

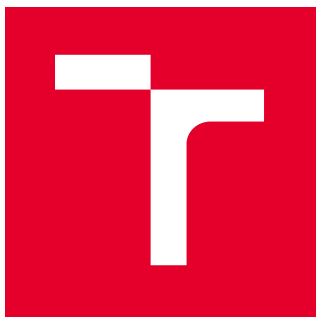
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Josef Holub



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODELOVÁNÍ DISPERZNÍCH VLASTNOSTÍ ATMOSFÉRY VE VERTIKÁLNÍM A ŠIKMÉM SMĚRU

MODELLING OF THE DISPERSION PROPERTIES OF THE ATMOSPHERE IN VERTICAL AND SLANT DIRECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Holub

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Josef Holub

ID: 203513

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Modelování disperzních vlastností atmosféry ve vertikálním a šikmém směru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vlastnostmi atmosférického přenosového prostředí v optické oblasti spektra a modelem vrstev atmosféry. Prostudujte parametry jednotlivých vrstev atmosféry, definujte jevy, které ovlivňují kvantitativní a kvalitativní parametry optických svazků z celého optického spektra. Stručně popište interakci atmosféry s optickými svazky. Zaměřte se na modelování indexu lomu atmosféry ve vertikálním a šikmém směru. Navrhněte a vytvořte program, který stanoví na základě výšky nad povrchem země a zvolené vlnové délky hodnotu indexu lomu v daném místě a čase. Následně umožněte vykreslení profilu indexu lomu atmosféry mezi dvěma zadanými body. Seznamte se s pojmem disperze optického záření. Popište, za jakých podmínek disperze optického signálu vzniká a jaký je její vliv na přenos informace optickými bezkabelovými spoji.

Do vámi navrženého a vytvořeného programu pro vykreslení profilu indexu lomu prostředí na trase mezi nastavenými body v prostoru implementujte možnost zadat relevantní parametry optického svazku, které jsou ovlivněny indexem lomu prostředí. Umožněte zobrazení a vyčíslení parametrů optického svazku ve vstupní a výstupní rovině optické trasy, případně v libovolném místě optické trasy. Zaměřte se na kvantifikaci míry disperze optického svazku způsobeného přenosovou trasou. Stanovte vliv míry disperze optického svazku na přijímaný signál o různých přenosových rychlostech. Na základě získaných znalostí zkuste vytvořit doporučení pro parametry optického signálu pro komunikaci ve vertikálním a šikmém směru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ANDREWS, L. C., PHILLIPS, R. L. Laser Beam Propagation through Random Media. Bellingham: SPIE, 1998.
- [2] MAJUMDAR, A. K., RICKLIN J. C. Free - Space Laser Communications: Principles and Advantages, New York: Springer, 2008.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá šířením optického svazku atmosférou Země ve vertikálním a šikmém směru. V rámci práce jsou popsány vlastnosti zemské atmosféry, její parametry a její vlivy na šíření optického svazku, zejména pak optická disperze. V rámci práce byl vytvořen model šíření optického svazku atmosférou ve dvou verzích, skriptové a uživatelsky grafické. Model byl vytvořen v prostředí MATLAB a umožňuje vykreslit profil indexu lomu prostředí pro zadanou vlnovou délku záření obsahuje další grafické i numerické výstupy.

Klíčová slova

Atmosféra Země, optický svazek, index lomu prostředí, disperze optického záření, model atmosféry, model optické komunikace

Abstract

This diploma thesis deals with the propagation of the optical beam through the Earth's atmosphere in the vertical and oblique directions. The work describes the properties of the Earth's atmosphere and parameters of atmosphere and its effects on the propagation of the optical beam, especially the optical dispersion. As part of the work, a model of optical beam propagation through the atmosphere was created in two versions, script and user-graphic. The model was created in the MATLAB environment and allows to draw the profile of the refractive index of the environment for the specified wavelength of radiation, it contains other graphical and numerical outputs.

Keywords

Earth's atmosphere, optical beam, refractive index, dispersion of optical radiation, model of the atmosphere, model of optical communication

Bibliografická citace

HOLUB, Josef. Modelování disperzních vlastností atmosféry ve vertikálním a šikmém směru [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20].

Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141539>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Lucie Hudcová.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Josef Holub
VUT ID studenta:	203513
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Modelování disperzních vlastností atmosféry ve vertikálním a šikmém směru

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23.května 2022

podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil své poděkování vedoucí diplomové práce doc. Ing. Lucii Hudcové, Ph.D. za časté odborné konzultace a za její věcné rady které byly velkou pomocí při zpracovávání této diplomové práce. Dále děkuji rodině a blízkým přátelům za vytrvalou podporu, bez které by nebylo možné dokončit práci.

V Brně dne: 23.května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
1. ZEMSKÁ ATMOSFÉRA A ŠÍŘENÍ SVĚTLA.....	14
1.1 VRSTVY A MODEL Y ATMOSFÉRY	14
1.1.1 Troposféra.....	15
1.1.2 Stratosféra.....	15
1.1.3 Mezosféra.....	16
1.1.4 Termosféra	16
1.1.5 Exosféra	16
1.1.6 Vybrané model y atmosféry.....	16
2. ŠÍŘENÍ SVĚTLA A VLASTNOSTI ATMOSFÉRY	19
2.1 LOM SVĚTLA	19
2.2 SPEKTRÁLNĚ ZÁVISLÝ INDEX LOMU	21
2.3 DISPERZE OPTICKÉHO ZÁŘENÍ	24
2.4 ANALÝZA VLASTNOSTÍ ATMOSFÉRY.....	25
2.4.1 Atmosférická turbulence	27
2.4.2 Šumy v atmosféře	27
3. ZÁKLADNÍ PRINCIP MODELU ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU ATMOSFÉROU	29
3.1 ZÁKLAD MODELU ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU ATMOSFÉROU – DVOUVRSTVÝ MODEL	29
3.2 OVĚŘOVACÍ VÍCEVRSTVÝ MODEL ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU A JEHO VÝSLEDKY	31
4. PROGRAM MODELU ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU ATMOSFÉROU	33
4.1 POPIS JEDNOTLIVÝCH FUNKČNÍCH BLOKŮ	34
4.1.1 Blok vstupních dat.....	34
4.1.2 Blok výškového rozložení	35
4.1.3 Blok výpočtu spektrálně závislého indexu lomu	36
4.1.4 Blok výpočtu vysílacího úhlu.....	38
4.1.5 Blok vykreslení trasy šíření svazku	39
4.1.6 Blok výpočtu vysílacího času a vzdálenosti.....	40
4.1.7 Blok prostorové disperze.....	42
4.1.8 Blok vykreslení prostorové disperze.....	43
4.1.9 Blok časové disperze	44
4.1.10 Blok divergence svazku	45
4.1.11 Blok útlumu šířením	47
4.2 VÝSTUPNÍ DATA MODELU ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU ATMOSFÉROU	49
4.2.1 Závislosti indexu lomu prostředí na výšce a vlnové délce.....	49
4.2.2 Závislosti disperzního rozšíření a zpoždění na zvoleném vysílacím úhlu.....	53
4.2.3 Závislosti disperzního rozšíření a disperzního zpoždění na šířce spektrální čáry laserového svazku	56

4.2.4	<i>Závislost vysílacího úhlu β_1 na horizontální vzdálenosti L</i>	58
4.2.5	<i>Závislosti pološířky laserového svazku v místě příjmu na vysílacím úhlu β_1</i>	60
4.2.6	<i>Simulace šíření laserového svazku v komunikaci loď – pobřežní maják</i>	62
4.2.7	<i>Simulace šíření laserového svazku v komunikaci pozemní stanice – letadlo</i>	67
4.2.8	<i>Simulace šíření laserového svazku v komunikaci pozemní stanice – družice</i>	72
4.2.9	<i>Simulace šíření laserového svazku pod různými úhly</i>	77
4.3	GRAFICKÁ VARIANTA MODELU ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU	78
4.4	HODNOCENÍ MODELU	81
5.	ZÁVĚR	83
	LITERATURA	85

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

MSA	Mezinárodní standartní atmosféra
ISA	International Standard Atmosphere
USSA	United States Standard Atmosphere (Americká standartní atmosféra)
ICAO	International Civil Aviation Organization
UV	Ultrafialové záření (ultraviolet)
IR	Infračervené záření (infrared)
LEO	Nízká oběžná dráha Země (Low Earth Orbit)
MEO	Střední oběžná dráha Země (Medium Earth Orbit)
GEO	Geostacionární oběžná dráha Země (Geostationary Earth Orbit)

Symboly:

n	index lomu prostředí	[-]
c_0	rychlost světla ve vakuu	[m/s]
v	rychlost světla v prostředí	[m/s]
ε_r	relativní permitivita	[-]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
r	refraktivita prostředí	[-]
λ	vlnová délka záření	[m]
$\Delta\lambda$	šířka spektrální čáry	[m]
λ	dolní okrajová vlnová délka záření	[m]
λ	horní okrajová vlnová délka záření	[m]
γ	koeficient extinkce	[m ⁻¹]
τ	propustnost atmosféry	[-]
β_1	vysílací úhel optického svazku	[°]
d	délka trasy optického svazku ve vrstvě	[m]
t_p	čas šíření optického svazku ve vrstvě	[s]
Δ_{disp}	délka disperzního rozšíření	[m]
p_B	pološířka svazku v místě přijímače bez ohledu na optickou disperzi	[m]
p_{disp}	pološířka svazku v místě přijímače s ohledem na optickou disperzi	[m]
θ	úhel divergence svazku	[°]
α_{TRdB}	útlum šířením	[dB]

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Profil zemské atmosféry [2]	14
1.2	Profil teploty podle MSA [5].....	17
2.1	Grafické znázornění Snellova zákona [7] (dvě prostředí A a B, normála N, úhel dopadu α a lomu β)	20
2.2	Profil refraktivity prostředí v atmosféře	23
2.3	Detailní pohled na refraktivitu prostředí v atmosféře pro různé vlnové délky záření	24
2.4	Disperzní jev na skleněném hranolu [7]	25
2.5	Rozptyly optického záření v atmosféře [12].....	26
2.6	Spektrální vlastnosti absorpce zemské atmosféry [10].....	27
3.1	Situační nákres řešení šíření laserového svazku přes dvě prostředí	29
3.2	Výstup z modelu šíření svazku pro deset vrstev.....	32
4.1	Blokový diagram navrženého programu	33
4.2	Blok vstupních dat.....	34
4.3	Blok výškového rozložení.....	35
4.4	Řešená situace blokem výškového rozložení	35
4.5	Blok výpočtu indexu lomu	36
4.6	Řešená situace blokem výpočtu indexu lomu.....	36
4.7	Grafický výstup funkce func_edlen_g s profilem indexu lomu pro vlnou délku 850 nm	37
4.8	Blok výpočtu vysílacího úhlu.....	38
4.9	Řešená situace blokem vysílacího úhlu	38
4.10	Blok vykreslení trasy šíření svazku.....	39
4.11	Grafický výstup funkce func_grafy s porovnáním vysílací trajektorie a skutečné trasy laserového svazku atmosférickým prostředím.....	40
4.12	Blok výpočtu vysílacího času a vzdálenosti	40
4.13	Blok prostorové disperze.....	42
4.14	Blok vykreslení prostorové disperze	43
4.15	Grafický výstup funkce func_grafy_disp s průběhy střední a okrajových vlnových délek laserového záření	44
4.16	Blok časové disperze	44
4.17	Blok divergence svazku	45
4.18	Grafický výstup funkce func_divergence s porovnáním svazků bez a s vlivem optické disperze	47
4.19	Blok útlumu šířením.....	47
4.20	Řešená situace blokem útlumem šířením	47
4.21	Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 10 km	49
4.22	Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 100 km	50
4.23	Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 1000 km	50
4.24	Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 10000 km	51
4.25	Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 36000 km	51
4.26	Porovnání 3 vlnových délek a jejich profilů indexů lomu do výšky 1 km	52
4.27	Porovnání 3 vlnových délek a jejich profilů indexů lomu do výšky 100 km	52
4.28	Porovnání 3 vlnových délek a jejich profilů indexů lomu do výšky 10000 km	53
4.29	Závislost disperzního rozšíření na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 10 km).....	54
4.30	Závislost disperzního zpoždění na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 10 km)	54
4.31	Závislost disperzního rozšíření na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km).....	55
4.32	Závislost disperzního zpoždění na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km)	56
4.33	Závislosti disperzního rozšíření na šířce spektrální čáry (celková výška bodu B 100 km)	57

4.34	Závislosti disperzního zpoždění na šířce spektrální čáry (celková výška bodu B 100 km).....	57
4.35	Závislost vysílacího úhlu na horizontální vzdálenosti L (celková výška bodu B 100 km).....	58
4.36	Závislost vysílacího úhlu na horizontální vzdálenosti L (celková výška bodu B 1000 km).....	59
4.37	Závislost vysílacího úhlu na horizontální vzdálenosti L (celková výška bodu B 10000 km).....	59
4.38	Závislost pološířky svazku na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km, $\theta = 0,00001^\circ$)	60
4.39	Závislost pološířky svazku na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km, $\theta = 0,000\ 001^\circ$)	61
4.40	Závislost pološířky svazku na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km, $\theta = 0,000\ 000\ 1^\circ$) ..	61
4.41	Profil indexu lomu pro vlnovou délku 633 nm do výšky 100 m	63
4.42	Vysílací trajektorie a skutečná trasa laserového svazku atmosférickým prostředím (modelová situace komunikace loď – pobřežní maják).....	64
4.43	Průběhy střední a okrajových vlnových délek laserového svazku (výška bodu B 100 m).....	65
4.44	Porovnání podoby svazků bez a s vlivem optické disperze (výška bodu B 100 m)	66
4.45	Profil indexu lomu pro vlnovou délku 850 nm do výšky 10 km	68
4.46	Vysílací trajektorie a skutečná trasa laserového svazku atmosférickým prostředím (modelová situace komunikace zem – dopravní letadlo)	69
4.47	Průběhy střední a okrajových vlnových délek laserového svazku (výška bodu B 10 km).....	70
4.48	Porovnání podoby svazků bez a s vlivem optické disperze (výška bodu B 10 km)	71
4.49	Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 10 000 km	73
4.50	Vysílací trajektorie a skutečná trasa laserového svazku atmosférickým prostředím (modelová situace komunikace zem – dopravní letadlo)	74
4.51	Průběhy střední a okrajových vlnových délek laserového svazku (výška bodu B 10 000 km).....	75
4.52	Porovnání podoby svazků bez a s vlivem optické disperze (výška bodu B 10 000 km)	76
4.53	grafická varianta modelu šíření laserového svazku atmosférou	78
4.54	Odchylky od zakřivení Země pro různé délky horizontální vzdálenosti L.....	82

SEZNAM TABULEK

1.1	Složení atmosféry podle MSA [5].....	17
1.2	Vývoj teploty atmosféry s rostoucí nadmořskou výškou [5].....	18
2.1	Konstanty potřebné pro výpočet spektrálně závislého indexu lomu Edlénovou metodou [11].....	22
3.1	Fiktivní indexy lomu prostředí v jednotlivých vrstvách.....	31
3.2	Souřadnice bodu B	31
3.3	Výstupní hodnoty ověřovacího desetivrstvého modelu šíření laserového svazku.....	32
4.1	Vysílací úhly v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják.....	63
4.2	Vysílací časy a vzdálenosti v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják	64
4.3	Disperzní rozšíření a časové zpoždění svazku v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják	65
4.4	Pološířky svazku v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják	65
4.5	Hodnoty výkonů laserového záření v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják	66
4.6	Hodnoty výkonů laserového záření v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják s upraveným úhlem divergence $\theta = 0,0001^\circ$	67
4.7	Vysílací úhly v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo.....	68
4.8	Vysílací časy a vzdálenosti v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo.....	69
4.9	Disperzní rozšíření a časové zpoždění svazku v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo	70
4.10	Pološířky svazku v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo.....	70
4.11	Hodnoty výkonů laserového záření v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo	71
4.12	Vysílací úhly v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO	73
4.13	Vysílací časy a vzdálenosti v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO	74
4.14	Disperzní rozšíření a časové zpoždění svazku v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO.....	75
4.15	Pološířky svazku v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO	75
4.16	Hodnoty výkonů laserového záření v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO	76
4.17	Srovnání hodnot šíření stejného zdroje pod různými úhly	78

ÚVOD

Diplomová práce spadá do oblasti optických komunikací, přesněji se zabývá modelováním vlastností atmosféry Země pro bezkabelovou komunikaci ve vertikálním a šikmém směru. Atmosféra Země není pro optický svazek homogenní prostředí s konstantním indexem lomu, ale naopak jsou její vlastnosti proměnné a závislé na výšce nad mořem. Šíření optického svazku atmosférou vyžaduje znalost vlastností atmosféry a jejího vlivu na šíření optického svazku tímto prostředím. Optický svazek se při šíření atmosférou oddaluje od svého původního směru v závislosti na místě v atmosféře a vlnové délce záření a dalších parametrech.

Hlavními cíli práce je vytvořit takový model šíření optického svazku atmosférou ve vertikálním a šikmém směru, do kterého lze zadat různé vlnové délky optického záření a s možností měnit výšku přijímacího bodu nad mořem. Dále by model šíření optického svazku atmosférou měl zohledňovat disperzní vlastnosti atmosféry a ve výstupu uvádět výsledné vlivy na šířený optický svazek. Dalším cílem bylo vytvořit graficky uživatelský program modelu šíření optického svazku atmosférou.

Zmíněných cílů bylo dosaženo zpracováním vlastností atmosféry Země a jevů působících na optické rážení při průchodu atmosférou. Pro vývoj modelu šíření optického svazku atmosférou bylo vybráno prostředí MATLAB. Byl vytvořen základní model šíření, který byl následně upraven a rozšířen o další funkce. Dále byl vytvořen graficky uživatelský program téhož modelu s přehlednější interpretací dosažených výsledků modelování komunikace atmosférou.

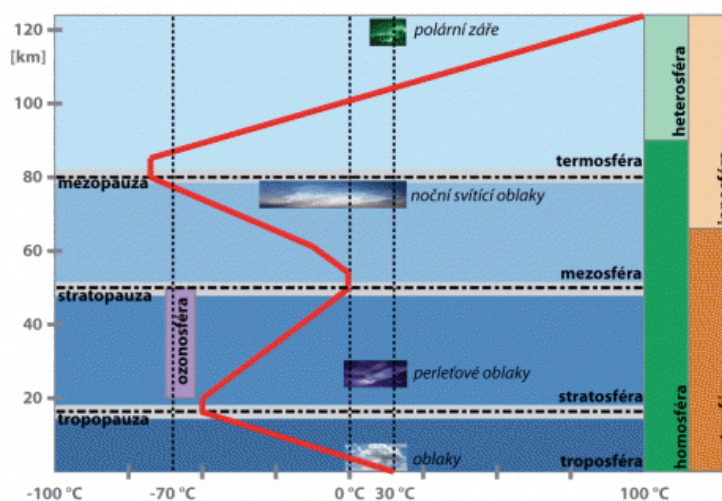
Diplomová práce je členěna do pěti částí. Kapitola 1 představuje zemskou atmosféru a její parametry, vlastnosti a dělení na vrstvy. Také jsou zde představeny základní modely atmosféry. Kapitola 2 popisuje světlo a jeho šíření atmosférou Země a jevy s tím spojené. Je zde také definován spektrálně závislý index lomu. Základní princip modelu šíření světla a jeho výsledky jsou uvedeny v kapitole 3. Nejobsáhlejší je kapitola 4, kde se předvádí způsob postupu výpočtu modelu šíření optického svazku atmosférou s vysvětlením jednotlivých bloků a jejich výpočtním postupem. Uvedeny jsou také závislosti získané pomocí vytvořeného modelu šíření optického svazku atmosférou a vzorové modelované situace s výsledky. Poslední kapitolou je závěr se shrnutím diplomové práce, s komentářem dosažených cílů a možného využití uvedeného modelu šíření optického svazku atmosférou. Jsou také uvedeny možnosti dalších úprav a rozšiřování modelu.

1. ZEMSKÁ ATMOSFÉRA A ŠÍŘENÍ SVĚTLA

Planeta Země má vyvinutou atmosféru, lze hovořit o plynovém obalu, který je udržován u Země díky její gravitaci. Je nezbytnou podmínkou pro život na Zemi v takové podobě jako jej známe. Díky atmosféře není na zemský povrch propouštěno ultrafialové záření v plné míře, vysoké teploty v termosféře dokážou zničit nebo poškodit cizí vesmírná tělesa dopadající na zemský povrch. Zemská atmosféra vytváří rovněž skleníkový efekt, díky kterému se otepluje povrch planety a díky zadržování tepla vyrovnává rozdíly teplot mezi dnem a nocí [1]. Planety a tělesa bez vlastní atmosféry nejsou chráněny před vesmírnými tělesy a teploty na povrchu jsou v řádech stovek stupňů Celsia.

1.1 Vrstvy a modely atmosféry

Atmosféru Země lze rozdělit podle různých přístupů, například podle teploty prostředí, nebo podle koncentrace prvků obsažených prvků.



Obrázek 1.1 Profil zemské atmosféry [2]

Na obrázku 1.1 jsou vidět různá dělení Zemské atmosféry a teplotní profil závislý na výšce. Nejznámější dělení atmosféry je na vrstvy a mezivrstvy z hlediska průběhu teploty. Vrstvy se nazývají sféry a mezivrstvy pauzy. Vlastnosti jednotlivých vrstev atmosféry jsou popsány níže v dalších podkapitolách (1.1.1 až 1.1.5).

Další členění, které obrázek 1.1 ukazuje je na heterosféru a homosféru. V nižší homosféře se vyskytují turbulence, které neustále promíchávají atmosférické plyny. Díky tomu se nemění jejich procentuální zastoupení. V heterosféře již není turbulence tak výrazná, a tudíž těžší plyny ubývají na koncentraci s rostoucí výškou. Proto dochází k vrstvení kyslíku a dusíku, nad touto vrstvou vrstva hélia a na hranici atmosféry a volného vesmíru je vrstva, kde převládá vodík [2]. Hranice atmosféry Země a volného vesmíru se obecně udává 100 km nad mořem.

Posledním členěním, které ukazuje obrázek 1.1, je dělení na neutrosféru a ionosféru. V atmosféře Země sluneční záření způsobuje fotoionizaci a fotodisociaci, které způsobí vznik volných iontů a elektronů. V neutrosféře tomuto jevu nedochází a koncentrace volných iontů a elektronů není významná. Naopak ionosféra s velkou koncentrací volných iontů a elektronů se stává elektricky vodivá [2]. Tato skutečnost je využívána v radioelektronice, kdy se elektromagnetická vlna na rozhraní neutrosféry a ionosféry odrazí zpět pod úhlem dopadu k povrchu Země. Lze tak elektromagnetickým vlněním pokrýt značnou plochu zemského povrchu.

1.1.1 Troposféra

Troposféra je nejbližší vrstva k zemskému povrchu. Název této vrstvy pochází z řeckého slova „trópos“ znamenající míchat, protože troposféra je neustále promíchávána, jsou zde zastoupeny plyny. Tato vrstva zahrnuje 90 % procent hmotnosti zemské atmosféry. Dosahuje do výšky od 9 km na zemských pólech, přes 11 km v mírném pásu až do 18 km na rovníku. Uvedené výšky jsou nad hladinou moře, nikoliv nad povrchem Země. S rostoucí výškou klesá lineárně teplota, a to v průměru o $0,65^{\circ}\text{C}$ na 100 m [1]. Tlak vzduchu v celé atmosféře s rostoucí výškou klesá, platí to i pro troposféru.

Troposféru a stratosféru odděluje tropopauza. Nastává zde změna gradientu teploty, tedy teplota se začne s výškou zvyšovat, ale tlak stále klesá. Tropopauzu, přesněji její vliv na prostředí atmosféry lze pozorovat na bouřkových mracích cumulonimbus, kterým se vytvoří v horní části mraku rovina zvaná kovádlina [2].

1.1.2 Stratosféra

Stratosféra se nachází nad tropopauzou a sahá až do výšky 50 km nad hladinou moře. Pro život na Zemi je stratosféra velmi důležitá, protože ve vrstvě od 25 až 35 km se nachází ozónová vrstva, která díky silné koncentraci O_3 absorbuje značné množství ultrafialového záření dopadajícího na Zemi. Ozón v atmosféře vzniká z reakce slunečního záření a molekul kyslíku, které se rozpadnou na atomy kyslíku a následně se slučují s molekulami O_2 na molekuly ozónu O_3 [2]. Teplota s výškou ve stratosféře zůstává stálá nebo mírně roste až po ozónovou vrstvu, kde díky absorpci krátkovlnného záření dochází k zahřívání atmosférického prostředí [1]. Tlak atmosféry i na dále s výškou klesá. Ve stratosféře se téměř nenacházejí vodní páry a prach se zemského povrchu.

