



International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Eclairage
Internationale Beleuchtungskommission

ISBN 978-3-902842-75-6

DOI: 10.25039/TR.233.2019

TECHNICAL REPORT

Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers

CIE 233:2019

UDC: 535.24
535.243

Descriptor: Photometry
Spectrophotometry

THE INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION

The International Commission on Illumination (CIE) is an organization devoted to international co-operation and exchange of information among its member countries on all matters relating to the art and science of lighting. Its membership consists of the National Committees in about 40 countries.

The objectives of the CIE are:

1. To provide an international forum for the discussion of all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting and for the interchange of information in these fields between countries.
2. To develop basic standards and procedures of metrology in the fields of light and lighting.
3. To provide guidance in the application of principles and procedures in the development of international and national standards in the fields of light and lighting.
4. To prepare and publish standards, reports and other publications concerned with all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting.
5. To maintain liaison and technical interaction with other international organizations concerned with matters related to the science, technology, standardization and art in the fields of light and lighting.

The work of the CIE is carried out by Technical Committees, organized in six Divisions. This work covers subjects ranging from fundamental matters to all types of lighting applications. The standards and technical reports developed by these international Divisions of the CIE are accepted throughout the world.

A plenary session is held every four years at which the work of the Divisions and Technical Committees is reported and reviewed, and plans are made for the future. The CIE is recognized as the authority on all aspects of light and lighting. As such it occupies an important position among international organizations.

LA COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) est une organisation qui se donne pour but la coopération internationale et l'échange d'informations entre les Pays membres sur toutes les questions relatives à l'art et à la science de l'éclairage. Elle est composée de Comités Nationaux représentant environ 40 pays.

Les objectifs de la CIE sont :

1. De constituer un centre d'étude international pour toute matière relevant de la science, de la technologie et de l'art de la lumière et de l'éclairage et pour l'échange entre pays d'informations dans ces domaines.
2. D'élaborer des normes et des méthodes de base pour la métrologie dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
3. De donner des directives pour l'application des principes et des méthodes d'élaboration de normes internationales et nationales dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
4. De préparer et publier des normes, rapports et autres textes, concernant toutes matières relatives à la science, la technologie et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
5. De maintenir une liaison et une collaboration technique avec les autres organisations internationales concernées par des sujets relatifs à la science, la technologie, la normalisation et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.

Les travaux de la CIE sont effectués par Comités Techniques, organisés en six Divisions. Les sujets d'études s'étendent des questions fondamentales, à tous les types d'applications de l'éclairage. Les normes et les rapports techniques élaborés par ces Divisions Internationales de la CIE sont reconnus dans le monde entier.

Tous les quatre ans, une Session plénière passe en revue le travail des Divisions et des Comités Techniques, en fait rapport et établit les projets de travaux pour l'avenir. La CIE est reconnue comme la plus haute autorité en ce qui concerne tous les aspects de la lumière et de l'éclairage. Elle occupe comme telle une position importante parmi les organisations internationales.

DIE INTERNATIONALE BELEUCHTUNGSKOMMISSION

Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) ist eine Organisation, die sich der internationalen Zusammenarbeit und dem Austausch von Informationen zwischen ihren Mitgliedsländern bezüglich der Kunst und Wissenschaft der Lichttechnik widmet. Die Mitgliedschaft besteht aus den Nationalen Komitees in rund 40 Ländern.

Die Ziele der CIE sind:

1. Ein internationales Forum für Diskussionen aller Fragen auf dem Gebiet der Wissenschaft, Technik und Kunst der Lichttechnik und für den Informationsaustausch auf diesen Gebieten zwischen den einzelnen Ländern zu sein.
2. Grundnormen und Verfahren der Messtechnik auf dem Gebiet der Lichttechnik zu entwickeln.
3. Richtlinien für die Anwendung von Prinzipien und Vorgängen in der Entwicklung internationaler und nationaler Normen auf dem Gebiet der Lichttechnik zu erstellen.
4. Normen, Berichte und andere Publikationen zu erstellen und zu veröffentlichen, die alle Fragen auf dem Gebiet der Wissenschaft, Technik und Kunst der Lichttechnik betreffen.
5. Liaison und technische Zusammenarbeit mit anderen internationalen Organisationen zu unterhalten, die mit Fragen der Wissenschaft, Technik, Normung und Kunst auf dem Gebiet der Lichttechnik zu tun haben.

