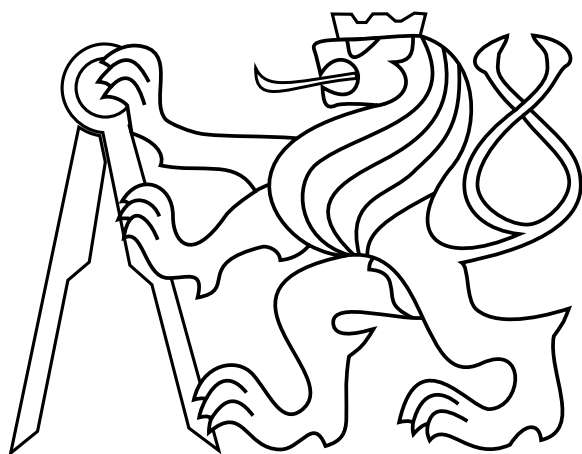


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

ING. MARTIN MUDROCH

**ODHAD PROFILU REFRAKTIVITY POMOCÍ UMĚLÝCH  
NEURONOVÝCH SÍTÍ**

**DOKTORSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM: ELEKTROTECHNIKA A INFORMATIKA  
STUDIJNÍ OBOR: RADIOELEKTRONIKA**

TEZE DISERTACE K ZÍSKÁNÍ AKADEMICKÉHO TITULU „DOKTOR“, VE ZKRATCE „PH.D.“

PRAHA, ČERVEN 2014

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře elektromagnetického pole Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze

Uchazeč: Ing. Martin Mudroch

Katedra elektromagnetického pole  
Technická 2  
Praha 6

Školitel: prof. Ing. Miloš Mazánek CSc.

Katedra elektromagnetického pole

Školitel specialista: prof. Ing. Pavel Pechač Ph.D.

Katedra elektromagnetického pole

Oponenti: .....

.....

.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba se koná dne ..... v ..... hodin před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Radioelektronika v zasedací místnosti č..... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda pro obhajobu disertační  
práce  
ve studijním oboru  
Radioelektronika  
Fakulta elektrotechnická ČVUT,  
Technická 2, Praha 6

# 1 Současný stav problematiky

## 1.1 Oblast výpočtu refraktivity pro radiové spoje

Pro řešení vlivu atmosferických vlivů na radiové spoje v současnosti existuje řada doporučení ITU-R [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Jejich obsahem jsou především postupy pro výpočet útlumu způsobeného hydrometeory, vzdušnými aerosoly a podobně. Doporučení ITU-R P.676 [2] zahrnuje metodiku, pomocí které je možné určit specifické útlumy atmosferických plynů pro frekvence do 1000 GHz. Tento útlum je dán především rezonancemi molekul plynů obsažených v atmosféře. Vstupními daty pro tyto metodiky je především teplota, tlak a vlhkost. Jsou zde přehledně uvedeny průběhy útlumu pro různé frekvence pro atmosféru s definovanou koncentrací vodních par a dále postup výpočtu specifického útlumu pro různé nadmořské výšky. Zpráva [7] uvádí přehled a srovnání jednotlivých modelů odhadu intenzity srážek pro průměrný rok, průměrný nejhorší měsíc a pro kombinaci průměrného roku a průměrného nejhoršího roku. Metoda ITU-R [1] je hodnocena společně s metodami Lefrancois [8], Stutzman-Dishman [9] a Lin I [10] jako nejspolehlivější pro testovací spoje rozmístěné po celé Evropě. V atmosféře probíhají relativně chaotické toky plynů, toto proudění může být laminární, ale při dosažení vyššího Reynoldsova čísla se mění na turbulentní. Průběh a vlivy vzdušných turbulencí je podrobněji popsán v knize [11].

Pro výpočet šíření v závislosti na stavu atmosféry existuje řada modelů, typicky parabolická rovnice. K jejímu řešení existuje celá řada algoritmů a přístupů publikovaných například v [12], [13], [14] a řadě dalších.

Ohledně radiového průzkumu troposférických jevů, které mají vliv na šíření elektromagnetické vlny byly publikovány práce například [15] a [16]. Tyto práce se věnují především refraktivitě v souvislosti se vzdušnými aerosoly. Byly publikovány i články zaměřené na radiovou analýzu vlastností hydrometeorů [17]. V souvislosti s odhadem profilu refraktivity na experimentálním spoji využitého v této práci byla publikována práce [18].

## 1.2 Oblast vlivů počasí na FSO spoje

V oblasti atmosferických vlivů na FSO spoje byla publikována řada prací, která se zabývá odhady specifických útlumů atmosferických jevů jako je mlha, déšť a sníh. Tyto specifické útlumy jsou převážně založeny na znalosti statistických vlastností příslušných atmosferických jevů.

Pro útlumy způsobené mlhou byly publikovány například Kimův model [19] a Kruseův model [20], které jsou závislé na viditelnosti, vlnové délce a množství vodních kapek v prostředí. Byly publikovány i srovnání jednotlivých metod v [21].

Pro specifický útlum způsobený deštěm existují doporučení ITU-R [6].