Stratosféru od mezosféry odděluje stratopauza nacházející se ve výšce 50 až 55 km. Ve stratosféře teplota s výškou roste, v mezosféře je tomu opačně. Ve stratopauze je tak lokální maximum atmosférické teploty a dochází zde ke změně gradientu teploty. Teplota ve stratopauze nabíhá hodnot kolem 0°C . Atmosférický tlak zde dosahuje asi tisíciny hodnoty při hladině moře [1].

1.1.3 Mezoféra

Mezoféra je pojmenována z řeckého slova „mésos“ znamenající uprostřed. Vrstva se nachází nad oblastí leteckého provozu a pod oblastí vhodné pro kosmický provoz (zejména družic). Není tedy podrobně dosud prozkoumána jako troposféra a termosféra. Nachází se mezi 50 až do 100 km výšky nad hladinou moře podle ročního období [1]. Mezoféra je tedy různá pro severní a jižní polokouli. Teplota zde s výškou klesá o 3°C na 100 m výšky [2]. Tlak zde s výškou stále klesá.

Mezopauza odděluje mezoféru od termosféry. Přesná poloha je určena druhým lokálním minimem teplotního profilu v zemské atmosféře [2]. V létě leží ve výšce 80 až 85 km. V zimě se hladina mezopauzy posune na 100 km.

1.1.4 Termosféra

Termosféra leží nad mezopauzou. Dosahuje téměř 700 km nad mořem. Teplota má zde opačný gradient než v mezoféře a s přibývajícím výškou nad mořem roste až k teplotám přesahujícím 1000°C, obecně je zde nejvyšší teplota v atmosféře Země [1]. To je dáno slunečním zářením a vysokou vzdáleností od země. V termosféře se vyskytují polární záře.

Termopauza odděluje termosféru od exosféry. Atmosférický tlak zde je již zanedbatelný. Termopauza odděluje nižší atmosféru, která je citlivá na sluneční záření díky přítomnosti těžkých plynů, a vyšší atmosféru kde se vyskytují částice helia a vodíku s velkou střední volnou dráhou [2]. Střední volná dráha udává, jakou průměrnou vzdálenost urazí částice mezi dvěma srážkami [3].

1.1.5 Exosféra

Exosféra je poslední vrstvou zemské atmosféry, nachází se celá za hranicí atmosféry Země a volného vesmíru (obecně udávaná ve výšce 100 km nad mořem) a vytváří skutečný konec atmosféry. K atmosféře se považuje tam, kde částice rotují společně se Zemí nebo tam kde koncentrace částic klesne na desetinu hodnoty koncentrace v troposféře [4], výška takové hladiny se uvádí mezi 20000 až 35000 km nad hladinou moře [2]. V exosféře se nacházejí volné atomy vodíku a helia. Díky slabé gravitaci opouští takové atomy zemskou atmosféru a unikají do volného prostoru. Zem tak za sebou na trajektorii zanechává závoj unikajících částic.

1.1.6 Vybrané modely atmosféry

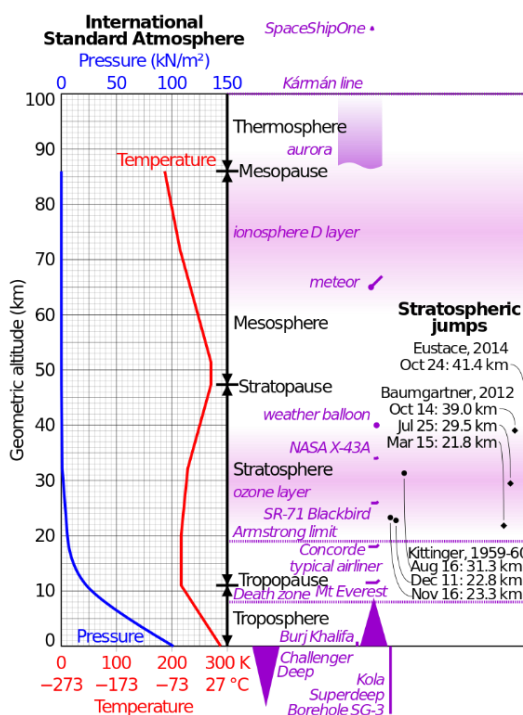
Zemská atmosféra se neustále v čase mění v závislosti na denní době a ročním období. Dále jsou vlastnosti atmosféry Země závislé na zeměpisné poloze. Modely atmosféry jsou založeny na měření vlastností a parametrů zemské atmosféry v určitém zeměpisném pásmu. Hodnoty uvedené v modelech odpovídají průměrným naměřeným hodnotám, nebo jsou dopočítány. Atmosférické modely slouží v meteorologii k předpovědi počasí,

v letectví k vývoji letadel a kalibraci leteckých měřicích přístrojů, k vojenskému vývoji raket a civilnímu vývoji elektronických komunikačních technologií [5].

Mezinárodní standartní atmosféra MSA představuje mezinárodně uznávaný model ideální atmosféry Země. Model MSA každé výšce nad mořem přiřazuje hodnotu teploty, tlaku a hustoty. Hodnoty teploty, tlaku a hustoty se ve skutečné Zemské atmosféře neustále mění, ale model MSA uvádí průměrné hodnoty naměřené v daných výškách nad mořem. Model MSA se používá v letectví, pro návrh letadel a raket, ale i pro cejchování tlakoměrných přístrojů jako jsou výškoměry, rychloměry a variometr. MSA byl zaveden Mezinárodní organizací pro civilní letectví (anglická zkratka ICAO) v roce 1952. Model pracuje s tím, že atmosféra je homogenní. Uvádí složení vzduchu uvedení v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1 Složení atmosféry podle MSA [5]

Plyn	Zastoupení [%]
Dusík N ₂	78
Kyslík O ₂	21
Ostatní plyny	1



Obrázek 1.2 Profil teploty podle MSA [5]

Z obrázku 1.2 je patrné, že podle modelu MSA, na obrázku uvedeným pod anglickou zkratkou ISA (International Standard Atmosphere), průměrné naměřené hodnoty teploty střídavě s rostoucí výškou klesají nebo vzrůstají. Průměrné naměřené hodnoty atmosférického tlaku s rostoucí výškou klesají. Profil teploty a tlaku odpovídá výše zmíněným teoretickým předpokladům (kapitoly 1.1.1 až 1.1.5).

Tabulka 1.2 Vývoj teploty atmosféry s rostoucí nadmořskou výškou [5]

Výška nad mořem [km]	Vývoj teploty
0-11 (troposféra)	klesá o 6,5 °C/km
11-20 (stratosféra)	teplota se nemění
20-32 (stratosféra)	stoupá o 1 °C/km
32-47 (stratosféra)	stoupá o 2,8 °C/km
47-51 (mezosféra)	teplota se nemění
51-71 (mezosféra)	klesá o 2,8 °C/km

U.S. Standard Atmosphere neboli Americká standardní atmosféra je model zemské atmosféry založený na již známém modelu MSA. Odlišnost s tímto modelem je ve stanovém rozložení teplot ve vyšších nadmořských výškách. Matematický model americké standardní atmosféry rozděluje atmosféru do vrstev s lineárním rozložením teplot, tlak a hustota jsou následovně dopočítány [6]. Poslední aktualizace amerického modelu byla v roce 1976.

2. ŠÍŘENÍ SVĚTLA A VLASTNOSTI ATMOSFÉRY

Viditelné světlo je elektromagnetické vlnění, které je pro lidské oko detekovatelné. Tato část elektromagnetického spektra se nazývá viditelné spektrum. Frekvence takového vlnění se pohybuje mezi 390 – 790 THz. V souvislosti s viditelným spektrem se ovšem častěji uvádí vlnová délka takového vlnění ve vakuu, tedy 390 – 760 nm. Světlo lze popsat radiometrickými veličinami, ale také fotometrickými veličinami, kterými lze popsat lidské vnímání světla. Šíření světla a světlo samotné podléhá jevům, které je možné popisovat pomocí geometrické, vlnové, elektromagnetické a kvantové optiky [7].

Za světlo je považováno i ultrafialové záření (UV) a infračervené záření (IR). UV záření má vlnovou délku kratší než viditelné světlo [7], ale delší než rentgenové záření. Přírodním zdrojem UV záření je Slunce. IR záření má vlnovou délku záření delší než viditelné světlo, ale kratší než mikrovlnné záření [7]. IR se záření se používá v optické bezkabelové komunikaci na krátké vzdálenosti, typicky dálkové ovladače spotřební elektroniky.

2.1 Lom světla

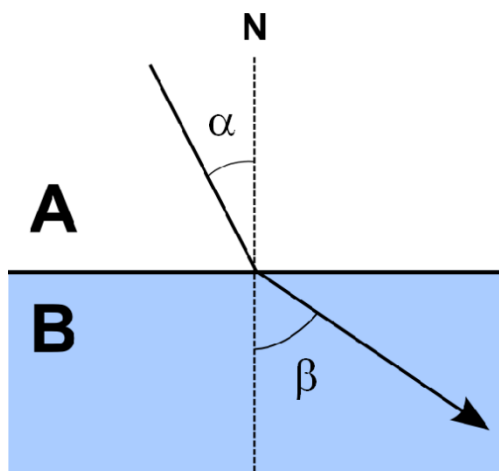
Lom světla je jev, kterým se zabývá geometrická optika. Při popisu tohoto jevu tak není brán v potaz vlnový charakter světla. Na světlo je nahlíženo jako na paprsek. Při šíření takového paprsku mezi opticky různými prostředími je možné pozorovat lom v trajektorii šíření paprsku. Na velikost zlomu mají vliv vlastnosti prostředí, zejména relativní permitivita ϵ_r a relativní permeabilita μ_r , které určují rychlost šíření světla v daném prostředí [7]. Ta je vždy nižší než rychlost šíření světla ve vakuu c_0 .

Poměrem rychlostí světla ve vakuu a daném prostředí je dán index lomu prostředí n . Index lomu prostředí je bezrozměrná veličina [8], která je závislá na vlastnostech prostředí. Díky spektrální závislosti vlastností prostředí je i index lomu n závislý na vlnové délce záření. Avšak v geometrické optice se index lomu prostředí n považuje za nezávislý na vlnové délce záření. Index lomu lze definovat podle následujícího vztahu (2.1)

$$n = \frac{c_0}{v} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}, \quad (2.1)$$

kde c_0 je rychlost šíření světla ve vakuu, v je rychlost šíření světla v daném prostředí, ϵ_0 je permitivita vakua, μ_0 je permeabilita vakua, ϵ_r je relativní permitivita prostředí a μ_r je relativní permeabilita prostředí.

Situace, kdy obecný paprsek bez ohledu na vlnovou délku záření prochází přes rozhraní dvou prostředí popisuje Snellův zákon [7].



Obrázek 2.1 Grafické znázornění Snellova zákona [7] (dvě prostředí A a B, normála N, úhel dopadu α a lomu β)

Na obrázku 2.1 jsou vidět prostředí A a prostředí B, jejich vodorovné rozhraní, normála N je kolmicí na rozhraní protínající v místě dopadu paprsku. Vyznačené úhly dopadu α a lomu β . Úhly jsou vztaženy k normále a platí pro ně vztah Snellova zákona [7]

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (2.2)$$

kde n_1 je index lomu prostředí A, n_2 je index lomu prostředí B. Díky indexu lomu lze stanovit, zda je jedno prostředí opticky hustší nebo řidší oproti druhému prostředí. Obrázek 2.1 znázorňuje lom paprsku od kolmice, tedy přechod paprsku z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí ($n_1 < n_2$), tedy například přechod světla ze skla do vzduchu. Lom paprsku ke kolmici je možný pouze při přechodu z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí ($n_1 > n_2$), příkladem může být přechod světla ze vzduchu do vody.

Úplný nebo také totální odraz je speciální případ lomu od kolmice. Při určitém úhlu dopadu α_m , který se nazývá mezní úhel, je úhel lomu roven 90° a na rozhraní prostředí dojde tedy k úplnému odrazu paprsku. Takového jevu se využívá v optických vláknech, kdy se laserový paprsek odráží na rozhraní jádra a pláště. Jádro a plášť optického vlákna jsou vyrobeny z materiálů s rozdílnými indexy lomu. Mezní úhel je odvozený ze Snellova zákona následovně

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2 \sin \beta}{n_1} = \frac{n_2 \sin 90^\circ}{n_1} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.3)$$

kde α_m je mezní úhel pro rozhraní prostředí A s indexem n_1 a prostředí B s indexem lomu n_2 .

Index lomu v atmosféře je téměř roven hodnotě ve vakuu, ale díky závislosti indexu lomu na relativní permitivitě ϵ_r a relativní permeabilitě μ_r není roven. Ovšem rozdíly jsou patrné až na pozici deseti tisícín. Pro práci s indexem lomu v atmosféře je tedy vhodnější používat veličinu refraktivita prostředí r . Refraktivitu lze z indexu lomu prostřední n vyjádřit následujícím vztahem [8]

$$r = (n - 1) \cdot 10^6. \quad (2.4)$$

Refraktivita atmosféry r je vždy nižší než 1 a pro lidské vnímání jsou viditelnější rozdíly například mezi hodnotami r pro různé vlnové délky nebo pro různé výškové úrovně v atmosféře.

2.2 Spektrálně závislý index lomu

Index lomu daného prostředí není konstantní pro celé spektrum vlnových délek, ale je závislý na vlnové délce. Taktéž pro danou vlnou délku není index lomu prostředí konstantní vlivem změn teploty, tlaku a vlhkosti. Dvě základní metody pro výpočet indexu lomu prostředí závislého na vlnové délce záření a na teplotě, vlhkosti a tlaku jsou známé jako metoda uvedená matematikem Ciddorem a modifikovaná verze metody zavedená matematikem Edlénem. Obecně lze říct, že metoda podle Ciddora je výpočetně složitější, přesnější a je použitelná v širším rozsahu vlnových délek. Avšak potřebuje více vstupních dat než metoda matematika Edléna. Edlénova metoda výpočtu spektrálně závislého indexu lomu je výpočetně méně náročná, požaduje menší množství vstupních proměnných, avšak dosahuje nižší přesnosti [11].

Ciddorova rovnice pro výpočet indexu lomu prostředí vyžaduje znalost atmosférického tlaku, teploty, koncentrace oxidu uhličitého CO_2 v prostředí, vlhkost, rosný bod nebo bod mrazu v daném prostředí [11]. Výpočet Ciddorovy rovnice vyžaduje převedení teplot na stupně Celsia, tlaky na Pascaly a výpočet molární zlomku vodních par a tlak nasycených par. Dále je nutné znát množství konstant.

Rovnice Edlénovy metody nevyžaduje na rozdíl od předešlé znalost koncentrace oxidu uhličitého CO_2 v prostředí. Dále je nutné převést teploty na stupně Celsia, tlaky na jednotky Pascalů a vyjádřit relativní vlhkost jako parciální tlak vodní páry. I tato rovnice vyžaduje množství konstant, ty jsou uvedené v tabulce 2.1. V rámci postupu se převede vlnová délka ve vakuu do parametru S [11].

Tabulka 2.1 Konstanty potřebné pro výpočet spektrálně závislého indexu lomu Edlénovou metodou [11]

Název konstanty	Hodnota konstanty [-]
A	8342,54
B	2406147
C	15998
D	96095,43
E	0,601
F	0,00972
K	0,003661

$$S = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.5)$$

Kde λ je vlnová délka ve vakuu v mikrometrech. Dále se vypočte mezivýsledek indexu lomu prostředí n_s

$$n_s = 1 + 10^{-8} \left[A + \frac{B}{130 - S} + \frac{C}{38,9 - S} \right], \quad (2.6)$$

kde A, B, C jsou konstanty, S je vypočtený parametr. Dalším mezivýsledkem je parametr X

$$X = \frac{1 + 10^{-8}(E - F \cdot t) \cdot p}{1 + G \cdot t}, \quad (2.7)$$

kde E, F, G jsou konstanty, t je teplota ve °C a p je atmosférický tlak Pascalech. Pomocí mezivýsledků n_s a X se vypočte index lomu n_{tp} .

$$n_{tp} = 1 + \frac{p \cdot (n_s - 1) \cdot X}{D}, \quad (2.8)$$

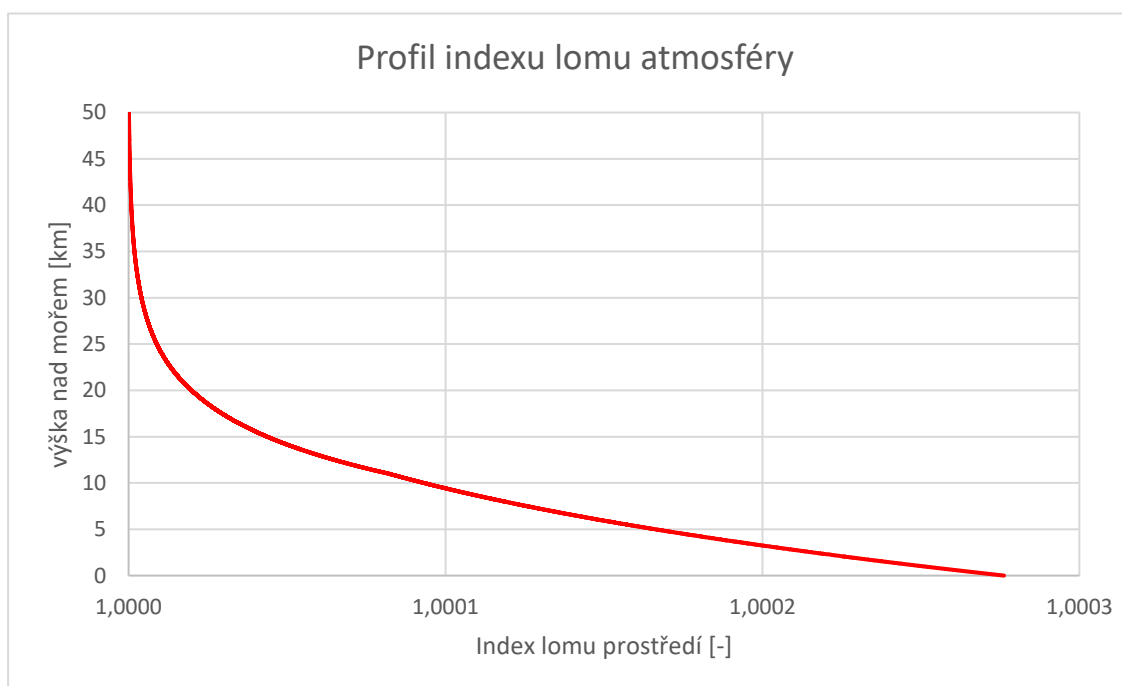
Kde p je atmosférický tlak, n_s a X jsou známé mezivýsledky a D je konstanta. Nyní je již možné vypočítat index lomu n prostředí závislý na teplotě, tlaku a relativní vlhkosti podle následující rovnice

$$n = n_{tp} - 10^{-10} \left[\frac{292,75}{t + 273,15} \right] \cdot [3,7345 - 0,0401 \cdot S] \cdot p_v, \quad (2.9)$$

kde n_{tp} a S jsou dříve vypočtené mezivýsledky, t je teplota ve $^{\circ}\text{C}$ a p_v je parciální tlak vodí páry, který se stanoví pomocí tlaku nasycených par p_{sv} a relativní vlhkosti RH . Parciální tlak vodní páry je stanoven podle rovnice 2.10

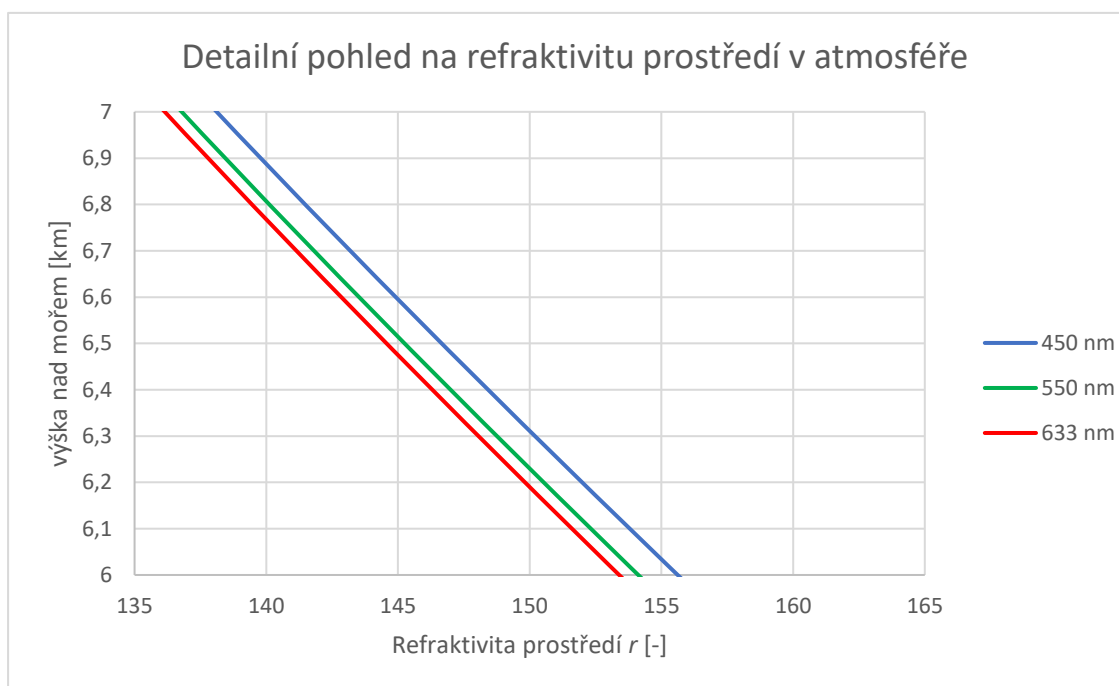
$$p_v = \frac{RH}{100} \cdot p_{sv}, \quad (2.10)$$

kde figuruje zmíněný tlak nasycených par p_{sv} a relativní vlhkost RH . Nyní lze vztáhnout index lomu prostředí konkrétní vlnové délky záření na model atmosféry, který určuje teplotu, atmosférický tlak a vlhkost pro dané výšky nad hladinou moře. Tím lze stanovit profil indexu lomu závislý na výšce nad mořem a vlnové délce záření.



Obrázek 2.2 Profil refraktivity prostředí v atmosféře

Z obrázku 2.2 je zobrazena závislost indexu lomu atmosféry pro vlnovou délku záření 633 nm. Závislost má logaritmický charakter. S rostoucí výškou se index lomu atmosféry blíží k hodnotě 1. Ačkoliv je index lomu funkcí výšky, v grafu jsou osy otočené, aby nadmořská výška byla uvedena a svislé ose.

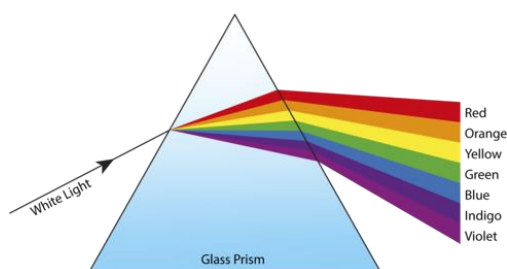


Obrázek 2.3 Detailní pohled na refraktivitu prostředí v atmosféře pro různé vlnové délky záření

Detailní pohled na obrázku 2.3 ukazuje rozdílnost hodnot refraktivity atmosféry pro tři různé vlnové délky z viditelného spektra elektromagnetického vlnění. Detailní pohled je zprostředkován pro výšky mezi 6 a 7 km nad mořem. Diference hodnot refraktivity pro různé vlnové délky se může jevit nízká, ale i tato relativně nepatrná odlišnost způsobí různé lámání svazku při průchodu atmosférickým prostředím, ale také různou disperzi svazku laserového záření, které již z principu laseru nemůže nikdy být zcela monochromatické, ale vždy bude mít určitou šířku spektrální čáry [7].

2.3 Disperze optického záření

Důkazem spektrální závislosti indexu lomu prostřední n je jev zvaný optická disperze. Při optické disperzi dochází k rozdílnému šíření jednotlivých složek optického záření, které má nenulovou šířku spektrální čáry. Na rozhraní dvou prostředí dojde k lomu světla, ale pro každou složku bude platný jiný index lomu prostředí, díky jeho spektrální závislosti [7]. Původní záření se tak rozloží v prostoru a jednotlivé složky se vzájemně časově zpozdí.



