

## Měření dohlednosti kamerou pro účely studia vlivu reálné atmosféry na přenos optického bezkabelového spoje

V. Brázda<sup>1</sup>, O. Fišer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Katedra elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice, Studentská 95, Pardubice

<sup>2</sup> Ústav fyziky atmosféry AVČR, v.v.i., Boční II/1401, Praha 4  
E-mail : vladimir.brazda@student.upce.cz, ondrej@ufa.cas.cz

### Anotace:

Největší nevýhodou optických bezkabelových spojů (OBS) je velký útlum signálu v mlze, jenž je popsána meteorologickou veličinou dohlednost. V článku prezentujeme první výsledky z nově zkonstruovaného měření dohlednosti pomocí kamery a černobílého terče v reálných podmínkách na meteorologické observatoři Milešovka. Jsou uvedeny dva příklady stavu atmosféry – maximální dohlednost a situace v husté mlze. Z časového průběhu lze dokázat, že oproti profesionálním dohledměřům je systém měření kamerou schopen měřit nehomogenní mlhu podél optického spoje a detekuje velmi rychlé změny dohlednosti. Ve vybraném časovém úseku dosahuje korelační koeficient mezi měřeným útlumem optického spoje a útlumem teoreticky spočteným z měřené dohlednosti hodnoty 0.97. V homogenní mlze se liší od kalibrovaných dohledměřů maximálně o 10 metrů.

### Abstract:

The biggest disadvantage of Free Space Optical Link (FSO) is a high attenuation in fog, which is characterized by visibility. We present the first results from the newly constructed visibility measurement using camera and black and white target in real conditions at the meteorological observatory Milešovka. Two examples of state of the atmosphere are shown - the maximum visibility and the situation in dense fog. On the basis of time course it is proved that the camera measurement system is able to measure inhomogeneous fog along the optical link and detects a quick change in visibility unlike the professional visibility meters. The correlation coefficient between the measured attenuation and theoretic attenuation of optical link computed from measured visibility reaches value 0.97 in the selected time interval. The camera measurement differs from the calibrated visibility meters by a maximum of 10 meters in homogeneous fog.

## ÚVOD

V poslední době se značně zvyšuje produkce i poptávka optických bezkabelových spojů (OBS, z angličtiny Free Space Optics - FSO). Systém OBS využívá velký potenciál světla a přenáší data volným prostorem za použití monochromatického laserového svazku. Nabízí širokou modulační šířku pásma a agregátní rychlost přenosu dat v řádu desítek Gbps. Používané vlnové délky se pohybují v intervalu 800 – 1600 nm, jedná se tedy o přenosy v infračervené oblasti, lidskému oku neviditelné. Z důvodu ochrany před možným poškozením lidského oka je vysílací optický výkon omezen na jednotky až desítky mW v závislosti na vlnové délce. Kvůli tomu nelze při současném stavu technologie provozovat tyto spoje na vzdálenosti delší než jednotky km. Díky vysoké směrovosti spoje je velkou výhodou odolnost proti rušení (EMS) a zároveň téměř nulová EMI. Systémy OBS vynikají vysokou mírou zabezpečení dat a nevyžadují k provozu žádné licence. Proto jsou OBS požadovány za alternativní možnost v metropolitních a místních sítích, stejně jako možné řešení či alespoň zkrácení „poslední míle“, kde dochází přechodem na kabelové rozvody k výrazné degradaci přenosové rychlosti.