Dalšími studovanými vlivy jsou scintilace optických spojů. Pro moderní komunikační služby je vyžadována velká šířka pásma, a zároveň musí být definovaná minimální šířka pásma, aby byla zaručena bezchybnost přenosu dat v reálném čase. Právě scintilace způsobují zvýšení chybovosti linky a tím zmenšení šířky pásma. Scintilace jsou rovněž spojeny s turbulencemi v přenosovém médiu. Studium scintilací způsobených turbulencemi se zabývají například publikace [22], [23], [24], [25] a [11].

Vzhledem k tomu, že FSO je už relativně dlouho používaná technologie, lze najít výsledky dlouhodobých měření spolehlivosti těchto spojů například v [26] a [27].

V souvislosti s FSO spoji se objevují studie diverzitních spojů. V oblasti zájmu je studium prostorová diverzity optických spojů a pak statistické zpracování spolehlivosti hybridních spojů, ve kterých se k přenosu dat používá kombinace FSO a radiového spoje. Zde je předpoklad, že průběh atmosferických vlivů na FSO a radiové spoje není shodný, tudíž lze u těchto spojů odhadovat diverzitní zisk, závislý na prostředí. Různé technologie těchto hybridních spojů byly publikovány například v [28], [29] a [30]. Studie zabývající se spolehlivostí takových spojů byly publikovány v [31], [32] a dalších.

## 2 Cíle disertační práce

Základním cílem práce je ověřit, je-li možné predikovat chování bezdrátových spojů v atmosféře bez znalosti fyzikálně vyjádřených vlivů jednotlivých meteorologických veličin na radiový nebo optický signál. Na základě takto obecně definovaného cíle je stanoveno několik dílčích cílů, které budou postupně řešeny a vyhodnocovány. Jednotlivé kroky vedou k sestavení jednotné metodiky zpracování dat pomocí metod umělé inteligence.

1. Výběr vhodného prostředku pro zpracování experimentálních dat.

Na základě výsledků rešerše metod uvedené v předchozí kapitole byla pro práci s experimentálními daty zvolena metoda neuronových sítí. Tato oblast je velmi rozsáhlá a v dalších kapitolách budou podrobně diskutovány jednotlivé architektury neuronových sítí použitelné pro řešení zadaných problémů. Tyto architektury budou postupně ověřeny na experimentálních datech a výkonnost bude analyzována.

2. Ověření vhodnosti zvolené výpočetní metody na problému detekce množství srážek v trase experimentálního spoje.

Pomocí jednodušších struktur neuronových sítí bude otestována jejich vhodnost pro danou problematiku. Vzhledem k novosti neuronového přístupu k datům z oblasti atmosferických vlivů na komunikační spoje je touto analýzou stanovena orientační přesnost odhadu, kterou dokáže neuronové sítě poskytnout.

3. Návrh metodiky pro odhad gradientu refraktivity pomocí neuronové sítě na základě dat naměřených na experimentálním spoji.

Cílem bude najít nový postup pro aplikaci neuronové sítě na odhad gradientu refraktivity v oblasti experimentálního spoje, který je

## 2 Cíle disertační práce

již v literatuře relativně dobře popsán prostředky statistiky a existujícími modely. Tato metodika bude naprosto oproštěna od známých fyzikálních principů a využívat pouze naměřená data bez zakomponování jejich skutečného významu.

4. Návrh metodiky pro konstrukci neuronové sítě, která bude analyzovat vliv aktuálního počasí na kvalitu FSO spoje.

Metodika navržená pro radiové spoje poskytuje v některých případech relativně dobré přesnosti predikce, ale další zpřesnění není kvůli povaze experimentu už reálné. Protože není vzhledem k povaze experimentu možné překonat popsané problémy, je původní metodika použita na obdobný problém – odhad vlivu aktuální meteorologické situace na FSO spoje. Lze předpokládat, že vzhledem k dostupnosti kvalitních dat z experimentálních spojů, bude tato metodika poskytovat přesnější výstupy. Zároveň ji bude možno dále zpřesňovat – například dalšími meteorologickými čidly.

## 3 Metody zpracování

Pro zpracování zadané problematiky byl z několika možných variant řešení zvolen přístup za použití různých typů umělých neuronových sítí. Pro analýzy dat byly použity Kohonenovy samoorganizující mapy (SOM), pro samotnou klasifikaci a odhad refraktivity byly vyhodnocovány různé velikosti dopředných neuronových sítí (Multi-layer Perceptron) nebo rekurentních sítí.

### 3.1 Multi-layer Perceptron

Jedná se o vícevrstvou dopřednou neuronovou síť. Tato síť už se třemi vrstvami dokáže klasifikovat obecné oblasti. Třívrstvá neuronová síť, schopná vyhodnotit obecný klasifikační problém, je zobrazena na obr. 3.1. Je třeba zdůraznit, že u vícevrstvých neuronových sítí se předpokládá, že vrstvy jsou mezi sebou propojeny v pořadí, v propojení neuronů neexistují cykly ani zpětné propoje mezi vrstvami, proto se tyto sítě také často pojmenovávají jako dopředné neuronové sítě (Feed-Forward Artificial Neural Networks).