Obrázek 2.4 Disperzní jev na skleněném hranolu [7]

Z obrázku 2.4 je patrné chování popsané výše. Skleněný hranol představuje homogenní optické prostředí. Hranol je umístěn ve vzduchu nebo vakuu, tedy v opticky řidším prostředí. Do hranolu vstupuje svazek bílého světla, tedy světlo ze zdroje, který obsahuje všechny složky viditelného spektra. Na rozhraní vzduch-sklo se bílý svazek rozloží. Spektrálně závislý index lomu způsobí, že jednotlivé spektrální složky se na rozhraní vzduch-hranol zalomí každá pod jiným úhlem. Na dalším rozhraní sklo-vzduch se jednotlivé složky ještě více prostorově rozšíří. Z obrázku je patrné že kratší vlnové délky (fialový okraj) podléhají většímu lomu na rozhraních, protože mají v daném prostředí vyšší hodnoty indexu lomu než delší vlnové délky. Proto delší vlnové délky podléhají menšímu lomu [7]. Dále je zřejmé, že na místo stínítka (které si lze představit v obrázku na místě názvů barev) dopade nejprve fialová složka původního bílého svazku, má nejkratší trasu šíření. Jako poslední dopadne na stínítka červená složka záření. Jev disperze tedy způsobuje prostorové i časové roztažení svazku. Při optické bezkabelové komunikaci v atmosféře se vlivem disperze může stát, že část složek laserového svazku mine přijímací detektor. Nebo při použití příliš vysoké přenosové rychlosti může docházet k mezisymbolovým interferencím, protože se vlivem optické disperze vzájemně zpozdí okrajové spektrální složky laserového záření.

2.4 Analýza vlastností atmosféry

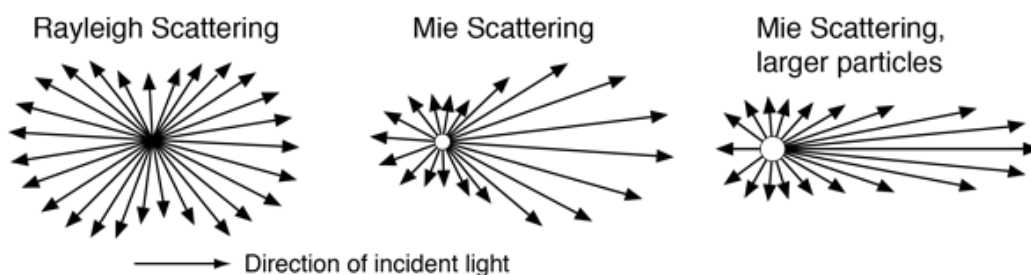
Na zemskou atmosféru lze nahlížet jako na látku, přes kterou se šíří laserové záření. Látka představuje přenosové prostředí, které má svou propustnost. Propustnost atmosféry lze stanovit podle Beer-Lambertova zákona, který popisuje vztah mezi zeslabením optického výkonu látkou a vlastnostmi látky [9]. Propustnost atmosféry lze stanovit jako poměr intenzity propuštěného světla a intenzity světla vstupující do atmosféry. Definice propustnosti atmosféry je v rovnici (2.11),

$$\tau(\lambda, d) = \frac{I(\lambda, d)}{I(\lambda, 0)} = e^{[-\gamma(\lambda) \cdot d]} \quad (2.11)$$

kde $\tau(\lambda, d)$ je propustnost atmosféry ve výšce d , $I(\lambda, d)$ je intenzita světla ve výšce d , $I(\lambda, 0)$ je intenzita světla v nulové výšce a $\gamma(\lambda)$ je koeficient extinkce závislý na vlnové délce záření. Koeficientem extinkce lze přímo klasifikovat stav atmosféry. Pokud je koeficient extinkce na hodnotě blízké nule, jedná se o velmi čisté až čisté atmosféře. Při hodnotách koeficientu extinkce větších než 60 m^{-1} se v atmosféře vyskytuje silná mlha. Koeficient extinkce lze definovat podle rovnice (2.12),

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (2.12)$$

kde $\alpha_m(\lambda)$ je absorpce na molekulách, $\alpha_a(\lambda)$ je absorpce na aerosolech, $\beta_m(\lambda)$ je rozptyl na molekulách a $\beta_a(\lambda)$ je rozptyl na aerosolech. Absorpce je, z pohledu šíření světla, důležitým jevem v atmosféře, způsobená zejména mraky ale i ostatními molekulami. Výše zmíněný cumulonimbus může dosahovat výšky přes 10 km, což pro optický svazek představuje nepřekonatelnou překážku [12]. V mracích se uplatňuje Miův rozptyl optického záření.



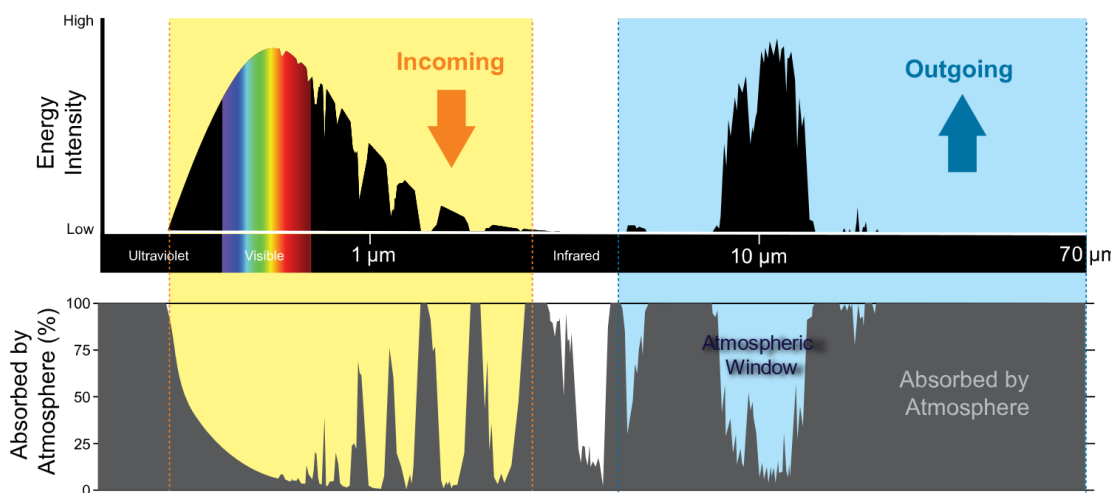
Obrázek 2.5 Rozptyly optického záření v atmosféře [12]

Rozptyly rozlišujeme podle poměrů velikostí vlnové délky a částice na které k rozptylu dochází. Rayleighův rozptyl se projeví na částicích mnohem menších než vlnová délka záření. Chování Rayleighova rozptylu je možné vidět na obrázku 2.5. Dopadající záření se na molekulách vzduchu rozptýlí do všech směrů téměř rovnoměrně. Rayleighův rozptyl je důvod proč je obloha zbarvená do odstínů modré [12].

Na obrázku 2.5 je dále zobrazený Miův rozptyl. Ten se projevuje na částicích srovnatelně velkých jako vlnová délka záření, mrholení nebo mlha. Záření dopadající na kapky mlhy se při dopadu částečně rozptýlí ve zpětném směru a do bočních směrů [12]. V přímém směru zůstává nevyšší podíl energie záření, avšak dochází ke značnému rozšíření stopy.

Poslední zobrazeným rozptylem je Miův rozptyl na velkých částicích. Projevuje se při interakci záření s částicemi většími než vlnová délka, jako například na kapkách vody. Princip jevu je stejný jako v předešlém případě, ale rozšíření stopy v přímém směru není tak výrazné [12]. Tomuto rozptylu se někdy říká geometrický rozptyl.

Útlum optické záření v atmosféře charakterizovat pomocí meteorologické viditelnosti. Ta je kvantifikována koeficientem extinkce. Obecně platí, že čím nižší hodnota koeficientu extinkce, tím čistší a propustnější prostředí atmosféra představuje. Útlum v atmosféře je spektrálně závislý a vytváří okna propustnosti. Spektrální závislost atmosférického útlumu je zobrazena na obrázku 2.6, kde lze pozorovat tak zvaná okna propustnosti. Nejnižšímu útlumu podléhají viditelné vlnové délky. Další okno propustnosti lze najít na v okolí vlnových délek 850 nm, 1250 nm a 1550 nm [10]. Tyto vlnové délky se používají pro optickou bezkabelovou komunikaci právě z důvodu nízkého útlumu atmosféry.



Obrázek 2.6 Spektrální vlastnosti absorpce zemské atmosféry [10]

2.4.1 Atmosférická turbulence

Turbulence vzniká v atmosféře dvěma způsoby, termickým a mechanickým prouděním. Termická turbulence je způsobena rozdíly teplot v různých hladinách nad mořem, ale třeba i rozdílem teplot nad vodní hladinou, zalesněním územím nebo městskou zástavbou [9]. Takovou turbulenci lze pozorovat v letním období nad městskou zástavbou po západu slunce, kdy teplo akumulované v městském prostředí uniká do okolního chladnější vzduchu. To způsobí mihotání světél nad městem. Mechanická turbulence je dána reliéfem krajiny a charakterem počasí v dané oblasti. V hornaté krajině může vníkat vlivem větru ve vyšších hladinách turbulentní víření za hřebeny hor, nebo za hranami budov a střech v městské zástavbě.

Turbulence nezpůsobuje absorpci optického záření, ale změnu směru při průchodu turbulentními celami [9]. To má za následek fluktuaci přijímaného výkonu optického signálu nebo úplné výpadky příjmu.

2.4.2 Šumy v atmosféře

Šumy se v atmosféře vyskytují přirozené i vyprodukované lidskou činností. Zdrojem světelného šumu je Slunce a světelný smog. Jako šum lze považovat i fluktuaci úrovně

vlivem turbulence [9]. Mechanické otřesy přijímací soustavy vlivem větru nebo pohybu budov se při příjmu optického svazku projeví jako šum. Šumy lze redukovat vhodným umístěním přijímací soustavy optického spoje, nebo zastíněním zdroje šumu krytem. Další možností redukce šumu je filtrací spektrálním filtrem, kdy je na detektor propuštěna pouze žádaná spektrální složka.

Dále se v atmosféře vyskytují nestandardní jevy, které nelze jednoduše předvídat. Ale mohou být ovlivněny lokalitou. Mezi nestandardní jevy patří námraza, zamlžené nebo orosené čočky detektorů, pavučiny, aktivita ptáků nebo blesky. Tyto jevy ovlivňují přenos optického záření atmosférou a uplatní se hlavně při komunikaci při zemi nebo v rámci troposféry. Ale i při vertikální nebo šikmé komunikaci mohou ovlivnit optický přenos.

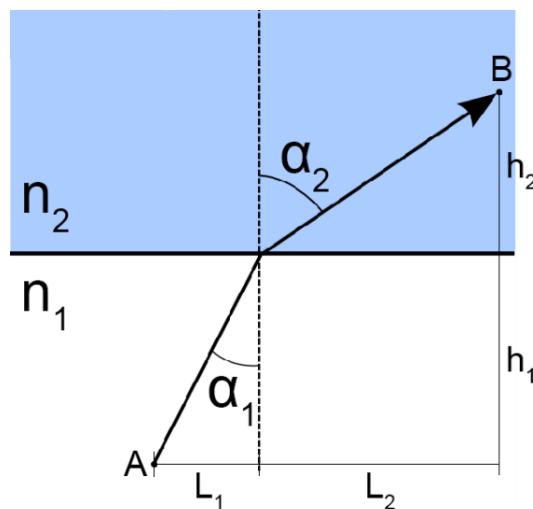
Výše zmíněné jevy ovlivní přenášený svazek částečně nebo totálně. V šikmé optické komunikaci skrz atmosféru se vyslaný svazek odchýlí od původního úhlu vlivem průchodu skrz více rozhraní prostředí s různými indexy lomu. Vlivem disperze a nenulové šířce spektra laserového záření dojde vlivem disperze k prostorovému rozšíření svazku a časovému zpoždění jednotlivých složek vůči sobě. Vyslaný laserový svazek musí být dostatečně výkonný, aby při šíření nebyl zcela absorbován a bylo možné v místě příjmu detekovat dostatečnou úroveň optického záření.

3. ZÁKLADNÍ PRINCIP MODELU ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU ATMOSFÉROU

Tato kapitola se věnuje základnímu návrhu modelu šíření laserového svazku atmosférou. Kapitola je dělená na popis principiálního řešení s komentářem postupu a ověření principiálního modelu šíření laserového svazku atmosférou. Součástí jsou dosažené výsledky a výstupy.

3.1 Základ modelu šíření laserového svazku atmosférou – dvouvrstvý model

Model v principu řeší komunikaci mezi body A a B, kde bod A představuje přízemní vysílací optickou jednotku. Bod B je přijímací optická jednotka umístěná v určité výšce v atmosféře nebo za hranicí atmosféry Země (letadlo nebo družice). Komunikace probíhá přes vrstvy atmosféry. Základní princip modelu šíření laserového svazku vychází z geometrické optiky, která popisuje šíření paprsku prostředím a přes rozhraní dvou prostředí bez ohledu na vlnové vlastnosti laserového svazku.



Obrázek 3.1 Situační náčrtek řešení šíření laserového svazku přes dvě prostředí

Na obrázku 3.1 je zobrazená řešená situace. Prostředí s indexy lomu n_1 a n_2 , komunikační body. Výška bodu A je nulová. Vzdálenost bodu A od normály je L_1 . Vzdálenost rozhraní od bodu A určuje výška h_1 . Celková výška bodu B je dána součtem výšek h_1 a h_2 , kde h_2 je výška bodu B od rozhraní. Vzdálenost bodu B od normály určuje délka L_2 . Celková vodorovná vzdálenost L komunikačních bodů je tedy součet L_1 a L_2 .

Úhly α_1 a α_2 jsou doplněny do 90° úhly β_1 a β_2 . Protože strany L_1 a h_1 a úhel α_1 tvoří pravoúhlý trojúhelník, lze úhel β_1 považovat zároveň za úhel vysílací v bodě A.

Do modelu jsou zadávány vstupní data polohy komunikačního bodu A a B, celková výška bodu B a horizontální vzdálenost komunikačního bodu B od vysílacího bodu A. V níže prezentovaném modelu jsou indexu lomu prostředí vypočítány podle vlastností atmosféry a hodnotě vlnové délky laserového záření, ale pro vysvětlení základního principu jsou indexu lomu prostředí určeny bez ohledu na fyzikální vlastnosti atmosféry. Dále je zadána výška rozhraní prostředí. Model šíření laserového svazku atmosférou vypočte ideální vysílací úhel z následujícího vztahu (3.1)

$$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{h}{L}\right), \quad (3.1)$$

kde L celková vodorovná vzdálenost komunikačního bodu B od vysílacího bodu A, h je celková výška komunikačního bodu B. Díky známému ideálnímu vysílacímu úhlu je stanoven úhel dopadu paprsku na rozhraní. Ze znalosti úhlu α_1 je spočítána vodorovná vzdálenost bodu A od normály označená jako L_1 . Úhel lomu α_2 je dopočítán pomocí Snellova zákona podle rovnice (3.2).

$$\alpha_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 \cdot \sin(\alpha_1)}{n_2}\right) \quad (3.2)$$

Dále je dopočítána teoretická vodorovná vzdálenost bodu B od normály L_2 . V dalším kroku je spočítána geometrická L_{2g} , díky které je stanoven geometrický úhel α_{2g} . Geometrické parametry L_{2g} , α_{2g} a výška h_2 vytváří pravoúhlý trojúhelník jehož odvěsna spojuje průsečík normály a rozhraní s bodem B. Díky tomu lze porovnat úhel daný Snellovým zákonem s úhlem, který je dán geometrií řešené situace. Z porovnání úhlů je dána hodnota korekčního úhlu β_K , ten nabývá hodnot mocnin jedné poloviny.

Korekční úhel β_K je používán v iteračním výpočetní cyklu pro určení vhodného vysílacího úhlu β_1 . Na konci každého běhu je podle výsledku porovnání úhlů α_2 a α_{2g} hodnota korekčního úhlu nastavena vhodnou hodnotou. Korekční úhel je kladný, pokud hodnota úhlu lomu α_2 je větší než hodnota úhlu α_{2g} vycházejícího z geometrie spojnic mezi body A a B. Na začátku další iterace je korekční úhel přičten k předchozí hodnotě vysílacího úhlu a cyklus se opakuje. Iterační cyklus provede celkem 64 iterací. Příslušný kód iteračního cyklu je uveden níže.

```

%% Výpočetní-iterační cyklus
beta1 = atan(h/L);           %odhad vysílacího úhlu
beta1 = rad2deg(beta1);      %převod úhlu na stupně
betaK = 0;                   %korekční úhel
for i=1:63
    beta1 = beta1+betaK;

    alfa1 = 90-beta1;
    L1 = h1*tan(deg2rad(alfa1));

    alfa2 = asin((n1*sin(deg2rad(alfa1)))/(n2));
    alfa2 = rad2deg(alfa2);
    L2 = h2*tan(deg2rad(alfa2));

    L2g = L-L1;
    alfa2g = atan(L2g/h2);
    alfa2g = rad2deg(alfa2g);

    if alfa2 > alfa2g
        betaK = beta1/(2^(i+1));
    else
        betaK = -beta1/(2^(i+1));
    end
end

```

3.2 Ověřovací vícevrstvý model šíření laserového svazku a jeho výsledky

Výše popsany základní princip modelu šíření laserového svazku atmosférou byl rozšířen na více vrstev prostředí. Pro ověření funkčnosti modelu byly uvažovány fiktivní hodnoty indexu lomu prostředí od 1,55 v nejnižší vrstvě do 1,10 v desáté vrstvě, dalšího hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.1. Výšky jednotlivých vrstev byly zvoleny 5 kilometrů.

Tabulka 3.1 Fiktivní indexy lomu prostředí v jednotlivých vrstvách

n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8	n_9	n_{10}
1,55	1,50	1,45	1,40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10

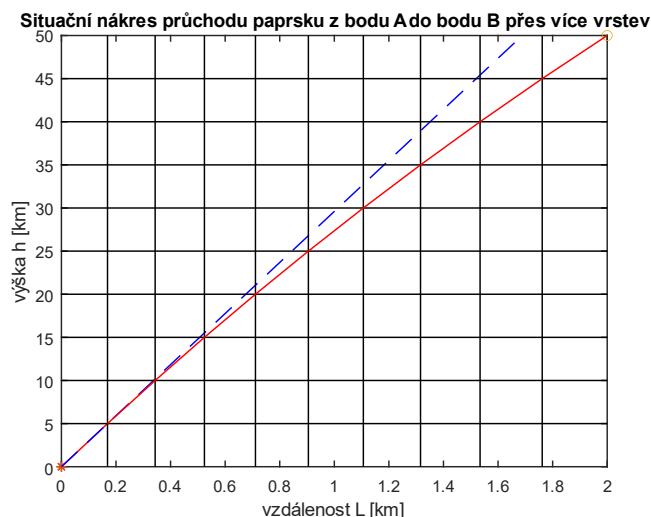
Tabulka 3.2 Souřadnice bodu B

Výška bodu B h [km]	Vodorovná vzdálenost bodu B L [km]
50	2

Aby popsany základní princip modelu fungoval i pro více než dvě vrstvy prostředí, musel být upraven iterační cyklus výpočtu vhodného vysílacího úhlu. Tato úprava zahrnuje další vrstvy prostředí do iteračního cyklu.

Tabulka 3.3 Výstupní hodnoty ověřovacího desetivrstvého modelu šíření laserového svazku

Vysílací úhel β_1 [°]	Ideální trasa [km]	Reálná trasa [km]	Ideální čas šíření [μs]	Reálný čas šíření [μs]
88,0653	50,039984	50,040468	166,92	258,72

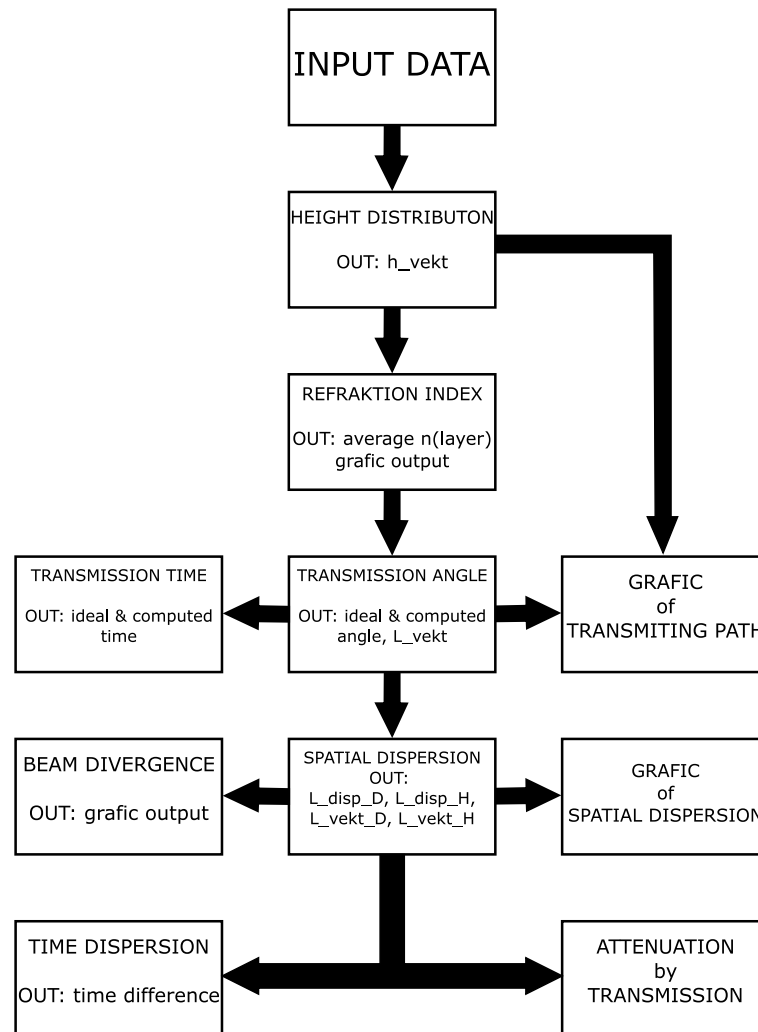


Obrázek 3.2 Výstup z modelu šíření svazku pro deset vrstev

Na obrázku 3.2 je vidět výstup z modelu po úpravě pro deset vrstev. Červená křivka zobrazuje skutečnou trasu šíření optického svazku. Na každém rozhraní se odchýlí od původního vysílacího úhlu. Červené křivce odpovídají v tabulce 3.3 hodnoty délky reálné trasy a reálného času šíření. Pro výpočet reálného času šíření byly uvažovány teoretické hodnoty rychlosti šíření v daném prostředí pomocí indexu lomu. Modrá přímka uvažuje trasu šíření ve vakuu, respektive v atmosféře s jedním indexem lomu. Této přímce odpovídají hodnoty v tabulce 3.3 hodnoty délky ideální trasy a ideálního času šíření. Pro stanovení času šíření byla uvažována konečná rychlost světla ve vakuu.

4. PROGRAM MODELU ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU ATMOSFÉROU

V rámci řešení práce byly vytvořeny dvě verze modelu šíření laserového svazku atmosférou. První varianta je ve formě klasického souboru MATLAB .m s kombinací kódového skriptu a vyvolávání připravených funkcí. Druhá varianta modelu byla vytvořena v grafické uživatelské podobě.



Obrázek 4.1 Blokový diagram navrženého programu

Na obrázku 4.1 je vidět rozvržení programu do jednotlivých samostatných bloků. Texty v blocích jsou v anglickém jazyce, aby byla zřetelná návaznost na grafickou podobu programu. Grafický varianta programu byla vytvořena pomocí App Designer od MATLAB. Toto prostředí, na rozdíl od základního MATLAB, nepodporuje znaky s diakritikou, a tedy použití českého jazyka je při práci s App Designer nevhodné. V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé funkční bloky.

4.1 Popis jednotlivých funkčních bloků

V níže uvedených podkapitolách jsou blíže popsány jednotlivé bloky a jejich funkce a početní postupy modelu šíření laserového záření atmosférou, zmíněný model používá dva módy definice komunikačního bodu B, ve kterém se nachází přijímací část.

První mód modelu definuje bod B pomocí souřadnic umístění vzhledem k vysílacímu bodu A $[0,0]$. Bod B je tedy definován horizontální vzdáleností od vysílacího bodu A a výškou nad povrchem Země.

Druhý mód modelu nedefinuje bod B přímo, ale je zadán požadovaný vysílací úhel a výška komunikačního bodu B.

