



# Luminance Distribution Analyser LDA

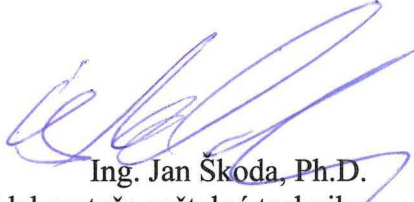
## Kalibrační protokol

Číslo protokolu: **18320-LDA-2018-3**  
Datum vystavení: **13. 11. 2018**  
Platnost kalibrace: **13. 11. 2020**  
Vystaveno pro: **ELTODO OSVĚTLENÍ, s.r.o**  
**Novodvorská 1010/14**  
**Praha 4, 142 00**


Měřené součásti sestavy:

Digitální fotoaparát: **NIKON D7500 vč.: 6033008**  
Objektiv: **SIGMA 135 mm f/1,8 DG : 52234048**  
Korekční filtr: **V( $\lambda$ ), id.č.: SFG13a-Sk041018/4**


Zodpovědná osoba:

  
Ing. Jan Škoda, Ph.D.  
vedoucí laboratoře světelné techniky

Schválil:

  
doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.  
vedoucí pracovní skupiny

Vedoucí pracoviště:

  
doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.  
vedoucí UEEN



Výsledky kalibrace:

Konfigurace	$k_L$ [counts/cd·m <sup>-2</sup> ]
Sigma 135 mm	10,8106
Sigma 135 mm + ND 1000 filtr	9731,55

Nejistota měření jasu:

Typ nejistoty	Symbol	Hodnota
Celková rozšířená nejistota	$U$	9,3 %

$k_u=2$

Celkový počet listů protokolu: 7

list 1

## 1. Účel kalibrace

Nalezení optimálních koeficientů pro výpočet jasu z naměřených obrazů pomocí přístroje LDA a vytvoření elektronické verze kalibrační databáze. Stanovení základních chyb měření.

## 2. Výchozí podmínky

Absolutní měření jasu vyžaduje úplné přizpůsobení snímacího senzoru křivce spektrální účinnosti optického záření normálního fotopického pozorovatele dle CIE 1931. Použitý snímací systém obsahuje tři typy senzorů: R, G, B. Z fyzikální podstaty není možné najít takové koeficienty, které by zajistily úplné spektrální přizpůsobení pro libovolný typ světelného zdroje. Proto je nutné pro přístroj LDA použít diferenční filtr  $V(\lambda)$ , speciálně navržen pro hardwarové přizpůsobení spektrální citlivosti fotoaparátu ke křivce spektrální účinnosti optického záření normálního fotopického pozorovatele.

## 3. Podmínky použití

Kalibrační protokol nesmí být bez písemného souhlasu dodavatele rozmnožován jinak, než v celkovém počtu stran. Změny a doplňky mohou být provedeny pouze dodavatelem, který protokol vystavil. Výsledky měření platí pouze pro přístroje uvedené v tomto protokolu. Protokol nenahrazuje úřední certifikaci a ověření certifikační autoritou. Postup kalibrace a výsledky měření pomocí přístroje jsou prováděny podle mezinárodních standardů a doporučení, zejména ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 se zpětnou sledovatelností vazby na standardy definované NIST (National Institute of Standards and Technology).

## 4. Použité měřicí přístroje

Jasový normál: Integrační koule OL IS-670-LED Gooch & Housego  
Referenční měřidlo: JETI Specbos 1211 UV, vč.: 2015926, kalibrace platná do 29. 8. 2019  
Kontrolní měřidlo: Jasoměr Minolta LS-100, vč.: 72213028  
Zdroj monochromatického světla: Gooch & Housego OL 750 se světelným zdrojem typu A

## 5. Metoda kalibrace

Kalibrace byla provedena na pracovišti laboratoře světelné techniky Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, pomocí metodiky, která je výsledkem dlouhodobého výzkumu a vývoje pracoviště.