Die Arbeit der CIE wird durch Technische Komitees geleistet, die in sechs Divisionen organisiert sind. Diese Arbeit betrifft Gebiete mit grundlegendem Inhalt bis zu allen Arten der Lichtenwendung. Die Normen und Technischen Berichte, die von diesen international zusammengesetzten Divisionen ausgearbeitet werden, sind auf der ganzen Welt anerkannt.

Alle vier Jahre findet eine Session statt, in der die Arbeiten der Divisionen berichtet und überprüft werden, sowie neue Pläne für die Zukunft ausgearbeitet werden. Die CIE wird als höchste Autorität für alle Aspekte des Lichtes und der Beleuchtung angesehen. Auf diese Weise unterhält sie eine bedeutende Stellung unter den internationalen Organisationen.

Published by the

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE
CIE Central Bureau
Babenbergerstrasse 9, A-1010 Vienna, AUSTRIA
Tel: +43(1)714 31 87
e-mail: ciecb@cie.co.at
www.cie.co.at



International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Eclairage
Internationale Beleuchtungskommission

ISBN 978-3-902842-75-6

DOI: 10.25039/TR.233.2019

TECHNICAL REPORT

Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers

CIE 233:2019

UDC: 535.24
535.243

Descriptor: Photometry
Spectrophotometry

This Technical Report has been prepared by CIE Technical Committee 2-51 of Division 2 "Physical Measurement of Light and Radiation" and has been approved by the Board of Administration and by Division 2 of the Commission Internationale de l'Eclairage. The document reports on current knowledge and experience within the specific field of light and lighting described, and is intended to be used by all with an interest in excellence in light and lighting. The information provided here is advisory, and not mandatory.

Ce rapport technique a été élaboré par le Comité Technique CIE 2-51 de la Division 2 "Mesures Physiques de la Lumière et des Radiations" et a été approuvé par le Bureau et Division 2 de la Commission Internationale de l'Eclairage. Le document expose les connaissances et l'expérience actuelles dans le domaine particulier de la lumière et de l'éclairage décrit ici. Il est destiné à être utilisé par tous ceux qui s'intéressent à l'excellence de la lumière et de l'éclairage. Les informations fournies ici sont données à titre indicatif et non obligatoire.

Dieser Technische Bericht ist vom Technischen Komitee CIE 2-51 der Division 2 "Physikalische Messungen von Licht und Strahlung" ausgearbeitet und vom Vorstand sowie Division 2 der Commission Internationale de l'Eclairage gebilligt worden. Das Dokument berichtet über den derzeitigen Stand des Wissens und Erfahrung in dem behandelten Gebiet von Licht und Beleuchtung. Es ist zur Verwendung durch alle an Licht- und Beleuchtungsqualität Interessierte bestimmt. Die in diesem Dokument gegebenen Informationen sind eine Empfehlung und keine Vorschrift.

Any mention of organizations or products does not imply endorsement by the CIE. Whilst every care has been taken in the compilation of any lists, up to the time of going to press, these may not be comprehensive.

Toute mention d'organisme ou de produit n'implique pas une préférence de la CIE. Malgré le soin apporté à la compilation de tous les documents jusqu'à la mise sous presse, ce travail ne saurait être exhaustif.

Die Erwähnung von Organisationen oder Erzeugnissen bedeutet keine Billigung durch die CIE. Obgleich große Sorgfalt bei der Erstellung von Verzeichnissen bis zum Zeitpunkt der Drucklegung angewendet wurde, besteht die Möglichkeit, dass diese nicht vollständig sind.

