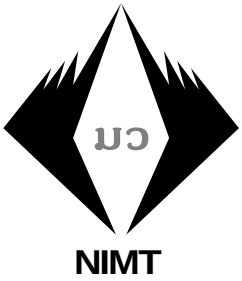


แนวทางการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ฉบับภาษาไทย)

จัดทำโดย

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

1 ตุลาคม 2559

คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางแสงคือเทคโนโลยีที่สำคัญสาขาหนึ่งที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ความต้องการเครื่องมือวัดทางแสงที่มีความถูกต้องสูงเช่น เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (Optical Spectrum Analyzer) จึงมีมากขึ้นเรื่อยๆ ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมโทรคมนาคม อุตสาหกรรมอิเลคโทรนิกส์ อุตสาหกรรมทางด้านความปลอดภัย การแพทย์ งานวิจัย การวิเคราะห์ทางเคมี และ สิ่งแวดล้อม เป็นต้น เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง คือ เครื่องมือที่ใช้วัดความยาวคลื่นแสง (wavelength) และ กำลังงานแสง (power) ของแหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ที่มีความถูกต้องสูง โดยที่กำลังของแสงแสดงในแกนตั้งและความยาวคลื่นแสดงในแกนนอน

จากข้อมูลผลจากสำรวจปรากฏว่ามีบริษัทที่ใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงและมีความต้องการความต้องการสอบเทียบเครื่องมือนี้มีจำนวนไม่น้อย และมีแนวโน้มว่าในอนาคตจะมีจำนวนผู้ใช้เครื่องมือนี้มากขึ้นเรื่อยๆ และจากการทำสำรวจดังกล่าวพบว่าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่มีอยู่ ยังไม่เคยได้รับการสอบเทียบที่ได้มาตรฐาน ทั้งนี้ในปัจจุบันยังไม่มีแนวทางหรือคู่มือสำหรับการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่เป็นภาษาไทย เพื่อให้บริษัทสอบเทียบนำไปเป็นแนวทางในการสอบเทียบที่เป็นวิธีมาตรฐานเดียวกันในประเทศ

ดังนั้นทางสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติจึงได้จัดกิจกรรมภายใต้โครงการจัดทำแนวทางการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเพื่อเป็นประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมดังกล่าว โดยตั้งคณะทำงานซึ่งประกอบไปด้วยนักวิชาการและผู้ทรงคุณวุฒิจากภาคการศึกษาและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการจัดทำแนวทางการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงฉบับภาษาไทยให้เป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติ โดยใช้มาตรฐาน ISO 62129:2006 Calibration of Optical Spectrum Analyzers เป็นแนวทางหลักในการจัดทำแนวทางการสอบเทียบดังกล่าว โดยปรับเนื้อหาให้เหมาะสมกับการใช้งานของเครื่อง

คณะผู้จัดทำ

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติแต่งตั้งคณะทำงานจัดทำแนวทางสำหรับสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ที่เป็นไปตามมาตรฐานนานาชาติ ดังมีรายนามต่อไปนี้

1.	รศ.ดร.อธิคม	ฤกษบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	ประธานคณะทำงาน
2.	ดร.มลฤดี	เรณูสวัสดิ์	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	รองประธานคณะทำงาน
3.	ดร.สมมาตร	แสงเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	คณะทำงาน
4.	ดร.อภิชัย	ภัทรนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	คณะทำงาน
5.	รศ.ดร.วันชัย	ไพจิตโรจนา	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	คณะทำงาน
6.	ผศ.ดร.นำคุณ	ศรีสนิท	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	คณะทำงาน
7.	นายกรีธา	ไตรสนธิ์	บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน)	คณะทำงาน
8.	นายสมหมาย	จตุทอง	บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน)	คณะทำงาน
9.	ดร.กนกวรรณ	นนทพจน์	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	คณะทำงาน
10.	ดร.สุนทร	จรรยาวดี	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	คณะทำงาน
11.	นายสิทธิชัย	ศรีคำ	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	คณะทำงาน
12.	นายชยุตม์	เจริญกิจ	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	คณะทำงานและเลขานุการ

การสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

(Calibration of optical spectrum analyzer)

สารบัญ

1. ขอบข่าย
2. เอกสารอ้างอิง
3. คำศัพท์และนิยาม
4. ข้อกำหนดการสอบเทียบ
    4.1 การเตรียม
    4.2 สภาวะอ้างอิงของการทดสอบ
    4.3 การสอบกลับได้
5. การทดสอบความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ (spectral resolution)
    5.1 กล่าวนำ
    5.2 การทดสอบความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ (spectral resolution)
6. การสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผล
    6.1 กล่าวนำ
    6.2 การสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผล (DPL) ภายใต้สภาวะอ้างอิง
    6.3 การสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผล (DPL) ภายใต้สภาวะการใช้งาน
    6.4 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายของการสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผล
7. การสอบเทียบความยาวคลื่น (Wavelength calibration)
    7.1 กล่าวนำ
    7.2 การสอบเทียบความยาวคลื่นภายใต้สภาวะอ้างอิง
    7.3 การสอบเทียบความยาวคลื่นภายใต้สภาวะการใช้งาน

7.4 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายของการสอบเทียบความยาวคลื่น

8. การบันทึกผล

8.1 ผลการวัดและค่าความไม่แน่นอน

8.2 เงื่อนไขการวัด

ภาคผนวก ก คณิตศาสตร์พื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด

ภาคผนวก ค การใช้ผลการสอบเทียบ

ภาคผนวก ง ค่าความยาวคลื่นอ้างอิง

ภาคผนวก จ การอ่านเพิ่มเติมและการอ้างอิงของการสอบเทียบความยาวคลื่น

การสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

(Calibration of optical spectrum analyzers)

1. ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฉบับนี้ เป็นแนวทางการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (optical spectrum analyzer) ที่ถูกออกแบบสำหรับการวัดกำลังงานของสเปกตรัมแสง การเชื่อมต่อสัญญาณขาเข้าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงนี้ กระทำผ่านตัวเชื่อมต่อเส้นใยนำแสง (fiber-optic connector)

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ต้องประกอบไปด้วยฟังก์ชันการทำงานอย่างน้อยดังนี้

ก) สามารถแสดงผลหน้าจอของสเปกตรัมแสงตามค่าความยาวคลื่นแสงที่แน่นอน

ข) มีตัวแสดงตำแหน่ง (maker/cursor) บนหน้าจอที่สามารถระบุค่ากำลังงานแสงและค่าความยาวคลื่นแสงบนตำแหน่งที่ต้องการของสัญญาณสเปกตรัมแสงได้

หมายเหตุ : มาตรฐานฉบับนี้ใช้กับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ที่ใช้ในงานสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง โดยทำการวัดสเปกตรัมของสัญญาณแสงที่ออกจากปลายเส้นใยนำแสงเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงกับเส้นใยนำแสงด้วยตัวเชื่อมต่อ (connector) เท่านั้น

นอกจากนี้ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ต้องสามารถวัดค่ากำลังงานแสงตามการกระจายของค่าความยาวคลื่นแสงที่แน่นอนของแสงที่ทดสอบได้ และต้องสามารถแสดงผลของค่าที่วัดได้นี้ด้วย ซึ่งในที่นี้ไม่รวมถึงมิเตอร์วัดความยาวคลื่นแสง ที่วัดเพียงค่าความยาวคลื่นกลาง (centre wavelength), อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดเฟบรีเปโรต์ (Fabry-Perot interferometer) หรือ โมโนโครเมเตอร์ (monochromator) ที่ไม่สามารถแสดงผลค่ากำลังงานแสงตามการกระจายของค่าความยาวคลื่นแสงที่แน่นอนของแสงที่ทดสอบได้

ขั้นตอนวิธีการสอบเทียบในมาตรฐานฉบับนี้ ใช้เป็นแนวทางสำหรับผู้ใช้งานเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเป็นหลัก มาตรฐานนี้ไม่ได้รวมถึงการแก้ค่าของผลการสอบเทียบในตัวเครื่อง ส่วนวิธีการแก้ค่าได้บรรยายไว้ในภาคผนวก ค ที่สำคัญเอกสารฉบับนี้น่าจะมีประโยชน์สำหรับห้องปฏิบัติการสอบเทียบและโรงงานผู้ผลิตเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

2. เอกสารอ้างอิง

มาตรฐานอุตสาหกรรมฉบับนี้ จัดทำขึ้นโดยอาศัยเอกสารอ้างอิงที่ได้แสดงไว้ในส่วนนี้เป็นแนวทาง สำหรับเอกสารอ้างอิงที่ได้ระบุวันเวลาที่จัดทำไว้ ให้ใช้เฉพาะเอกสารที่ได้อ้างถึงในที่นี้เท่านั้น สำหรับเอกสารอ้างอิงที่มิได้ระบุวันเวลาที่จัดทำไว้ ให้ใช้ข้อมูล (รวมทั้งที่ได้มีการแก้ไข) ในเอกสารอ้างอิงที่เป็นฉบับปัจจุบัน

IEC 60050-731, International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 731 : Optical fibre communication.

