky za finanční podporu plynoucí z grantových prostředků, a to především panu prof. Wilfertovi za finanční podporu z grantu GA102/09/0550, panu prof. Svačinovi za finanční podporu z grantů GD102/08/H027 a MSM0021630513, panu prof. Šebestovi a panu Doc. Maršálkovi za podporu z grantu GD102/03/H109.

Velmi děkuji mému životnímu partnerovi a nejlepšímu příteli Lubošovi a mé rodině za nesmírnou podporu nejen během studia a práce na disertaci.

5 LITERATURA

- [1] FLECKER, B., GEBHART, M., LEITGEB, E., SHEIKH MUHAMMAD, S., CHLESTIL, C. Results of attenuation measurements for optical wireless channels under dense fog conditions regarding different wavelengths. *Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation II - Proceedings of the SPIE*. 2006, vol. 6303, p. 1-11.
- [2] NABOULSI, A., SIZUN, M., DE FORNEL, F. Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. In *The Proceedings of the XXVIIIth URSI General Assembly in New Delhi*. New Delhi (India): URSI, 2005, p. 1 – 4.
- [3] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. *Laser Beam Scintillation with Applications*. Washington: Spie Press, 2001.
- [4] KOREVAAR, E., KIM, I., MCARTHUR, B. Atmospheric Propagation Characteristics of Highest Importance to Commercial free Space Optics. *Atmospheric Propagation - Proceedings of the SPIE*. 2003, vol. 4976, p. 1 – 12.
- [5] GEBHART, M., LEITGEB, E., SHEIKH MUHAMMAD, S., FLECKER, B., CHLESTIL, C., AL NABOULSI, M., DE FORNEL, F., SIZUN, H. Measurement of Light attenuation in dense fog conditions for FSO applications. *Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation - Proceedings of the SPIE*. 2005, vol. 5891, p. 175-186.
- [6] KIM, I., MCARTHUR, B., KOREVAAR, E. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications, *Optical Wireless Communications III - Proceedings of SPIE* . 2001, vol. 4214, p. 26-37.
- [7] SALEH, B.E.A., TEICH, M.C. *Základy fotoniky*. Praha: MATFYZPRESS Praha, 1994. ISBN 80-85863-00-6.
- [8] KIM, I.I., STIEGER R., KOONTZ J.A., MOURSUND C., BARCLAY M., ADHIKARI P., SCHUSTER J., KOREVVAR E. Wireless optical transmission of fast ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink laser communication system. *Optical Engineering*. 37(12) s.3143–3155. December 1998.
- [9] KAVEHRAD, M., HAMZEH, B. Beaming Bandwidth via Laser Communications. In *5th Integrated Communications, Navigation and Surveillance Technologies*. Pennsylvania (USA): The Pennsylvania State University, Department of Electrical Engineering, 2005.
- [10] DORDOVÁ, L. Laser Beam Geometry and Spectral Linewidth Variation in Turbulent Atmosphere. In *6th INTERNATIONAL CONFERENCE OF PHD STUDENTS*. Miskolc (Hungary): University of Miskolc, Innovation and Technology Transfer Centre, 2007, p. 239-244. ISBN: 978-963-661-783-7.
- [11] DORDOVÁ, L., WILFERT, O. Optical intensity distribution and beam halfwidth in relation to the laser diode operating temperature. In *Kondor 2007*. Trenčianske Jastrabie (Slovakia): Institute of Radio Electronics, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Brno University of Technology, 2007, p. 13-16. ISBN: 978-80-214-3394-6.
- [12] DORDOVÁ, L. Metody stanovení teplotních vlivů na bezkabelové optické spoje. In *Seminář o řešení projektu GA ČR 102/03/H109 2007*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2007, p. 48-51. ISBN: 978-80-214-3444-8.
- [13] DORDOVÁ, L., WILFERT, O. Optimal laser diode operating mode with unstable operating temperature in turbulent atmosphere. In *Proceedings of the Semiconductor Lasers and Laser*

Dynamics in SPIE Europe – Photonics Europe 2008, Strasbourg (France): SPIE Europe, 2008, p. 1 - 11