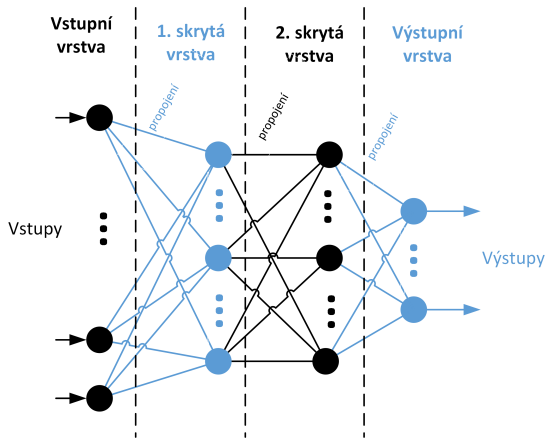
První vrstva MLP se nazývá vstupní. Neurony v této vrstvě nemají žádné předchůdce a je na ně přiváděn vstupní signál. Jde vlastně jen o velmi zjednodušené perceptrony, které mají za úkol rozvést vstupní signál na více perceptronů v další vrstvě bez změny hodnoty.

Následují skryté vrstvy. Jejich počet není prakticky omezen, ale pro obecný klasifikátor postačují dvě skryté vrstvy, jak bylo popsáno v předchozích odstavcích. V některých případech mohou další skryté vrstvy vylepšit rychlost nebo kvalitu učení neuronové sítě. Při vyšším počtu skrytých vrstev ale obecně roste náročnost učení. V této vrstvě jsou už plnohodnotné neurony se všemi vahami, prahy a aktivačními funkcemi.

Poslední vrstvou dopředných sítí jsou výstupní vrstvy. Tyto neurony mají za úkol poskytnout požadovanou výstupní informaci. Podle druhu



zamýšleného využití sítě mívají neurony v této vrstvě buď spojitou (sigmoidní) aktivační funkci nebo skokovou aktivační funkci. V případě, že síť je určena ke klasifikaci, bývají výstupní neurony spíše dvoustavové a tudíž mají skokovou aktivační funkci (například Heavisideova fce). Pokud má síť fungovat jako aproximátor nějaké reálné funkce, jsou výstupní neurony se spojitým výstupem, tudíž aktivační funkce by měla být spojitá, což splňuje jak sigmoida, tak třeba i lineární funkce. Tyto neurony tedy udávají i požadovaný rozsah výstupních hodnot.

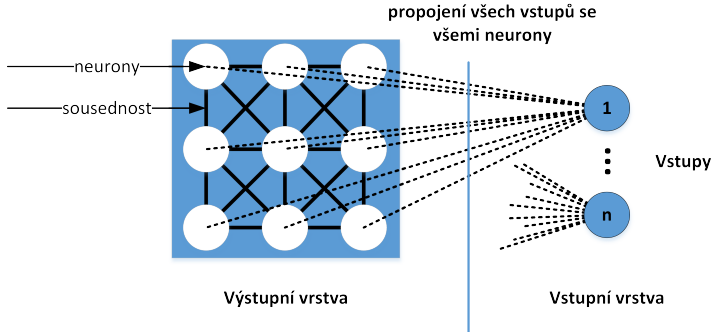


Obr. 3.1: Vícevrstvá síť perceptronovského typu (Multi-Layer Perceptron - MLP)

### 3.2 Kohonenova síť - SOM

Kohonenova síť má zcela jinou architekturu než sítě uvedené v předcházejících kapitolách a její použití je zaměřeno na řešení jiných druhů problémů. Těmi jsou především klasifikace a analýza dat. Síť je učena bez učitele a patří do skupiny samoorganizujících neuronových sítí. Lze tedy zjednodušeně říci, že sama dokáže rozlišovat objekty s podobnými vlastnostmi. Samoorganizací biologických neuronů ve vztahu ke vnímání vnějších podnětů se v 70. letech zabývali především Christoph von der Malsburg ve

spolupráci s Davidem J. Willshawem v celé řadě publikací - například [33], [34], [35] a [36]. Lze říci, že jejich práce je velkou motivací pro sítě, které od 80. let vyvíjí Teuvo Kohonen a podle něj jsou i tyto sítě pojmenovány. Jedná se o Kohonenovy samoorganizující mapy (SOM). Tyto sítě jsou rovněž vhodné pro vizualizaci vícerozměrných množin dat.