IEC 60359, Electrical and electronic measurement equipment – Expression of performance

IEC 60793-1 (all parts), Optical fibres – Part 1 : Measurement methods and test procedures

IEC 60825-1, Safety of laser products – Part 1 : Equipment classification, requirements and user's guide

IEC 60825-2, Safety of laser products – Part 2: Safety of optical fibre communication systems

IEC 61290-3-1, Optical amplifiers – Test methods – Part 3-1 : Noise figure parameters – Optical spectrum analyzer method

BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAPP, and OIML:1993, International vocabulary of basic terms in metrology (VIM)

BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)

3. คำศัพท์และนิยาม

คำศัพท์และนิยามในแนวทางการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ตามมาตรฐานฉบับนี้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ใน IEC 60050-731 และตามที่กำหนดดังต่อไปนี้

3.1 การสอบเทียบ

กระบวนการที่จัดทำขึ้นภายใต้เงื่อนไขเฉพาะที่กำหนด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้โดยเครื่องมือวัดกับค่าที่รู้ของปริมาณมาตรฐาน (ดูนิยามในหัวข้อ 6.11 ใน VIM ประกอบ)

3.2 การสอบเทียบภายใต้สภาวะอ้างอิง

การสอบเทียบภายใต้สภาวะอ้างอิงของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ดูหัวข้อ 3.17) หมายถึง การสอบเทียบที่ประเมินค่าความไม่แน่นอนของผลที่ได้จากการวัดภายใต้สภาวะอ้างอิงรวมอยู่ด้วย

3.3 การสอบเทียบภายใต้สภาวะใช้งาน

การสอบเทียบภายใต้สภาวะใช้งานของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ดูหัวข้อ 3.16) หมายถึง การสอบเทียบที่ประเมินค่าความไม่แน่นอนของผลที่ได้จากการวัดภายใต้สภาวะใช้งานรวมอยู่ด้วย

3.4 ค่าความยาวคลื่นกลาง, λcentre

ค่าความยาวคลื่นแสงเฉลี่ยที่เกิดจากการถ่วงน้ำหนักตามกำลังงานของแหล่งกำเนิดแสงในสุญญากาศในหน่วยของ nm (nm)

สำหรับสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง ค่าความยาวคลื่นกลางสามารถหาได้จาก

$$\lambda_{\text{centre}} = (1/P_{\text{total}}) \int \rho(\lambda)\, \lambda\, d\lambda \qquad (1)$$

สำหรับสเปกตรัม แบบไม่ต่อเนื่อง ค่าความยาวคลื่นกลางสามารถหาได้จาก

$$\lambda_{\text{centre}} = \frac{\sum_i P_i \lambda_i}{\sum_i P_i} \qquad (2)$$

โดยที่

$\rho(\lambda)$ คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานของแหล่งกำเนิดแสง โดยทั่วไปมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อnm (W/nm)

λ_i คือ ค่าความยาวคลื่นแสงแบบไม่ต่อเนื่องลำดับที่ i

P_i คือ กำลังงานแสงของ λ_i โดยทั่วไปมีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

P_{total} คือ $\sum P_i$ หรือผลรวมของกำลังงานแสงทั้งหมด โดยทั่วไปมีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

<u>หมายเหตุ</u> ปริพันธ์และผลรวมข้างต้น ในทางทฤษฎีแล้วต้องครอบคลุมสเปกตรัมทั้งหมดของแหล่งกำเนิดแสง

3.5 ระดับความเชื่อมั่น

การประมาณค่าความน่าจะเป็นของค่าจริงของพารามิเตอร์ที่วัดได้ที่อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ (ดูหัวข้อ 3.11 ความไม่แน่นอนขยายของการวัด)

3.6 ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor), *k*

ตัวประกอบครอบคลุม Coverage factor (*k*) เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัด (expanded uncertainty, U) (ดูหัวข้อ 3.11) จากความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวัด (standard uncertainty, σ) (ดูหัวข้อ 3.11 และ 3.21)

3.7 ระดับกำลังงานที่แสดงผล

ระดับกำลังงานที่ระบุโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ดูหัวข้อ 3.16) ในขณะทำการสอบเทียบ (Calibration) (ดูหัวข้อ 3.1) เมื่อตั้งค่าความละเอียดของความยาวคลื่นตามที่ต้องการ

หมายเหตุ ในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง จะมีการวัดค่าและแสดงผลระดับกำลังงานสำหรับความละเอียดที่ตั้งค่าไว้

3.8 ค่าเบี่ยงเบนระดับกำลังงานที่แสดงผล, ΔP

ความแตกต่างระหว่างระดับกำลังงานที่แสดงผลที่วัดค่าได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (P_{OSA}) กับกำลังงานอ้างอิง (P_{ref}) หารด้วยค่ากำลังงานอ้างอิง

$$\Delta P = \frac{P_{\mathrm{OSA}} - P_{\mathrm{ref}}}{P_{\mathrm{ref}}} = \frac{P_{\mathrm{OSA}}}{P_{\mathrm{ref}}} - 1 \qquad (3)$$

3.9 ความไม่แน่นอนระดับกำลังงานที่แสดงผล, $\sigma_{\Delta P}$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวัด (ดูหัวข้อ 3.21) ของค่าเบี่ยงเบนระดับกำลังงานที่แสดงผล

$$\sigma_{\Delta P} = \sigma\left(\frac{P_{\mathrm{OSA}}}{P_{\mathrm{ref}}} - 1\right) \qquad (4)$$

หมายเหตุ ในสมการที่ (4) σ คือความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวัด (ดูหัวข้อ 3.21)

3.10 ช่วงความยาวคลื่นที่แสดงผล

ช่วงความยาวคลื่นทั้งหมดที่แสดงบนหน้าจอแสดงผลของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ดูหัวข้อ 3.16) ในขณะทำการวัด (instrument state) (ดูหัวข้อ 3.12)

3.11 ค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัด (Expanded Uncertainty) , U

ช่วงความเชื่อมั่น

ค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัด U คือ ช่วงของผลการวัดสำหรับพารามิเตอร์ที่ทำการวัด ที่อยู่ในระดับความเชื่อมั่น (ดูหัวข้อ 3.5) ค่านี้เท่ากับผลคูณของตัวประกอบครอบคลุม k กับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวัดรวม (combined standard uncertainty,σ) (ดูหัวข้อ 3.21)

$$U = k\sigma \qquad (5)$$

หมายเหตุ เมื่อการกระจายของค่าความไม่แน่นอนของการวัดเป็นแบบปกติ และจำนวนของค่าที่วัดมีจำนวนมาก ค่าระดับความเชื่อมั่น (ดูหัวข้อ 3.5) จะมีค่าเท่ากับ 68.3%, 95.5% และ 99.7% เมื่อ k มีค่าเท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ดูหัวข้อ 3.16) ควรแสดงอยู่ในรูปแบบของค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัด U

3.12 สถานะเครื่องมือ

คำจำกัดความโดยสมบูรณ์ของสภาพและสถานะการวัดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ดูหัวข้อ 3.16) ระหว่างกระบวนการสอบเทียบ

หมายเหตุ พารามิเตอร์โดยทั่วไปของสถานะเครื่องมือ ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นที่แสดงผล (ดูหัวข้อ 3.10) ค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ (ดูหัวข้อ 3.18) รูปแบบการแสดงผล (วัตต์ หรือ ดีบีเอ็ม) เวลาในการเตรียมความพร้อมของเครื่อง และการตั้งค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์

3.13 ผลการวัด

การแสดงผลหรือเอาต์พุตทางไฟฟ้าของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ดูหัวข้อ 3.16) ระหว่างความยาวคลื่นที่มีหน่วยเป็น nm หรือ μm กับค่ากำลังงานที่มีหน่วยเป็น mWหรือ dBm หลังจากที่ได้ปฏิบัติตามคู่มือในการเตรียมความพร้อมการทำงานของเครื่องแล้ว

3.14 ช่วงความยาวคลื่นของการวัด

ช่วงความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ ซึ่งครอบคลุมสมรรถนะของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ดูหัวข้อ3.16) ตามที่กำหนด

3.15 สภาวะใช้งาน (operating conditions)

สภาวะทั้งหมดของการวัด, ปัจจัยที่มีผล และ ข้อกำหนดที่สำคัญอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดความไม่แน่นอนขยายของการวัด (ดูข้อ 3.11) ที่กำหนดไว้ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