- [14] DORDOVÁ, L., WILFERT, O. Volume of Atmospheric Turbulences Evaluation on the Basis of the Turbulent Area Quantification. In *Proceedings of 14th Conference on Microwave Techniques COMITE 2008*. Praha: Faculty of Electrical Engineering Czech Technical University in Prague, 2008, p. 1-4
- [15] TOŠOVSKÝ, O., DORDOVÁ, L. Free Space Optical Channel Parameters Estimation for High Altitude Platform System. In *Proceedings of 18th International Conference Radioelektronika 2008*. Praha: Faculty of Electrical Engineering Czech Technical University in Prague, 2008, p. 1-5
- [16] DORDOVÁ, L. Analysis of Atmospheric Transmission Media Influence on Symmetrical Gaussian Beam. In *12th International Student Conference on Electrical Engineering Poster 2008*. Praha: Faculty of Electrical Engineering Czech Technical University in Prague, 2008, p. 1-4
- [17] DORDOVÁ, L. The Turbulent Area and Substitutive Turbulent Function of the Circular Symmetric Gaussian Beam. In *Student EEICT 2008*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií a Fakulta informačních technologií, 2008, p. 1-5
- [18] KOLKA, Z.; WILFERT, O. Statistical model of free-space optical data link. In *Proc. of The International Symposium on Optical Science and Technology*. Denver: Int. Soc. for Opt. Eng., 2004. s. 203-213. ISBN: 0-8194-5488-5.
- [19] O'BRIEN, H. W. Visibility and Light Attenuation in Falling Snow, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 9, pp. 671-683, 1970
- [20] NEBULONI, R., CAPSONI, C. Laser Attenuation by Falling Snow, In *Proc. of CSNDSP 2008*, vol. 10, Graz, Austria, 2008
- [21] WILFERT, O., *Optické bezkabelové spoje*, Habilitační práce, 2004
- [22] GLESK, I., RUNSER, R. J., PRUCNAL, P. P., New trends in optical communications, In *Proc. SPIE Vol. 4356*, p. 102-110, 12th Czech – Slovak – Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics
- [23] LUTZ, H. P., *Optical Communications in Space - Twenty Years of ESA Effort* [online]. Instrument Technology Division, ESA Technical and Operational Support Directorate, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands [cit. 2009-03-07]. Dostupný z WWW: <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet91/b91lutz.htm>
- [24] HENNIGER, H., EPPLE, B., GIGGENBACH, D., Mobil FSO Activities in Europe and Fading Mitigation Approaches, In *Proceedings of 17th International Conference Radioelektronika 2007*. Brno (Czech Republic), 2007, p. 263-268. ISBN 1-4244-0821-0
- [25] DORDOVÁ, L.; WILFERT, O. Free Space Optical Link Range Determination on the Basis of Meteorological Visibility. In *Proceedings of 19th International Conference Radioelektronika 2009*. 2009. s. 333-336. ISBN: 978-1-4244-3536-4
- [26] DORDOVÁ, L.; WILFERT, O. Laser beam attenuation determined by the method of available optical power in turbulent atmosphere. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2009, roč. 2009, č. 2, s. 53-57. ISSN: 1509-4553

6 ŽIVOTOPIS

Jméno: Lucie DORDOVÁ
Narozená: 23. prosince 1981 v Třinci
Kontakt: xdordo00@stud.feec.vutbr.cz

Vzdělání

- 2001 – 06 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav radioelektroniky**
Magisterský program Elektronika a sdělovací technika
Státní zkouška složena v červnu 2006
Diplomová práce Speciální techniky měření elektrických nábojů
obhájena v červnu 2006
- 2006 – 09 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav radioelektroniky**
Doktorský program Elektronika a sdělovací technika
Státní zkouška složena v červnu 2008

Zkušenosti

- 7/04 – 8/04 **Třinecký Inženýring – TK**
studijní praxe
měření a regulace, projektová dokumentace
- Od 1/09 **Ústav radioelektroniky**
technický pracovník

Jazyky

Angličtina, španělština, polština

7 ABSTRACT

This dissertation is focused on the determination of turbulent atmospheric transmission media properties. The concept of new method for turbulent attenuation designation is presented – the method of available power. This method comes from laser beam intensity profile analysis. The next point of this work is relative variance of optical intensity study. On the basis of experimental measurements relative variance of optical intensity is non-uniformly distributed in laser beam intensity profile. This non uniform distribution is subordinated to angular coefficient of intensity profile curve. Due to this information we can determine optimal laser beam shape to minimize influence of turbulent atmosphere.