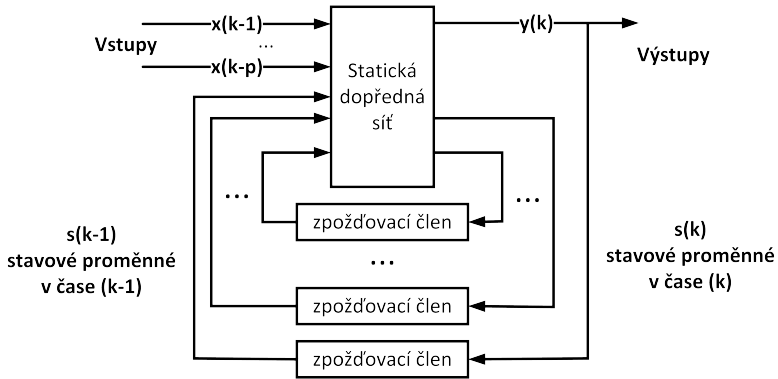
Obr. 3.2: Architektura Kohonenovy sítě - SOM

### 3.3 Rekurentní sítě

Rekurentní neuronové sítě jsou obdobou dopředných neuronových sítí resp. obsahují v sobě architekturu těchto sítí, ale navíc obsahují zpětné vazby. Tyto zpětné vazby zpravidla do sítě zavádějí časově závislý prvek. Lze tedy říci, že odezva neuronové sítě už nebude záviset jen na kombinaci vstupních hodnot, ale bude nějakým způsobem zohledněn i předchozí odezvu (nebo i jen část jejího výpočtu). V okamžiku, kdy síť obsahuje rekurentní spoje, je nutné tuto síť už učit celými sekvencemi vstupů a nikoli už jen jakkoli promíchanou množinou vstupních vektorů právě kvůli zavedenému časovému kontextu. Tyto sítě vyžadují jiný způsob učení, který ale stále může být založen na původním Back-propagation. Rozbor a algoritmus tohoto základního učení je uveden např. v publikaci [37].

Obecná rekurentní síť může být převedena do Nerrandovy kanonické formy (popsaná v práci [38]), která bude mít externí vstupy (ty mohou být časově závislé), časově závislý výstup, zpětnou vazbu stavových proměn-

ných přes zpořďovací bloky a výkonná síť už bude běžná statická dopředná neuronová síť. Tato architektura je rozkreslená na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Nerrandova kanonická forma

Určitým zjednodušením rekurentních sítí může být neuronová síť s časovými zpožděními (Time-delay Neural Network), kde jsou v síti zavedeny zpětné vazby z výstupu na vstup přes bloky zahrnující zpoždění - ty opět zajišťují síti časový kontext. Je to vlastně zjednodušení, kdy by v kanonické formě byly na nulu nastaveny váhy u neuronů, ke kterým jsou přivedeny stavové proměnné  $s$  z obr. 3.3. Obdoba těchto sítí je využívána v této práci.

### 3.4 Shrnutí navržené metodiky

Samotná metodika pro tvorbu neuronového modelu odhadu refraktivity atmosféry se skládá z několika kroků, které byly podrobněji popsány v předchozích odstavcích. Součástí metodiky jsou doporučení, která je vhodné dodržet, aby bylo dosaženo dostatečné přesnosti. Metodika se skládá z následujících kroků:

1. Příprava a konverze měřených dat.
2. Návrh neuronové sítě – probíhá experimentálně v několika krocích a tento krok musí být zpětně vyhodnocen.

### 3 Metody zpracování

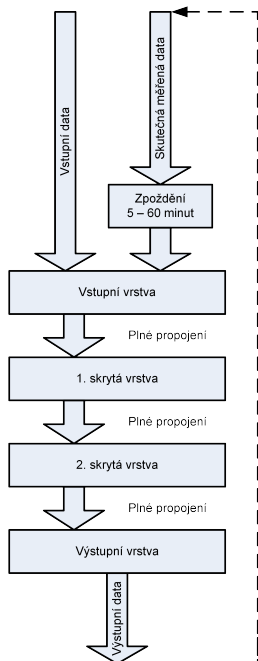
3. Tvorba učících množin.
4. Učení neuronové sítě.
5. Vyhodnocení výstupů neuronové sítě.

Neuronové sítě, které byly využity pro neuronový odhad chování FSO spojů byly konstruovány podle obdobné metodiky, ale tyto postupy byly na základě analýzy dat rozšířeny v oblasti normalizace naměřených dat, tvorby učících množin a především v návrhu architektury neuronových sítí. Pro normalizaci dat byla navržena normalizační funkce, která vhodným způsobem konvertuje naměřená data do intervalu nutného pro zpracování pomocí neuronové sítě. Byl stanoven vhodný postup pro výběr dat do učící množiny, který koresponduje s povahou FSO spojů. Důležitého zlepšení odezvy systému bylo dosaženo použitím neuronových sítí s různými druhy zpětné vazby.

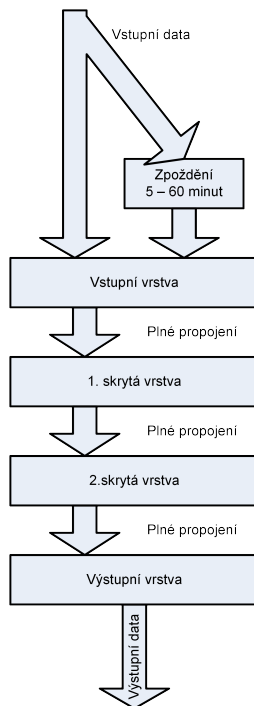
Neuronová síť na obr. 3.4 má na vstupu zpožděná data útlumů. Budou vyhodnoceny různé délky zpoždění. Tato architektura neuronové sítě se už blíží k architektuře neuronových sítí a lze říci, že se jedná o speciální případ Nerrandovy formy neuronové sítě, případně rekurentní neuronové sítě NARX (Nonlinear Autoregressive Network with Exogeneous Inputs) popsané například v [39].