[ดูนิยามในหัวข้อ 5.5 ใน ViM ประกอบ]

3.16 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

เครื่องมือวัดเชิงแสง สำหรับใช้วัดค่าการแจกแจงกำลังงานแสงตามค่าสเปกตรัมหรือความยาวคลื่นแสง (หรือความถี่)

หมายเหตุ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงประกอบด้วยพอร์ตอินพุตสำหรับใช้เชื่อมต่อกับเส้นใยนำแสง (fiber-optic connector) และจอแสดงผล โดยสเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้ มาจากแสงที่ถูกป้อนเข้ามาในพอร์ตอินพุต

3.17 สภาวะอ้างอิง

ชุดของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมประกอบด้วยค่าระบุ (nominal value) และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนยินยอม (tolerance band) ที่มีผลกระทบต่อความไม่แน่นอนของการวัดภายใต้สภาวะอ้างอิงที่กำหนดไว้

[ดูนิยามในหัวข้อ 3.3.10 ปรับปรุง ใน IEC 60359]

หมายเหตุ เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนยินยอมประกอบด้วย ความไม่แน่นอนที่เป็นไปได้ของสภาวะ และความไม่แน่นอนในการวัดสภาวะ

โดยทั่วไปสภาวะอ้างอิง ประกอบ ด้วยพารามิเตอร์อ้างอิงและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนยินยอม (ถ้าจำเป็น) ดังต่อไปนี้ วันเวลา อุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศ แหล่งกำเนิดแสง ระดับกำลังงานที่แสดงผล (ดูหัวข้อ 3.7) เส้นใยนำแสง ตัวแปลงตัวเชื่อมต่อ ความยาวคลื่นแสง แบนด์วิดท์ (สเปกตรัม) และชุดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ (ความละเอียดของสเปคตรัม) (ดูหัวข้อ 3.18)

3.18 ความละเอียดของความกว้างแถบความถี่, *R*

ความละเอียดของสเปคตรัม

ความกว้างของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแอมปลิจูด (FWHM) ของสเปกตรัมที่แสดงผลบนเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าแบนด์วิดท์ของสเปกตรัม (ดูหัวข้อ 3.20) แคบกว่าค่าความละเอียดแบนด์วิดท์ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม มาก ๆ

3.19 อัตราส่วนการกดโหมดด้านข้าง, SMSR

อัตราส่วนระหว่างกำลังงานสูงสุดของโหมดหลัก (main mode) ต่อกำลังงานสูงสุดของโหมดด้านข้างที่ใหญ่ที่สุด (largest side mode) ของสเปคตรัม ในเลเซอร์ไดโอดชนิดโหมดเดี่ยว เช่น เลเซอร์ไดโอดชนิด DFB-LD

หมายเหตุ อัตราส่วนการกดโหมดด้านข้างจะมีหน่วยเป็น dB

3.20 ความกว้างแถบความถี่แสงหรือแบนด์วิดท์สเปกตรัม, *B*

ในมาตรฐานนี้ใช้ความกว้างของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแอมปลิจูด (FWHM) ของแหล่งกำเนิดแสง

กรณีที่แหล่งกำเนิดแสงปล่อยสเปกตรัมอย่างต่อเนื่อง (แบบโหมดตามยาวโหมดเดียว) แบนด์วิดท์สเปกตรัม *B* คือ ความกว้างของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแอมปลิจูด (FWHM) ของแหล่งกำเนิดแสง

กรณีที่แหล่งกำเนิดแสงคือเลเซอร์ไดโอดที่มีสเปกตรัมแบบโหมดตามยาวหลายโหมด ความกว้างของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแอมปลิจูด (FWHM) คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของ แบนด์วิดท์สเปกตรัม คูณด้วย 2.35 (สมมุติว่าแหล่งกำเนิดมีรูปคลื่นเป็นแบบเกาส์เซียน):

$$B = 2.35\left[\left\{\left(1/P_{\text{total}}\right)\times\left[\sum_i P_i\lambda_i^{\,2}\right]\right\} - \lambda_{\text{center}}^{\,2}\right]^{1/2} \qquad (6)$$

โดยที่

λ_{center} คือ ความยาวคลื่นกลาง (ดูหัวข้อ 3.4) ของเลเซอร์ไดโอด หน่วยเป็น nm

P_{total} คือ $\sum P_i$ = กำลังงานรวม หน่วยเป็น วัตต์

P_i คือ กำลังงานของโหมดตามยาวลำดับที่ *i* หน่วยเป็น วัตต์

λ คือ ความยาวคลื่นของโหมดตามยาวลำดับที่ *i* หน่วยเป็น nm

3.21 ความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวัด, σ

ความไม่แน่นอนของผลการวัด แสดงด้วยค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน

หมายเหตุ ข้อมูลเพิ่มเติม ดูภาคผนวก ก และมาตรฐาน ISO/IEC Guide to the Expresstion of Uncertainty in Measurement (ISO/IEC GUIDE EXPRES)

3.22 ความไม่แน่นอนแบบเอ (type A)

ความไม่แน่นอนที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติของชุดของการสังเกต ตัวอย่างเช่น การประเมินผลกระทบแบบสุ่มของการวัด (ดูเพิ่มเติมที่ ISO/IEC GUIDE EXPRES)

3.23 ความไม่แน่นอนแบบบี

ความไม่แน่นอนจากการวัดที่ได้โดยวิธีอื่นนอกเหนือจากการวิเคราะห์ทางสถิติของชุดของการสังเกต ตัวอย่างเช่น การประมาณของแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนที่เป็นไปได้ เช่น การประเมินผลกระทบอย่างเป็นระบบของการวัด (ดูเพิ่มเติมที่ ISO/IEC GUIDE EXPRES)

หมายเหตุ วิธีอื่นในที่นี้อาจรวมถึง ข้อมูลการวัดครั้งก่อน ประสบการณ์หรือความรู้ทั่วไปของพฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง เครื่องมือ ผู้ผลิต รายละเอียด ข้อมูลที่เกิดจากการสอบเทียบและใบรับรองอื่น ๆ และความไม่แน่นอนที่ถูกกำหนดให้กับข้อมูลอ้างอิงที่ได้มาจากคู่มือต่าง ๆ

3.24 ค่าการเบี่ยงเบนความยาวคลื่น, $\Delta\lambda$

ความแตกต่างระหว่างความยาวคลื่นกลาง (ดูหัวข้อ 3.4) ที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (λ_{OSA}) กับความยาวคลื่นอ้างอิง (λ_{ref}) หน่วยเป็นnm หรือไมโครเมตร

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{OSA}} - \lambda_{\text{ref}} \qquad (7)$$

3.25 ความไม่แน่นอนของความยาวคลื่น, $\sigma_{\Delta\lambda}$

ความไม่แน่นอนมาตรฐานของการวัด (ดูหัวข้อ 3.21) ของค่าการเบี่ยงเบนความยาวคลื่น (ดูหัวข้อ 3.24) หน่วยเป็น nm หรือไมโครเมตร

4. ข้อกำหนดการสอบเทียบ

4.1 การเตรียม

ข้อแนะนำต่อไปนี้ควรใช้เป็นแนวทางปฏิบัติ

การสอบเทียบควรปฏิบัติภายใต้สิ่งอำนวยความสะดวก ที่แยกออกจากฟังก์ชันอื่น ๆ ในผังองค์กร การแยกนั้นต้องรวมถึงห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์การวัด

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบควรกระทำภายใต้ระบบคุณภาพที่เหมาะสมกับการวัด (เช่นระบบ ISO 9000) เมื่อทำการสอบเทียบต้องปฏิบัติภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบ การปฏิบัติงานต้องเป็นอิสระ และมีการตรวจสอบผลการวัดอย่างละเอียด การคำนวณ และการเตรียมใบรับรองผลการสอบเทียบ

สภาวะแวดล้อมต้องเหมาะสมกับระดับความไม่แน่นอนการวัดที่เกิดขึ้นสำหรับการสอบเทียบ

ก) สภาวะแวดล้อมต้องสะอาด

ข) ต้องมีการเฝ้าติดตามและทำการควบคุมอุณหภูมิที่ปฏิบัติงาน

ค) แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ต้องมีการปฏิบัติงานอย่างปลอดภัย (อ้างอิงถึง IEC 60825-1)

การปฏิบัติงานการทดสอบทั้งหมดต้องอยู่ภายใต้อุณหภูมิห้องที่ (23 $\pm$ 3) ^{O}C ด้วยความชื้นสัมพัทธ์ที่ (50 $\pm$ 20) % เว้นแต่มีการระบุค่าดังกล่าวไว้แล้ว ให้เตรียมเครื่องมือก่อนทำการวัดอย่างน้อย 2 ชั่วโมง เพื่อให้เครื่องมือเข้าสู่สมดุลกับสภาวะแวดล้อม ณ ขณะนั้น โดยการเตรียมเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงต้องเป็นไปตามคู่มือของบริษัทผู้ผลิต

