



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

ISBN 978-3-902842-53-4

TECHNICAL REPORT

Effect of Instrumental Bandpass Function and Measurement Interval on Spectral Quantities

CIE 214:2014

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 seven 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 sept 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 sieben Divisionen organisiert sind. Diese Arbeit betrifft Gebiete mit grundlegendem Inhalt bis zu allen Arten der Lichtanwendung. 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



ISBN 978-3-902842-53-4

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

TECHNICAL REPORT

Effect of Instrumental Bandpass Function and Measurement Interval on Spectral Quantities

CIE 214:2014

UDC: 535.24
535.243

Descriptor: Photometry
Spectrophotometry

This Technical Report has been prepared by CIE Technical Committee 2-60 of Division 2 "Physical Measurement of Light and Radiation" and has been approved by the Board of Administration as well as by Division 2 of the Commission Internationale de l'Eclairage for study and application. The document reports on current knowledge and experience within the specific field of light and lighting described, and is intended to be used by the CIE membership and other interested parties. It should be noted, however, that the status of this document is advisory and not mandatory.

Ce rapport technique a été élaboré par le Comité Technique CIE 2-60 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, pour étude et emploi. 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 les membres de la CIE et par tous les intéressés. Il faut cependant noter que ce document est indicatif et non obligatoire.

Dieser Technische Bericht ist vom Technischen Komitee CIE 2-60 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 CIE-Mitglieder und durch andere Interessierte bestimmt. Es sollte jedoch beachtet werden, dass das Dokument eine Empfehlung und keine Vorschrift ist.

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 2-60, “Effect of Instrumental Bandpass Function and Measurement Interval on Spectral Quantities” took part in the preparation of this Technical Report. The committee comes under Division 2 “Physical Measurement of Light and Radiation”.

Authors:

Gardner, J.
Woolliams, E.

Baribeau, R.
Bergen, T.
Bialek, A.
Carter, E.
Cox, M.
Goodman, T.
Krueger, U.
Li, C.
Nevas, S.
Ohno, Y.
Saito, T.
Young, R.
Zong, Y.
Zwinkels, J.

Australia (Chair from 2013)
United Kingdom (Chair until 2013)

Canada
Australia
United Kingdom
USA
United Kingdom
United Kingdom
Germany
China
Germany
USA
Japan
Germany
USA
Canada

Advisors:

Görlich, S.
Heidel, G.
Hirschler, R.
Sieberhagen, R.
Sperfeld, P.

Germany
Germany
Hungary
South Africa
Germany

CONTENTS

Summary	VII
Résumé	VII
Zusammenfassung	VII
1 Introduction	1
1.1 Objectives	1
1.2 Scope	1
2 Terminology	1
2.1 References for terminology	1
2.2 Instrumentation	1
2.2.1 Spectrometer	2
2.2.2 Spectroradiometer	2
2.2.3 Spectrophotometer	2
2.2.4 Monochromator	2
2.2.5 Array spectrometer	3
2.3 Instrumental passband and instrumental bandpass	3
2.3.1 Bandpass function	3
2.3.2 Bandwidth, passband, full-width at half maximum	4
2.3.3 Reciprocal linear dispersion and slit width	4
2.3.4 Spectrometer resolution	5
2.4 Instrumental wavelength accuracy	5
2.4.1 Nominal wavelength (of measurement)	5
2.4.2 Centroid wavelength	5
2.4.3 Wavelength error	5
2.5 Stray light	5
2.6 Measurement interval	6
2.7 Mathematical descriptions and symbols	6
2.7.1 Measurand, measurement and measured values	6
2.7.2 Symbols used in formulae in this report	7
3 A practical introduction to bandwidth correction	8
3.1 Spectrometers for spectral measurements	8
3.1.1 Introduction	8
3.1.2 Calibration	8
3.1.3 Measurement geometry	8
3.1.4 Bandwidth in a grating-based device	9
3.2 The effect of bandwidth on spectral measurements	9
3.3 The effect of measurement interval for line sources	10
3.4 Determining the instrumental bandpass function	10
3.5 Applying a bandwidth correction	11
3.5.1 Step 1: Determine the bandpass function and its moments	11
3.5.2 Step 2: Determine the correction coefficients	12
3.5.3 Step 3: Calculate the correction	12
3.5.4 Step 4: Test the correction	14
3.5.5 Simplification for triangular bandpass functions	14
3.6 Limits to bandwidth correction for noise-free measurements	14
3.7 Limits to bandwidth correction in the presence of measurement noise	15