Kalibrace byla provedena přímým porovnáním hodnot získaných měřením testovaným a referenčním měřidlem. Referenční měřidlo pracuje na principu radiometrického vyhodnocení rozložení energie ve spektru a z tohoto rozložení poté vypočte fotometrický jas dle křivky  $V(\lambda)$  CIE 1931. Takto získanou hodnotu lze považovat za dostatečně přesnou pro daný účel dalšího provozního měření.

Přístroj LDA byl testován v několika oddělených sekvencích, kdy se kalibruje linearita vlastního snímače a jeho citlivost, korekce velikosti clonového čísla, korekce rychlosti závěrky, spektrální citlivost a geometrie objektivu. Testy byly prováděny pro normalizované světlo A o teplotě chromatičnosti 2856K. Pro zajištění homogenity jasu snímaného pole byl použit kulový integrátor o průměru 2,5 m.

Při měření byl fotoaparát nastaven na **krok 1/3 EV** a citlivost **ISO o hodnotě 100**.

Kalibraci provedli společně pracovníci ústavu elektroenergetiky Ing. Jan Škoda, Ph.D., Ing. Stanislav Sumec, Ph.D., doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D a Ing. Martin Motyčka.

## 6. Podmínky měření

Měření bylo provedeno za standardních podmínek v zatemněné laboratoři bez přítomnosti rušivého světla a jiných parazitních vlivů.

Teplota vzduchu v laboratoři se pohybuje  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ , relativní vlhkost  $35\% \pm 10\%$ , tlak  $104,0\text{ kPa} \pm 10\text{ kPa}$ .