The following members of TC 2-51 “Calibration, characterization and use of array spectroradiometers” took part in the preparation of this Technical Report. The committee comes under Division 2 “Physical Measurement of Light and Radiation”.

Authors:

Young, R. (Chair)	Germany
Austin, R. (former chair)	USA
Bergen, T.	Australia
Distl, R.	Germany
Gardner J.	Australia
Goodman, T.	United Kingdom
Heidel, G.	Germany
Krüger, U.	Germany
Nägele, T.	Germany
Nevas, S.	Germany
Ohkubo, K.	Japan
Pan, J.	China
Schanda, J. †	Hungary
Sperfeld, P.	Germany
Sperling, A.	Germany
Thorseth, A.	Denmark
Zong, Y.	USA

Advisor:

Leecharoen, R.	Thailand
----------------	----------

CONTENTS

Summary	vii
Résumé	vii
Zusammenfassung	vii
1 Introduction	1
2 Scope	2
3 Terminology	2
4 Common designs of array spectroradiometers	4
4.1 General components	4
4.1.1 Spectrograph design	4
4.1.2 Input optics	4
4.1.3 Array detector	5
5 Properties and characterization of array spectroradiometers	5
5.1 Input optics characterization	5
5.1.1 Imaging optics characterization	5
5.1.2 Irradiance input optic characterization	6
5.2 Resolution	6
5.2.1 Sampling interval	6
5.2.2 Interpolation	8
5.2.3 Numerical integration	13
5.2.4 Optical resolution	13
5.2.5 Bandpass correction	15
5.2.6 Spectral broadening index	17
5.3 Stray light	17
5.3.1 Sources of stray light	18
5.3.2 Matrix method for stray-light correction	21
5.3.3 Bandpass filter method for stray-light reduction in array spectrometers	24
5.3.4 Stray-light coefficient method for stray-light reduction	29
5.3.5 Stray-light contribution from light outside the spectral range of a spectroradiometer	31
5.3.6 Stray light index	33
5.3.7 OoR stray light index	34
5.4 External stray light	35
5.5 Linearity	35
5.5.1 Measurement averages	35
5.5.2 External stray light	36
5.5.3 Dark (baseline) subtraction	36
5.5.4 Linearity at fixed integration time	38
5.5.5 Linearity at fixed intensity	38
5.5.6 Linearity at fixed counts	38
5.5.7 Smearing and charge-transfer efficiency	38
5.5.8 Blooming	38
5.5.9 Fatigue	39
5.5.10 Linearity index	39

5.6	Synchronization.....	40
5.6.1	Measurement of pulsed and flash sources	40
5.6.2	Measurement of modulated sources	41
5.7	Ambient temperature	41
6	Calibrations	42
6.1	Wavelength calibration	42
6.2	Calibration of spectroradiometric instruments	45
6.2.1	Calibration methods.....	46
6.2.2	Measurement uncertainty considerations	50
6.2.3	Spectral irradiance response calibration	51
6.2.4	Spectral radiance response calibration	57
6.2.5	Total spectral radiant flux (TSRF) responsivity calibration	62
6.2.6	2π spectral radiant flux (2π SRF) responsivity calibration.....	64
6.2.7	Special response calibrations	66
Annex A	General components and properties	70
A.1	Spectrograph designs.....	70
A.1.1	Czerny–Turner and Fastie–Ebert	70
A.1.2	Crossed Czerny–Turner.....	70
A.1.3	Curved holographic grating designs	71
A.2	Aberrations.....	71
A.2.1	Astigmatism.....	72
A.2.2	Coma	72
A.2.3	Spherical aberration	72
A.2.4	Field curvature	72
A.2.5	Refraction through filters and windows	73
A.2.6	Effect of aberrations on measurement results	74
A.3	Order-sorting filters	74
A.3.1	Principles	74
A.3.2	Filter wheels and slides	75
A.3.3	Mosaic filters	75
A.3.4	Progressive filters.....	75
A.4	Fibre optics	75
A.5	Imaging optics	77
A.5.1	Reflex-view design	77
A.5.2	Direct-viewing design	78
A.5.3	Back-projection design	78
A.6	Non-imaging input optics	79
A.6.1	Irradiance/radiant intensity measurements.....	79
A.6.2	Flux measurements	80
A.7	Optics for spectrophotometric measurements	83
A.7.1	Geometries for measuring reflecting samples	83
A.7.2	Influx and efflux geometries.....	83
A.7.3	Geometries for measuring transmitting samples	86
A.7.4	Corrections for differences between sample and reference	87
A.8	Array detectors.....	88
A.8.1	Common types of array detector	88
A.8.2	Responsivity of array detectors.....	90
A.8.3	Fill factor	91