Největší nevýhodou OBS je vliv aktuálního stavu atmosféry na přenos. Přítomnost aerosolů v podobě mlhy, oblaků, kouře či sněhu způsobuje absorpci a rozptyl laserového svazku. Pokud výsledný útlum přesáhne dynamický rozsah optického přijímače, dochází k nežádoucímu výpadku spojení. Je proto nutné zkoumat fyzikální podstatu interakce optického svazku a jednotlivých atmosférických jevů za účelem zdokonalování designu systému OBS ve smyslu robustnosti vůči reálným podmínkám v přenosové cestě. Pro elektromagnetické vlny představují největší překážku aerosoly, jejichž velikost je úměrná vlnové délce záření. Zatímco pro rádiový spoj je největším nepřítelem déšť, optický signál tlumí především mlha a oblaka, jež jsou obecně složeny z volně poletujících vodních kapek o velikosti 2 – 80  $\mu\text{m}$ . Vzhledem k technologicky obtížnému měření spektra velikosti mlžných kapek je hustota mlhy charakterizována veličinou Dohlednost [m].

## DOHLEDNOST

V odborné literatuře se vyskytují dvě definice dohlednosti:

„Dohlednost je vzdálenost, v níž je kontrast daného objektu a jeho pozadí právě roven prahu kontrastové citlivosti oka pozorovatele“ [1].

Pro instrumentální měření dohlednosti bylo potřeba definovat dohlednost i pomocí měřitelných veličin:

„Dohlednost je vzdálenost  $x$ , kde kontrastní poměr  $C_T(x)$  klesne na 2%“ [2].

První definici využívají pozorovatelé, jež měří dohlednost subjektivně na meteorologických observatořích.

Na druhé definici jsou založeny všechny ostatní automatické měřicí systémy. Principy různých technik měření jsou zmíněny v článku [3].

Z našich zkušeností víme, že mlha či oblaka mohou být i na velmi krátké vzdálenosti značně nehomogenní [3]. Pro účely výzkumu vlivu mlhy na OBS potřebujeme systém měřící dohlednost mezi dvěma pevně danými body (přijímač a vysílač optického spoje).

## PRINCIP MĚŘENÍ

V článku [3] jsme prezentovali vývoj a testování metody měření dohlednosti digitální kamerou v laboratorních podmínkách, kde jsme k měření kontrastu využili černobílý terč. Tento článek prezentuje výsledky měření v reálných podmínkách. Princip metody vychází z druhé výše uvedené definice dohlednosti. Kontrastní poměr je definován jako poměr zdánlivého kontrastu  $C$  ke kontrastu vlastního  $C_0$ :

$$C_T = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

Vlastní kontrast je v našem případě kontrast terče změřený v jeho blízkosti.

Samotný kontrast je definován A. Michelsonem následovně [5]:

$$C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} \quad (2)$$

kde  $L_w$  je svítivost (luminance) bílé části terče a  $L_b$  je svítivost černé části terče. Díky faktu, že jde o poměr mezi oběma svítivostmi, není nutné znát absolutní svítivost v  $\text{cd/m}^2$ . Postačuje relativní svítivost ve stupních šedi určená z fotografie.

Výsledná dohlednost je za použití Beer-Lambert-Boguerova zákona určena vztahem [6]:

$$V = \frac{\ln(0.02)}{\ln \frac{C}{C_0}} \cdot x \quad (3)$$

kde  $V$  je dohlednost [m],  $x$  je vzdálenost mezi kamerou a terčem [m],  $C$  je zdánlivý kontrast měřený ve vzdálenosti  $x$  a  $C_0$  je vlastní kontrast terče.

## EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Data prezentovaná v tomto článku byla naměřena na meteorologické observatoři Milešovka v období od 7.-14. listopadu 2012. Milešovka, nejvyšší hora Českého středohoří s nadmořskou výškou 837 m. n. m., má výrazný kuželovitý tvar a převyšuje okolní terén o 400 m. Díky svému tvaru a umístění je to jedno z míst s nejdrsnějším počasím v České republice. Velmi často se zde vyskytují husté mlhy a nízká oblačnost, což činí z této hory ideální místo pro studium vlivu atmosférických jevů na optický spoj. Od roku 1905 zde probíhá pravidelné meteorologické měření.