4.1.1 Blok vstupních dat



Obrázek 4.2 Blok vstupních dat

Při použití prvního módu modelu jsou vstupními daty parametry komunikačního bodu a parametry laserového záření. Parametry komunikačního bodu B jsou následující:

- Horizontální vzdálenost komunikačního B bodu od vysílacího bodu A zadávaná v kilometrech
- Výška komunikačního bodu B nad povrchem Země zadávaná v kilometrech
- Počet vrstev výškového rozložení, které nabývá hodnot 10 nebo 20
- Poloha vysílacího bodu A je vždy v počátku souřadnicového systému $[0,0]$

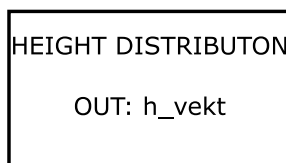
V případě druhého módu definování komunikačního bodu jsou vstupní parametry následující:

- Výška komunikačního bodu nad povrchem Země zadávaná v kilometrech
- Zvolený vysílací úhel ve stupních v intervalu od $0,5^\circ$ do $89,999999999^\circ$, tento interval možných zvolených vysílacích úhlů je omezen výpočetními možnostmi MATLABu, kdy pro nízké vysílací úhly mohou vznikat příliš vysoké hodnoty v proměnných a dochází k přetékání datových typů. Rovněž nelze zadat vysílací úhel 90° , protože pro tento úhel nelze počítat vyřešit Snellův zákon. Z toho vyplývá, že nízké vysílací úhly lze používat pro modelování šíření laserového svazku atmosférou do takových výšek bodu B, pro které vznikne horizontální vzdálenost L od vysílacího bodu A, která nepodléhá zakřivení Země. (kapitola 4.4)
- Počet vrstev výškového rozložení, které nabývá hodnot 10 nebo 20

Parametry laserového záření jsou následující

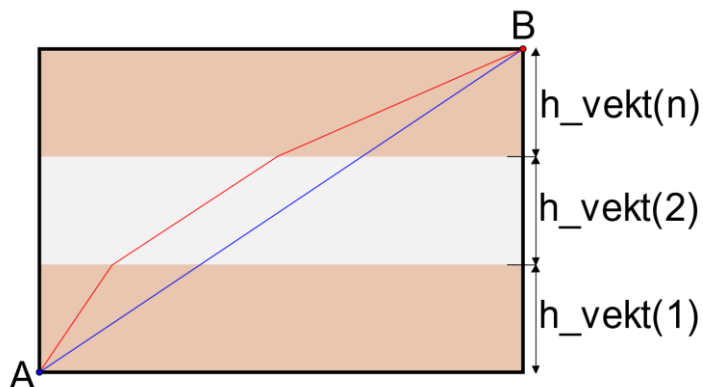
- Vlnová délka záření zadávaná v nanometrech v intervalu od 300 nm do 1700 nm, interval vlnových délek je dán výpočtem spektrálně závislého indexu lomu podle Edlénovy metody (kapitola 2.2).
- Pološířka svazku v krčku zadávaná v milimetrech nebo divergence svazku zadávaná ve stupních
- Šířka spektrální čáry zadávaná v nanometrech
- Výkon laserového záření zadávaný v miliwattech

4.1.2 Blok výškového rozložení



Obrázek 4.3 Blok výškového rozložení

Protože zemská atmosféra mění své vlastnosti s výškou nad povrchem Země je důležité vzdálenost rozdělit na dílčí části, aby bylo možné následně využívat Snellův zákon (uvedený v kapitole 2.1).



Obrázek 4.4 Řešená situace blokem výškového rozložení

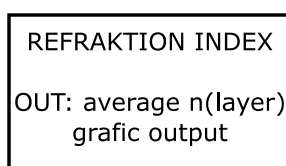
Na obrázku 4.4 je zobrazená řešená situace. Je zde vidět umístění vysílacího bodu A a komunikačního bodu B. Jednotlivé vrstvy atmosféry jsou odlišeny barevně a mají kótou vyznačený příslušný prvek vektoru h_vekt . Modrá přímka mezi body A a B je ideální trasa laserového svazku při homogenní atmosféře. Červená křivka je naznačení skutečného šíření laserového svazku atmosferickým prostředím s proměnným indexem lomu.

Kvůli odlišným vlastnostem atmosféry v jednotlivých vrstvách je nutné výškovým rozložením definovat výšky jednotlivých rozhraní v atmosféře. Tento blok používá funkci `func_h`, která používá následující vstupní informace

- Výška komunikačního bodu nad povrchem Země zadávaná v kilometrech
- Počet vrstev výškového rozložení, které nabývá hodnot 10 nebo 20

V rámci této funkce je stanovena výška jedné vrstvy a pomocí cyklu je vytvořený vektor `h_vekt`, ve kterém je každému prvku přiřazena výška jedné vrstvy. Počet prvků vektoru `h_vekt` se rovná počtu vrstev výškového rozložení. Tento výškový vektor `h_vekt` je důležitý prvek pro další výpočty modelu šíření laserového svazku atmosférou.

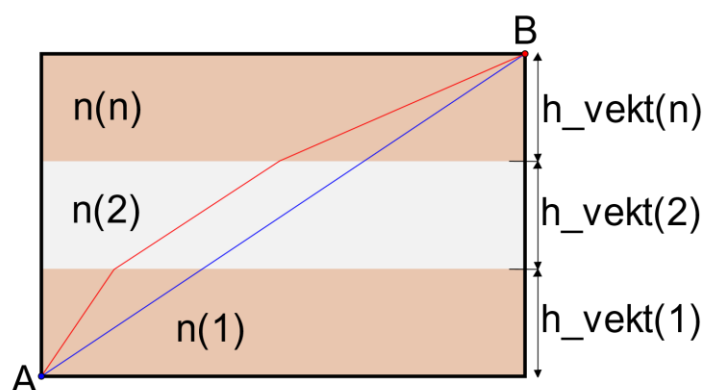
4.1.3 Blok výpočtu spektrálně závislého indexu lomu



Obrázek 4.5 Blok výpočtu indexu lomu

Jak je výše zmíněno, index lomu prostředí závisí na vlnové délce a výšce nad povrchem Země. V bloku se nachází data [14] o teplotě a tlaku Standardní atmosféry vygenerované z výšky 0 metrů nad mořem až do výšky 80 kilometrů nad mořem s krokem 1 metr. Řešená situace je zobrazená na obrázku 4.6, ze kterého je zřejmé, že funkce vypočte pro každou horizontální vrstvu zemské atmosféry příslušný index lomu prostředí. Funkce `func_edlen_g` používá následující vstupní data

- Vlnová délka záření zadávaná v mikrometrech v intervalu od 300 nm do 1700 nm
- Vektor výškového rozložení `h_vekt`
- Počet vrstev výškového rozložení, které nabývá hodnot 10 nebo 20



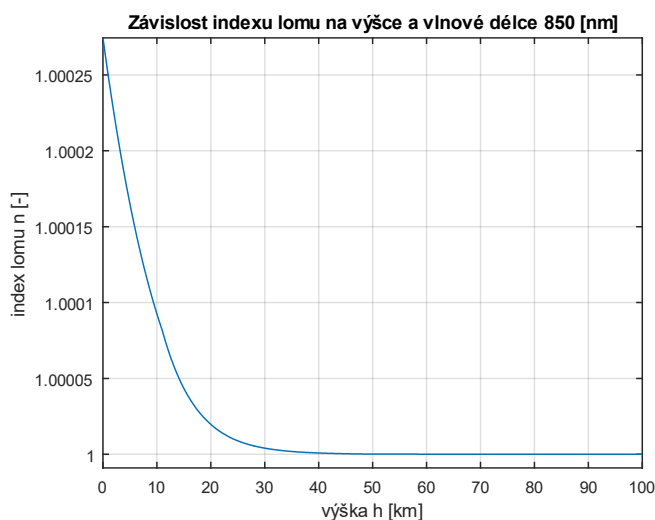
Obrázek 4.6 Řešená situace blokem výpočtu indexu lomu

Funkce postupně načte data Standardní americké atmosféry o teplotě a tlaku v určitých výškách ze souborů umístěných ve stejné složce jako program a ostatní funkce. Zdrojové soubory mají tyto názvy:

- atmosférická teplota temperature.mat
- atmosférický tlak pressure.mat
- příslušné výšky high.mat

Dále následuje výpočetní cyklus Edlénovy metody (popsané v kapitole 2.2), který stanoví index lomu prostředí pro danou vlnou délku a výšky od 0 metrů nad mořem s krokem 1 metr až do výšky 80 kilometrů nad mořem bez ohledu na zadanou výšku komunikačního bodu. Vznikne tedy vektor hodnot indexu lomu prostředí čítající 80001 prvků.

Podle hodnoty výšky komunikačního bodu je tento vektor buď oříznut nebo nastaven příslušným počtem prvků. Hodnoty prvků na pozicích vyšších než 80001 jsou rovny 1, protože v takových výškách lze index lomu prostředí považovat za konstantní a již nezavilý na vlnové délce záření a výšce nad mořem.



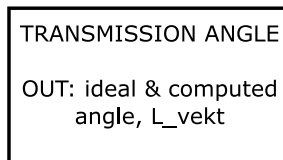
Obrázek 4.7 Grafický výstup funkce func_edlen_g s profilem indexu lomu pro vlnou délku 850 nm

Dále tato funkce vykreslí závislost indexu lomu prostředí dané vlnové délky na výšce nad mořem s přesností jeden metr. Výsledná závislost je zobrazena na obrázku 4.7. Uvedená závislost platí pro vlnovou délku 850 nm a výšku komunikačního bodu B 100 km.

Následně funkce pracuje s kompletním vektorem indexů lomu prostředí a s pomocí výšky komunikačního bodu jej rozdělí na požadovaný počet vrstev a přiřadí každé vrstvě výškového rozdělení průměrnou hodnotu indexu lomu prostředí. Výstupní vektor indexu lomu je stejně dlouhý jako vektor výškového rozdělení. Počet prvků vektoru n je roven počtu vrstev výškového rozložení.

Pro potřeby výpočtu modelu šíření laserového svazku atmosférou byla vytvořena i verze funkce `func_edlen`, která neobsahuje část vykreslování závislosti.

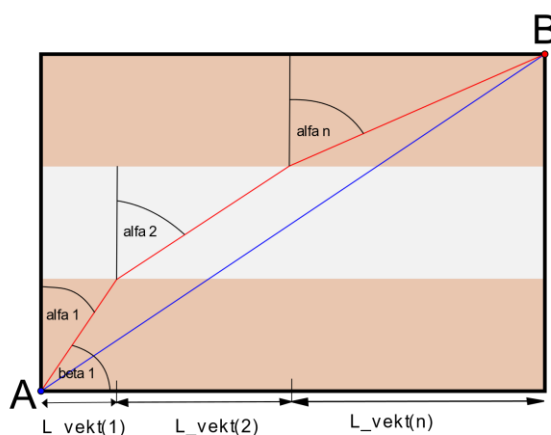
4.1.4 Blok výpočtu vysílacího úhlu



Obrázek 4.8 Blok výpočtu vysílacího úhlu

Vysílací úhel stanovuje funkce `func_angle_L`. Do funkce vstupují následující veličiny:

- Vektor indexu lomu prostředí n
- Vektor výškového rozložení h_vekt
- Horizontální vzdálenost od vysílacího bodu L
- Počet vrstev výškového rozložení, které nabývá hodnot 10 nebo 20



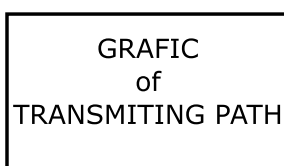
Obrázek 4.9 Řešená situace blokem vysílacího úhlu

Situace řešená tímto blokem je zobrazená na obrázku 4.9, kde jsou zobrazeny složky vektoru rozdělení vodorovné vzdálenosti L_vekt na dílčí úseky. Také jsou zobrazeny počítané úhly. Úhel β_{11} je vysílací úhel, jeho doplňkem do 90° je úhel α_1 . Další úhly pojmenované α se dopočítávají.

V rámci funkce je stanoven počáteční vysílací úhel, který je vypočten pomocí goniometrické funkce `tangens`, výšky komunikačního bodu a vodorovné vzdálenosti od vysílacího bodu v počátku. Podle počtu vrstev je pomocí příkazu `switch` vybrán příslušný iterační cyklus, pomocí kterého je v 64 opakování vypočítán vhodný vysílací úhel a vektor rozdělení vodorovné vzdálenosti L_vekt . Výstupem funkce je vypočtený vysílací úhel a vektor L_vekt .

V případě, že je komunikační bod definován výškou a vysílacím úhlem je tato funkce v rámci bloku nahrazena obdobnou funkcí `func_L_angle`, se vstupními daty o vlnové délce, zadaném vysílacím úhlu a výškového rozložení. Tato funkce pomocí počtu prvků vektoru výškového rozdělení stanoví počet vrstev a pomocí výše zmíněné funkce `fun_edlen` získá potřebný vektor indexů lomu. Pomocí informace o počtu vrstev je zvolena vhodná část následujícího kódu, kde je jedním během spočítán vektor rozdělení vodorovné vzdálenosti `L_vekt`, který je jediným výstupem této funkce `func_L_angle`.

4.1.5 Blok vykreslení trasy šíření svazku

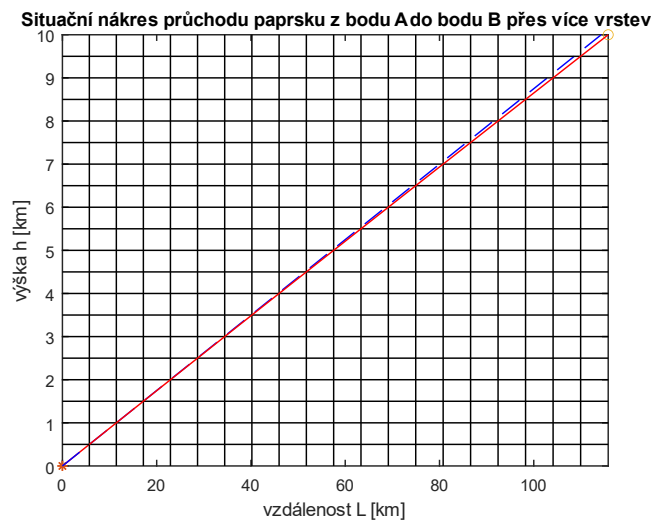


Obrázek 4.10 Blok vykreslení trasy šíření svazku

Vykreslení trasy šíření laserového svazku má na starosti funkce `func_grafy`. Tato funkce pracuje s následujícími vstupními daty:

- Souřadnice vysílacího bodu A [0,0]
- Horizontální vzdálenost L od vysílacího bodu A
- Horizontální vzdálenost L_0 od vysílacího bodu, která představuje vzdálenost dopadu vyslaného svazku pod vypočteným vysílacím úhlem v homogenní atmosféře
- Vektor výškového rozložení `h_vekt`
- Vektor rozdělení vodorovné vzdálenosti `L_vekt`
- Počet vrstev výškového rozložení, které nabývá hodnot 10 nebo 20

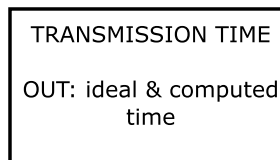
Následně se proměnné upraví tak, aby jejich velikost odpovídala kilometrům a pomocí přepínače `switch` se provede příslušná část následujícího kódu podle hodnoty počtu vrstev. V této části se vykreslí do jednoho grafu vodorovné dělicí čáry jednotlivých vrstev podle `h_vekt` a svislé dělicí čáry jednotlivých délkových úseků podle `L_vekt`. Do takto přípravné mřížky se dále zakreslí ideální trasa šíření a skutečná trasa šíření. V posledním kroku této funkce se graf opatří patřičnými popisky os s jednotkami a názvem nad grafem.



Obrázek 4.11 Grafický výstup funkce `func_grafy` s porovnáním vysílací trajektorie a skutečné trasy laserového svazku atmosférickým prostředím

Výstupní grafické zpracování je uvedené na obrázku 4.11. Tento výstup platí pro modelování trasy svazku vyslaného pod vysílacím úhlem 5° a přijímaným ve výšce 10 km nad mořem. Taková vstupní data modelu byla zvolena proto, aby bylo možné pozorovat rozdíl mezi ideální trasou šíření svazku (na obrázku modře) a simulovanou trasou šíření svazku (na obrázku červeně).

4.1.6 Blok výpočtu vysílacího času a vzdálenosti



Obrázek 4.12 Blok výpočtu vysílacího času a vzdálenosti

Tento časový blok se skládá z dvou funkcí `func_time_ideal` pro stanovení ideálního času šíření, tedy doba šíření v homogenní atmosféře s indexem lomu světla rovný jedné. Laserový svazek se v takové ideální homogenní atmosféře šíří přímo po přeponě pravoúhlého trojúhelníku mezi vysílacím bodem A a komunikačním bodem B rychlostí světla c_0 . Do této funkce vstupují následující informace:

- Rychlost světla c_0
- Vektor výškového rozložení h_vekt
- Vektor rozdělení vodorovné vzdálenosti L_vekt

Ze součtu prvků obsažených v h_vekt je stanovena celková výška komunikačního bodu. Dále je pomocí Pythagorově věty stanovena délka přepony. Při znalosti délky

přepony a rychlosti šíření je stanovený ideální čas šíření laserového záření v ideální atmosféře.

Druhou funkcí v tomto bloku je `func_time` s následujícími vstupními daty:

- Rychlost světla c_0
- Vektor indexu lomu prostředí n
- Vektor výškového rozložení h_vekt
- Vektor rozdělení vodorovné vzdálenosti L_vekt

V této funkci se nachází tři cykly. První cyklus vytvoří vektor rychlostí světla pro každou vrstvu podle rovnice (4.1), kde v je rychlost světla v prostředí s indexem lomu n a c_0 je rychlost světla ve vakuu. V závorkách u proměnných je vyznačen symbol i jako indexace prvku v rámci vektoru více hodnot.

$$v(i) = \frac{c_0}{n(i)} \quad (4.1)$$

Druhý cyklus počítá pro každou vrstvu délku trasy šíření optického záření podle následující rovnice (4.2), kde d je délka trasy v rámci jedné vrstvy. $L_vekt(i)$ a $h_vekt(i)$ jsou příslušné prvky vektorů výškového rozložení a rozdělení vodorovné vzdálenosti. V závorkách u proměnných je vyznačen symbol i jako indexace prvku v rámci vektoru více hodnot.

$$d(i) = \sqrt{L_vekt(i)^2 + h_vekt(i)^2} \quad (4.2)$$

Poslední obsažený cyklus ve funkci stanoví vektor časů šíření v rámci vrstev. Cyklus používá rovnici (4.3), kde t_p je čas šíření svazku ve vrstvě, d je délka trasy svazku ve vrstvě a v je rychlost šíření svazku v prostředí vrstvy. V závorkách u proměnných je vyznačen symbol i jako indexace prvku v rámci vektoru více hodnot.

$$t_p(i) = \frac{d(i)}{v(i)} \quad (4.3)$$

Následně je součtem těchto časů stanovená celková doba šíření z bodu A do bodu B. Součtem tras v jednotlivých vrstvách je stanovená celková délka trasy šíření optického záření mezi body A a B.

V programu je následně dopočítán rozdíl mezi ideálním a simulovaným časem šíření.

4.1.7 Blok prostorové disperze

SPATIAL DISPERSION OUT: L_disp_D, L_disp_H, L_vekt_D, L_vekt_H

Obrázek 4.13 Blok prostorové disperze

Protože laserové záření má nenulovou spektrální šířku, podléhá disperznímu šíření atmosférickým prostředím. Tento jev řeší funkce `func_L_disp` s následujícími vstupními daty:

- Vlnová délka záření λ
- Šířka spektrální čáry $\Delta\lambda$
- Vypočtený nebo požadovaný vysílací úhel β_1 , vypočtený vysílací úhel – první mód modelu šíření laserového svazku atmosférou, požadovaný vysílací – druhý mód modelu
- Vektor výškového rozložení `h_vekt`
- Počet vrstev výškového rozložení, které nabývá hodnot 10 nebo 20

V rámci postupu funkce jsou podle šířky spektrální čáry stanoveny okrajové vlnové délky podle rovnic (4.4). Tyto vlnové délky jsou označeny jako dolní λ_D a λ_H a horní (v kódu `lambda_D` a `lambda_H`).

$$\begin{aligned}\lambda_D &= \lambda - \frac{\Delta\lambda}{2} \\ \lambda_H &= \lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}\end{aligned}\tag{4.4}$$

Ve vztahu (4.4) je λ_D dolní okrajová vlnová délka záření, λ_H horní okrajová délka záření, λ je střední vlnová délka záření a $\Delta\lambda$ je šířka spektrální čáry.

Následně je použita pro obě vlnové délky postupně funkce pro výpočet spektrálně závislého indexu lomu `func_edlen`. Tím se získají dva vektory indexů lomu prostředí pro dolní a horní okrajovou vlnovou délku označené jako `n_D` a `n_H`.

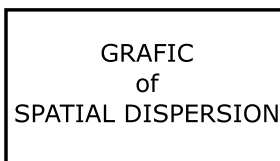
V dalším kroku se vypočítá pomocí Snellova zákona vektor vodorovných délkových úseků pro dolní okrajovou vlnou délku vyslanou vysílacím úhlem. Vektor je označen jako `L_vekt_D`. Součtem jeho prvků je získána celková vodorovná vzdálenost dopadu disperzního šíření dolní vlnové délky. Tento součet je označen jako `L_disp_D`.

Následuje postupově stejná část kódu, ale pro horní okrajovou vlnovou délku. Podobně jako v předchozím kroku je vytvořen vektor vodorovných délkových úseků

L_vekt_H a celková vodorovná vzdálenost dopadu disperzního šíření horní vlnové délky L_disp_H .

Zmíněné hodnoty a vektory jsou výstupními daty popisované funkce. V hlavním kódu modelu spočítána délka rozšíření svazku vlivem disperzního šíření laserového záření skrz nehomogenní atmosférické prostředí. Délka disperzního rozšíření je rovna rozdílu délek dopadu dolní vlnové délky a horní vlnové délky.

4.1.8 Blok vykreslení prostorové disperze



Obrázek 4.14 Blok vykreslení prostorové disperze

Prostorová disperze je v tomto bloku graficky znázorněná pomocí funkce `func_grafy_disp`, která pracuje s následujícími vstupními daty:

- Vektor výškového rozložení h_vekt
- Vektory rozdělení vodorovné vzdálenosti L_vekt , L_vekt_D a L_vekt_H

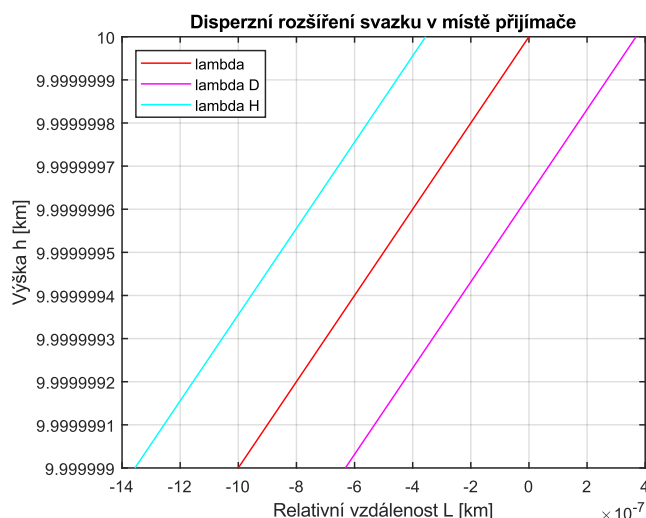
Podobně jako v zobrazování trasy šíření laserového svazku jsou i v této funkci převedeny z metrů na kilometry pro srozumitelnější vyjádření. Dále je podle hodnoty délky vektoru h_vekt přesměrován na příslušnou část kódu, ve které se vykreslí nejvyšší vrstva a je zobrazena trasa střední vlnové délky, dolní vlnové délky a horní vlnové délky odlišené barevně. Navíc je zobrazený průběh ořezaný tak aby byl vidět detail poslední milimetr z výšky komunikačního bodu. Grafické znázornění je dále doplněno popisky os s jednotkami a názvem.

Grafický výstup uvedený na obrázku 4.15 je platný pro model šíření laserového svazku z vysílacího bodu A do komunikačního bodu B umístěného v horizontální vzdálenosti 10 km a ve výšce 10 km. Grafický výstup používá relativní horizontální vzdálenost L , která neuvádí absolutní horizontální vzdálenost. Relativní horizontální vzdálenost L upravuje osu x tak, aby trasa střední vlnové délky dopadla do bodu B v hodnotě relativní horizontální vzdálenosti 0 a okrajové vlnové délky v takové vzdálenosti od 0, které odpovídají jejich výsledné disperzní odchylce. Relativní horizontální vzdálenost L je definovaná následujícími vztahy (4.5).

$$L_r = L - L = 0$$

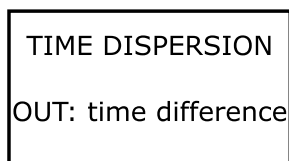
$$L_{rD} = L_{disp_D} - L \quad (4.5)$$

$$L_{rH} = L_{disp_H} - L$$



Obrázek 4.15 Grafický výstup funkce `func_grafy_disp` s průběhy střední a okrajových vlnových délek laserového záření

4.1.9 Blok časové disperze



Obrázek 4.16 Blok časové disperze

Dispersní šíření laserového svazku se šíří jinými trasami a dopadne na jiná místa v požadované výšce, dochází i k disperznímu zpoždění mezi dopadem okrajových vlnových délek. S tímto problémem pracuje funkce `func_time_disp`, která používá následující vstupní data:

- Rychlost světla c_0
- Vlnová délka záření λ
- Šířka spektrální čáry $\Delta\lambda$
- Vektor výškového rozložení h_vekt
- Vektory rozdělení vodorovné vzdálenosti L_vekt_D a L_vekt_H

V první části se v rámci funkce stanoví hodnoty dolní a horní vlnové délky, které jsou následně postupně vloženy do funkce `func_edlen` pro vytvoření příslušných vektorů indexů lomu prostředí. Dále je postup funkce totožný s funkcí `func_time`, jen s rozdílem že jednotlivé postupy jsou zdvojeny, protože funkce pracuje s dvěma okrajovými délkami zároveň. Funkce stanoví pomocí vzorce (4.1) vektor rychlosti šíření světla pro dolní okrajovou vlnovou délku a horní okrajovou vlnovou délku. V dalším cyklu se podle vzorce (4.2) vypočte délka trasy šíření svazku dolní okrajové vlnové délky a horní

okrajové vlnové délky. V posledním cyklu funkce této se stanoví podle rovnice (4.3) vektory časů šíření v rámci vrstev pro obě okrajové vlnové délky separátně.