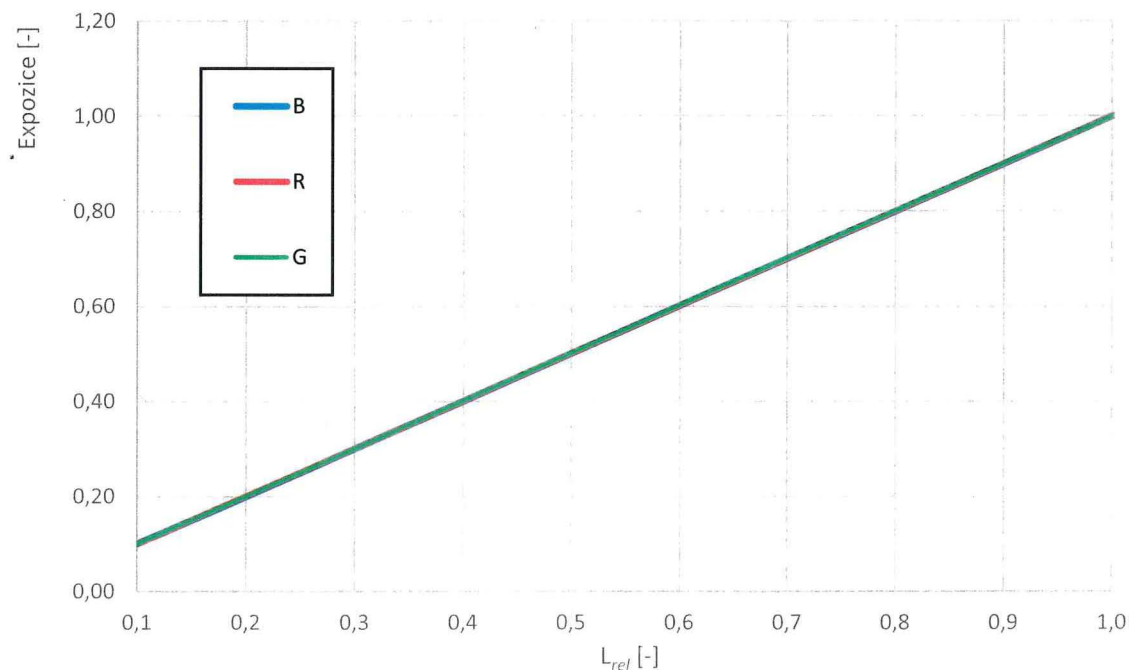
## 7. Výsledky kalibrace

Naměřená data z referenčního a testovaného měřidla byla zpracována a vyhodnocena řadou srovnávacích zkoušek, jejichž výsledkem jsou jednotlivé koeficienty, které se používají v přepočtových funkcích pro konverzi signálu z digitální fotografie zpět na jasovou informaci. Hodnoty byly vybrány ze statisticky významných vzorků tak, aby výsledky nebyly zatíženy nahodilými chybami. Kvůli zajištění spolehlivosti a opakovatelnosti měření, jsou koeficienty integrovány do elektronické podoby kalibrační databáze. Z hlediska uživatele však tyto údaje nejsou důležité, přístroj při měření a nastavení vhodného režimu správné koeficienty vybere sám.

Kalibrační databáze uložená v elektronické podobě tvoří nedílnou součást přístroje. Koeficienty se týkají přepočtu clonového čísla, expoziční doby, vlivu spektrálního složení světla a citlivosti vlastního snímacího čipu. Hodnoty a způsob použití koeficientů tvoří součást vnitřní architektury přístroje a nejsou uživatelsky dostupné. Ovládací program koeficienty používá automaticky při výběru vhodné kalibrační funkce.

### Linearita snímače

V tomto kroku kalibrace se ověřovala linearita snímače, kdy byl snímač exponován jasovým normálem a byla zkoumána jeho odezva, která byla porovnávána s referenčním spektrometrem JeTi SCB 1211 UV. Měření prokázalo výbornou linearitu použitého snímače. V následujícím grafu č. 1 jsou zobrazeny lineární závislosti jednotlivých senzorů: R, G, B.