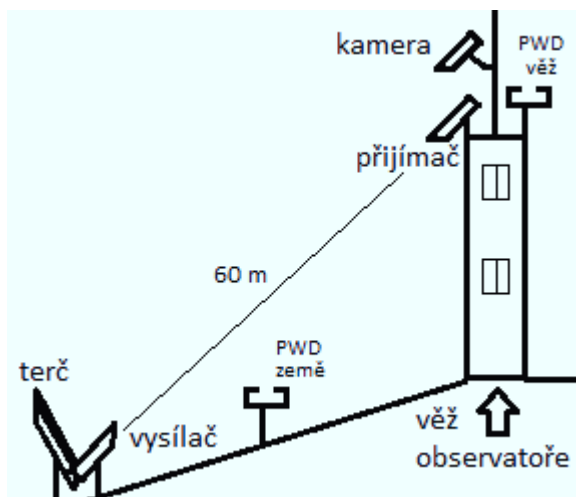
Optický spoj na Milešovce je orientovaný na jih-jihovýchod na délku 60 m s vertikálním převýšením 29 m. Pracuje v simplexním provozu, kdy se v pravidelných 15-ti sekundových intervalech střídá vysílání na dvou vlnových délkách – 1550 nm (CH1) a 830 nm (CH2).

Součástí meteorologického vybavení jsou též dva dohledoměry PWD od firmy Vaisala. Dohledoměr typu PWD-11 je umístěn na věži přímo u optického přijímače, zatímco modernější typ PWD-21 je umístěn ve výšce 2 m nad zemí v blízkosti vysílače. V dalším textu jsou označeny názvy 'věž' resp. 'země'. Tyto dohledoměry poskytují průměrnou hodnotu dohlednosti v intervalech 15 min v případě věže a 10 min v případě země. Útlum z optického spoje je zaznamenáván s integračním časem 1 minuta, data z dohledoměrů jsou tedy mezi příslušnými intervaly interpolována.

Pro účely měření dohlednosti digitální kamerou dle vzorce (3) byl vyroben černobílý terč o rozměrech 1x1 m, který jsme umístili k vysílači. Na věž k přijímači jsme instalovali černobílou kameru značky Basler typu acA1600-20gm s rozlišením 1628 x 1236 pixelů, která je schopna snímat v 12-bitovém režimu. Svítivost každého pixelu je tedy vyjádřena číslem v rozmezí 0 – 4095 odpovídající odstínu šedi, kde 0 představuje černou a 4095 dokonale bílou barvu. Byl použit objektiv Computar M7528-MP s ohniskovou vzdáleností 75 mm, zajišťující na vzdálenost 60 m zorné pole tak, aby byl terč zachycen dostatečným rozlišením.

Vyvinutý obsluhující software umožňuje ručně nastavit parametry pro určení černé a bílé části terče na pořízeném snímku. Výsledná hodnota svítivosti jedné části terče ( $L_w$  či  $L_b$ ) je střední hodnotou svítivosti všech pixelů v určené oblasti. Snímky a tudíž i dohlednost jsou snímány každých 60 sekund shodně s integračním časem optického spoje. Tento interval je u kamery nastavitelný, měřit dohlednost lze v podstatě kontinuálně.

Nákres experimentálního uspořádání je na Obr. 1.



Obr. 1: Náčrt experimentálního pracoviště na Milešovce

Pro přepočet změřené dohlednosti na útlum optického signálu a následné porovnání s útlumem naměřeným je použit teoreticky odvozený vzorec s empirickou korekcí pomocí koeficientu  $q$  dle I.I.Kima [7]:

$$\alpha_0 = \frac{3.91}{V} \cdot \left( \frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q} \quad (4)$$

$[\text{m}^{-1}]$ ,

kde  $\alpha_0$  je měrný útlum v  $\text{m}^{-1}$ ,  $V$  je dohlednost v m,  $\lambda$  je vlnová délka záření v nm a koeficient  $q$  závisí na aktuální dohlednosti  $V$ :

Tab. 1: Tab. 1 – Koeficient  $q$  pro Kimův vzorec

$q=$	1.6	pro $V > 50$ km
	1.3	pro $6 \text{ km} < V < 50$ km
	$0.16V + 0.34$	pro $1 \text{ km} < V < 6$ km
	$V - 0.5$	pro $0.5 \text{ km} < V < 1$ km
	0	pro $V < 0.5$ km

Vzorec v podstatě říká, že útlum optického spoje je převrácená hodnota dohlednosti násobená frekvenčně závislým koeficientem.

## VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V období 7.-14.11.2012 bylo vyselektováno 5 úseků, kdy se přes den objevovala mlha či nízká oblačnost, o celkové délce 27 hodin.

Následující obrázky č. 2 a 3 ilustrují dva případy stavu atmosféry. Na Obr. 2: je zachycena situace při maximální dohlednosti. Kontrast mezi bílou a černou částí terče zde dosahuje hodnoty 0.6, což je tedy i vnitřní kontrast  $C_0$ . V levé části fotografie je optický vysílač, jenž v tom okamžiku vysílal na vlnové délce 830 nm, která je lidskému oku neviditelná, ale kamera jej díky širší spektrální odezvě zaznamená. Na Obr. 3 dosahuje dohlednost naměřená kamerou hodnoty 83 m. Je patrné, že mlha je příčinou ztmavení bílé části a zesvětlení černé části terče, což

vede k poklesu kontrastu (v tomto případě  $C=0.0349$ ).

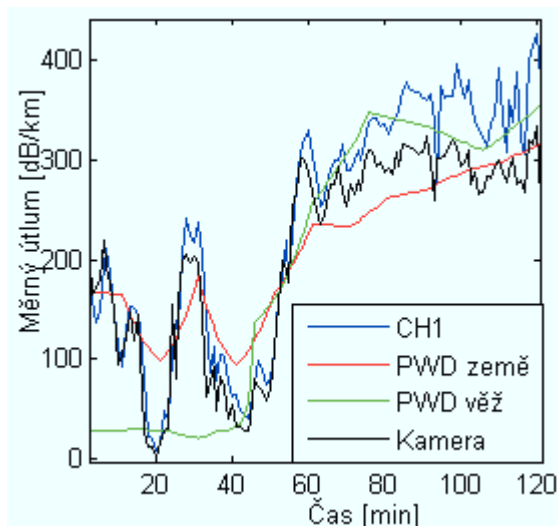


Obr. 2: Maximální dohlednost naměřená 8. 11. 2012 v 10:59 UTC ( $C_0=0.6$ )



Obr. 3: Dohlednost 83 m naměřená 7. 11. 2012 v 12:22 UTC ( $C=0.0349$ )

Ukázka časového průběhu měřeného a teoreticky spočteného útlumu optického signálu dle (4) je na Obr. 4.



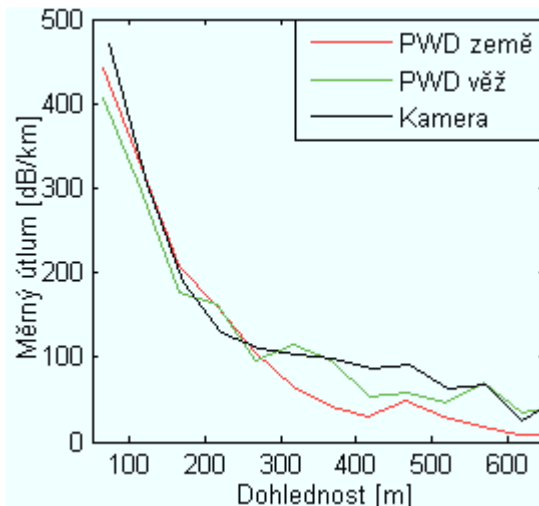
Obr. 4: Časový průběh naměřeného útlumu na 1550 nm a útlumu vypočteného pomocí Kimova vzorce (4) ze tří měřených dohledností dne 14.11.2012 v období od 6 do 8 hodin UTC