Následně je součtem prvků vektoru časů šíření v rámci jedné vrstvy stanoven celkový čas šíření pro dolní okrajovou vlnovou délku a horní okrajovou vlnou délku. Součtem tras v jednotlivých vrstvách je stanovena celková délka trasy šíření svazku dolní okrajové vlnové délky a horní okrajové vlnové délky do výšky bodu B.

V programu je následně dopočítán rozdíl mezi časem šíření svazku dolní okrajové vlnové délky a časem šíření horní okrajové vlnové délky.

4.1.10 Blok divergence svazku

BEAM DIVERGENCE

OUT: grafic output

Obrázek 4.17 Blok divergence svazku

Divergencí svazku je dáno, jak se svazek rozšiřuje s rostoucí vzdáleností od zdroje záření. Tento jev je řešen pomocí funkce `func_divergence`, která používá následující vstupní data:

- Úhel divergence zadávaný ve stupních
- Horizontální vzdálenost L komunikačního bodu B od vysílacího bodu A zadávaná v kilometrech
- Výška komunikačního bodu nad povrchem Země zadávaná v kilometrech
- Celková vypočtená délka šíření
- Horizontální vzdálenosti dopadu disperzního šíření okrajových vlnových délek L_disp_D a L_disp_H
- Délka disperzního rozšíření ve výšce přijímače

V prvním kroku výpočtu funkce se stanoví pološířka svazku v místě přijímače bez ohledu na disperzi způsobenou průchodem atmosférickým prostředím. Pološířku stanoví podle následujícího vzorce (4.6),

$$p_B = d \cdot \tan(\theta) \quad (4.6)$$

kde p_B je pološířka svazku v místě přijímače, d je celková délka trasy svazku mezi vysílacím bodem A a komunikačním bodem B, θ je úhel divergence laserového svazku.

V dalším kroku je vytvořen vektor pro budoucí horizontální osu grafického výstupu a pomocí převzaté funkce MATLAB `gaussmf` je vytvořen vektor hodnot Gaussovského průběhu svazku bez vlivu optické disperze.

V následujícím kroku je vytvořena pološířka svazku v místě přijímače po průchodu atmosférickým prostředím s ohledem na disperzní rozšíření svazku. Ta je stanovena podle následujícího vztahu (4.7),

$$p_{dips} = p_B + \frac{\Delta_{disp}}{2} \quad (4.7)$$

kde p_{disp} je pološířka svazku disperzního šíření, p_B je pološířka laserového svazku bez ohledu na disperzi a Δ_{disp} je délka disperzního rozšíření ve výšce přijímače.

Dále je stanovena relativní intenzita záření po vlivu disperze. Relativita je v tomto případě vztažena k intenzitě svazku bez ohledu na disperzi. Relativní intenzita je stanovena podle vzorce (4.8),

$$I_r = \frac{p_B}{p_{dips}} \quad (4.8)$$

kde I_r je relativní intenzita laserového svazku po disperzním šíření, p_B je pološířka laserového svazku bez ohledu na disperzi a p_{disp} je pološířka laserového svazku disperzního šíření.

Dále je vytvořen opět pomocí převzaté funkce MATLAB `gaussmf` vektor hodnot Gaussovského průběhu svazku s vlivem optické disperze.

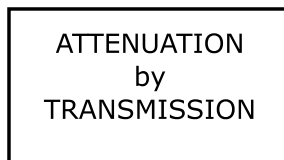
Následuje cyklus, který převede vektor vodorovných hodnot pro grafický výstup na relativní podobu pomocí celkové horizontální vzdálenost L komunikačního bodu B od vysílacího bodu A. Tento krok je pro srozumitelnější vyjádření vodorovné osy grafického výstupu funkce `func_divergence`.



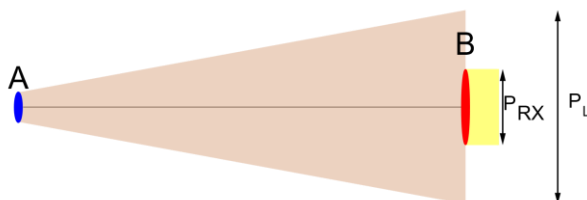
Obrázek 4.18 Grafický výstup funkce func_divergence s porovnáním svazků bez a s vlivem optické disperze

Na obrázku 4.18 je vidět grafický výstup funkce func_divergence, kde je zobrazená podoba Gaussovského svazku bez vlivu optické disperze modře a oranžově s vlivem optické disperze. Zobrazený výstup je pro nízko divergentní laserový svazek s úhlem divergence $0,0000001^\circ$. Z obrázku lze vidět, jak optická disperze ovlivňuje nízko divergentní laserové svazky.

4.1.11 Blok útlumu šířením



Obrázek 4.19 Blok útlumu šířením



Obrázek 4.20 Řešená situace blokem útlumem šířením

Na obrázku 4.20 je zobrazená situace řešená blokem útlumem šířením, je zde zobrazen vysílací bod A a komunikační bod B. Modře je znázorněna vysílací apertura, červeně potom přijímací apertura. Běžovou barvou je znázorněn kužel šířícího se laserového svazku atmosférou. Pološířka takového svazku se rozšiřuje podle úhlu divergence θ a závisle na disperzních vlastnostech atmosféry. Žlutou barvou je znázorněna velikost přijatého výkonu laserového záření.

Blok útlumu optického výkonu šířením určuje, kolik vyslané energie je ztraceno šířením laserového svazku atmosférou. Jedná se o ztráty, které vzniknou rozšířením pološířky svazku a následným příjmem svazku optickou aperturou s konečnou velikostí. Přijímací aperturou projde pouze omezené množství vyslaného optického výkonu. Blok útlumu šířením pracuje s následujícími výstupními parametry:

- Výkon zdroje laserového záření zadávaný v mW
- Pološířka svazku v místě příjmu s ohledem na disperzi p_{disp}
- Průměr přijímací apertury v zadávaný v milimetrech

Nejprve se výkon laserového záření převede z miliwattů do logaritmické míry dBm podle rovnice (4.9),

$$P_{LdBm} = 20 \cdot \log_{10}(P_L) \quad (4.9)$$

kde P_{LdBm} je hodnota výkonu laserového záření v logaritmické míře dBm a P_L je výkon laserového záření v miliwattech. Následně je spočítán optický tok v místě příjmu laserového svazku v ose přijímací apertury podle následující rovnice (4.10),

$$I_B = \frac{P_L}{\pi \cdot p_{\text{disp}}^2} \quad (4.10)$$

kde I_B je optický tok v komunikačním bodě B, P_L je výkon laserového záření a p_{disp} je pološířka svazku v místě příjmu s ohledem na optickou disperzi. Ze znalosti optického toku v místě příjmu a plochy přijímací apertury lze stanovit skutečný přijatý výkon laserového záření. To je provedeno podle rovnice (4.11),

$$P_{RX} = I_B \cdot S_{RX} = I_B \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{RX}}{2}\right)^2 \quad (4.11)$$

kde P_{RX} je skutečný přijatý výkon laserového záření, I_B je optický tok v místě příjmu, S_{RX} je plocha přijímací apertury a d_{RX} je průměr přijímací apertury. Skutečný přijatý výkon laserového záření je podle rovnice (4.9) převeden do logaritmické míry. Výsledný útlum šířením je stanoven podle vztahu (4.12),

$$\alpha_{TRdB} = P_{LdBm} - P_{RXdBm} \quad (4.12)$$

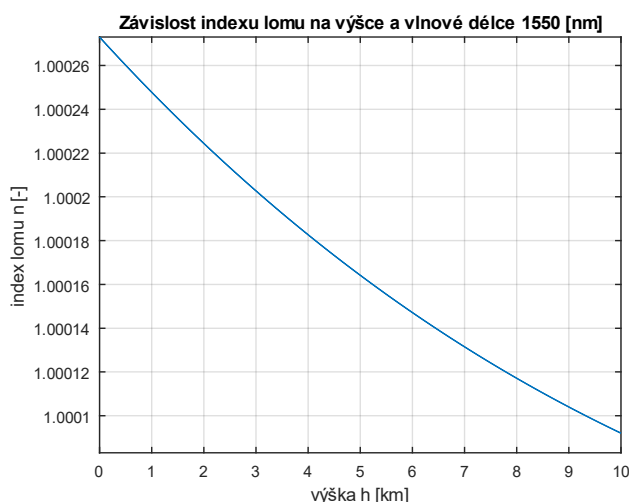
kde α_{TRdB} je útlum šířením v logaritmické míře dB, P_{LdBm} je výkon vysílaného laserového záření a P_{RXdBm} je skutečný výkon laserového záření přijatý přijímací aperturou.

4.2 Výstupní data modelu šíření laserového svazku atmosférou

V této kapitole budou ukázány a popsány výstupní data modelu šíření laserového svazku atmosférou a různé závislosti získané z modelových situací.

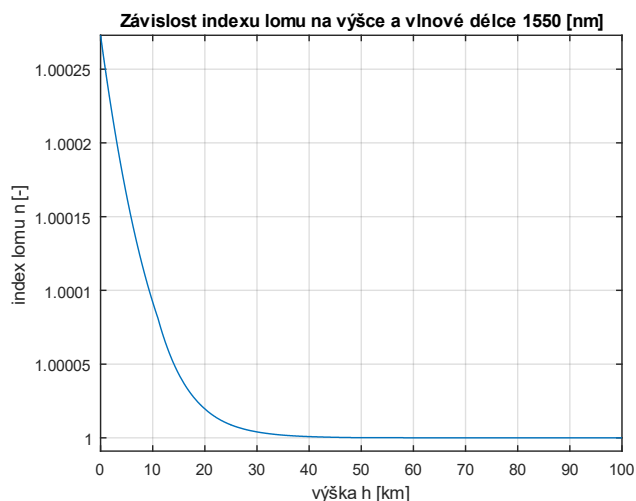
4.2.1 Závislosti indexu lomu prostředí na výšce a vlnové délce

Do modelu šíření laserového svazku atmosférou byly zadány typické hodnoty výšek komunikačního bodu B a následně byly zkoumány profily indexu lomu prostředí v daném výškovém rozmezí.



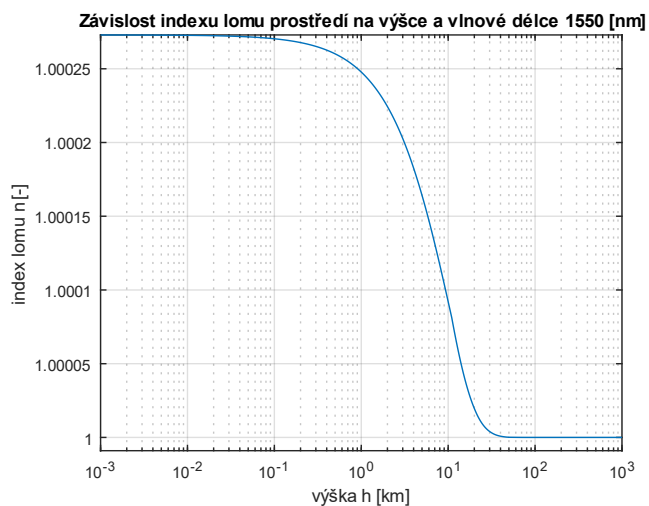
Obrázek 4.21 Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 10 km

Na obrázku 4.21 je vidět profil indexu lomu prostředí atmosféry do výšky 10 km, tedy typické letové hladiny dopravních letadel. Index lomu prostředí se nejvíce mění právě v tomto rozmezí výškových hladin nad mořem. Index lomu prostředí atmosféry klesá z hodnoty 1,00027 v nulové výšce nad mořem až na hodnotu 1,00009 ve výšce 10 km nad mořem. Pokles hodnoty indexu lomu atmosférického prostředí se dá v tomto rozmezí považovat za téměř lineárně klesající.



Obrázek 4.22 Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 100 km

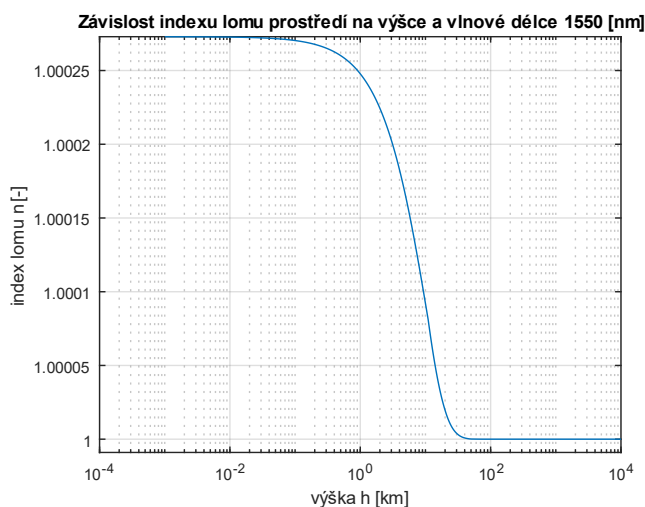
Předcházející tvrzení potvrzuje i další obrázek 4.22, který zobrazuje profil indexu lom atmosférického prostředí opět pro vlnou délku 1550 nm do celkové výšky 100 km. Tato výška je obecně považována za hranici mezi atmosférou Země a prostorem volného vesmíru. Z obrázku vyplývá, že ve výškách vyšších než 10 km zpomaluje klesání hodnoty indexu lomu prostředí atmosféry Země. To se projevuje vytvořením kolena v profilu a postupným přibližováním hodnoty indexu lomu prostředí k hodnotě rovné 1. Ve výškách vyšších než 50 km lze považovat index lomu prostředí již konstantní.



Obrázek 4.23 Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 1000 km

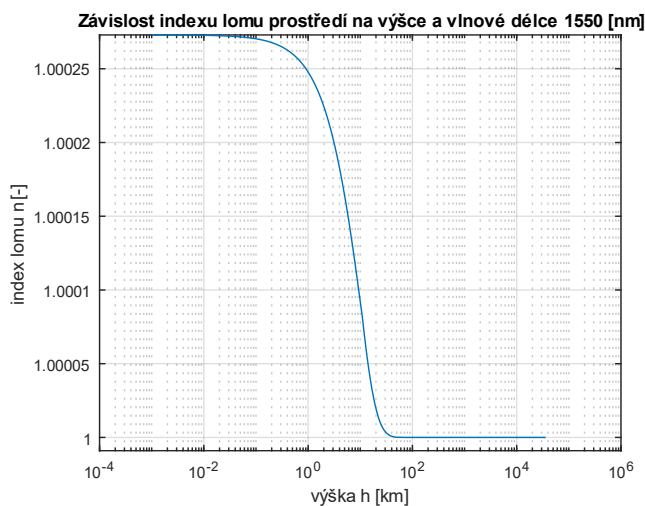
Na obrázku 4.23 je vidět profil indexu lomu atmosférického prostředí opět pro vlnovou délku 1550 nm až do výšky 1000 km, tedy výšky, kde se mohou pohybovat družice na nízké oběžné dráze s anglickou zkratkou LEO. Díky vykreslení profilu indexu lomu s přesností na jeden metr výšky nad mořem, bylo možné pro vyšší výšky zvolit věrné logaritmické zobrazení profilu lomu. Z profilu pro výšku 100 km je patrné, že

největší změnu hodnoty indexu lomu prostředí atmosféry prodělá do 10 km. Poté se do výšky 100 km přiblíží a dosáhne hodnoty 1 a na té zůstane až do výšky 1000 km.



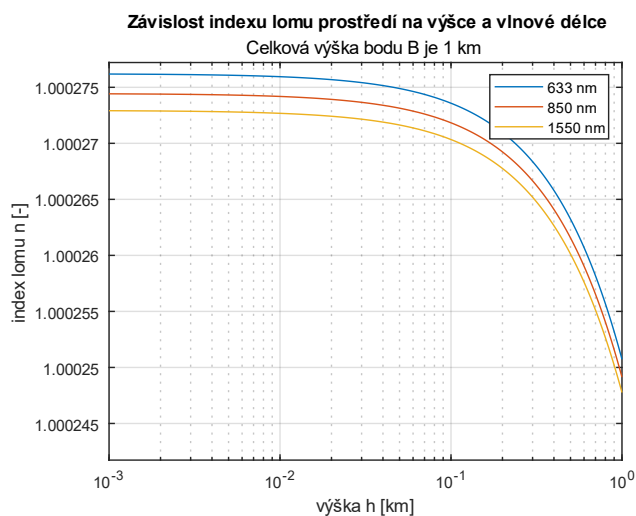
Obrázek 4.24 Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 10000 km

Obrázek 4.24 zobrazuje profil indexu lomu prostředí opět pro vlnu délku 1550 nm a pro celkovou výšku 10000 km, tedy výšku, kde se mohou pohybovat družice na střední oběžné dráze s anglickou zkratkou MEO. Tento zobrazený profil potvrzuje, že hodnota indexu lomu prostředí je za hranicí volného vesmírného prostoru rovný 1 a již nezávislý na narůstající výšce.



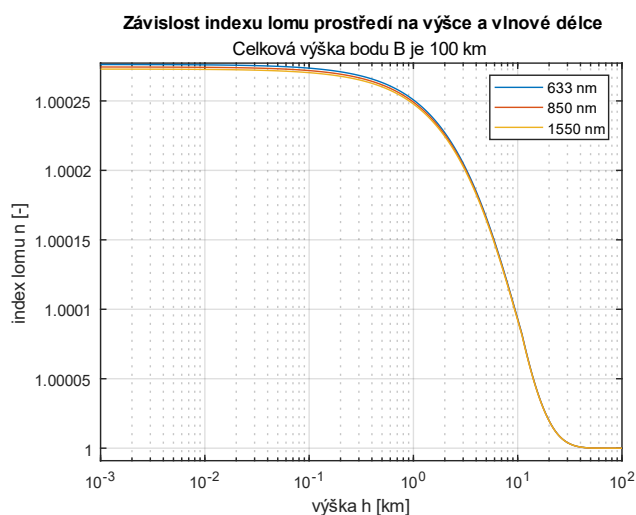
Obrázek 4.25 Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 36000 km

Obrázek 4.25 zobrazuje doplňující profil indexu lomu prostředí atmosféry a navazujícího volného vesmírného prostoru do výšky 36000 km, tedy výšky, ve které se pohybují družice na geostacionární oběžné dráze s anglickou zkratkou GEO. Z porovnání profilů na obrázku 4.24 a 4.25 je zřejmé, že i nadále se index lomu volného vesmírného prostředí dále nemění a zůstává na hodnotě 1.



Obrázek 4.26 Porovnání 3 vlnových délek a jejich profilů indexů lomu do výšky 1 km

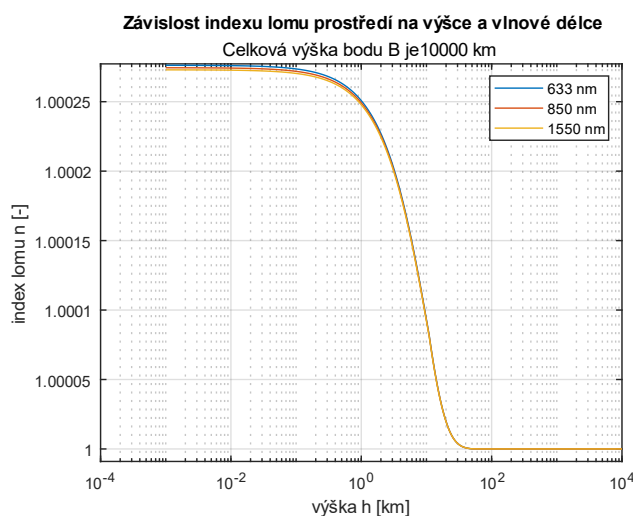
Na obrázku 4.26 je zobrazeno porovnání dvou hlavních vlnových délek používaných v atmosférické komunikaci 1550 nm a 850 nm s vlnovou délkou červeného světla 633 nm a jejich profily index lomu atmosférického prostředí do výšky 1 km. Z porovnání je patrné, že kratší vlnové délky mají vyšší hodnoty indexu lomu prostředí v rozmezí výšek 0 až 1 km nad mořem než delší vlnové délky. Zhruba do výšky 10 m je index lomu prostředí téměř konstantní. Ve výškách vyšších než 100 m nastává rychlá změna hodnot indexů lomu prostředí u všech třech porovnávaných vlnových délek stejným způsobem a jejich hodnoty se začínají přibližovat.



Obrázek 4.27 Porovnání 3 vlnových délek a jejich profilů indexů lomu do výšky 100 km

Obrázek 4.27 ukazuje profily až do výšky 100 km tří vlnových délek laserového záření a jejich porovnání. Mezi výškovou hladinou 1 km a 10 km je vidět, že se hodnoty

jednotlivých profilů indexu lomu stále více přibližují, ale k rovnosti indexů lomu dojde až na výškové hladině 50 km.



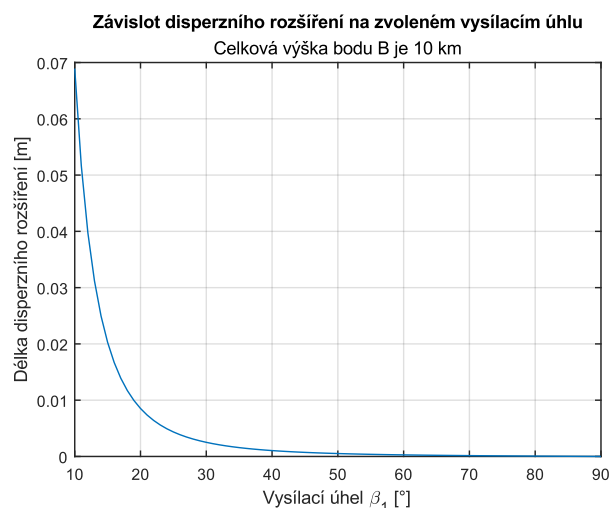
Obrázek 4.28 Porovnání 3 vlnových délek a jejich profilů indexů lomu do výšky 10000 km

Na obrázku 4.28 pokračuje porovnávání tří vlnových délek je jejich profilů indexů lomu až do výšky 10000 km. V grafickém porovnání lze pozorovat, že ve výškách za hranicí volného vesmírného prostoru 100 km jsou již hodnoty indexů lomu všech vlnových délek rovny 1.

Z výše uvedených porovnání profilů indexů lomu prostředí pro různé vlnové délky a v různých výškách lze stanovit že index lomu je závislý na výšce nad mořem a vlnové délce do rozhraní Zemské atmosféry a volného vesmírného prostoru ve 100 km. Nad touto výškou je již index lomu konstantní, a tedy nezávislý na nadmořské výšce a vlnové délce laserového záření.

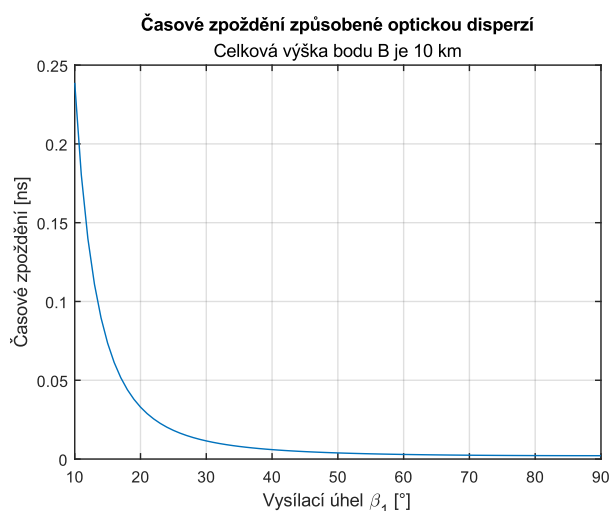
4.2.2 Závislosti disperzního rozšíření a zpoždění na zvoleném vysílacím úhlu

Model šíření laserového svazku atmosférou byl nastaven tak, aby byl nastavován vysílací úhel β_1 a pro různé celkové výšky komunikačního bodu B byly vygenerovány závislosti, které jsou uvedeny níže.