4.2 สภาวะอ้างอิงสำหรับการทดสอบ

สภาวะอ้างอิงสำหรับการทดสอบควรระบุพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนยินยอม วันที่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ระดับกำลังงานที่แสดงผล ความยาวคลื่นแสง แหล่งกำเนิดแสง เส้นใยนำแสง ตัวแปลงตัวเชื่อมต่อ ความกว้างแถบความถี่ และ แบนด์วิดท์สเปกตรัม เว้นแต่การระบุเงื่อนไขอื่น ๆ การใช้เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว ตามที่ระบุไว้ใน IEC 60793-1 ต้องมีความยาวอย่างน้อย 2 เมตร

การใช้งานเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงควรเป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ผลิตและคู่มือการใช้งาน ซึ่งในทางปฏิบัติต้องเลือกช่วงการทดสอบและพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการใช้งานของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง การเลือกพารามิเตอร์ต้องเหมาะสมกับความถูกต้องของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง และความสามารถแสดงรายละเอียดตามที่ระบุในคู่มือการใช้งานของผู้ผลิต

การบันทึกสภาวะตามที่ระบุในหัวข้อที่ 8

ผลการสอบเทียบเป็นเพียงข้อมูลที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ทำการสอบเทียบ เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเกิดอันตรายจากการแผ่รังสี ดังนั้นต้องแน่ใจในเรื่องสภาวะการติดตั้งและการดูแลความปลอดภัยในการใช้งานแสงเลเซอร์ อ้างถึง IEC 60825-1 และ IEC 60825-2

4.3 การสอบกลับได้

ต้องแน่ใจว่าเครื่องมือที่มีผลกระทบต่อผลการสอบเทียบต้องมีการสอบเทียบที่มีระบบห่วงโซ่การสอบกลับได้อย่างเหมาะสมไปยังมาตรฐานแห่งชาติหรือค่าคงที่ทางกายภาพตามธรรมชาติ เว้นแต่มีความต้องการค่าเฉพาะที่ระบุไว้ในเครื่องมือรวมทั้งห่วงโซ่การสอบเทียบ โดยช่วงเวลาการสอบเทียบซ้ำจะมีการกำหนดไว้และระบุในเอกสาร

5. การทดสอบวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ของแสง

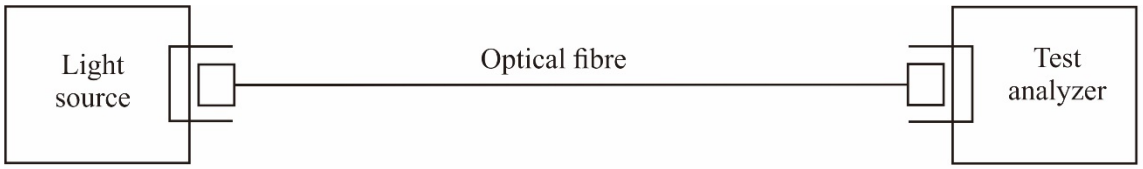
5.1 กล่าวนำ

การทดสอบค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ของแสงควรกระทำก่อนการสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลและค่าความยาวคลื่นแสง เนื่องจากค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่มีผลต่อการสอบเทียบ การทดสอบนี้กระทำภายใต้สภาวะอ้างอิง ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ การสอบเทียบค่าความกว้างแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ของแสงอธิบายไว้ใน IEC 61290-3-1

หมายเหตุ ผลการทดสอบค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ที่กล่าวถึงในที่นี้ ควรเป็นค่าที่เกิดจากการวัดค่าแบนด์วิดท์ของแสง (ในหน่วยความยาวคลื่น) ในเทอมของตัวเลขสัญญาณรบกวนหรือนอยส์ฟิกเกอร์ (noise figure) ที่เกิดจากการขยายสัญญาณเชิงแสง

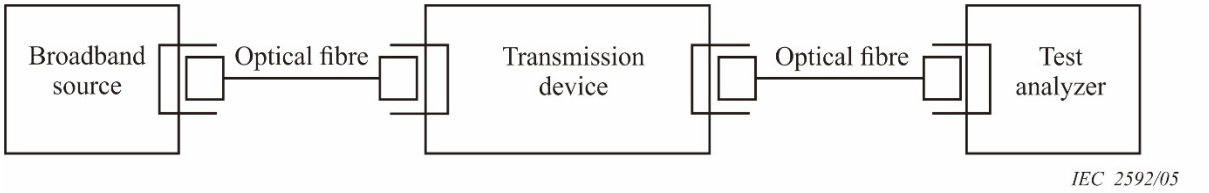
5.2 การทดสอบค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่

รูปที่ 1, 2 และ 3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ โดยรูปที่ 1 ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นเลเซอร์ชนิดแก๊สที่ทราบค่าความยาวคลื่น รูปที่ 2 ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เปล่งแสงออกมาหลายความยาวคลื่นในช่วงแถบกว้างร่วมกับอุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่งได้ (สอบกลับได้) และรูปที่ 3 ใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอดที่ไม่ทราบค่าความยาวคลื่นที่เปล่งออกมา



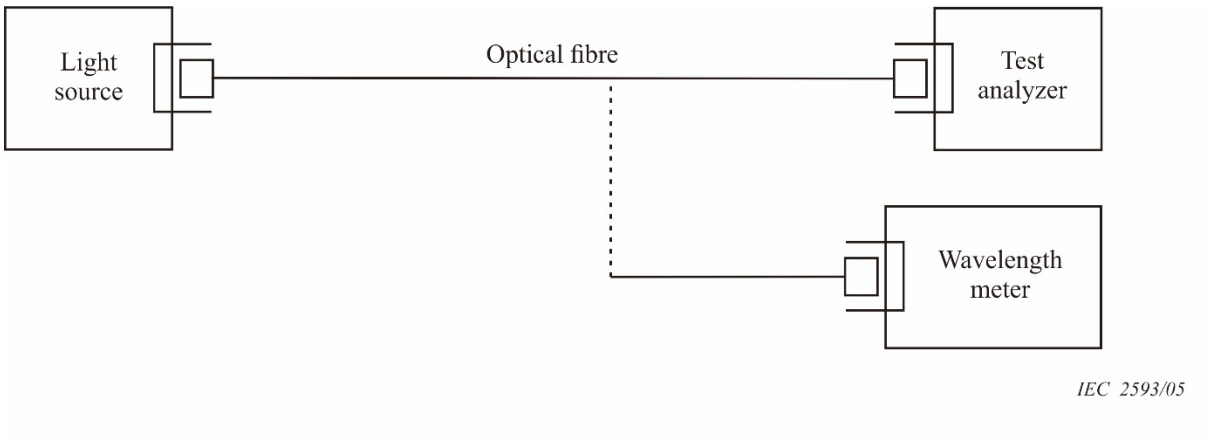
ก) สำหรับการทดสอบวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่
ข) สำหรับการสอบเทียบค่าความยาวคลื่นภายสภาวะเงื่อนไขอ้างอิง และ
ค) สำหรับการหาค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นที่แปรผันกับความยาวคลื่น

รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นเลเซอร์ชนิดแก๊สที่ทราบค่าความยาวคลื่น



ก) สำหรับการทดสอบวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่
ข) สำหรับการสอบเทียบค่าความยาวคลื่นภายสภาวะเงื่อนไขอ้างอิง และ
ค) สำหรับการหาค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นที่แปรผันกับความยาวคลื่น

รูปที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เปล่งแสงออกมาหลายความยาวคลื่นในช่วงแถบกว้างร่วมกับอุปกรณ์ส่งผ่านแสง



ก) สำหรับการทดสอบวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่
ข) สำหรับการสอบเทียบค่าความยาวคลื่นภายสภาวะเงื่อนไขอ้างอิง และ
ค) สำหรับการหาค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นที่แปรผันกับความยาวคลื่น

รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอดที่ไม่ทราบค่าความยาวคลื่น

5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่

ก) แหล่งกำเนิดแสง: ให้ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่กำหนดสำหรับการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ต้องการทดสอบ หากไม่มีการกำหนดแหล่งกำเนิดแสง ให้ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความกว้างแถบความถี่และค่าความยาวคลื่นที่มีเสถียรภาพเพียงพอ สำหรับค่าขั้นต่ำที่กำหนดเกี่ยวกับความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่ต้องการทดสอบ

แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำในที่นี้มีหลายชนิดดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 กรณีของเลเซอร์ไดโอดหรือแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์อื่น (อาจเป็นชนิดที่ปรับค่าความยาวคลื่นได้) ควรมีค่าความกว้างแถบความถี่แคบกว่าค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงมาก ๆ แหล่งกำเนิดแสงที่