3.8	Implication of bandwidth correction for the calculation of integrated quantities	16
3.9	When should bandwidth correction be applied and when not?	16
3.10	Evaluating uncertainties for measurements with bandwidth correction	17
3.11	Details covered in following clauses	17
4	Other related effects	17
4.1	Measurement interval	17
4.2	Stray light	18
4.3	Wavelength scale error	20
5	Origin of bandwidth	22
5.1	The grating equation	22
5.2	Origin of the bandpass function	23
6	Determining the bandpass function	24
6.1	Filling the entrance slit of the spectrometer	25
6.2	Monochromatic sources	25
6.3	Highest accuracy measurement	26
6.4	Specifics for scanning instruments	26
6.5	Specifics for multi-channel spectrometers	26
6.6	Spectral range used and creating 'zeros'	27
6.7	Determining the bandpass function of an array spectrometer using a model	27
7	Effect of instrumental bandpass on spectral measurements	29
7.1	Effect of spectrum being measured on measurement results	29
7.1.1	No change for linear functions	29
7.1.2	Peaks are broadened and shortened	30
7.1.3	Troughs are made shallower and broader	30
7.1.4	Effect of asymmetrical bandpass functions	31
7.1.5	Real bandpass functions	32
7.2	Effect of the bandpass function on the calibration of a spectrometer	32
7.2.1	Calibration of test artefact against reference artefact calibrated for the same quantity	33
7.2.2	Calibration of test artefact against reference artefact calibrated for a different quantity	34
7.3	When bandpass can be ignored	34
8	Convolution and sampling theory	34
8.1	Fourier transforms	34
8.2	Convolution	38
8.3	Integrated recording vs point recording	38
8.4	Sampling	39
8.5	Shannon-Nyquist sampling theorem	40
9	Theoretical limits to correction	41
9.1	Influence of bandwidth	42
9.2	Influence of sampling	43
9.3	Effectiveness of the weighted-mean correction	44
9.4	Bandpass functions that are non-symmetric or non-triangular	46
10	Effect of measurement interval and Instrumental bandpass on line source measurements	47

11	Developing a correction approach	50
11.1	Possible types of correction approach	50
11.2	Historical development	51
11.2.1	Stearns-and-Stearns approach	51
11.2.2	Non-triangular bandpass functions	52
11.2.3	ASTM E-308: correcting weights rather than measurements	52
11.3	Derivation of the differential operator correction	53
11.4	Direct vs indirect bandpass function	56
11.5	Perfect triangular bandpass functions	56
12	When should weighted-mean bandwidth correction be applied?.....	57
13	Effect of bandpass and its correction on integrated quantities	60
13.1	Integrated quantities.....	60
13.2	Calculating integrated quantities from measured data	61
13.3	Bandpass and integrated quantities.....	62
13.4	Noise and integrated quantities	62
14	Uncertainty.....	63
14.1	The determination of the bandpass function	63
14.2	Uncertainties associated with the measurement data	64
14.3	Accuracy of correction algorithm	64
15	Experimental examples	64
15.1	Irradiance of deuterium lamp calibrated against a blackbody	64
15.2	Monochromator measurements of filtered source	66
15.3	Correlated colour temperature of a white LED	66
15.3.1	Step 1: Determine the instrument bandpass	67
15.3.2	Step 2: Calculate the correction coefficients	67
15.3.3	Step 3: Measure the LED	68
15.3.4	Step 4: Apply the correction	68
15.3.5	Effect of smaller derivative interval	69
16	Determining the bandpass function.....	70
16.1	Common spectral lines	70
16.2	Determining contamination due to overlapping peaks	71
17	Conclusions.....	73
18	References.....	74

EFFECT OF INSTRUMENTAL BANDPASS FUNCTION AND MEASUREMENT INTERVAL ON SPECTRAL QUANTITIES

Summary

This report presents a detailed study of bandwidth correction applied to spectra encountered in radiometric, photometric and spectrophotometric measurements. The mechanism of broadening of data recorded by both scanning and array spectrometers, due to bandpass function effects, is discussed in detail, along with an historical study of methods currently applied. The report presents a bandwidth correction algorithm that can be used for any real bandpass function and provides both a step-by-step guide on how to apply that correction, and a discussion of the theoretical and experimental limits to its applicability.

The effect of noise and measurement interval in measurement of both the spectrum and the bandpass function is discussed and methods for identifying the significance of noise effects in the corrected spectrum are presented. The reduced effect of noise when calculating spectrally integrated quantities (such as photometric or colorimetric values) is also examined. Practical guidelines are given for the application of bandwidth correction, both for the determination of the bandpass function and for estimating whether the correction may lead to an improvement in spectral accuracy.

L'EFFET DE LA BANDE PASSANTE INSTRUMENTALE ET DU PAS DE MESURE DANS LE CALCUL DES QUANTITÉS SPECTRALES

Résumé

Ce rapport présente une étude détaillée de la correction pour la bande passante appliquée aux spectres rencontrés en radiométrie, en photométrie et en spectrophotométrie. On y discute en détail du mécanisme de l'étalement des données enregistrées tant pour les spectromètres à balayage que pour ceux incorporant des photoéléments en rangée, accompagné d'une étude historique des méthodes couramment employées. Le rapport présente un algorithme de correction pour la largeur de bande qui peut être utilisé pour n'importe quelle fonction de bande passante réelle, explique comment l'appliquer étape par étape, et discute des limites théoriques et expérimentales à son applicabilité.