Na první pohled je patrná vysoká korelace mezi naměřeným útlumem (modrá) a útlumem spočítaným z dohlednosti pomocí kamery (černá). Průměrné 10-ti či 15-ti minutové měření dohlednosti není schopno zaznamenat rychlé změny. V prvních 40 minutách časového průběhu je dohlednost na Milešovice podél dráhy optického spoje nehomogenní. Zatímco spodní dohledoměr u země zaznamenává mlhu, na věži je ještě dohlednost vysoká. To je hlavní důvod, proč jsme systém měření dohlednosti kamerou zavedli. Teoretický útlum z měření dohlednosti kamerou zde velmi dobře kopíruje útlum naměřený na optickém spoji. Statistické zpracování tohoto časového průběhu je shrnuto v Tab. 2.

Tab. 2: Tabulka korelačních koeficientů a relativní RMSE mezi naměřeným útlumem na 1550 nm a útlumem teoreticky vypočteným z naměřených dohledností dle (4)

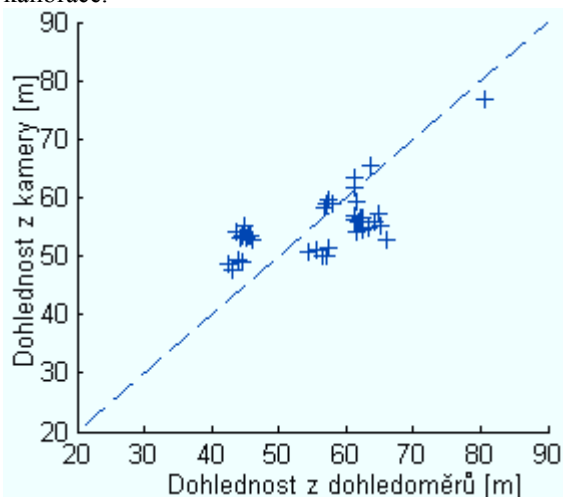
	Korel. koef.	Rel. RMSE
CH1 vs. Věž	0.945	0.8452
CH1 vs. Země	0.884	0.4791
CH1 vs. Kamera	0.969	0.2076

Na obr. 5 je zobrazena závislost měřeného útlumu na dohlednosti. Osa x byla rozdělena na konečný počet intervalů, kde v každém intervalu byl spočten průměrný útlum. Byla použita data z období 7.-14. 11. 2012. Z grafu vyplývá, že z hlediska dlouhodobějšího měření není mezi metodami měření dohlednosti žádný výrazný rozdíl. Především v oblasti velmi nízkých dohledností jsou minimální difference. Větší odchylky v oblasti vyšších dohledností jsou způsobeny nedostatečným množstvím dat.



Obr. 5: Průměrovaný bodový graf – závislost měřeného útlumu na 1550 nm na měřené dohlednosti

Oba profesionální a kalibrované dohledoměry PWD poskytují v každém intervalu 2 hodnoty – průměrnou dohlednost za celý interval a aktuální dohlednost na konci každého intervalu. A právě tuto aktuální dohlednost můžeme využít k testování a kalibraci metody měření dohlednosti kamerou. Na ose x následujícího grafu je vyznačen průměr aktuálních dohledností z obou dohledoměrů PWD za podmínky, že se jejich hodnoty neliší o více jak 5 m. To znamená, že předpokládáme v podstatě homogenní mlhu po celé délce optického spoje. Na ose y je vyznačena tomu odpovídající změřená dohlednost pomocí kamery. V oblasti velmi nízkých dohledností, které nás z hlediska šíření optického signálu zajímají nejvíce, dosahují nejvyšší odchylky 10 m, což je velmi dobrá přesnost. Symetrické rozložení bodů kolem osy naznačuje, že není potřeba žádná kalibrace.