Obrázek 4.29 Závislost disperzního rozšíření na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 10 km)

Obrázek 4.29 zobrazuje vliv optické disperze na šíření laserového svazku s vlnovou délkou 850 nm a šířkou spektrální čáry 20 nm. Závislost byla vygenerována postupným nastavováním vysílacího úhlu β_1 od 10° po 90° . Model byl nastaven pro simulaci šíření laserového svazku atmosférou do výšky 10 km. Ze závislosti je patrné, že pro malé vysílací úhly je pro zvolené výstupní data je délka disperzního rozšíření laserového svazku až 7 cm. S narůstajícím vysílacím úhlem délka disperzního rozšíření svazku rychle klesá až při kolmé komunikaci mezi vysílacím bodem A a komunikačním bodem B je podle simulace nulová.



Obrázek 4.30 Závislost disperzního zpoždění na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 10 km)

Na obrázku 4.30 je zobrazená závislost časového zpoždění způsobeným optickou disperzí na zvoleném vysílacím úhlu β_1 od 10° po 90° . Model byl stejně jako v předešlém

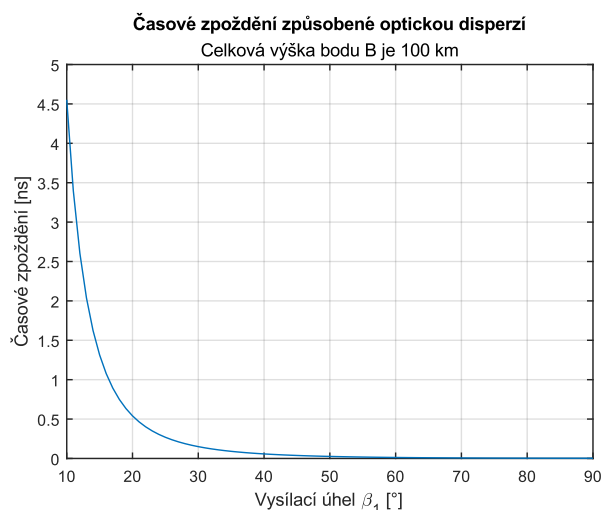
případě nastaven pro simulaci šíření laserového svazku atmosférou do výšky 10 km, při použití zdroje s vlnovou délkou 850 nm a šířkou spektrální čáry 20 nm. Při zmíněném nastavení komunikace dochází ke zpoždění až 0,25 ns při nízkých vysílacích úhlech. Pro vyšší vysílací úhly se časové zpoždění vlivem disperze zkracuje až je téměř nulové při vertikální komunikaci mezi vysílacím bodem A a přijímacím bodem B.



Obrázek 4.31 Závislost disperzního rozšíření na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km)

Předcházející nastavení modelu bylo změněno. Nově výška komunikačního bodu B byla nastavena na 100 km. Ostatní parametry jako vlnová délka a šířka spektrální čáry byly ponechány na stejných hodnotách. Na obrázku 4.31 je zobrazená výsledná závislost disperzního rozšíření laserového svazku na vysílacím úhlu β_1 . Z obrázku je vidět, že k největšímu disperznímu rozšíření dochází při vysílání nízkým vysílacím úhlem. Se zvyšováním vysílacího úhlu se disperzní rozšíření zkracuje až při vertikální komunikaci mezi vysílacím bodem A a komunikačním bodem B je nulové.

Při porovnání obrázků 4.29 a 4.31 jsou patné rozdíly v maximech disperzního rozšíření laserového svazku. To je dáno vyšší výškou komunikačního bodu B a tím pádem mnohem delší celková délka trasy šíření. U disperzního šíření platí, čím delší trasa šíření, tím větší konečné disperzní rozšíření.

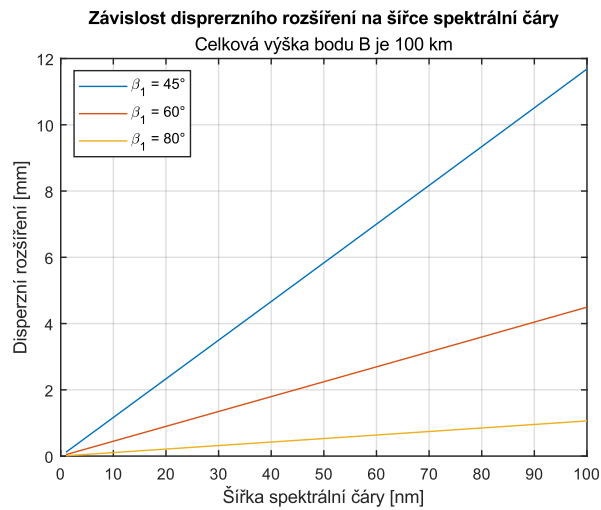


Obrázek 4.32 Závislost disperzního zpoždění na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km)

Stejně jako v předchozím kroku, i zde byla zkoumána závislost časového zpoždění na zvoleném vysílacím úhlu β_1 . Z obrázku 4.32 je vidět, že i časové zpoždění způsobené disperzním šířením laserového svazku je větší při vyšší výšce komunikačního bodu B. Při nízkých vysílacích úhlech je časové zpoždění v řádech jednotek nanosekund. Při zvětšování vysílacího úhlu klesá a při vertikální komunikaci mezi vysílacím bodem A a komunikačním bodem B je téměř nulové.

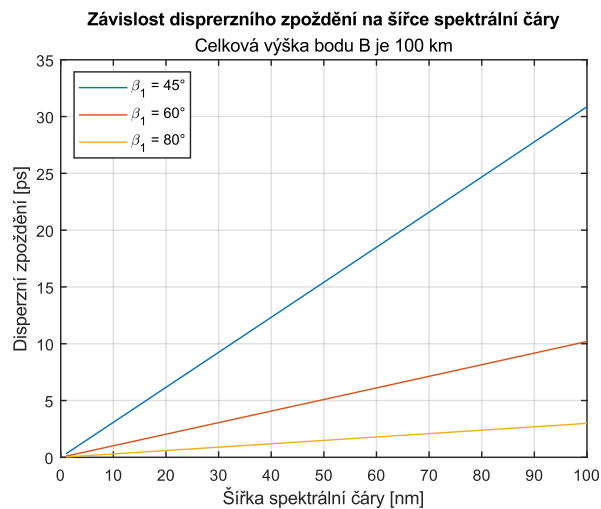
4.2.3 Závislosti disperzního rozšíření a disperzního zpoždění na šířce spektrální čáry laserového svazku

Model šíření laserového svazku atmosférou byl nastaven tak, aby byla nastavována šířka spektrální čáry laserového svazku v rozmezí od 1 nm do 10 nm. Vlnová délka záření byla nastavena na 1550 nm a výška komunikačního bodu B byla nastavena na 100 km. Závislosti byly vygenerovány pro tři různé vysílací úhly β_1 od 45° do 80°.



Obrázek 4.33 Závislosti disperzního rozšíření na šířce spektrální čáry (celková výška bodu B 100 km)

Na obrázku 4.33 jsou vidět výsledné závislosti v jednom grafickém výstupu. Závislost disperzního rozšíření svazku v místě příjmu optického signálu na šířce spektrální čáry je lineární pro všechny tři zvolené vysílací úhly. Pro laserové zdroje s malou šířkou spektrální čáry je i disperzní rozšíření relativně malé. S rostoucí šířkou spektrální čáry roste i disperzní rozšíření v místě přijímače. Strmost růstu je dána vysílacím zvoleným vysílacím úhlem.



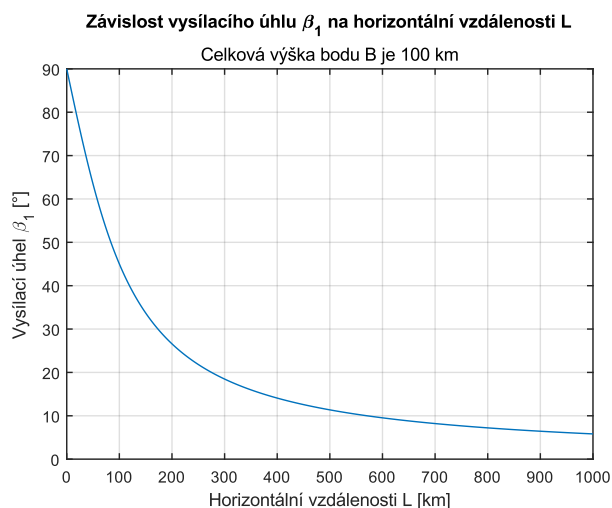
Obrázek 4.34 Závislosti disperzního zpoždění na šířce spektrální čáry (celková výška bodu B 100 km)

Obrázek 4.34 uvádí závislost disperzního časového zpoždění na šířce spektrální čáry optického záření pro tři různé vysílací úhly. Závislost časového zpoždění na šířce spektrální čáry má lineární průběh, i zde vysílací úhel ovlivňuje strmost závislosti. Disperzní zpoždění je minimální pro vysoké vysílací úhly a úzké šířky spektrálních čar

laserového záření a vzrůstá při rozšiřování spektrální čáry a při snižování vysílacího úhlu β_1 .

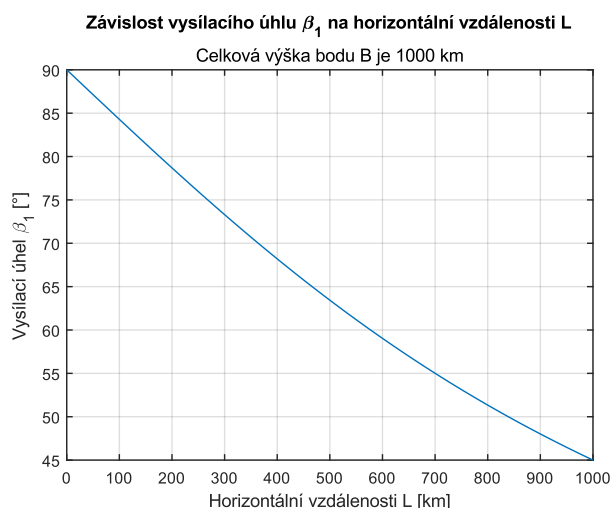
4.2.4 Závislost vysílacího úhlu β_1 na horizontální vzdálenosti L

V tomto případě byl model šíření laserového svazku atmosférou byl nastaven tak, aby bylo možné nastavovat horizontální vzdálenost L. Závislosti byly vygenerované pro tři různé celkové výšky komunikačního bodu B.



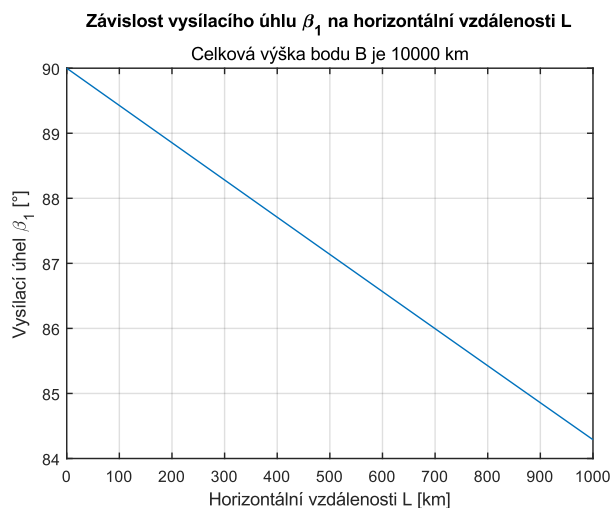
Obrázek 4.35 Závislost vysílacího úhlu na horizontální vzdálenosti L (celková výška bodu B 100 km)

Další obrázek 4.35 zobrazuje závislost vysílacího úhlu β_1 na horizontální vzdálenosti L od vysílacího bodu A. Celková výška bodu komunikačního bodu B byla nastavena na 100 km. Vlnová délka laserového zdroje byla nastavena na 1550 nm. Horizontální vzdálenost L komunikačního bodu B od vysílacího bodu A byla nastavována v rozmezí od 0 až po 1000 km. Ze zobrazené závislosti je patné že při nulové horizontální vzdálenosti L je vysílací úhel roven 90° , jedná se tedy o vertikální komunikaci mezi vysílacím a přijímacím bodem. V takovém případě se svazek šíří po přímé trase a na rozhraních mezi prostředími se neuplatňuje Snellův zákon. Při zvětšování horizontální vzdálenosti L se vysílací úhel β_1 relativně rychle snižuje. Při hodnotě horizontální vzdálenosti L 100 km a výšce komunikačního bodu 100 km je vysílací úhel β_1 roven $45,011^\circ$. Je tedy vyšší úhel než pro tento případ ideální vysílací úhel 45° .



Obrázek 4.36 Závislost vysílacího úhlu na horizontální vzdálenosti L (celková výška bodu B 1000 km)

Na obrázku 4.36 je zobrazená závislost vysílacího úhlu β_1 na horizontální vzdálenosti L komunikačního bodu B od vysílacího bodu A. Na rozdíl od předchozí závislosti je zde změněna celková výška komunikačního bodu B na 1000 km. Ze závislosti je opět patrné, že při nulové horizontální vzdálenosti je vysílací úhel roven 90° . V porovnání závislosti na obrázku 4.35 a 4.36 je vidět, že při stejné hodnotě horizontální vzdálenosti L 100 km je vysílací úhel rozdílný. Vypočtený vysílací úhel β_1 je $84,2897^\circ$ a ideální vysílací úhel je v tomto případě $84,2894^\circ$.



Obrázek 4.37 Závislost vysílacího úhlu na horizontální vzdálenosti L (celková výška bodu B 10000 km)

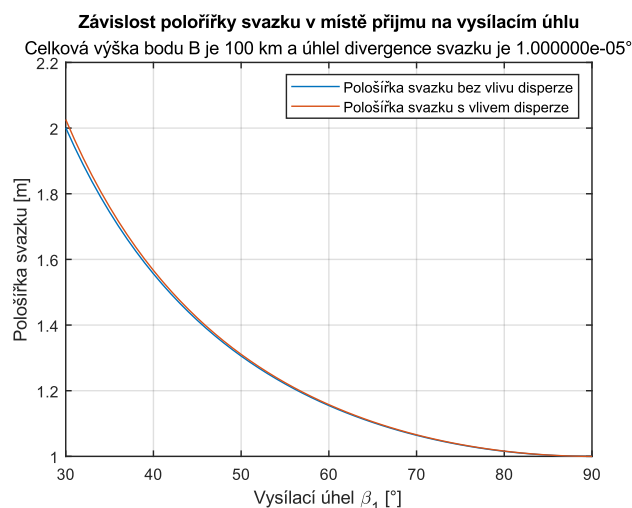
Další obrázek 4.37 zobrazuje doplňující závislost vysílacího úhlu β_1 na horizontální vzdálenosti L komunikačního bodu B od vysílacího bodu A. Celková výška komunikačního bodu B byla změněna na 10000 km. Ostatní parametry byly ponechány

stejně. Z uvedené závislosti je patrné, že při zvolené horizontální vzdálenosti L 100 km je vypočtený β_1 roven $89,427064^\circ$ a vysílací úhel roven $89,427061^\circ$.

Z porovnání závislostí na obrázcích 4.35, 4.36 a 4.37 lze stanovit, že se zvyšující se celkovou výškou komunikačního bodu B je závislost vysílacího úhlu na horizontální vzdálenosti L lineárnější, zároveň klesá odchylka mezi ideálním vysílacím úhlem a vypočteným vysílacím úhlem.

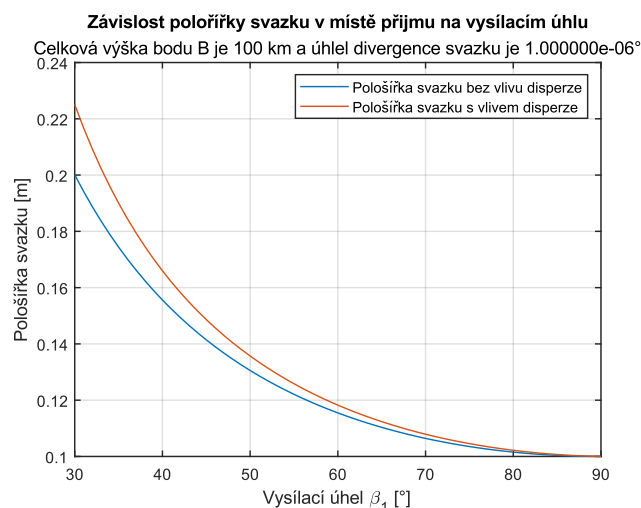
4.2.5 Závislosti pološířky laserového svazku v místě příjmu na vysílacím úhlu β_1

Pro vygenerování následujících závislostí byl model šíření laserového svazku atmosférou nastaven taky, aby při nastavování vysílacího úhlu v rozmezí od 30° až 90° byly zaznamenány pološířky svazku bez ohledu na optickou disperzi a s ohledem na optickou disperzi v atmosféře.



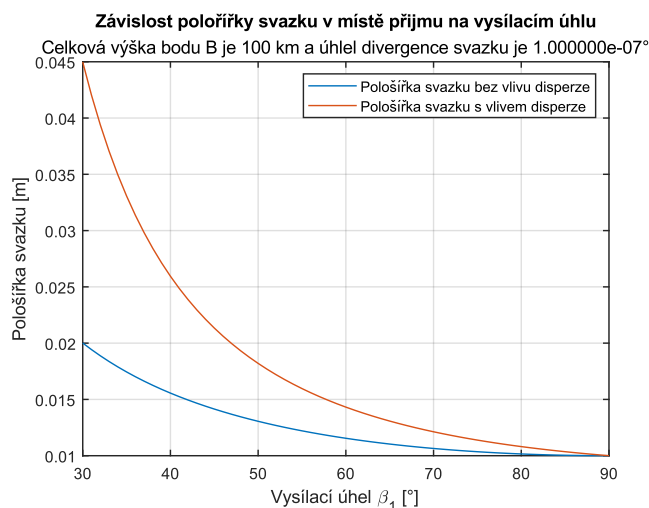
Obrázek 4.38 Závislost pološířky svazku na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km, $\theta = 0,00001^\circ$)

Na obrázku 4.38 je zobrazená závislost pološířky laserového svazku na vysílacím úhlu. Vlnová délka laserového zdroje byla nastavena na 1550 nm, celková výška komunikačního bodu B 100 km, úhel divergence θ byl nastaven na $0,00001^\circ$ a vysílací úhel β_1 byl nastavován v rozmezí 30° až 90° . Pro tuto hodnotu divergence svazku je podle závislosti pološířka svazku bez ohledu na optickou disperzi téměř stejná jako pološířka svazku s ohledem na optickou disperzi.



Obrázek 4.39 Závislost pološířky svazku na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km, $\theta = 0,000\,001^\circ$)

Obrázek 4.39 zobrazuje další závislost pološířky laserového svazku v místě příjmu na vysílacím úhlu. Nastavení modelu šíření laserového svazku atmosférou byla ponechána stejná až na hodnotu úhlu divergence θ , ten byl změněn na $0,000001^\circ$. Svazek byl tedy méně divergentní než v předchozím případě. Z uvedené závislosti vyplývá, že pro nižší vysílací úhly se více projeví optická disperze než pro vyšší vysílací úhly až při vertikální komunikaci mezi vysílacím bodem A a komunikačním bodem B.



Obrázek 4.40 Závislost pološířky svazku na vysílacím úhlu (celková výška bodu B 100 km, $\theta = 0,000\,000\,1^\circ$)

Následující křivky na obrázku 4.40 zobrazují doplňující závislost pološířky laserového svazku v místě příjmu na vysílacím úhlu. Pro tuto závislost byla opět změněna pouze hodnota úhlu divergence θ na $0,0000001^\circ$. Z uvedené závislosti opět vyplývá, že pro nižší vysílací úhly je rozdíl mezi pološířkou svazku bez ohledu na optickou disperzi

a pološířkou svazku s ohledem na optickou disperzi ještě výraznější než v předchozím případě.

Z porovnání závislostí na obrázcích 4.38, 4.39 a 4.40 vyplývá, že pološířka svazku s ohledem na optickou disperzi je závislá na vysílacím úhlu β_1 a úhlu divergence θ . Navíc lze stanovit, že pro méně divergentní svazky je optická disperze více výrazná než pro více divergentní svazky, kde se vliv optické disperze neprojeví tak výrazně a s přihlédnutím na velikost přijímací optiky lze zanedbat.

4.2.6 Simulace šíření laserového svazku v komunikaci loď – pobřežní maják

Model šíření laserového svazku atmosférou byl nadále použit pro simulaci šíření různých zdrojů a v různých situacích. Následující modelovaná situace může simulovat komunikaci z lodi na mořské hladině na pobřežní maják. K této modelové situaci byl vybrán Helium-Neon laser model N-LHR-925. Parametry takového laseru jsou následující:

- Vlnová délka $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
- Šířka spektrální čáry $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$
- Úhel divergence $\theta = 0,84 \text{ mrad} = 0,0481^\circ$
- Výkon laseru $P_L = 17 \text{ mW}$
- Průměr přijímací apertury $d_{RX} = 10 \text{ mm}$

Parametry komunikačního bodu B, tedy pobřežního majáku byly zvoleny následovně:

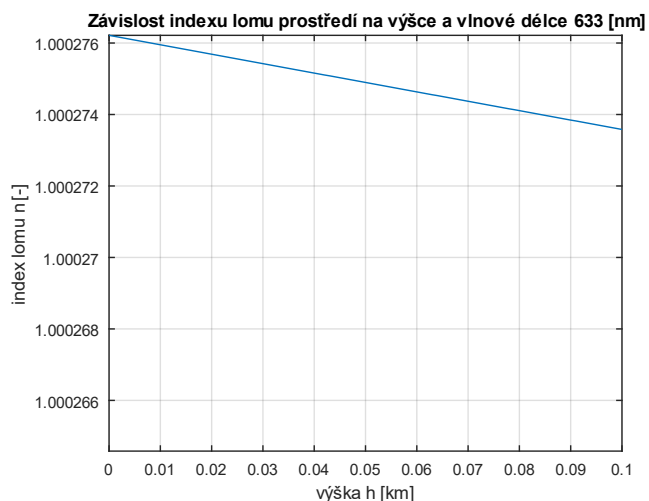
- Výška komunikačního bodu B, tedy výška pobřežního majáku $h_B = 100 \text{ m}$
- Horizontální vzdálenost komunikačního bodu B od vysílacího bodu A, tedy vzdálenost lodi od pobřeží $L = 5 \text{ km}$
- Počet vrstev výškového rozdělení byl nastaven na 20

Tyto hodnoty byly zapsány do modelu šíření laserového svazku atmosférickým prostředím a model byl zpuštěn.

```
%% Vstupní hodnoty
L = 5000; %horizontální vzdálenost bodu B od bodu A [m]
hB = 100; %výška bodu B [m]
pocet_vrstev = 20;
A = [0,0]; %bod A
B = [L,hB]; %bod B

lambda = 632.8*1e-9; %vlnová délka lambda [m]
delta_lambda = 20*1e-9; %šířka spektrální čáry [m]
uhel_divergence = rad2deg(0.84/1000); %úhel divergence [°]
P_laser = 17*1e-3; %výkon laseru v [W]
prumer_RX = 10*1e-3; %průměr přijímací apertury v [m]
```

Nejprve se v rámci výpočtu modelu vypočte rozložení výškových hladin a vytvoří se vektor h_vekt . A pomocí funkce `func_edlen_g` je vytvořen vektor hodnot indexu lomu a grafická profil indexu lomu v atmosféře.



Obrázek 4.41 Profil indexu lomu pro vlnovou délku 633 nm do výšky 100 m

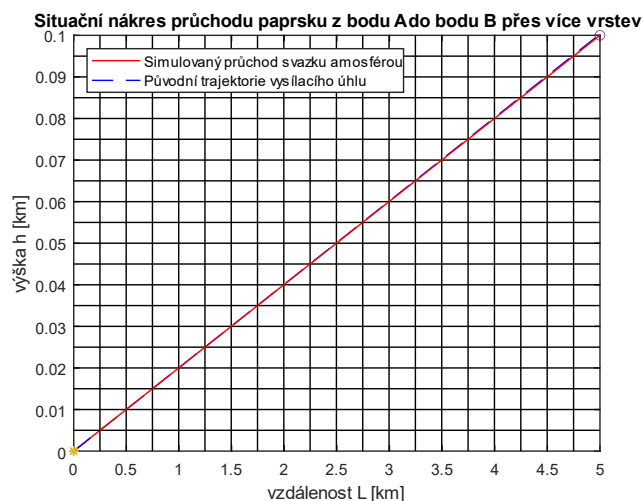
Na obrázku 4.41 je zobrazen profil indexu lomu pro vlnou délku 633 nm do výšky komunikačního bodu B 100 m. Z profilu je vidět, že index lomu prostředí klesá s rostoucí výškou od hodnoty 1,0002762 do 1,0002737.

Dále je v bloku výpočtu vysílacího úhlu vypočten vhodný vysílací úhel β_1 a ideální vysílací úhel β_{ideal} . Pro tuto modelovou situaci jsou hodnoty zmíněných úhlů následující.

Tabulka 4.1 Vysílací úhly v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják

Ideální vysílací úhel β_{ideal} [°]	1,1458
Vypočtený vysílací úhel β_1 [°]	1,1494

Následně je vykreslena trasa šíření laserového svazku z vysílacího bodu na lodi na přijímací bod na pobřežním majáku.