L'effet du bruit et du pas de mesure sur le spectre et sur la fonction de bande passante est discuté et des méthodes sont présentées pour identifier la signification du niveau de bruit dans le spectre corrigé. On examine aussi l'effet réduit du bruit sur les quantités intégrées spectralement, telles que les valeurs photométriques et colorimétriques. On fournit un guide pratique pour l'application de la correction pour la bande passante tant pour la détermination de la fonction de bande passante que pour l'estimation du bénéfice que la correction peut apporter à la précision spectrale.

AUSWIRKUNG DER GERÄTEBANDPASSFUNKTION UND DES MESSINTERVALLS AUF SPEKTRALE GRÖSSEN

Zusammenfassung

Dieser Bericht beinhaltet eine detaillierte Studie zur Anwendung der Bandpasskorrektur auf Spektren, so wie sie sich bei radiometrischen, photometrischen und spektralphotometrischen Messungen ergeben. Der Mechanismus der Verbreiterung von sowohl mit scannenden Spektrometern als auch mit Arrayspektrometern aufgenommenen Daten durch den Effekt der Bandpassfunktion, wird, zusammen mit einer Studie über die Geschichte der Methoden, die zur Zeit angewendet werden, im Detail erörtert. Dieser Bericht stellt einen Bandpasskorrekturalgorithmus vor, der für jede real existierende Bandpassfunktion angewendet werden kann, und bietet sowohl eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Anwendung dieser Korrektur als auch eine Erörterung der theoretischen und experimentellen Grenzen seiner Anwendbarkeit.

Es wird der Einfluss von Störungen und Rauschen, sowie des Messintervalls der Messung sowohl auf Spektrum als auch auf Bandpassfunktion erörtert, und es werden Methoden zur Erkennung der Signifikanz von Störungen und Rauscheffekten auf das korrigierte Spektrum gezeigt. Ebenso wird der verminderte Einfluss von Störungen und Rauschen auf die spektral integrierten Größen (wie z.B. photometrische oder farbmimetrische Werte) untersucht. Es werden praktische Richtlinien zur Anwendung der Bandpasskorrektur angegeben, sowohl zur Bestimmung der Bandpassfunktion als auch zur Abschätzung, ob die Korrektur zu einer Verbesserung der spektralen Genauigkeit führt.

1 Introduction

1.1 Objectives

In recent years there has been increased interest in the uncertainties associated with instrumental measurement of spectrally-dependent optical properties of sources, detectors, and materials and the errors that spectral instruments can introduce. The bandpass function of the instrument can introduce appreciable errors when measuring test artefacts that change rapidly with wavelength, particularly when the instrument's calibration is performed using a reference source, detector, or material that has a very different spectral characteristics from those of the test artefact.

This report aims to be a practical guide for users making spectral measurements to understand the nature of the errors introduced by the instrumental bandpass function and to provide a practical procedure for correcting measured values to take account of the instrumental bandpass function. The methodology described here deals with both triangular and non-triangular bandpass functions.

Clause 3 is written as an introduction to the concepts of the report. It is aimed at an audience that wants a practical guide. The ideas presented in this clause are discussed in more detail, and with more theoretical rigour, in later clauses of the report. This introduces some repetition, but also means that the main ideas of the report are collated in a single location. It is recommended that readers start with Clause 3.

1.2 Scope

This report describes the effect of instrumental bandpass and measurement wavelength interval on spectral quantities and provides recommendations on suitable methods to minimize the effect of instrumental bandpass functions. The report concentrates on a correction method of the form commonly used, that of a weighted mean over surrounding values applied to the data and based on assumption of the form of the spectrum across the bandpass. The report also provides information relating to the determination of the bandpass function itself for both monochromators and spectrometers.

As this report was being compiled, a true deconvolution method, not dependent on assumptions about the spectrum, was being developed (Eichstaedt et al. 2013). This method offers the promise of better spectral correction than the weighted-mean methods described in this report, but further study is required and a detailed description is not included here. Weighted-mean methods are simple to apply and give good results for spectral integrals (e.g. as in colorimetry), which are a common application of bandpass correction.

This report also describes the effect of instrumental bandpass on spectrally integrated quantities, but it does not cover the propagation of errors and uncertainty from spectral measurement to spectrally integrated quantities.

Other related effects in spectrometer characterization include stray-light correction and wavelength accuracy. These are included only in as far as they affect the determination of the bandpass function. Full determination and correction of stray-light and wavelength errors are not described within this report.

2 Terminology

2.1 References for terminology

Where possible terms are used as described in the International Lighting Vocabulary (ILV) (CIE 2011a) and the International Vocabulary of Metrology (VIM) (JCGM 2012).

2.2 Instrumentation

The following terms are all used to describe instruments that select a particular narrow spectral region or which separate a broadband spectrum into its spectral components. In this document "spectrometer" is used to describe this class of instruments.