Obr. 6: Porovnání dohledností z kamery s dohlednostmi z dohledoměrů v homogenní mlze

## ZÁVĚR

V článku byly prezentovány prvotní výsledky měření dohlednosti kamerou v reálných podmínkách na meteorologické observatoři Milešovka. Časový průběh na Obr. 4 dokazuje, že tento systém vystihuje rychlé změny hustoty mlhy a především je schopen měřit odpovídající dohlednost podél celé trasy optického spoje. Oproti profesionálním dohledoměrům tedy detekuje i nehomogenní mlhu na dané trase a je výrazně levnější. V našem případě byla zvolena varianta s objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností a ručně nastavitelnou clonou, což se ukazuje být nevhodným řešením. Clona je nastavena na slabší světlo v mlze a při slunečném počasí jsou snímky tzv. přepálené. Nás ale nejvíce zajímají právě mlžné úseky s nízkou dohledností. Naším řešením nyní bude použití autoiris objektivu s automatickou clonou, díky čemuž budeme schopni objektivně měřit dohlednost v různých světelných podmínkách. Systém měření kamerou je nevhodný pro operační dlouhodobé měření dohlednosti kvůli nemožnosti měřit v noci. I při osvětlení terče v noci by se jednalo o odlišné podmínky, jelikož ve dne se na kameře zachycuje i difúzní sluneční záření odražené přímo od kapiček mlhy.

Největší devízou je možnost detekovat časově velmi krátké mlžné či oblačné události, díky čemuž jsme schopni tyto události z dat filtrovat za účelem studování vlivu ostatních meteorologických jevů (např. větrných turbulencí, deště atd.) na přenos optického spoje. V neposlední řadě poskytuje vizuální kontrolu pracoviště. Lze tak detekovat typ srážek, pokud by identifikace z meteorologických měřených dat nebyla stoprocentní.

Parametry kamery a objektivu by měly být přizpůsobeny vzdálenosti terče tak, aby snímač zachytil plochu obou částí terče alespoň dvěma sty pixely. Pro účely měření kontrastu se osvědčil černobílý snímač, jenž měří poměrnou svítivost přímo. U barevného snímače se musí svítivost přepočítat ze složek RGB, což vede ke zdroji nepřesnosti vzhledem k možnému nesprávnému nastavení vyvážení bílé barvy.

## Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou studentského grantu SGFEI01/2013 Univerzity Pardubice a grantu GAČR P102/11/1376.

## LITERATURA

- [1] Bednář, J. at al. „Meteorologický slovník výkladový a terminologický,“ MŽP Praha, 1993
- [2] Kruse, P.W., McGlauchlin, L.D., McQuistan, R.B. „Elements of Infrared Technology: generation, transmission and detection.“ [s.l.] : J.Wiley & Sons, 1962.
- [3] Brázda, V., Ijaz M., Pérez Soler J. a Fišer O. „Měření dohlednosti digitálním fotoaparátem.“ Perner's Contacts. 2012, 7., 3., s. 16-23. ISSN 1801-674x.
- [4] Brázda V., Fišer O., Pešice P., Pešek J. 2011. „Combination of two visibility sensors to predict fog attenuation on FSO links.“ Proceedings of the Eleventh International Conference on Telecommunications, ISBN 987-953-184-152-8, 15-17.6.2011, Graz, Austria.
- [5] Michelson, A. Studies in Optics. U. of Chicago Press, 1927.
- [6] Colvero C.P., Cordeiro M.C.R., von der Weid J.P., „New Proposal for Real Time Measurements of Visibility and Signal Levels in Free Space Optical Systems,“ Microwave and Optoelectronics, SBMO/IEEE MTT-S International Conference, pp. 344 – 347, 2005.
- [7] Kim, I.I.; McArthur, B.; Korevaar, E. „Comparison of Laser Beam Propagation at 785nm and 1550nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications.“ [s.l.] : Proc. SPIE, Vol.4214 Optical Wireless Communications III., 2001.