Neuronová síť na obr. 3.5 není rekurentní. Má dvojnásobnou velikost vstupní vrstvy, kdy druhou polovinu tvoří o pevný časový úsek zpožděná meteorologická data.

### 3 Metody zpracování



Obr. 3.4: Architektura neuronové sítě se zpožděnými daty útlumů



Obr. 3.5: Architektura neuronové sítě se zpožděnými meteorologickými daty

## 4 Výsledky

### 4.1 Výsledky poskytované metodikou pro radiové spoje

Byla představena metodika, jak přistupovat k naměřeným meteorologickým datům, aby je bylo možné využít pro zpracování neuronovými sítěmi. Zároveň byl naznačen přístup k diagnostice množství srážek pomocí experimentálního mikrovlnného spoje. Bylo dosaženo přesnosti klasifikace čtyř úrovní srážek s přesností 60%.

Byly vyhodnoceny výstupy poskytované metodikou. Přesnost těchto výstupů je postačující pro orientační odhady gradientu refraktivity, kdy přesnost dosahuje 70-80%. Přesnost odhadu výškového průběhu gradientu refraktivity klesá k 50%, to je ale dáno kombinací nepřesnostmi měření i nepřesností výstupů neuronové sítě a zároveň i vlivy, které nebylo možné podchytit měřením na experimentálním spoji.

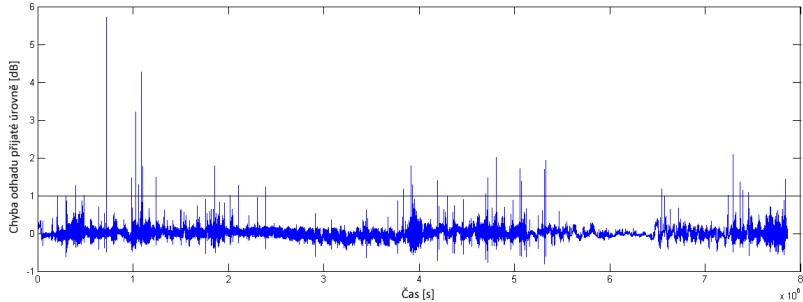
Pro zpracování naměřených dat byla vytvořena doporučení, která je vhodné dodržet při použití navržené metodiky:

1. **Normalizace vstupních dat.** Tento druh dat má tu vlastnost, že největší množství dat se nachází v okolí střední hodnoty, ale tato data ovlivňují samotné zpracování neuronovou sítí jen ve velmi malé míře. Je tedy vhodné použít už normalizační funkci, která tuto vlastnost zohlední při převodu vstupních hodnot do příslušného intervalu nutného pro zpracování pomocí neuronové sítě.
2. **Konstrukce učících množin.** Ze stejného důvodu jako v předchozím bodě je nutno učící množiny vytvářet tak, aby se zvýraznil výskyt hodnot mimo 90% percentil. Není ale vhodné vytvořit zcela uniformní zastoupení, je-li klasifikováno jen několik tříd.
3. **Velikost neuronové sítě.** Velikosti použité sítě se pohybovaly ve velikostech 20x10 až 30x18 a větších. Nebyl pozorován zásadní vliv

## 4 Výsledky

větších sítí na kvalitu odhadu refraktivity ani množství srážek. Naopak se při trénování objevovaly problémy s časovou náročností učení velkých sítí a pak s přeučením sítě.

### 4.2 Výsledky poskytované metodikou pro FSO spoje



Obr. 4.1: Časový průběh velikosti chyby odhadu pro nejlepší rekurentní neuronovou síť

Byla představena funkční metodika pro tvorbu modelu bezdrátového optického spoje pro predikci jeho chování v závislosti na aktuálních povětrnostních podmínkách. Byly popsány jednotlivé kroky metodiky od tvorby učicích a validačních množin až ke způsobu vyhodnocování odezvy modelu. Na obr. 4.1 je zobrazen časový průběh chyby nejlepšího odhadu (zobrazený průběh odpovídá třem měsícům měření). Byla provedena analýza chybných odezav a bylo zjištěno, že by bylo vhodné se při dalším zpřesňování modelu zaměřit na okamžiky, kdy je mírný déšť a vítr nad 5 m/s. V případě deště se může jednat o chybu způsobenou měřením, protože použitý srážkoměr nemusí pro tak malá množství srážek poskytovat zcela přesné informace. Zároveň bylo zjištěno, že pro kvalitní model spoje je nutné mít dostatečně jemná data o přijaté úrovni signálu na jednotlivých FSO hlavicích.

## 5 Závěr

V práci byly ověřeny možnosti využití dat experimentálního mikrovlnného spoje v kombinaci s umělými neuronovými sítěmi pro klasifikaci množství deště v jeho průběhu. Vzhledem k povaze sledovaného jevu a možnostem experimentálního měřicího spoje, který ale nebyl cíleně určen k řešení daného problému, se podařilo vytvořit použitelný model odhadu s přesností 50-80%.