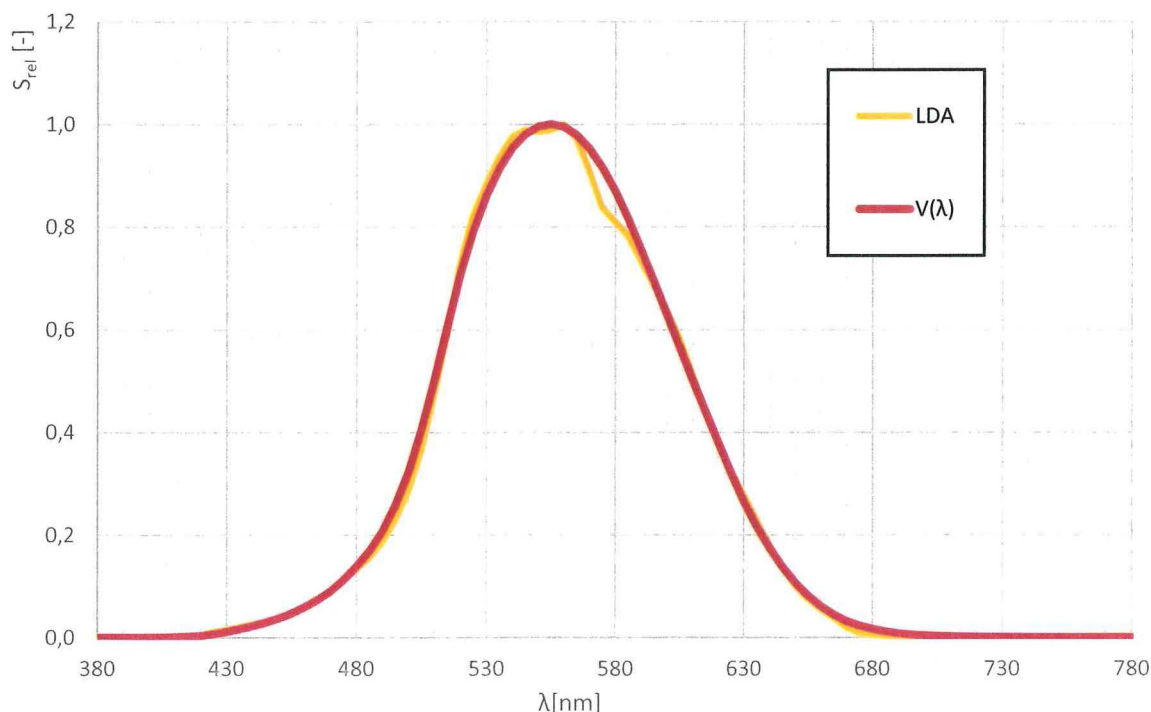


Graf 1 Linearita senzorů Nikon D7500

### Spektrální citlivost

Spektrální citlivost detektoru včetně objektivu a filtru byla změřena pomocí dvojitého monochromátoru Gooch & Housego OL 750, který společně se světelným zdrojem typu A sloužil jako zdroj monochromatického světla.

V následujícím grafu č. 2 je zobrazena změřená spektrální citlivost jasového analyzátoru LDA s objektivem Sigma 135 mm f/1,8. Spektrální chyba je rovna  $f_l' = 3,65\%$ .



Graf 2 Spektrální citlivost jasového analyzátoru LDA s objektivem Sigma 135 mm

### Nodální body

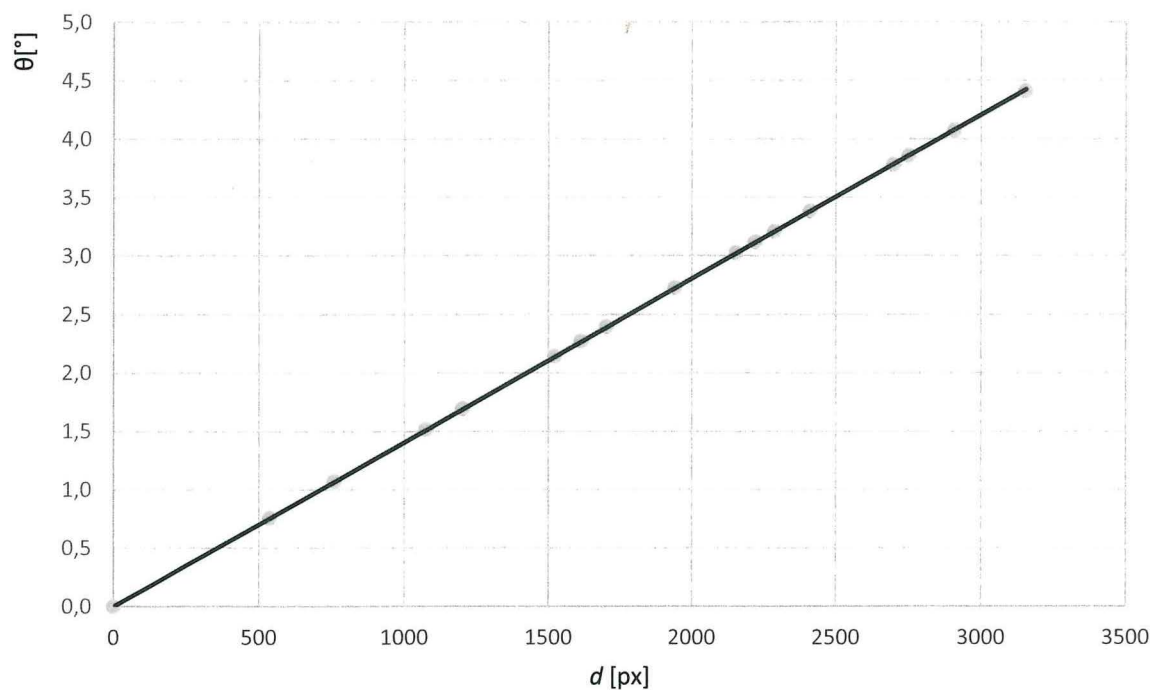
Pro objektiv Sigma 135 mm byla změřena hodnota nodálního bodu. Tento parametr je nezbytný pro korekci geometrie objektivu a pro panoramatické fotografování. Pro objektiv Sigma 135 mm byly změřeny nodální body ve vzdálenosti  $l_{FD}$  od závitového šroubu. Záporné znaménko značí směr od objektivu.