Obrázek 4.42 Vysílací trajektorie a skutečná trasa laserového svazku atmosférickým prostředím (modelová situace komunikace loď – pobřežní maják)

Na obrázku 4.42 je zobrazená červenou křivkou skutečná trasa laserového svazku mezi vysílacím a přijímacím bodem. Modře je zobrazená původní vysílací trajektorie, tedy stav šíření laserového svazku homogenní atmosférou vyslaným pod úhlem β_1 . Vysílací úhel je velice nízký a kvůli tomu dochází ke zřetelnému odchýlení skutečné trasy šíření laserového svazku od původní trajektorie.

Dále blokem výpočtu vysílacího času a vzdálenosti jsou vypočteny ideální a vypočtený čas šíření a ideální a vypočtený vysílací vzdálenosti.

Tabulka 4.2 Vysílací časy a vzdálenosti v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják

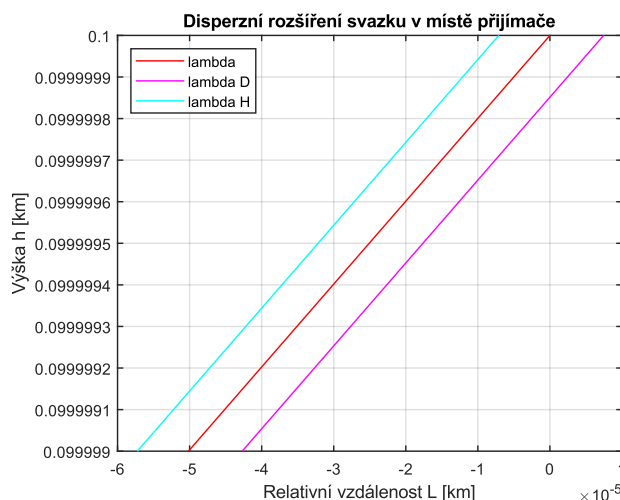
Ideální vysílací čas [μs]	16,682
Vypočtený vysílací čas [μs]	16,686
Ideální vysílací vzdálenost [km]	5,000999900
Vypočtená vysílací vzdálenost [km]	5,000999904

V bloku prostorové disperze podle šířky spektrální čáry, vypočteného vysílacího úhlu a dalších hodnot vypočteno disperzní prostorové rozšíření svazku v místě přijímače. V bloku časové disperze je vypočteno časové zpoždění způsobené optickou disperzí v atmosféře. Následující tabulka 4.3 uvádí numerické hodnoty disperzního prostorového rozšíření svazku a časové disperzní zpoždění.

Tabulka 4.3 Disperzní rozšíření a časové zpoždění svazku v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják

Disperzní rozšíření laserového svazku [m]	0,0146
Disperzní časové zpoždění [ps]	52,746

Dále jsou blokem vykreslení prostorové disperze zobrazena rozdílná místa dopadu okrajových vlnových délek laserového svazku.

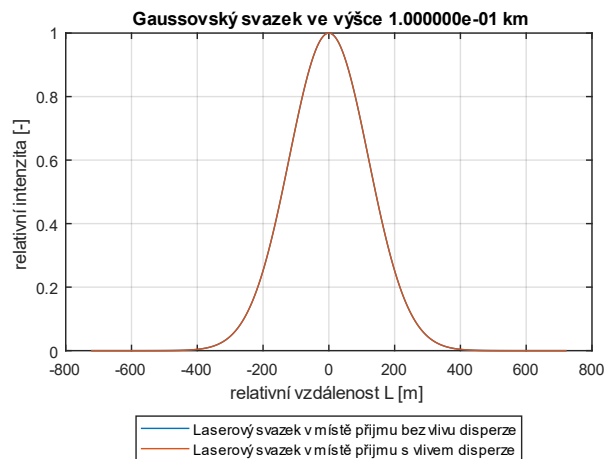


Obrázek 4.43 Průběhy střední a okrajových vlnových délek laserového svazku (výška bodu B 100 m)

Předposledním blokem modelu šíření laserového svazku atmosférou, tedy blokem divergence svazku byla podle divergence a disperzním rozšířením laserového svazku spočítána pološířka svazku v místě přijímače s ohledem na optickou disperzi a bez ohledu na optickou disperzi.

Tabulka 4.4 Pološířky svazku v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják

Pološířka svazku bez ohledu na disperzi p_B [m]	240,876
Pološířka svazku s ohledem na disperzi p_{disp} [m]	240,884



Obrázek 4.44 Porovnání podoby svazků bez a s vlivem optické disperze (výška bodu B 100 m)

Z tabulky 4.4 je vidět že pološířky svazku jsou relativně široké. Je to dáno poměrně velkou hodnotou úhlu divergence θ . Právě díky hodnotě úhlu divergence a poměrně nízké výšce bodu komunikačního bodu B a tím spojené poměrně malému vlivu optické disperze je pološířka svazku s ohledem na optickou disperzi srovnatelná s pološířkou svazku bez ohledu na optickou disperzi. Tento stav je vidět i na obrázku 4.44, kde se obě křivky Gaussovských svazků překrývají.

V posledním bloku útlumu šířením je vypočítán z výkonu laseru a průměru přijímací apertury útlum šířením.

Tabulka 4.5 Hodnoty výkonů laserového záření v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják

Výkon laseru P_L [mW]	17
Výkon laseru P_{LdBm} [dBm]	24,609
Přijatý výkon P_{RX} [mW]	0,000000007324
Přijatý výkon P_{RXdBm} [dBm]	-162,705
Útlum šířením α_{TRdB} [dB]	187,314

Z tabulky 4.5 je vidět, že díky velké hodnotě úhlu divergence θ , při této modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják, dochází k velkému útlumu šířením laserového svazku atmosférou. Originální úhel divergence laseru lze upravit vhodnou optikou ve vysílací aparatuře.

Tato stejná modelová situace s upraveným úhlem divergence na novou hodnotu $\theta = 0,0001^\circ$ byla simulována znova. Tabulka 4.6 uvádí nové hodnoty přijatého výkonu a útlumu šířením.

Tabulka 4.6 Hodnoty výkonů laserového záření v modelové situaci komunikace loď – pobřežní maják s upraveným úhlem divergence $\theta = 0,0001^\circ$

Výkon laseru P_L [mW]	17
Výkon laseru P_{LdBm} [dBm]	24,609
Přijatý výkon P_{RX} [mW]	0,001651
Přijatý výkon P_{RXdBm} [dBm]	-55,645
Útlum šířením α_{TRdB} [dB]	80,254

Jak je možné vidět z porovnání hodnot útlumu šířením v tabulkách 4.5 a 4.6, hodnotou úhlu divergence lze ve značné míře ovlivnit množství přijatého výkonu laserového záření.

4.2.7 Simulace šíření laserového svazku v komunikaci pozemní stanice – letadlo

Pro simulaci komunikace mezi pozemní stanicí a dopravním letadlem byl vybrán jako zdroj laserového svazku laserová dioda THORLABS L850P030. Parametry takového zdroje záření jsou následující:

- Vlnová délka $\lambda = 850$ nm
- Šířka spektrální čáry $\Delta\lambda = 20$ nm
- Úhel divergence $\theta = 1,745$ $\mu\text{rad} = 0,0001^\circ$
- Výkon laseru $P_L = 30$ mW
- Průměr přijímací apertury $d_{RX} = 50$ mm

Parametry komunikačního bodu B, tedy dopravního letadla byly zvoleny následovně:

- Výška komunikačního bodu B, tedy výška dopravního letadla $h_B = 10$ km
- Horizontální vzdálenost $L = 1$ km komunikačního bodu B od vysílacího bodu A
- Počet vrstev výškového rozdělení byl nastaven na 20

Tyto hodnoty byly zapsány do modelu šíření laserového svazku atmosférickým prostředím a model byl zpuštěn.

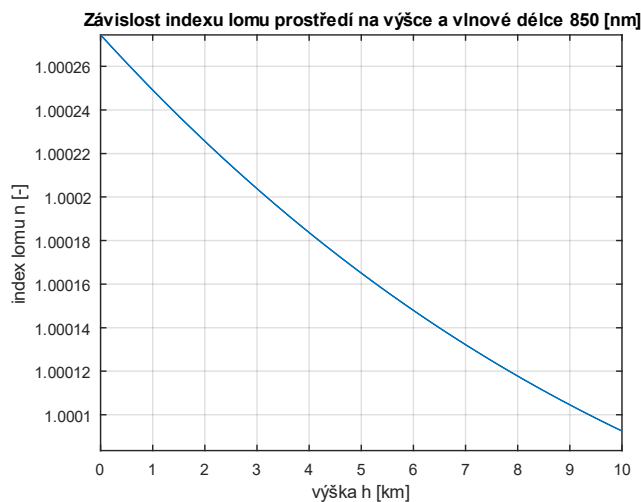
```

%% Vstupní hodnoty
L = 1000; %horizontální vzdálenost bodu B od bodu A [m]
hB = 10000; %výška bodu B [m]
pocet_vrstev = 20;
A = [0,0]; %bod A
B = [L,hB]; %bod B

lambda = 850*1e-9; %vlnová délka lambda [m]
delta_lambda = 20*1e-9; %šířka spektrální čáry [m]
uhel_divergence = 0.0001; %úhel divergence [°]
P_laser = 30*1e-3; %výkon laseru v [W]
prumer_RX = 50*1e-3; %průměr přijímací apertury v [m]

```

Nejprve se v rámci výpočtu modelu vypočte rozložení výškových hladin a vytvoří se vektor h_vekt . A pomocí funkce `func_edlen_g` je vytvořen vektor hodnot indexu lomu a grafická profil indexu lomu v atmosféře.



Obrázek 4.45 Profil indexu lomu pro vlnovou délku 850 nm do výšky 10 km

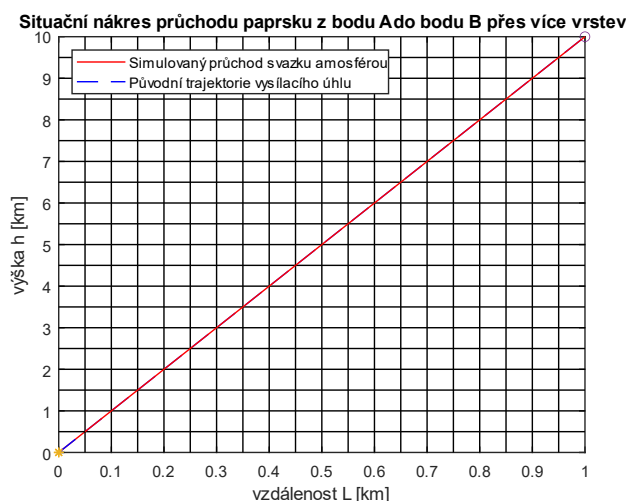
Na obrázku 4.45 je zobrazen profil indexu lomu pro vlnou délku 850 nm do výšky komunikačního bodu B 10 km. Z profilu je vidět, že index lomu prostředí klesá s rostoucí výškou od hodnoty 1,0002762 do 1,00009255.

Dále je v bloku výpočtu vysílacího úhlu vypočten vhodný vysílací úhel β_1 a ideální vysílací úhel β_{ideal} . Pro tuto modelovou situaci jsou hodnoty zmíněných úhlů v následující tabulce 4.7.

Tabulka 4.7 Vysílací úhly v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo

Ideální vysílací úhel β_{ideal} [°]	84,28941
Vypočtený vysílací úhel β_1 [°]	84,28996

Následně je vykreslena trasa šíření laserového svazku z vysílacího bodu na zemi na přijímací bod na spodní části trupu dopravního letadla.



Obrázek 4.46 Vysílací trajektorie a skutečná trasa laserového svazku atmosférickým prostředím (modelová situace komunikace zem – dopravní letadlo)

Na obrázku 4.46 je zobrazená červenou křivkou skutečná trasa laserového svazku mezi vysílacím a přijímacím bodem. Modře je zobrazená původní vysílací trajektorie, tedy stav šíření laserového svazku homogenní atmosférou vyslaným pod úhlem β_1 . Vysílací úhle je vyšší než 80° , je téměř stejný jako ideální vysílací úhel. Původní trajektorie a vypočtené šíření laserového svazku se téměř přerývají.

Dále blokem výpočtu vysílacího času a vzdálenosti jsou vypočteny ideální a vypočtený časy šíření a ideální a vypočtený vysílací vzdálenosti.

Tabulka 4.8 Vysílací časy a vzdálenosti v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo

Ideální vysílací čas [μs]	33,522777
Vypočtený vysílací čas [μs]	33,531760
Ideální vysílací vzdálenost [km]	10,0498756211
Vypočtená vysílací vzdálenost [km]	10,0498756213

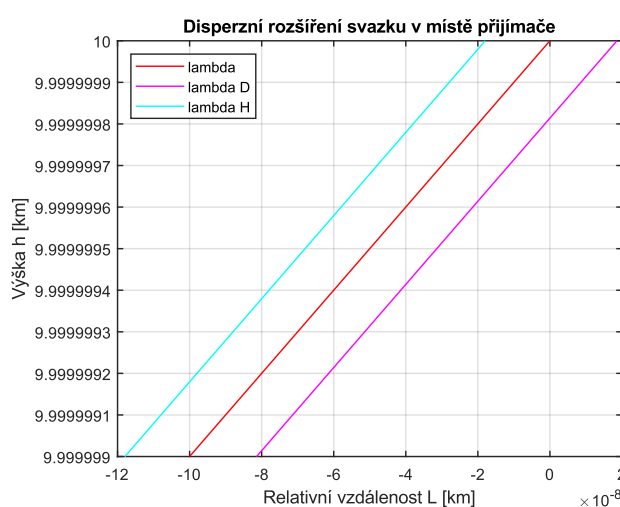
V bloku prostorové disperze je podle šířky spektrální čáry, vypočteného vysílacího úhlu a dalších hodnot vypočteno disperzní prostorové rozšíření svazku v místě přijímače. V bloku časové disperze je vypočteno časové zpoždění způsobené optickou disperzí v atmosféře. Následující tabulka 4.9 uvádí numerické hodnoty disperzního prostorového rozšíření svazku a časové disperzní zpoždění. Jelikož se v této modelové situaci jedná o

komunikaci v téměř vertikálním směru, tak jsou hodnoty disperzního rozšíření svazku minimální ve srovnání s modelovou situací komunikace loď – pobřežní maják.

Tabulka 4.9 Disperzní rozšíření a časové zpoždění svazku v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo

Disperzní rozšíření laserového svazku [μm]	36,563
Disperzní časové zpoždění [ps]	2,149

Dále jsou blokem vykreslení prostorové disperze zobrazena rozdílná místa dopadu okrajových vlnových délek laserového svazku.

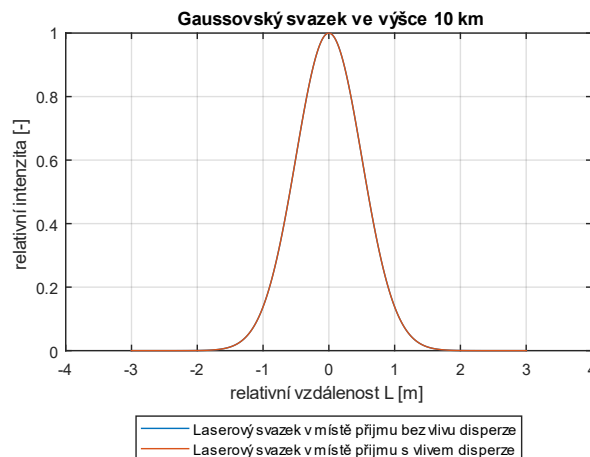


Obrázek 4.47 Průběhy střední a okrajových vlnových délek laserového svazku (výška bodu B 10 km)

Předposledním blokem modelu šíření laserového svazku atmosférou, tedy blokem divergence svazku byla podle divergence a disperzním rozšířením laserového svazku spočítána pološířka svazku v místě přijímače s ohledem na optickou disperzi a bez ohledu na optickou disperzi.

Tabulka 4.10 Pološířky svazku v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo

Pološířka svazku bez ohledu na disperzi p_B [m]	1,004988
Pološířka svazku s ohledem na disperzi p_{disp} [m]	1,005006



Obrázek 4.48 Porovnání podoby svazků bez a s vlivem optické disperze (výška bodu B 10 km)

Z tabulky 4.10 je vidět, že pološířky svazku díky malému disperznímu rozšíření a relativně malému úhlu divergence θ jsou téměř stejné. Rozdíl hodnot pološířek laserového svazku je 18 μm . Blízkost hodnot pološířek svazku je vidět i na obrázku 4.48, kde se obě křivky Gaussovských svazků překrývají.

V posledním bloku útlumu šířením je vypočítán z výkonu laseru a průměru přijímací apertury útlum šířením.

Tabulka 4.11 Hodnoty výkonů laserového záření v modelové situaci komunikace zem – dopravní letadlo

Výkon laseru P_L [mW]	30
Výkon laseru $P_{L\text{dBm}}$ [dBm]	29,542
Přijatý výkon P_{RX} [mW]	0,018564
Přijatý výkon $P_{RX\text{dBm}}$ [dBm]	-34,627
Útlum šířením α_{TRdB} [dB]	64,169

Z tabulky 4.11 je vidět, že díky relativně malému vlivu optické disperze na vyslaný svazek a vhodně zvoleném úhlu divergence svazku, který zaručuje vysílací optika, je útlum šířením, s ohledem na překonanou vzdálenost, poměrně nízký.

Pro modelovou situaci komunikace zem – dopravní letadlo se však musí počítat vysokou rychlostí a tím s nutností kontinuálně nastavovat vysílací úhel.

4.2.8 Simulace šíření laserového svazku v komunikaci pozemní stanice – družice

Model šíření laserového svazku byl nastaven podle modelové situace komunikace zem – družice na střední oběžné dráze MEO. Pro takovou komunikaci byla jako zdroj laserového záření laserová dioda THORLABS FPL1009S. Parametry této laserové diody jsou následující:

- Vlnová délka $\lambda = 1550 \text{ nm}$
- Šířka spektrální čáry $\Delta\lambda = 40 \text{ nm}$
- Úhel divergence $\theta = 0,1745 \text{ } \mu\text{rad} = 0,00001^\circ$
- Výkon laseru $P_L = 100 \text{ mW}$
- Průměr přijímací apertury $d_{RX} = 100 \text{ mm}$

Parametry komunikačního bodu B byly zvoleny následovně:

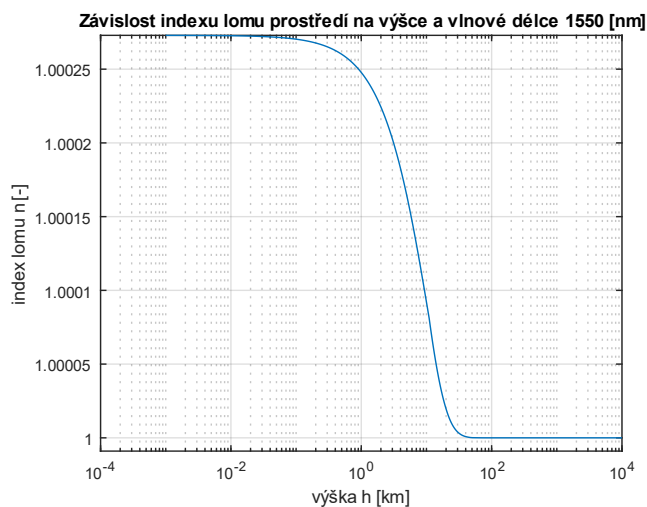
- Výška komunikačního bodu B, tedy výška družice $h_B = 10\,000 \text{ km}$
- Horizontální vzdálenost $L = 50 \text{ km}$ komunikačního bodu B od vysílacího bodu A
- Počet vrstev výškového rozdělení byl nastaven na 20

Tyto hodnoty byly zapsány do modelu šíření laserového svazku atmosférickým prostředím a model byl zpuštěn.

```
%% Vstupní hodnoty
L = 50000;                %horizontální vzdálenost bodu B od bodu A [m]
hB = 10000000;           %výška bodu B [m]
pocet_vrstev = 20;
A = [0,0];               %bod A
B = [L,hB];              %bod B

lambda = 1550*1e-9;      %vlnová délka lambda [m]
delta_lambda = 40*1e-9;  %šířka spektrální čáry [m]
uhel_divergence = 0.00001; %úhel divergence [°]
P_laser = 100*1e-3;      %výkon laseru v [W]
prumer_RX = 100*1e-3;    %průměr přijímací apertury v [m]
```

Nejprve se v rámci výpočtu modelu vypočte rozložení výškových hladin a vytvoří se vektor `h_vekt`. A pomocí funkce `func_edlen_g` je vytvořen vektor hodnot indexu lomu a grafická profil indexu lomu v atmosféře.



Obrázek 4.49 Profil indexu lomu pro vlnovou délku 1550 nm do výšky 10 000 km

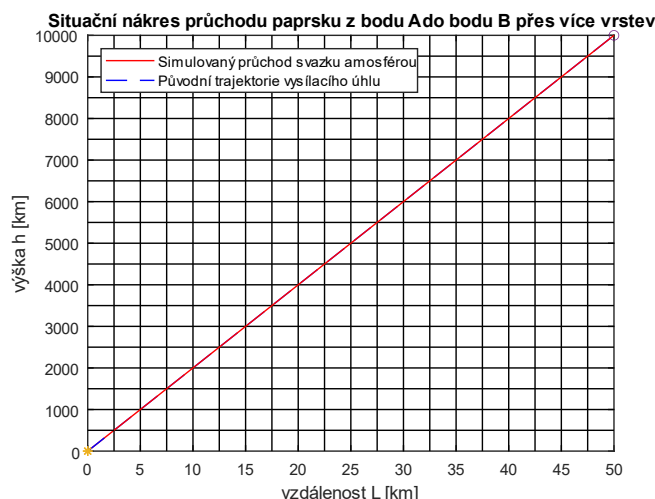
Na obrázku 4.49 je zobrazen profil indexu lomu pro vlnu délku 1550 nm do výšky komunikačního bodu B 10 000 km. Z profilu je vidět, že index lomu prostředí klesá s rostoucí výškou od hodnoty 1,0002762 na hodnotu 1.

Dále je v bloku výpočtu vysílacího úhlu vypočten vhodný vysílací úhel β_1 a ideální vysílací úhel β_{ideal} . Pro tuto modelovou situaci jsou hodnoty zmíněných úhlů v následující tabulce 4.12.

Tabulka 4.12 Vysílací úhly v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO

Ideální vysílací úhel β_{ideal} [°]	89,713525
Vypočtený vysílací úhel β_1 [°]	89,713524

Následně je vykreslena trasa šíření laserového svazku z vysílacího bodu na zemi na přijímací bod na spodní části trupu dopravního letadla.



Obrázek 4.50 Vysílací trajektorie a skutečná trasa laserového svazku atmosférickým prostředím (modelová situace komunikace zem – dopravní letadlo)

Na obrázku 4.50 je zobrazená červenou křivkou skutečná trasa laserového svazku mezi vysílacím a přijímacím bodem. Modře je zobrazená původní vysílací trajektorie, tedy stav šíření laserového svazku homogenní atmosférou vyslaným pod úhlem β_1 . Vysílací úhle je téměř roven 90° a je téměř stejný jako ideální vysílací úhel. Původní trajektorie a vypočtené šíření laserového svazku se přerývají.

Dále blokem výpočtu vysílacího času a vzdálenosti jsou vypočteny ideální a vypočtený čas šíření a ideální a vypočtený vysílací vzdálenosti. V tabulce 4.13 jsou uvedeny ideální a vypočtené vysílací časy a ideální a vypočtené vysílací vzdálenosti. Hodnoty časů jsou rozdílné o 150 ns. Hodnoty vysílacích vzdáleností jsou rozdílné tak malou měrou, že je MATLAB neumožní zaznamenat, jsou tedy považovány za stejné.

Tabulka 4.13 Vysílací časy a vzdálenosti v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO

Ideální vysílací čas [s]	0,033 356 83
Vypočtený vysílací čas [s]	0,03335698
Ideální vysílací vzdálenost [km]	10000,12499921876
Vypočtená vysílací vzdálenost [km]	10000,12499921876

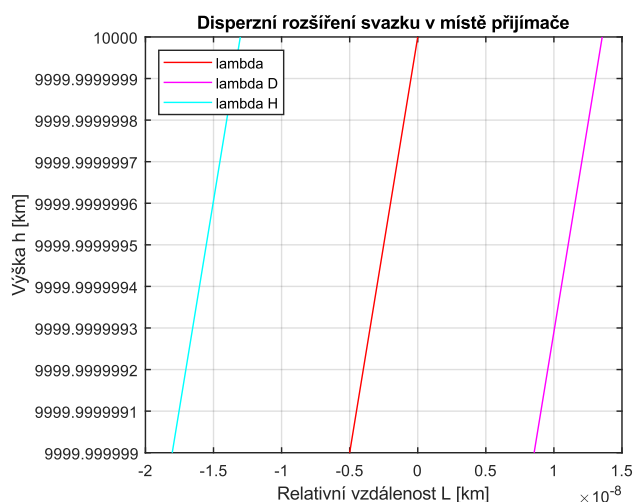
V bloku prostorové disperze je podle šířky spektrální čáry, vypočteného vysílacího úhlu a dalších hodnot vypočteno disperzní prostorové rozšíření svazku v místě přijímače. V bloku časové disperze je vypočteno časové zpoždění způsobené optickou disperzí v atmosféře. Následující tabulka 4.14 uvádí numerické hodnoty disperzního prostorového

rozšíření svazku a časové disperzní zpoždění. Jelikož se v této modelové situaci jedná o komunikaci v téměř vertikálním směru, tak jsou hodnoty disperzního rozšíření svazku minimální ve srovnání s modelovou situací komunikace loď – pobřežní maják.