เปล่งแสงออกมาหลายความยาวคลื่นในช่วงแถบกว้างก็สามารถนำมาใช้ในการวัดได้หากใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่งได้ ตัวอย่างของอุปกรณ์ส่งผ่านแสงในลักษณะดังกล่าวอาจได้แก่ ตัวกรองแสงชนิดแถบความถี่แคบที่เป็นแบบเดี่ยวหรือแบบต่อร่วมกันเป็นอนุกรม เส้นการดูดกลืนสเปกตรัมแสงของตัวกลางแก๊ส (absorption line in gaseous media) หรือ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดเฟบรีเปโรต์ (Fabry-Perot)

ภาคผนวก ง แสดงตารางค่าความยาวคลื่นแสงที่มีเสถียรภาพสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิง โดยค่าอ้างอิงที่ใช้ควรมีค่าความยาวคลื่น ค่าความกว้างแถบความถี่สเปกตรัม และค่ากำลังงานแสง ที่มีเสถียรภาพเพียงพอสำหรับการวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่

ตารางที่ 1 แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำในการใช้ทดสอบ

แหล่งกำเนิดแสง	ค่าความยาวคลื่น (nm) [vac]
เลเซอร์ชนิดแก๊สอาร์กอน	488.122
	514.673
เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียมนีออน	632.991
	1 152.590
	1 523.488

ข) เครื่องวัดความยาวคลื่นแสง: เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิดแสงต้องมีค่าความเที่ยงตรงในการวัดเพียงพอหรือดีกว่าค่าที่กำหนดในการทดสอบวัดค่าความยาวคลื่นแสง เครื่องมือนี้ใช้ในกรณีของแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอดที่ไม่ทราบค่าความยาวคลื่น

ค) เส้นใยนำแสง: ให้ใช้เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวตามที่กำหนดไว้ใน IEC 60793-1

5.2.2 ขั้นตอนการวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์

การติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดให้ใช้แนวทางในรูปที่ 1, 2 หรือ 3 โดยตั้งค่าช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต้องการวัดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ต้องการทดสอบให้ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นที่เปล่งออกจากแหล่งกำเนิดแสง

ก) ตั้งค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ต้องการทดสอบให้เป็นไปตามค่าที่กำหนด ค่านี้เรียกว่า R_{set}

ข) ทำการวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ที่แสดงบนเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ต้องการทดสอบ ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วงระหว่างตำแหน่งที่มีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุด (peak) เท่ากับ 3

dB (ค่านี้เรียกว่า $R_{\mathrm{OSA}i}$) จากนั้นทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อยสิบครั้งแล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าความละเอียดตามสมการ

$$R_{\mathrm{OSA}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} R_{\mathrm{OSA}i}}{m} \tag{8}$$

เมื่อ m เป็นจำนวนครั้งที่ทำการวัด

ค) คำนวณหาอัตราส่วนความแตกต่างของค่าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงจากค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ที่กำหนด จากสมการ

$$\Delta r_{\mathrm{diff}} = \frac{R_{\mathrm{OSA}}}{R_{\mathrm{set}}} - 1 \tag{9}$$

ง) หากมีความจำเป็นให้ดำเนินขั้นตอนการวัดซ้ำใหม่ โดยตั้งค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่บนเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ต้องการทดสอบ R_{set} ที่แตกต่างจากค่าเดิม

หมายเหตุ 1 หากพบว่าเครื่องเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ต้องการทดสอบมีค่าความผิดพลาดของช่วงห่างความยาวคลื่นที่เป็นเชิงเส้น ให้ทำการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นเล็กน้อยจากความยาวคลื่นที่ใช้และทำการวัดซ้ำหลายครั้ง เพื่อหาค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่จากช่วงความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วงระหว่างตำแหน่งที่มีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดลงมา 3 dB เพื่อให้ได้ค่าความกว้างแถบความถี่ที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น การเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นนี้ควรกระทำอยู่ในช่วงระหว่าง $\pm$1 nm ซึ่งสามารถกระทำได้โดยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิด DFB ที่ปรับแต่งค่าความยาวคลื่นแสงด้วยอุณหภูมิ หรือ แหล่งกำเนิดแสงที่มีคาวิตี้อยู่ภายนอก หรือ เลเซอร์เส้นใยนำแสงชนิดปรับค่าได้เป็นต้น การหาค่าเฉลี่ยของค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่จะช่วยทำให้การวัดได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

หมายเหตุ 2 ในกรณีที่ต้องการให้ได้ค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ที่ถูกต้องตามผลการสอบเทียบ สามารถดำเนินการด้วยการใช้ซอฟต์แวร์กำหนดค่าที่ถูกต้องให้กับเครื่องมือ หรือ ใช้ค่าแก้ทางคณิตศาสตร์กับผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือเพื่อให้ได้ความถูกต้อง หรือ ใช้การปรับแต่งเครื่องมือ อย่างไรก็ตาม หากดำเนินการปรับแต่งด้วยกรณีใด ควรทำการทดสอบตามขั้นตอนเดิมหลาย ๆ ครั้ง เพื่อยืนยันว่าขั้นตอนการปรับแต่งค่าความถูกต้องได้ถูกดำเนินการอย่างถูกต้องแล้ว ดูภาคผนวก ค

6. การสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผล

6.1 กล่าวนำ

ปัจจัยที่มีผลต่อความไม่แน่นอนการวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบประกอบด้วย

ก) ค่าความไม่แน่นอนภายใน (intrinsic uncertainties) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบภายใต้สภาวะอ้างอิง

ข) ความไม่แน่นอนย่อย (partial uncertainties) ที่เกิดจากความยาวคลื่น ความเป็นเชิงเส้น อุณหภูมิ โดยคำนวณค่าจากการทดสอบภายใต้สภาวะใช้งาน

ต้องทำการคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนย่อยด้วย หากนำเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง มาใช้งานที่สภาวะอื่นๆ นอกเหนือจากสภาวะอ้างอิง

ค่าความไม่แน่นอนภายในที่เกิดจากสภาวะอ้างอิงได้จากวิธีการสอบเทียบที่กล่าวในหัวข้อ 6.2 และค่าความไม่แน่นอนย่อยได้จากการวิธีการสอบเทียบที่กล่าวในหัวข้อ 6.3.1 ถึง 6.3.4 เพื่อให้สอดคล้องกับปัจจัยที่มีผลกระทบได้แก่ ความยาวคลื่น, โพลาไรเซชัน, ความเป็นเชิงเส้นและอุณหภูมิ เมื่อเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงถูกใช้งานภายใต้สภาวะอ้างอิง ดังนั้นไม่จำเป็นต้องปฏิบัติตามวิธีการสอบเทียบที่กล่าวในหัวข้อ 6.3

หมายเหตุ 1 โดยทั่วไปหน่วยที่ใช้ในการวัดคือ dBm ซึ่งไม่เหมาะสมกับการหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด ดังนั้นจะใช้หน่วยที่เป็นเชิงเส้นแทน คือ mW หรือ μW ในการรวมกันของความไม่แน่นอน หลังจากนั้นสามารถแปลงหน่วยกลับเป็น dB ได้

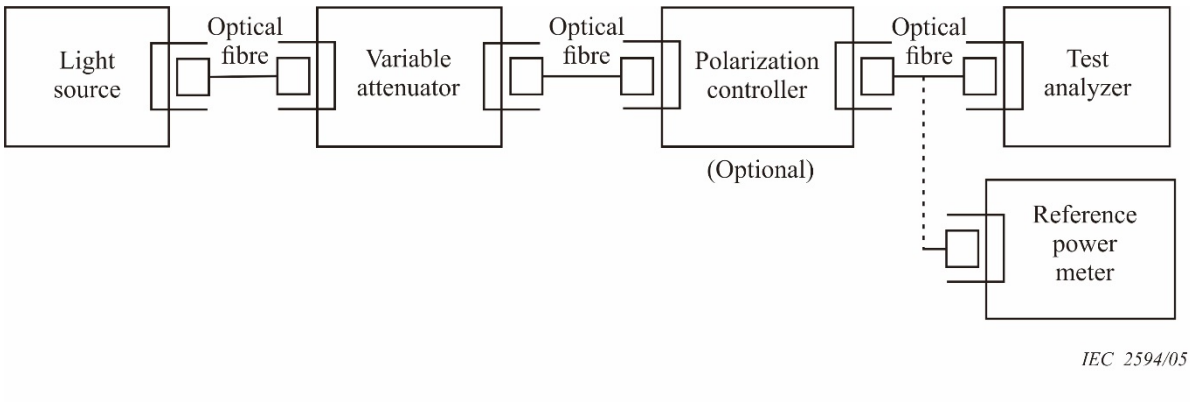
หมายเหตุ 2 ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง ต้องทำการตรวจสอบกำลังงานของแสงด้วย โดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแสง หรือ เครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิง

หมายเหตุ 3 ไม่ควรเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของแสงในขณะที่ทำการสอบเทียบ เว้นแต่จะถูกควบคุมโดยตัวควบคุมโพลาไรเซชัน

6.2 การสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะอ้างอิง

รูปที่ 4 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่แสดงผล โดยการทดสอบนี้กระทำภายใต้สภาวะอ้างอิง

หมายเหตุ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้สำหรับการสอบเทียบกำลังงานที่แสดงผลควรเป็นแบบดีโพลาไรซ์ (depolarized) ถ้าแสงไม่เป็นแบบดังกล่าวควรใช้ตัวควบคุมโพลาไรเซชันของแสง การทดสอบแบบนี้จะทำการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่จุดกึ่งกลางของค่าที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากโพลาไรเซชันของแสง



รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะอ้างอิง

6.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะอ้างอิง ประกอบด้วย

ก) แหล่งกำเนิดแสง (Light source): ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่สามารถปล่อยแสงที่มีความเสถียร โดยมีค่ากำลังงานแสงระหว่าง 0.1 mW (-10 dBm) ถึง 1 mW (0 dBm) ซึ่งมีการกดโหมดด้านข้างและสัญญาณรบกวนเชิง

แสง (optical noise) ที่อยู่ภายนอกค่าแบนด์วิดท์ของแหล่งกำเนิดแสงได้อย่างดี (> 40 dB เมื่อทำการวัดที่ค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมที่เหมือนกับค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมของเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแสง) โดยค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงควรมีค่าแคบกว่าค่าความละเอียดที่กำหนดไว้ของเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบ แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงที่แสดงในตารางที่ 1 หรือ แหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอด หรือแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์เส้นใยนำแสง (fiber laser) (มีค่าอัตราส่วนการกดโหมดด้านข้าง (SMSR) มากกว่า 40 dB: ดูหัวข้อ 3.19)

หมายเหตุ หากใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอดหรือเลเซอร์เส้นใยนำแสงควรทำการวัดค่าความยาวคลื่นก่อนด้วยเครื่องวัดความยาวคลื่น

ข) ตัวลดทอนแบบปรับค่าได้ (Variable attenuator): ใช้ตัวลดทอนที่สามารถปรับค่าได้ครอบคลุมกำลังงานแสงที่ใช้ในการทดสอบ

ค) เครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิง ที่ใช้งานทั้งภายใต้สภาวะใช้งานและสภาวะอ้างอิงควรมีลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งดังนี้

1) เครื่องวัดกำลังงานแสงที่ผ่านการสอบเทียบจากหน่วยงานที่เป็นทางการที่ดำเนินการสอบเทียบพร้อมรายงานค่าความไม่แน่นอน หรือ

2) เครื่องวัดกำลังงานแสงที่ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐานที่ถูกกำหนดโดยหน่วยงานที่เป็นทางการพร้อมรายงานค่าความไม่แน่นอน

ความไม่แน่นอนของเครื่องวัดกำลังแสงอ้างอิง σ_{PPM} เป็นค่าที่แสดงไว้ในเอกสารรับรอง (Certification)

ง) ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสง (ทางเลือก) : ใช้ควบคุมสถานะโพลาไรเซชันแสงที่มาจากเอาต์พุตของเส้นใยนำแสง โดยมีค่าอัตราส่วนเอกซ์ทิงชัน (extinction ratio) มากกว่าหรือเท่ากับ 20 dB ระดับการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันแสงควรน้อยกว่าการแปรผันกับโพลาไรเซชันของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง มาก ๆ ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสงอาจประกอบด้วยการรวมกันของอุปกรณ์อย่างโพลาไรเซอร์ (polarizer), แผ่นครึ่งคลื่น (Half-wave plate) แผ่นเสี้ยวคลื่น (Quarter-wave plate) และ การหมุนของลูปเส้นใยนำแสงอย่างน้อยสองวง

6.2.2 วิธีการสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะอ้างอิง

การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบให้ดำเนินการตามรูปที่ 5 โดยการตั้งค่าความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงให้กว้างกว่าค่าแบนด์วิดท์ของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง ปรับตัวลดทอนให้ระดับกำลังงานแสงที่ส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงมีค่าที่เหมาะสมที่สุด ถ้าไม่ทราบค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง ให้วัดความยาวคลื่นด้วยเครื่องวัดความยาวคลื่นแสงก่อน

ขั้นตอนการวัด

ก) ทำการวัดค่ากำลังงานแสงที่ออกจากเส้นใยนำแสงโดยใช้เครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิง โดยให้ค่าที่วัดได้เป็น $P_{\mathrm{REF},i}$ หากมีการใช้ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสง ให้ทำการวัดกำลังงานในหลาย ๆ แนวโพลาไรเซชันแสงแล้วทำการเฉลี่ยค่าที่วัดได้

ข) หลังจากนั้นให้ต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงแล้ววัดค่ากำลังงานสูงสุด บันทึกค่าเป็น P_{OSAi} หน่วยเป็น mW หรือ μW หากมีการใช้ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสง ให้ทำการวัดกำลังงานในหลาย ๆ แนวโพลาไรเซชันแสงแล้วทำการเฉลี่ยค่าที่วัดได้

ค) คำนวณหาค่าอัตราส่วนผลต่างของค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง กับ เครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิง ($\Delta P_{\mathrm{diff},i}$) โดยใช้สมการ (10)

$$\Delta P_{\mathrm{diff},i} = \frac{P_{\mathrm{OSA},i} - P_{\mathrm{REF},i}}{P_{\mathrm{REF},i}} = \frac{P_{\mathrm{OSA},i}}{P_{\mathrm{REF},i}} - 1 \qquad (10)$$

ง) ทำซ้ำตามขั้นตอนข้อ ก) – ค) อย่างน้อย 10 รอบ

6.2.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะอ้างอิง

คำนวณค่าเฉลี่ย (mean) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของอัตราส่วนผลต่างของค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง กับ เครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิง ตามสมการ

$$\Delta P_{\mathrm{diff}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \left(\Delta P_{\mathrm{diff},i} \right)}{m} \qquad (11)$$

$$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{diff}}} = \left[\sum_{i=1}^{m} \left(\Delta P_{\mathrm{diff},i} - \Delta P_{\mathrm{diff}} \right)^2 / (m-1) \right]^{1/2} \qquad (12)$$

โดยที่ m คือจำนวนครั้งของการวัด

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดของระดับกำลังงานที่แสดงผลของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงภายใต้สภาวะอ้างอิง $\sigma_{\Delta P_{\mathrm{ref}}}$ สามารถคำนวณได้จากสมการ (13)

$$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{ref}}} = \left(\sigma_{\mathrm{PPM}}{}^2 + \sigma_{\Delta P_{\mathrm{diff}}}{}^2 \right)^{1/2} \qquad (13)$$

โดยที่

σ_{PPM} คือค่าความไม่แน่นอนของการวัดของเครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิงที่ได้มาจากใบรับรองการสอบเทียบ

$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{diff}}}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของที่ได้มาจากการวัด

ค่าเบี่ยงเบนของระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะอ้างอิง ΔP_{ref} ที่ได้จากสมการ (14) เป็นค่าเดียวกันกับค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนผลต่าง คือ

$$\Delta P_{\mathrm{ref}} = \Delta P_{\mathrm{diff}} \qquad (14)$$

6.3 การสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะใช้งาน

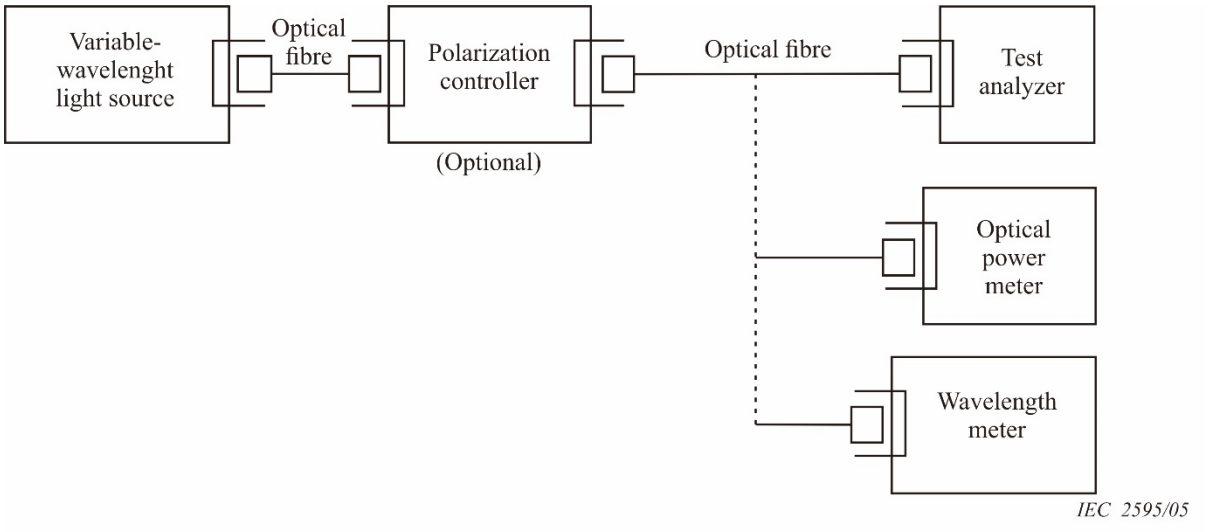
การสอบเทียบที่อธิบายในหัวข้อนี้จะทำก็ต่อเมื่อเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงนั้นถูกนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ ที่นอกเหนือไปจากสภาวะอ้างอิง