Poznatky a postupy z klasifikace deště byly dále využity při sestavení metodiky využití neuronových sítí pro radiový odhad gradientu refraktivity a výškového profilu gradientu refraktivity na spoji Praha-Poděbrady. Přesnost odhadu korespondovala předpokládané chybě, která byla způsobena způsobem měření meteorologických dat na experimentálním spoji. Samotné fyzikální principy, které se uvnitř neuronového modelu skrývají, nebyly předmětem této práce. Rovněž s výjimkou definice refraktivity a jejich standardních hodnot nebyly v modelu použity jiné existující modely nebo doporučení ITU, jak bylo stanoveno v cílech práce.

V další části práce věnované modelování atmosferických vlivů na FSO za použití neuronových sítí a běžně dostupných meteorologických senzorů byla navržena metodika, která poskytuje velmi dobré přesnosti odhadu. Zároveň byly rozebrány chyby odhadu, které model nebyl schopen správně predikovat. Tyto chyby mohly být způsobeny způsobem měření meteorologických veličin (především deště, který je velmi špatně měřitelný v malých intenzitách).

Cíle práce vytyčené v úvodu práce se podařilo splnit. Samotnou metodiku pro práci s daty podobné povahy lze doporučit především pro krátké spoje, kde nedochází k neměřitelným výkyvům atmosferických vlivů. V případě, kdy by informace o těchto vlivech byly dostupné, lze je shodným přístupem do metodiky doplnit, protože samotná metodika není omezená na konkrétní meteorologické veličiny.



## 5 Závěr

Hlavním přínosem této práce je samotná metodika pro zpracování meteorologických dat v kombinaci s měřeními parametry komunikačních spojů, která zatím nebyla jinde publikována. Využití postupů popsaných v této práci lze mimo jiné najít i v dalším zamýšleném rozvoji problematiky a tím je využití dat z komunikačních spojů k diagnostice aktuálního stavu atmosféry - tedy k opačnému přístupu, než jaký byl popsán v této práci.

## Literatura

- [1] ITU-R P.530 - Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-sight Systems, 2013.
- [2] ITU-R P.676 - Attenuation by Atmospheric Gases, 2013.
- [3] ITU-R P.836 - Water vapour: surface density and total columnar content, 2013.
- [4] ITU-R P.840 - Attenuation due to Clouds and Fog, 2013.
- [5] ITU-R P.837 - Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling, 2012.
- [6] ITU-R P.838 - Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods, 2005.
- [7] COST 253 Committee. *Radiowave propagation effects on next-generation fixed-services terrestrial telecommunication systems*. European Commission, 1996. ISBN: 92-827-8023-6, EUR: 16992.
- [8] G. Lefrancois. Modele theoretique de precipitation equivalents sur un trajet radioelectrique. *Ann. Telecom*, 26(11-12):795–800, 1971.
- [9] W. L. Stutzman and W. K. Dishman. A simple model for the estimation of rain induced attenuation along earth-spacepaths at millimeter wavelengths. *Radio Science*, 17(6):1465–1476, 1982.
- [10] S. H. Lin. Nationwide long-term rain statistics and empirical calculation of 11 GHz microwave rain attenuation. *Bell System Technical Journal*, 56(9):1581–1604, 1977.
- [11] V. I. Tatarski. *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*. McGraw-Hill, New York, 1971.

## LITERATURA

- [12] O. Ozgun, M. Kuzuoglu, G. Apaydin, and L. Sevgi. Two-way split-step parabolic equation algorithm for tropospheric propagation: Tests and comparisons. In *Microwave Symposium (MMS), 2010 Mediterranean*, pages 14–17, Aug 2010.
- [13] C.L. Rino and V.R. Kruger. A comparison of forward-boundary-integral and parabolic-wave-equation propagation models. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 49(4):574–582, Apr 2001.
- [14] G.D. Dockery. Modeling electromagnetic wave propagation in the troposphere using the parabolic equation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 36(10):1464–1470, Oct 1988.
- [15] J.H. Richter. Sensing of radio refractivity and aerosol extinction. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation., International*, volume 1, pages 381–385 vol.1, Aug 1994.
- [16] C.H. Wash and K.L. Davidson. Remote measurements and coastal atmospheric refraction. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation., International*, volume 1, pages 397–401 vol.1, Aug 1994.
- [17] F. Cuccoli and L. Facheris. Rainfall monitoring based on microwave link attenuation and related tomographic processing. In *Advances in Radar and Remote Sensing (TyWRRS), 2012 Tyrrhenian Workshop on*, pages 172–176, Sept 2012.
- [18] P. Valtr, P. Pechac, V. Kvicera, and M. Grabner. Estimation of the refractivity structure of the lower troposphere from measurements on a terrestrial multiple-receiver radio link. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 59(5):1707–1715, May 2011.
- [19] Isaac I. Kim, Bruce McArthur, and Eric J. Korevaar. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *Proc. SPIE*, 4214:26–37, 2001.