Tabulka 4.14 Disperzní rozšíření a časové zpoždění svazku v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO

Disperzní rozšíření laserového svazku [μm]	26,579
Disperzní časové zpoždění [ps]	0,934

Dále jsou blokem vykreslení prostorové disperze zobrazena rozdílná místa dopadu okrajových vlnových délek laserového svazku.



Obrázek 4.51 Průběhy střední a okrajových vlnových délek laserového svazku (výška bodu B 10 000 km)

Předposledním blokem modelu šíření laserového svazku atmosférou, tedy blokem divergence svazku byla podle divergence a disperzním rozšířením laserového svazku spočítána pološířka svazku v místě přijímače s ohledem na optickou disperzi a bez ohledu na optickou disperzi.

Tabulka 4.15 Pološířky svazku v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO

Pološířka svazku bez ohledu na disperzi p_B [m]	100,001250
Pološířka svazku s ohledem na disperzi p_{disp} [m]	100,001263



Obrázek 4.52 Porovnání podoby svazků bez a s vlivem optické disperze (výška bodu B 10 000 km)

Z tabulky 4.15 je vidět, že pološířky svazku díky malému disperznímu rozšíření a relativně malému úhlu divergence θ jsou téměř stejné. Rozdíl hodnot pološířek laserového svazku je 13 μm . Blízkost hodnot pološířek svazku je vidět i na obrázku 4.52, kde se obě křivky Gaussovských svazků překrývají. Avšak kvůli vysoké vysílací vzdálenosti je absolutní hodnota pološířek relativně vysoká.

V posledním bloku útlumu šířením je vypočítán z výkonu laseru a průměru přijímací apertury útlum šířením.

Tabulka 4.16 Hodnoty výkonů laserového záření v modelové situaci komunikace zem – družice na MEO

Výkon laseru P_L [mW]	100
Výkon laseru $P_{L\text{dBm}}$ [dBm]	40
Přijatý výkon P_{RX} [mW]	0,000024999368
Přijatý výkon $P_{RX\text{dBm}}$ [dBm]	-92,041
Útlum šířením α_{TRdB} [dB]	132,041

Z tabulky 4.16 je vidět důsledek vysoké hodnoty pološířky svazku s ohledem na optickou disperzi. Ačkoliv je vysílaný optický výkon vysoký, kvůli celkové šířce svazku v místě příjmu, je přijímací aperturou přijata pouze část vyslaného optického výkonu.

4.2.9 Simulace šíření laserového svazku pod různými úhly

Do modelu šíření laserového svazku atmosférou byl zadán zdroj optického záření a dále byly modelovány pro různé vysílací úhly od 30° do 90°. Parametry této laserové diody jsou následující:

- Vlnová délka $\lambda = 1550$ nm
- Šířka spektrální čáry $\Delta\lambda = 5$ nm
- Úhel divergence $\theta = 0,1745$ $\mu\text{rad} = 0,00001^\circ$
- Výkon laseru $P_L = 100$ mW
- Průměr přijímací apertury $d_{RX} = 100$ mm

Parametry komunikačního bodu B byly zvoleny následovně:

- Výška komunikačního bodu B, tedy výška družice $h_B = 10\,000$ km
- Počet vrstev výškového rozdělení byl nastaven na 20

Tyto hodnoty byly zapsány do modelu šíření laserového svazku atmosférickým prostředím a model byl postupně zpuštěn pro vybrané úhly. Sledované parametry jsou uvedené v tabulce 4.17. Z tabulky je vidět, že při vertikální komunikaci s vysílacím úhlem $\beta_1 = 90^\circ$ se vypočtená vysílací vzdálenost rovná výšce komunikačního bodu B, disperzní časové zpoždění je 86 tisícín pikosekund, disperzní rozšíření je minimální. S klesajícím vysílacím úhlem se vysílací vzdálenost prodlužuje, disperzní zpoždění zvyšuje a disperzní rozšíření také prodlužuje. Pro vysílací úhel $\beta_1 = 30^\circ$ je hodnota vysílací vzdálenosti více než dvojnásobná oproti vertikální komunikaci, více než dvojnásobný je i vysílací čas. Naopak disperzní časové zpoždění zvýší svoji hodnotu více než pětkrát než při vertikální komunikaci a zvýšení hodnoty disperzního rozšíření je ještě výraznější oproti hodnotě při vertikální komunikaci.

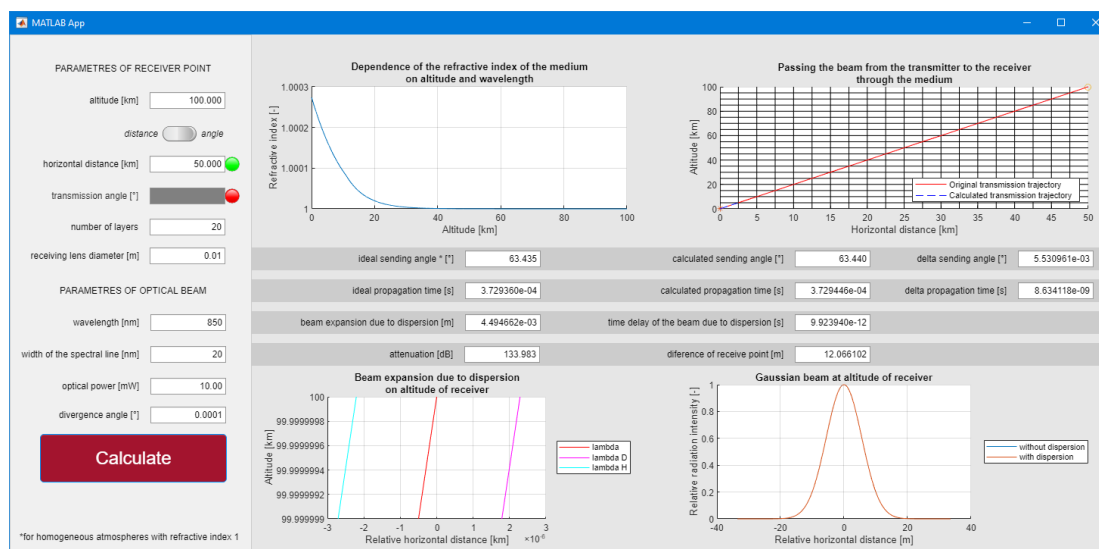
```
%% Vstupní hodnoty
vysilaci_uhel = <90 - 30>;           %vysílací úhel [°]
hB = 10 * 1000;                      %výška bodu B [m]
pocet_vrstev = 20;
A = [0,0];                           %bod A
prumer_RX = 100*1e-3;                %průměr přijímací apertury v [m]

lambda = 1550*1e-9;                  %vlnová délka lambda [m]
delta_lambda = 5*1e-9;               %šířka spektrální čáry [m]
uhel_divergence = 0.00001;           %úhel divergence [°]
P_laser = 100*1e-3;                  %výkon laseru v [W]
```

Tabulka 4.17 Srovnání hodnot šíření stejného zdroje pod různými úhly

Vysílací úhel β_1 [°]	Vypočtený vysílací čas [μs]	Vypočtená vysílací vzdálenost [km]	Disperzní časové zpoždění [ps]	Disperzní rozšíření laserového svazku [μm]
90	33,362	10	0,086112	0,0000000000000003
80	33,877	10,154297	0,088985	2,666072
70	35,504	10,641913	0,098537	6,044586
60	38,525	11,547376	0,118271	11,289711
50	43,554	13,054957	0,157399	20,973488
40	51,909	15,559365	0,242146	42,318714
30	66,744	20,005776	0,466155	101,7086

4.3 Grafická varianta modelu šíření laserového svazku



Obrázek 4.53 Grafická varianta modelu šíření laserového svazku atmosférou

Jak již bylo zmíněno, grafická verze modelu šíření laserového svazku atmosférou byla vytvořena v prostředí App Designer od MATLAB. Toto prostředí dovoluje použít výpočetní funkce představené výše. Ovšem grafické funkce a grafické části výpočetních funkcí není možné v programu pro grafické prostředí použít, kvůli jinému způsobu

zobrazování grafů. Grafické výstupy byly tedy naprogramovány přímo v hlavním kódu grafického programu.

Na obrázku 4.53 je zobrazená podoba grafického okna po doběhu výpočtu. Vlevo je vidět část kde se zadávají vstupní hodnoty. Tato část je shora rozdělena na parametry komunikačního bodu (*Parameters of receiver point*), níže parametry optického svazku (*Parameters of optical beam*) a nejnižší je velké tlačítko Výpočet (*Calculate*). Uživatel po zpuštění nebo po ukončení předešlého výpočtu zadá požadované parametry komunikačního bodu a laserového svazku v požadovaných jednotkách, které jsou uvedeny u zadávacího pole. Výpočet se zpusť kliknutím na tlačítko *Calculate*. Detailní pohled na zadávací část zobrazuje obrázek 4.54.

The image shows a software interface for inputting parameters. It is divided into two main sections: 'PARAMETRES OF RECEIVER POINT' and 'PARAMETRES OF OPTICAL BEAM'. The first section includes fields for altitude [km] (100.000), a toggle switch for distance or angle (set to distance), horizontal distance [km] (50.000 with a green indicator), transmission angle [°] (with a red indicator), number of layers (20), and receiving lens diameter [m] (0.01). The second section includes fields for wavelength [nm] (850), width of the spectral line [nm] (20), optical power [mW] (10.00), and divergence angle [°] (0.0001). At the bottom is a large red 'Calculate' button.

PARAMETRES OF RECEIVER POINT	
altitude [km]	100.000
distance ☒ angle ☐	
horizontal distance [km]	50.000 ●
transmission angle [°]	●
number of layers	20
receiving lens diameter [m]	0.01
PARAMETRES OF OPTICAL BEAM	
wavelength [nm]	850
width of the spectral line [nm]	20
optical power [mW]	10.00
divergence angle [°]	0.0001
Calculate	

Obrázek 4.54 Detailní pohled na zadávací pole vstupních hodnot (výřez)

Parametry přijímacího bodu jsou zadávány následovně:

- Výška komunikačního bodu B nad mořem
- Přepínač (*distance or angle*) dvou módů výpočetních módů modelu šíření laserového svazku atmosférou. Po zpuštění programu je přepínač standartně nastaven do prvního módu zadávání parametrů komunikačního bodu B (přepínač je na možnosti *distance*). V takovém případě je možné zadat horizontální vzdálenost bodu B od vysílacího bodu A, zadávací pole je bílé a barevná signalizace vedle zadávacího pole má zelenou barvu. Naopak pole pro zadání vysílacího úhlu je v při této poloze přepínače zašedlé a barevná signalizace vedle má červenou barvu

- V případně přepnutí přepínače na polohu *angle* má zadávací pole pro zvolený vysílací úhel bílé pozadí a barevná signalizace se změní na zelenou. Naopak zadávací pole pro horizontální vzdálenost zašedne a jeho barevná signalizace se změní na červenou
- Hodnota počtu vrstev (10 nebo 20), pro vytvoření výškového rozložení
- Průměr přijímací apertury, tato hodnota je použita pro pozdější stanovení útlumu šířením.

Parametry optického svazku jsou zadávány následovně:

- Vlnová délka optického záření v nanometrech pro stanovení profilu spektrálně závislého indexu lomu v atmosféře
- Šířka spektrální čáry v nanometrech pro výpočty vlivu optické disperze na šířící se svazek atmosférou Země
- Optický výkon záření v miliwattech pro stanovení útlumu šířením
- Úhel divergence záření nebo po úpravě vysílací aperturou ve stupních

Po kliknutí na tlačítko Výpočet (*Calculate*) se spustí callback funkce tlačítka, která odpovídá vývojovému diagramu na obrázku 4.1 a postupuje podle popsaných bloků (kapitoly 4.1.1 až 4.1.11). Výstupní numerické hodnoty a grafické výstupy modelu šíření laserového svazku atmosférou jsou zobrazeny ve střední a pravé části okna programu.

První grafickou závislostí v modelu zleva a shora je Profil indexu lomu prostředí v atmosféře pro zvolenou vlnou délku laserového záření (kapitola 4.1.3). Vedle vpravo je Simulace trasy laserového svazku atmosférou (kapitoly 4.1.4 a 4.1.5).

Mezi grafickými výstupy jsou čtyři řádky s numerickými výsledky. Nachází se zde ideální a vypočtený vysílací úhel a porovnání mezi nimi (kapitola 4.1.4). O řádek níže se nachází výsledky ideálního a vypočteného času šíření a rozdíl mezi nimi (kapitola 4.1.6). Poté následuje řádek věnovaný číselným výsledkům disperze. Je zde uvedeno výsledné disperzní rozšíření v místě přijímače v metrech a časové zpoždění způsobené disperzí v sekundách (kapitoly 4.1.7 a 4.1.9). V posledním řádku numerických výsledků je celkový útlum šířením v decibelech (kapitola 4.1.11) a rozdíl mezi dopadem svazku vyslaným ideálním vysílacím úhlem a skutečným místem příjmu.

Ve spodní části výstupních dat jsou zobrazeny dva grafické výstupy. Levý zobrazuje detailní pohled na disperzi svazku v místě přijímače. Jsou zde zobrazeny tři čáry, jedna pro horní okrajovou vlnou délku, další pro střední vlnou délku a poslední pro dolní okrajovou vlnou délku svazku (kapitola 4.1.8). Posledním grafickým výstupem je podoba Gaussovského svazku v místě příjmu zobrazené bez ohledu na optickou disperzi a s ohledem na optickou disperzi (4.1.10).

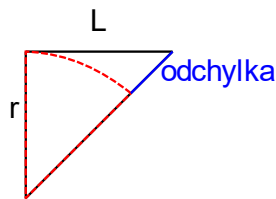
4.4 Hodnocení modelu

Model šíření laserového svazku atmosférou ve vertikálním a šikmém směru není platný pro neomezené parametry komunikačního bodu B a optického zdroje. Vlnová délka λ optického svazku je omezena platností Edlénovy metody výpočtu spektrálně závislého indexu lomu [11] (kapitola 2.2). Omezení vlnové délky je v intervalu od 300 nm do 1700 nm. Tento interval platí i pro okrajové vlnové délky laserového svazku. Je tedy nutné střední vlnovou délku záření volit tak, aby se při započítání šířky spektrální čáry, všechny spektrální složky byly uvnitř intervalu platnosti Edlénovy metody výpočtu spektrálně závislého indexu lomu.

Minimální výška nad mořem komunikačního bodu B je 100 m, je to dáno výpočty v rámci bloku výškového rozložení (*func_h*), ve které dochází k rozdělení celkové výšky pomocí hodnoty počtu vrstev a v bloku spektrálně závislého indexu lomu (*func_edlen / func_edlen_g*), kde dochází k průměrování hodnot spektrálně závislého indexu lomu prostředí podle hodnoty celkové výšky bodu B a počtu vrstev.

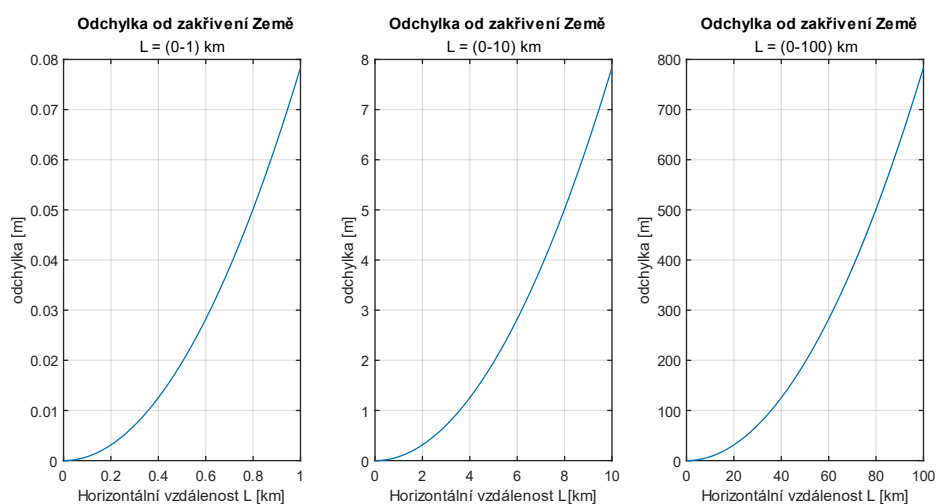
Horizontální vzdálenost L musí být vždy vyšší než nula (například $L = 1 \mu\text{m}$), protože při nulové hodnotě nastává vertikální komunikace s vysílacím úhlem šíření 90° pro který neplatí Snellův zákon [7]. Stejně tak při zadávání požadovaného vysílacího úhlu je jeho maximum $89,999999999^\circ$. S uvažováním přesnosti nastavení vysílacího úhlu lze takové vysílací úhly považovat za vertikální.

Velikost horizontální vzdálenosti je nadále omezena zakřivením Země. Náčrty výpočtu odchylky od povrchu Země je na obrázku 4.55, kde r je poloměr Země, L je horizontální vzdálenost komunikačního bodu B, červenou barvou je označena výseč povrchu Země a modře je vyznačena počítaná odchylka. Poloměr r a vzdálenost L svírá pravý úhel.



Obrázek 4.55 Náčrty výpočtu odchylky od povrchu Země

Při uvažování dokonale kulaté Země s poloměrem 6378,135 km je odchylka od zakřivení Země menší než 8 cm při hodnotě $L = 1 \text{ km}$, až po odchylku 800 m při $L = 100 \text{ km}$. Další hodnoty jsou vidět na obrázku 4.56. Uživatel modelu tedy musí zvážit modelovanou situaci, zda lze uvažovat povrch Země a atmosféru nad ním považovat za rovinou. Stejným problémem jsou omezeny požadované vysílací úhly v malých hodnotách.



Obrázek 4.56 Odchylky od zakřivení Země pro různé délky horizontální vzdálenosti L

Platnost modelu je dále omezena na lokalitou mírného zeměpisného pásu, kvůli výběru dat ze standardní americké atmosféry [13], která uvádí data právě pro mírný zeměpisný pás.

5. ZÁVĚR

V této práci byl vytvořen model šíření laserového svazku atmosférou ve vertikálním a šikmém směru. Model byl vytvořen v prostředí MATLAB, a to ve skriptové verzi a graficky uživatelském programu.

Nejprve bylo nutné vytvořit a otestovat základní model, který zohledňuje základní princip šíření světla prostředním pomocí Snellova zákona o lomu světla na rozhraní dvou prostředí. Takový model byl vytvořen v rámci jednoho kódového skriptu. Základní model byl otestován pomocí testovacích hodnot indexů lomu. Výsledky testování základního modelu šíření světla prostředím jsou součástí této práce.

V rámci dalšího postupu byl základní model šíření světla prostředím předělán z jednoho kódového skriptu do hlavního kódu a vyvolávaných funkcí, které provádějí opakující se výpočty. Model šíření laserového svazku atmosférou počítá s daty americké standardní atmosféry [13], které jsou platné pro mírné podnebné pásmo, tedy jsou použitelná i v rámci evropské zeměpisné polohy. Model šíření laserového svazku atmosférou umožňuje vypočítat a vykreslit profil spektrálně závislého indexu lomu prostřední atmosféry, vypočítat vysílací úhel pro šíření optického svazku na požadované místo v atmosféře nebo za hranicí vesmíru, například letadlo nebo družice. Dále umožňuje vypočítat ideální a simulované časy a vzdálenosti šíření optického svazku atmosférou. Další funkcí modelu je stanovení rozšíření svazku v místě přijímače vlivem optické disperze a disperzního zpoždění okrajových spektrálních složek optického záření. Dispersní rozšíření v místě přijímače je v rámci modelu zobrazeno i graficky. Dále model umožňuje grafické porovnání podoby svazku v místě přijímače s uvažováním optické disperze v atmosféře a bez uvažování tohoto jevu. Poslední funkcí modelu je stanovení útlumu optického výkonu šířením.

Díky zmíněným funkcím modelu šíření optického svazku atmosférou byly vytvořeny závislosti různých veličin, které jsou ovlivňovány vlastnostmi atmosféry Země. Například závislost indexu lomu prostředí na vlnové délce, závislost disperzního rozšíření a zpoždění na vysílacím úhlu nebo na šířce spektrální čáry nebo závislost pološířky svazku na vysílacím úhlu.

Grafický uživatelský program modelu umožňuje totéž jako skriptová podoba, výsledky simulace jsou přehledně uvedeny buď graficky nebo numericky v příslušných zobrazovacích polích. Uživatel programu získá přehled o všech sledovaných a modelovaných parametrech díky jejich zobrazení v jednom místě.

Model šíření optického svazku atmosférou je platný pro atmosféru Země jen díky vloženým datům pro americkou standardní atmosféru, je tedy možné změnou těchto dat model použít pro simulaci šíření laserového svazku atmosférou jiné planety nebo zcela jiným prostředím (vodní prostředí). Uvedený model šíření laserového svazku atmosférou lze dále zpřesnit, například započítáním zakřivením Země a její atmosféry, nebo dalším navýšením počtu vrstev v rámci kterých dochází k průměrování hodnot indexu lomu

atmosféry. V modelu šíření laserového svazku atmosférou je uvažováno pouze šíření svazku z pozemní stanice na přijímač v atmosféře. Opačný směr šíření svazku atmosférou by bylo možné modelovat po úpravě pořadí hodnot indexů lomu prostředí a úpravě vykreslovacích funkcí.

Samotný model šíření laserového svazku atmosférou ve vertikálním a šikmém směru je obsažen v komprimované složce *Josef_Holub_DP.zip*, která je elektronickou přílohou této práce. Pro otevření programu modelu je potřeba rozbalit přiloženou složku a pomocí prostředí MATLAB 2020b (nebo novější) otevřít soubor s příponou MATLABu .m. Komprimovaná složka obsahuje mimo jiné následující položky:

- *Atmospheric_laser_beam_propagation_model_GUI.m* *grafická varianta modelu*
- *Model_sireni_laseroveho_s vazku_atmosferou_Mod1.m* *skriptová varianta modelu mód 1*
- *Model_sireni_laseroveho_s vazku_atmosferou_Mod2.m* *skriptová varianta modelu mód 2*
- a další (soubory funkcí a dat)

LITERATURA

- [1] SAHA, Kshudiram. The Earth's Atmosphere: Its Physics and Dynamics. Springer Science & Business Media, 2008. ISBN 978-3-540-78426-5.
- [2] KRÁLOVÁ, Magda. ATMOSFÉRA ZEMĚ. VĚDA A TECHNIKA V POZADÍ [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/603?view_gf_cilove_skupiny=154
- [3] CHAPMAN, Sydney a T. G. COWLING. The Mathematical Theory of Non-uniform Gases: An Account of the Kinetic Theory of Viscosity, Thermal Conduction and Diffusion in Gases. 3rd edition. Cambridge University Press, 1990. ISBN 9780521408448.
- [4] The Exosphere | Center for Science Education. Home Page | Center for Science Education [online]. Copyright © 2011 UCAR [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/exosphere>
- [5] International Standard Atmosphere. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Standard_Atmosphere
- [6] U.S. Standard Atmosphere. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/U.S._Standard_Atmosphere
- [7] BORN, Max a Emil WOLF. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. 7th edition. Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780521784498.
- [8] ALLEN, Clabon Walter a Arthur N. COX. Allen's Astrophysical Quantities. 4th edition. Springer Science & Business Media, 2000. ISBN 9780387987460.
- [9] WALLACE, John Michael a Peter Victor HOBBS. Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2nd. Elsevier Academic Press, 2006. ISBN 9780127329512.
- [10] The Atmospheric Window. National Weather Service [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.weather.gov/jetstream/absorb>
- [11] Index of Refraction of Air. ENGINEERING METROLOGY TOOLBOX: Refractive Index of Air Calculator [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://emtoolbox.nist.gov/wavelength/documentation.asp>
- [12] Blue Sky, Rayleigh Scattering, Mie Scattering, Sky Saturation and Brightness [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>
- [13] DigitalDutch.com [online]. Copyright ©x [cit. 30.12.2021]. Dostupné z: https://www.digitaldutch.com/atmoscalc/US_Standard_Atmosphere_1976.pdf
- [14] 1976 Standard Atmosphere Calculator. DigitalDutch.com [online]. Dostupné z: <https://www.digitaldutch.com/atmoscalc/index.htm>