Tabulka 1 Vzdálenost nodálních bodů od závitového šroubu

Zaostření	$l_{FD}[\text{mm}]$
89 cm	-13,0
$\infty$	-8,0

### Geometrie objektivu

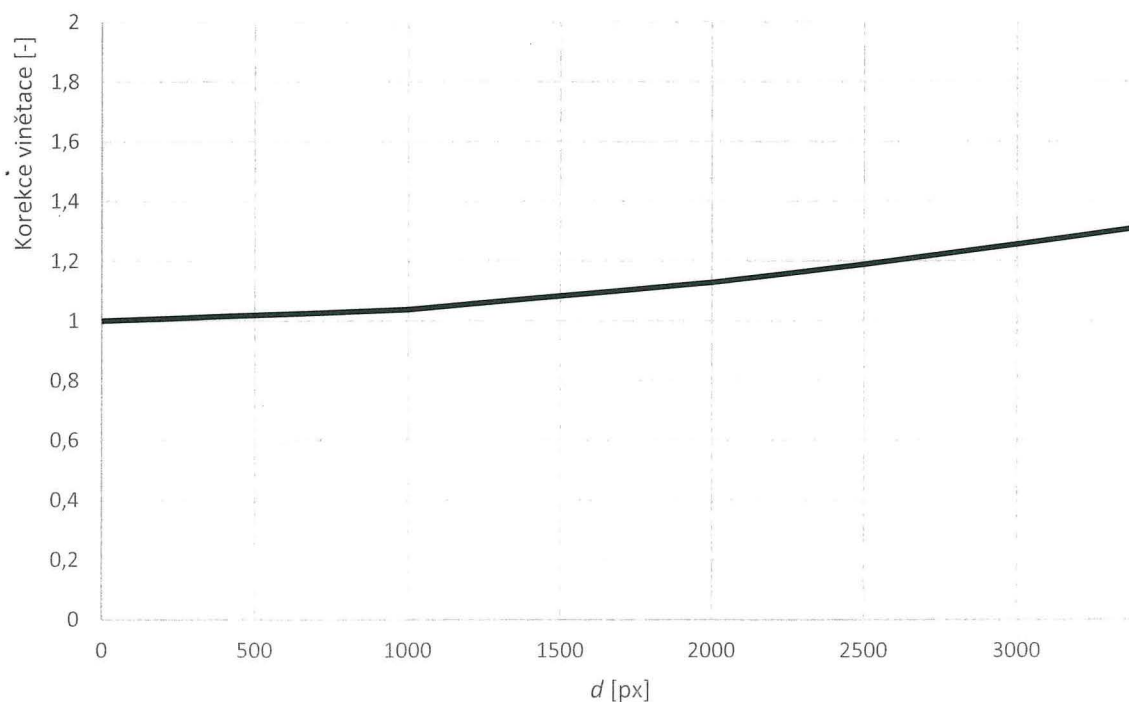
Pro korekci geometrie objektivu byly změřeny polynomy 2. řádu, které korigují úhly jednotlivých pixelů pořízeného snímku se skutečnou scénou. Tyto polynomy byly změřeny pro všechny roviny zaostření objektivu Sigma 135 mm. Příklad polynomu 2. řádu pro objektiv Sigma 135 mm je zobrazen v grafu č. 3.



Graf 3 Polynom korekce geometrie objektivu Sigma 135 mm.

### Vinětace objektivu

Korekce vinětace objektivu Sigma 135 mm byla změřena za pomoci jasového normálu Gooch & Housego OL IS-670-LED a speciálního polohovacího systému pro jednotlivá clonová čísla. Obecně platí, že vinětace se projevuje více na menších clonových číslech. Vinětace byla ověřena také pro neutrální filtr ND1000.