## LITERATURA

- [20] P. W. Kruse, L. D. McGlauchlin, and R. B. McQuistan. *Elements of infrared technology: generation, transmission, and detection*. John Wiley and Sons, 1962. ISBN: 978-0471508861.
- [21] F. Nadeem, T. Javornik, E. Leitgeb, V. Kvicera, and G. Kandus. Continental fog attenuation empirical relationship from measured visibility data. *Radioengineering*, 19(4):596–600, 2010.
- [22] L. C. Andrews and R. L. Phillips. *Laser Beam Propagation through Random Media*. SPIE Press, September 2005.
- [23] Xiang Yi, Zengji Liu, and Peng Yue. Optical scintillations and fade statistics for FSO communications through moderate-to-strong non-kolmogorov turbulence. *Optics & Laser Technology*, 47(0):199 – 207, 2013.
- [24] J. Libich and S. Zvanovec. Influence of turbulence in near vicinity of buildings on free-space optical links. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 5(9):1039–1044, 2011.
- [25] P. Barcik, L. Hudcova, and O. Wilfert. Influence of the atmospheric turbulence on the laser beam. In *Network and Optical Communications (NOC), 2013 18th European Conference on and Optical Cabling and Infrastructure (OCI), 2013 8th Conference on*, pages 83–86, July 2013.
- [26] M. Loschnigg, P. Mandl, and E. Leitgeb. Long-term performance observation of a free space optics link. In *Telecommunications, 2009. ConTEL 2009. 10th International Conference on*, pages 305–310, June 2009.
- [27] M. Loeschnigg, T. Plank, and E. Leitgeb. Five years analysis of a free space optics link in Graz. In *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*, pages 1248–1251, March 2012.
- [28] M. Tatarko, L. Ovsenik, and J. Turan. Properties of hybrid FSO/RF link with 60 GHz RF backup link. In *Information Communication Technology Electronics Microelectronics (MIPRO), 2013 36th International Convention on*, pages 495–497, May 2013.

## LITERATURA

- [29] J. Libich, M. Mudroch, P. Dvorak, and S. Zvanovec. Performance analysis of hybrid FSO/RF link. In *EuCAP 2012*, pages 1235–1238, March 2012.
- [30] Z. Kolka, Z. Kincl, V. Biolkova, and D. Biolek. Hybrid FSO/RF test link. In *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2012 4th International Congress on*, pages 502–505, Oct 2012.
- [31] F. Nadeem, E. Leitgeb, M.S. Awan, and G. Kandus. Comparing the snow effects on hybrid network using optical wireless and GHz links. In *Satellite and Space Communications, 2009. IWSSC 2009. International Workshop on*, pages 171–175, Sept 2009.
- [32] F. Nadeem, E. Leitgeb, O. Koudelka, T. Javornic, and G. Kandus. Comparing the rain effects on hybrid network using optical wireless and GHz links. In *Emerging Technologies, 2008. ICET 2008. 4th International Conference on*, pages 156–161, Oct 2008.
- [33] Christoph von der Malsburg. A model for self-organization of orientation sensitivity and columns in the visual cortex. *Pflügers Arch. Suppl. to*, 339, 1973. R 95.
- [34] Christoph von der Malsburg. Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex. *Kybernetik*, 14:85–100, 1973.
- [35] David J. Willshaw and Christoph von der Malsburg. The establishment of patterned neural connections according to a theory of self-organization. *Pflügers Arch. Suppl. to*, 359:463–469, 1975.
- [36] David J. Willshaw and Christoph von der Malsburg. How patterned neural connections can be set up by self-organization. In *Proceedings of the Royal Society London*, volume B194, pages 431–445, 1976.
- [37] P.J. Werbos. Backpropagation: past and future. In *Neural Networks, 1988., IEEE International Conference on*, pages 343–353 vol.1, July 1988.

## LITERATURA

- [38] O. Nerrand, P. Roussel-Ragot, L. Personnaz, G. Dreyfus, and S. Marcos. Neural networks and nonlinear adaptive filtering: Unifying concepts and new algorithms. *Neural Computation*, 5(2):165–199, March 1993.
- [39] H.T. Siegelmann, B.G. Horne, and C.L. Giles. Computational capabilities of recurrent NARX neural networks. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 27(2):208–215, 1997.

## 6 Summary

This work deals with design of methodology for application of suitable Artificial Neural Networks for meteorological influence prediction on radio and free-space optical links. The recommended approaches for meteorological data processing are described. These data are used as an input for the neural networks. In the first part of this thesis there are described some other possible approaches which were also considered as usable for solving assigned problems. In next part there is shown approach for amount of precipitation prediction on experimental link with length of 50 km. Classification accuracy is about 60% from three-months period of measuring time. The methodology for vertical gradient refractivity estimation with 70% to 80% accuracy is also shown. The lowest accuracy of this model decreased to level of 50%. This uncertainty can be caused by the length of the experimental link.

Following chapter is devoted to FSO links. There is introduced methodology for combined atmospheric influences on FSO communication link. All steps of this methodology are described and discussed. The accuracy is also evaluated - there can be found some short terms of estimation errors (in sum it is eight minutes in three-months period). The best architecture for this approach is considered recurrent neural network.