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าความไม่แน่นอนของการวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะใช้งานอาจประกอบด้วย

1) ความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง
2) ความแปรผันตามโพลาไรเซชัน
3) ความเป็นเชิงเส้น และ
4) ความแปรผันตามอุณหภูมิ

6.3.1 ความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง

รูปที่ 5 แสดงรูปแบบการติดตั้งสำหรับการหาความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง การทดสอบนี้จะถูกทดสอบภายใต้สภาวะการสอบเทียบอ้างอิง ยกเว้นความยาวคลื่น



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อหาค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่แสดงผลที่แปรผันตามความยาวคลื่นแสง

6.3.1.1 เครื่องมือสำหรับการหาความแปรผันตามความยาวคลื่นแสงของระดับกำลังงานที่แสดงผล

ก) แหล่งกำเนิดแสง : ให้ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้ เช่น เลเซอร์ปรับค่าความยาวคลื่นได้ แหล่งกำเนิดแสงต้องมีความเสถียรของกำลังที่ดี รวมถึงต้องมี ช่วงแบนด์วิดท์ของสเปกตรัม ที่แคบกว่าความละเอียดของแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงต้องการวัด

ข (เครื่องวัดความยาวคลื่นแสง : ใช้วัดความยาวคลื่นต่าง ๆ ของแหล่งกำเนิดแสง หากแหล่งกำเนิดแสงได้ทำการสอบเทียบแล้วอาจไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องวัดความยาวคลื่นแสง

คเครื่องวัดกำลังงานแสง (: ใช้เครื่องวัดกำลังงานแสงชนิดไม่แปรผันตามความยาวคลื่น หรือชนิดที่แปรผันตามความยาวคลื่นแต่ได้ทำการสอบเทียบแล้ว

ง(ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสง(ทางเลือก) : ใช้ควบคุมสถานะโพลาไรเซชันแสงที่มาจากเอาต์พุตของเส้นใยนำแสง โดยมีค่าอัตราส่วนเอกซ์ทิงชัน (extinction ratio) มากกว่าหรือเท่ากับ 20 dB ระดับการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันแสงควรน้อยกว่าความแปรผันตามโพลาไรเซชันของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงมาก ๆ ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสงอาจประกอบด้วยการรวมกันของอุปกรณ์อย่างโพลาไรเซอร์ (polarizer), แผ่นครึ่งคลื่น (Half-wave plate) แผ่นเสี้ยวคลื่น (Quarter-wave plate) และ การหมุนของลูปเส้นใยนำแสงอย่างน้อยสองวง

6.3.1.2 ขั้นตอนการหาค่าความแปรผันตามความยาวคลื่นแสงของระดับกำลังงานที่แสดงผล

อ้างอิงระบบการวัดดังรูปที่ 5 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ก) หลังจากปล่อยให้ระบบมีอุณหภูมิที่เสถียรแล้ว ต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับเครื่องวัดความยาวคลื่นแสง แล้วทำการวัดความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง บันทึกค่าเป็น λ_j

ข) ต่อเส้นใยนำแสงเข้ากับเครื่องวัดกำลังงานแสง ทำการวัดกำลังงานของแหล่งกำเนิดแสง บันทึกค่าเป็น $P_{\mathrm{REF,j}}$ หากมีการใช้ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสง ให้ทำการวัดกำลังงานในหลาย ๆ แนวโพลาไรเซชันแสงแล้วทำการเฉลี่ยค่าที่วัดได้

ค) ส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง โดยตั้งความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงให้กว้างกว่าของแสงอินพุต ค่ากำลังงานแสงสูงสุดที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงกำหนดเป็น $P_{\mathrm{OSA}j}$ ในกรณีที่มีการใช้ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสง ให้ทำการวัดกำลังงานในหลาย ๆ แนวโพลาไรเซชันแสงแล้วทำการเฉลี่ยค่าที่วัดได้

ค่าความผิดพลาดเบี่ยงเบนที่ความยาวคลื่น λ_j หาได้จากสมการ

$$\Delta P\left(\lambda_j\right)=\frac{P_{\mathrm{OSA}j}-P_{\mathrm{REF},j}}{P_{\mathrm{REF},y}}=\frac{P_{\mathrm{OSA}j}}{P_{\mathrm{REF},j}}-1 \qquad (15)$$

ง) ทำซ้ำตามขั้นตอนที่ความยาวคลื่นอื่น ๆ

จ) จากค่าที่วัดได้ $\Delta P_{(\lambda_i)}$ จะได้ค่ากำลังงานสูงสุดคือ $\Delta P_{\lambda,\mathrm{MAX}}$ และค่ากำลังงานต่ำสุดคือ $\Delta P_{\lambda,\mathrm{MIN}}$

6.3.1.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลอันเนื่องมาจากความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง

ค่าเบี่ยงเบนของผลการวัดอันเนื่องมาจากความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง ΔP_λ คำนวณได้จากสมการ (16)

$$\Delta P_\lambda=\left(\Delta P_{\lambda,\mathrm{MAX}}+\Delta P_{\lambda,\mathrm{MIN}}\right)/2 \qquad (16)$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน อันเนื่องมาจากความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง, $\sigma_{\Delta P_\lambda}$, หาได้จากสมการ (17)

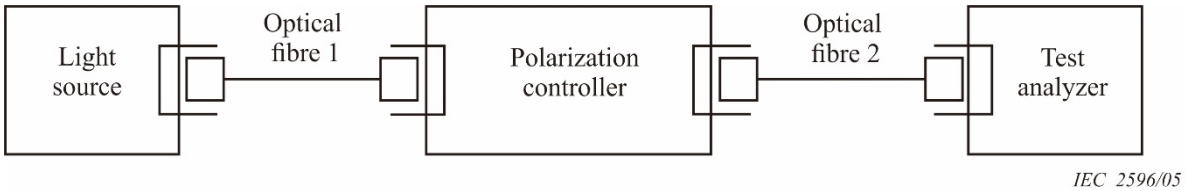
$$\sigma_{\Delta P\lambda} = \left(\Delta P_{\lambda,\mathrm{MAX}} - \Delta P_{\lambda,\mathrm{MIN}}\right) / 2\sqrt{3} \qquad (17)$$

6.3.2 ความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสง

การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการหาความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสงดังรูปที่ 6 โดยการทดสอบนี้กระทำภายใต้สภาวะอ้างอิง ยกเว้นโพลาไรเซชัน

หมายเหตุ 1 แหล่งกำเนิดแสงนั้น จะต้องถูกตั้งค่าความยาวคลื่นที่ความยาวคลื่นอ้างอิง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสงนั้นอาจแตกต่างกันไปที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน จึงแนะนำให้ทำการทดสอบความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงด้วย

หมายเหตุ 2 อัตราส่วนเอกซ์ทิงชัน (the extinction ratio) ของเอาต์พุตจากตัวควบคุมการโพลาไรเซชันแสงของระบบการวัดควรมีค่าประมาณอยู่ที่ 20 dB โดยวัดที่พอร์ตเอาต์พุตเส้นใยนำแสง อัตราส่วนเอกซ์ทิงชันนี้มีผลกระทบต่อความแม่นยำของผลการทดสอบค่าความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทำให้ความแม่นยำของการวัดลดลงไปประมาณ 2 % ที่ระดับ 20 dB



รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบหาค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่แสดงผลที่แปรผันตามโพลาไรเซชันแสง

6.3.2.1 เครื่องมือที่เกี่ยวข้องในการหาความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสงของระดับกำลังที่แสดงผล