A.8.4	Etaloning of detectors	91
A.8.5	Effect of cooling detectors	91
A.8.6	MPP control of detectors	91
A.8.7	Readout types	91
A.9	Flux measurements using combinations of relative and absolute standards	92
References	93

CALIBRATION, CHARACTERIZATION AND USE OF ARRAY SPECTRORADIOMETERS

Summary

Array spectroradiometers are used pervasively in light measurement. However, their properties are not widely understood by users. This report seeks to educate users in the characteristics of array spectroradiometers that are important to obtaining accurate measurement results. Moreover, performance indices are proposed that will enable users to rank instruments according to the properties that affect their applications. In many cases, if the array spectroradiometer is properly characterized, correction can be made to measurements that will improve the accuracy. Details of the nature and use of these corrections are given. Calibration procedures and uncertainties are discussed for various common quantities, giving a sound foundation to measurements. Background information, underlying the discussions, is found in the annexes and references.

ÉTALONNAGE, CARACTERISATION ET UTILISATION DES SPECTRORADIOMETRES A MATRICE CCD

Résumé

Les spectroradiomètres à matrice sont de plus en plus utilisés dans le domaine de la mesure de la lumière. Cependant, leurs propriétés ne sont pas très bien connues par les utilisateurs. Ce rapport a pour objectif d'informer l'utilisateur sur les caractéristiques de ces spectroradiomètres à capteur matriciel, afin de permettre à ce dernier d'obtenir des mesures justes. Des indices de performance sont proposés, pour permettre à l'utilisateur de classer les instruments en fonction de ses applications. Dans la plupart de cas, si le spectrophotomètre matriciel est correctement caractérisé, les mesures peuvent être corrigées afin d'augmenter la justesse des mesures. La nature de ces corrections est détaillée dans le rapport. Les méthodes d'étalonnage et les incertitudes correspondantes sont discutées pour différentes quantités radiométriques. Les travaux fondamentaux sur lesquels se sont appuyées les discussions peuvent être trouvés dans les annexes et les références.

KALIBRIERUNG, CHARAKTERISIERUNG UND NUTZUNG VON ARRAY-SPEKTRORADIOMETERN

Zusammenfassung

Array-Spektorradiometer werden allenthalben bei Lichtmessungen verwendet. Allerdings werden ihre Eigenschaften von den Nutzern häufig nicht verstanden. Dieser Bericht versucht, Nutzer hinsichtlich der Charakteristiken von Array-Spektorradiometern zu unterrichten, die zur Erzielung genauer Messresultate von Bedeutung sind. Weiterhin werden Leistungsindizes vorgeschlagen, die Nutzer in die Lage versetzen, Instrumente hinsichtlich der für ihre Anwendungen wichtigen Eigenschaften einzuordnen. In vielen Fällen, wenn das Array-Spektorradiometer hinreichend charakterisiert ist, können die Messungen korrigiert werden, um die Genauigkeit zu verbessern. Details zur Art und Nutzung dieser Korrekturen werden gegeben. Kalibrierungsprozeduren und -unsicherheiten werden für verschiedene gängige Größen diskutiert, womit eine solide Grundlage für Messungen gegeben wird. Hintergrundinformationen, die den Diskussionen zugrunde liegen, sind in den Anhängen und Referenzen zu finden.