Graf 4 Korekce vinětace objektivu Sigma 135 mm pro zaostření na blízko při clonovém čísle  $f/1,8$

**Korekce ohniskové vzdálenosti**

Korekce ohniskové vzdálenosti objektivu Sigma 135 mm byly změřeny na fotometrické lavici s normálem jasu Gooch & Housego OL IS-670-LED s normalizovaným zdrojem typu A pro všechny roviny zaostření.

**Kalibrace na jasový normál**

Kalibrace na jasový normál byla provedena s integrační koulí Gooch & Housego OL IS-670-LED s normalizovaným světlem typu A o teplotě chromatičnosti 2856 K a referenčního jasoměru JeTi SCB 1211 UV s návazností na NIST. V tabulce č. 2 jsou zobrazeny vypočítané citlivostní koeficienty  $k_L$ .

Tabulka 2 Citlivostní koeficienty pro LDA s objektivem Sigma 135 mm

Konfigurace	$k_L$ [counts/cd·m <sup>-2</sup> ]
Sigma 135 mm	10,8106
Sigma 135 mm + ND 1000 filtr	9731,55

**8. Nejistoty měření**

Výsledná rozšířená nejistota měření jasového analyzátoru LDA se vypočítá z nejistot typu A a B a koeficientu rozšíření  $k_u=2$ . Nejistota typu A reprezentuje náhodné chyby během měření a také opakovatelnost měření. Nejistoty typu B se počítají ze systematických chyb. Mezi tyto nejistoty patří nejistota kalibrace na jasový normál pomocí referenčního spektrometru JeTi SCB 1211 UV, nejistota spektrálního přizpůsobení na křivku  $V(\lambda)$ , nejistota korekce vinětace, clony a ohniskové vzdálenosti.

**Objektiv SIGMA 135 mm f/1,8 DG**

Seznam nejistot měření včetně výsledné nejistoty měření jasu pro objektiv Sigma 135 mm je zobrazen v tabulce č. 3.

Tabulka 3 Seznam nejistot měření s objektivem Sigma 135 mm

Typ nejistoty	Symbol	Hodnota
Opakovatelnost měření (nejistota typu A)	$U_A$	0,9 %
Kalibrace na jasový normál pomocí referenčního jasoměru JeTi SCB 1211 UV <sup>(1)</sup>	$U_{Bk}$	2,4 %
Spektrální chyba měření spektra odlišného od typu A <sup>(2)</sup>	$U_{Bs}$	0,4 %
Korekce geometrie objektivu	$U_{Bg}$	1,0 %
Korekce vinětace objektivu	$U_{Bv}$	2,9 %
Opakovatelnost nastavení clony <sup>(3)</sup>	$U_{Bc}$	1,8 %
Korekce ohniskové vzdálenosti	$U_{Bo}$	1,5 %
Kombinovaná nejistota	$U_C$	4,7 %
<b>Celková rozšířená nejistota</b>	<b><math>U</math></b>	<b>9,3 %</b>

Koeficient rozšíření  $k_u=2$ .

(1) Přístroj má platnou kalibraci s návazností na NIST do 29. 8. 2019.

(2) Nejistota spektrální chyby pro měření LED o náhradní teplotě chromatičnosti  $T_c=6500$  K v přímém směru.

(3) Nejistota při nastavení clony f/14

**Rozšířená nejistota  $U$** 

Při uvažování koeficientu rozšíření  $k_u = 2$ , který při normálním rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %, byla stanovena celková rozšířená nejistota měření jasu na  $U=9,3$  % pro objektiv Sigma 135 mm.

**9. Závěr**

Kalibrační protokol je nedílnou součástí sestavy přístroje LDA – Luminance Distribution Analyser a slouží jako dokument potvrzující existenci elektronické verze kalibračních dat, která jsou primárně používána dodaným přístrojem v softwarové podobě.

**10. Zúčastněné osoby**

Měření a kompletace přístroje se účastnili:

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Ing. Stanislav Sumec, Ph.D.

Ing. Martin Motyčka