# Seznam prací vztahujících se k disertaci

Autor: Ing. Martin Mudroch

## Publikace v impaktovaných časopisech

- M. Mudroch and S. Zvanovec. Artificial neural network utilization for FSO link performance estimation. *Radioengineering*, 23(1):474–479, April 2014

## Publikace excerpované WoS

- Martin Mudroch, Martin Grabner, Vaclav Kvicera, Premysl Hudec, Petr Bedrna, and Pavel Pechac. An experimental study of the lowest troposphere layers at 10 GHz - first results. In J Sistek, K Novotna, M Pourova, L Cifra, and L Visek, editors, *PROCEEDINGS OF COMITE 2008*, pages 73–76, 2008
- Martin Mudroch, Pavel Pechac, Martin Grabner, and Vaclav Kvicera. Classification and prediction of lower troposphere layers influence on RF propagation using artificial neural networks. In M Koppen, N Kasabov, and G Coghill, editors, *ADVANCES IN NEURO-INFORMATION PROCESSING*, volume 5506 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 893–900, BERLIN, GERMANY, 2009. SPRINGER-VERLAG BERLIN. 15th International Conference on Neuro-Information Processing, Auckland, NEW ZEALAND, NOV 25-28, 2008
- Martin Mudroch, Pavel Pechac, Martin Grabner, and Vaclav Kvicera. Atmospheric refractivity evaluation improved using artificial neural networks. In *PROCEEDINGS OF THE FOURTH EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, New York, USA,



## Seznam prací vztahujících se k disertaci

2010. IEEE. 4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Barcelona, SPAIN, APR 12-16, 2010

- Martin Mudroch, Pavel Pechac, Martin Grabner, and Vaclav Kvicera. First results from remote sensing of the atmosphere using artificial neural networks. In *2009 3RD EuCAP, vols. 1-6*, pages 1356–1359, New York, USA, 2009. IEEE. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, GERMANY, MAR 23-27, 2009

## Publikace ostatní

- M. Mudroch, J. Libich, S. Zvanovec, and M. Mazanek. FSO link performance modelling using artificial intelligence. In *Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on*, pages 1715–1718, 2011

# Ostatní práce

**Autor: Ing. Martin Mudroch**

## Publikace excerptované WoS

- Petr Cerny and Martin Mudroch. Shape optimization of UWB dipole radiating required impulse for specific excitation impulse. In *EURAD 2009*, European Radar Conference-EuRAD, pages 373–376, New York, USA, 2009. IEEE. 6th European Radar Conference, Rome, ITALY, SEP 30-OCT 02, 2009
- Petr Cerny and Martin Mudroch. Back radiation minimization of ultra wideband vivaldi antenna for radar application. In *2009 3RD EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOLS 1-6*, pages 3219–3223, New York, USA, 2009. IEEE. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, GERMANY, MAR 23-27, 2009
  - **2 citace na IEEE Explore:**
  - C. Rusch, S. Beer, and T. Zwick. LTCC endfire antenna with housing for 77-ghz short-distance radar sensors. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 11:998–1001, 2012
  - M. Salah Toubet, H. Abou Taam, B. Jecko, and M. Rammal. 1D Ultra Low-Profile (ULP) EBG matrix for radar applications. In *Radar Conference (RADAR), 2013 IEEE*, pages 1–4, April 2013
- J. Libich, S. Zvanovec, and M. Mudroch. Mitigation of time-spatial influence in free-space optical networks utilizing route diversity. In H Hemmati and DM Boroson, editors, *FREE-SPACE LASER COMMUNICATION TECHNOLOGIES XXIV*, volume 8246 of *Proceedings*

## Ostatní práce

of SPIE, 1000 20TH ST, PO BOX 10, BELLINGHAM, WA 98227-0010 USA, 2012. SPIE, SPIE

- Martin Mudroch, Petr Cerný, Pavel Hazdra, and Milos Mazanek. UWB Dipole Antenna Optimization with Neural Network Tuned Algorithm. In *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation, vol. 1-6*, pages 1422–1425. IEEE, 2009

## Funkční vzorek

- Černý, P.; Mudroch, M.: UWB anténa s minimalizovaným zkreslením vyřazeného pulzu a zpětného vyzářování, 2009

## Publikace ostatní

- P. Cerny, M. Mazanek, and M. Mudroch. Measurement methods of impulse radiation characteristics for ultra wideband antennas. In *Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007. The Second European Conference on*, pages 1–6, Nov 2007
- T. Korinek, M. Mudroch, and M. Mazanek. Shielding effectiveness measurement of small enclosures using linearly and circularly polarized antennas. In *Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007. The Second European Conference on*, pages 1–4, Nov 2007
- J. Libich, M. Mudroch, and S. Zvanovec. Atmosphere analysis and measurements via free-space optical network. In *Electrical Communications and Computers (CONIELECOMP), 2012 22nd International Conference on*, pages 230–233, Feb 2012
- M. Grabner, V. Kvicera, P. Pechac, and M. Mudroch. Multipath fading measurement and prediction on 10 GHz fixed terrestrial link. In *Microwave Techniques (COMITE), 2010 15th International Conference on*, pages 145–148, April 2010

**Autoři se na všech uvedených publikacích podíleli rovným dílem.**