ก) แหล่งกำเนิดแสง : ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่สามารถปล่อยแสงที่มีความเสถียร โดยมีค่ากำลังงานแสงระหว่าง 0.1 mW (-10 dBm) ถึง 1 mW (0 dBm) ซึ่งมีการกดโหมดด้านข้างและสัญญาณรบกวนเชิงแสง (optical noise) ที่อยู่ภายนอกค่าแบนด์วิดท์ของแหล่งกำเนิดแสงได้อย่างดี (> 40 dB เมื่อทำการวัดที่ค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมที่เหมือนกับค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมของเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแสง) โดยค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงควรมีค่าแคบกว่าค่าความละเอียดที่กำหนดไว้ของเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบ แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงที่แสดงในตารางที่ 1 หรือแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอด หรือแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์เส้นใยนำแสง (fiber laser) (มีค่าอัตราส่วนการกดโหมดด้านข้าง (SMSR) มากกว่า 40 dB: ดูหัวข้อ 3.19)

ข) ตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสง : ใช้ควบคุมสถานะโพลาไรเซชันแสงที่มาจากเอาต์พุตของเส้นใยนำแสง โดยมีค่าอัตราส่วนเอกซ์ทิงชัน (extinction ratio) มากกว่าหรือเท่ากับ 20 dB ระดับการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันแสงควรน้อยกว่าความแปรผันตามโพลาไรเซชันของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง มาก ๆ ตัวควบคุมโพลาไรเซ

ชันแสงอาจประกอบด้วยการรวมกันของอุปกรณ์อย่างโพลาไรเซอร์ (polarizer), แผ่นครึ่งคลื่น (Half-wave plate) แผ่นเสี้ยวคลื่น (Quarter-wave plate) และ การหมุนของลูปเส้นใยนำแสงอย่างน้อยสองวง

ค) เส้นใยนำแสง: ให้ใช้เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวดังที่ได้อธิบายใน IEC 60793-1 มีความยาวตั้งแต่ 1-2 เมตร ควรใช้เส้นใยนำแสงแบบคงไว้ซึ่งโพลาไรเซชันแสง (polarization-maintaining fibre) เป็นเส้นใยนำแสงอินพุตของตัวควบคุมโพลาไรเซชัน

6.3.2.2 ขั้นตอนการหาความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสงของระดับกำลังงานที่แสดงผล

การเตรียมอุปกรณ์ให้เป็นตามรูปที่ 6 โดยตั้งค่าความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงให้กว้างมากกว่าค่าความกว้างแถบความถี่ของแหล่งกำเนิดแสงและทำการยึดเส้นใยนำแสงให้อยู่กับที่ เนื่องจากโพลาไรเซชันแสงอาจเปลี่ยนแปลงได้ หากเส้นใยนำแสงมีการเคลื่อนไหว

ขั้นตอนการหาความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสงของระดับกำลังงานที่แสดงผลที่ความยาวคลื่นต่างๆ มีดังต่อไปนี้

ก) ส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปยังตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสงผ่านเส้นใยนำแสงที่ 1 และส่งแสงจากตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสงไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงโดยผ่านเส้นใยนำแสงที่ 2

ข) ปรับตัวควบคุมโพลาไรเซชันแสง เพื่อให้จำนวนสถานะโพลาไรเซชันแสงมีมากพอจนครอบคลุมทรงกลมพอยแคร์ (Poincare sphere) ได้ทั้งหมด ทำการสังเกตค่าการเปลี่ยนค่ากำลังงานจากยอดถึงยอดของระดับกำลังงานที่แสดงผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะโพลาไรเซชันแสง แล้วทำการบันทึกค่ามากสุด $P_{\mathrm{MAX}}(\lambda j)$ (แก้สมการ) และน้อยสุด $P_{\mathrm{MIN}}(\lambda j)$ (แก้สมการ) ที่อ่านได้

ค) ค่าระดับกำลังงานแสงที่แสดงผลต่าง ๆ อันเนื่องมาจากโพลาไรเซชันแสงที่ความยาวคลื่น λj ได้แก่ $\Delta P_{\mathrm{UL}}(\lambda j)$ และ $\Delta P_{\mathrm{LL}}(\lambda j)$ สามารถเขียนได้ดังสมการ (18) และ (19)

$$\Delta P_{\mathrm{UL}}(\lambda j)=\left(\frac{P_{\mathrm{MAX}}(\lambda j)}{P_{\mathrm{AVE}}(\lambda j)}\right)-1 \tag{18}$$

$$\Delta P_{\mathrm{LL}}(\lambda j)=\left(\frac{P_{\mathrm{MIN}}(\lambda j)}{P_{\mathrm{AVE}}(\lambda j)}\right)-1 \tag{19}$$

โดยที่ $P_{AVE}(\lambda j)$ คือ ค่าเฉลี่ยของระดับกำลังงานที่แสดงผลต่าง ๆ อันเนื่องมาจากโพลาไรเซชันแสงที่ความยาวคลื่น λj ที่มีค่าเป็น

$$P_{\mathrm{AVE}}(\lambda j)=\left[P_{\mathrm{MAX}}(\lambda j)+P_{\mathrm{MIN}}(\lambda j)\right]/2 \tag{20}$$

ง) ทำซ้ำตามขั้นตอนด้วยความยาวคลื่นอื่น ๆ (เปลี่ยนค่าความยาวคลื่น λj)

จ) จากค่าทั้งหมดที่วัดได้ ให้หาค่าสูงสุดของ $\Delta P_{\mathrm{UL}}(\lambda j)$ แล้วบันทึกเป็น $\Delta P_{\mathrm{POL,MAX}}$ และหาค่าต่ำสุดของ $\Delta P_{\mathrm{LL}}(\lambda j)$ แล้วบันทึกค่าเป็น $\Delta P_{\mathrm{POL,MIN}}$

6.3.2.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลอันเนื่องมาจากความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสง

ค่าเบี่ยงเบนของผลการวัดอันเนื่องมาจากอันเนื่องมาจากความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสงและความยาวคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการ (21)

$$\Delta P_{POL} = \left(\Delta P_{POL,MAX} + \Delta P_{POL,MIN}\right)/2 \quad (21)$$

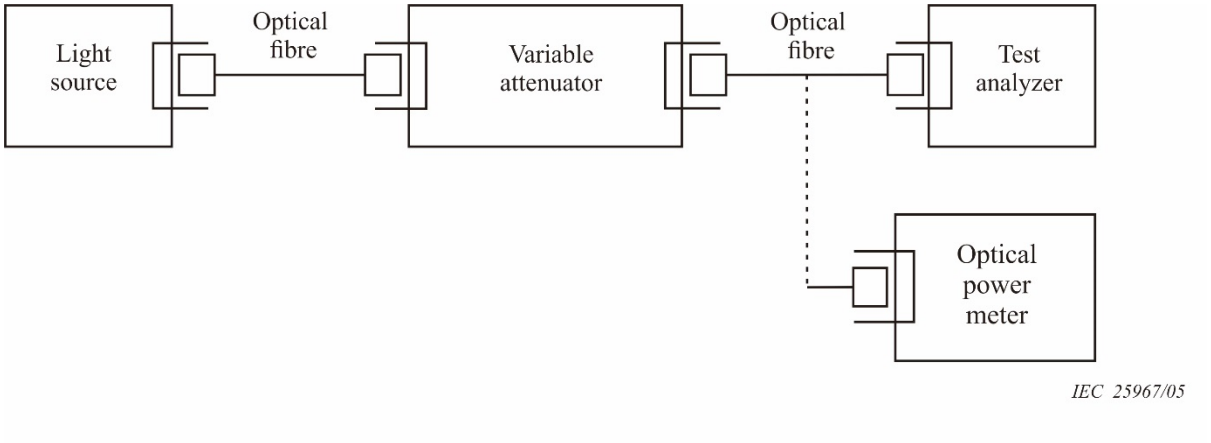
ค่าความไม่แน่นอนอนของความแปรปรวนระดับพลังงานแสงเนื่องมาจากโพลาไรเซชันสามารถคำนวณได้จากสมการ (22)

$$\sigma_{\Delta PPOL} = \left(\Delta P_{\mathrm{POL,MAX}} - \Delta P_{\mathrm{POL,MIN}}\right)/2\sqrt{3} \quad (22)$$

6.3.3 ความเป็นเชิงเส้น (linearity)

รูปที่ 7 แสดงรูปแบบการติดตั้งสำหรับการหาความเป็นเชิงเส้น การทดสอบนี้จะถูกทดสอบภายใต้สภาวะการสอบเทียบอ้างอิง ยกเว้นระดับกำลังงานแสง

หมายเหตุ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ต้องให้ความยาวคลื่นแสงอ้างอิง หากมีความยาวคลื่นแสงอ้างอิงมากกว่าหนึ่งค่าและความเป็นเชิงเส้นของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง การทดสอบความเป็นเชิงเส้นควรกระทำในแต่ละความยาวคลื่นอ้างอิง



รูปที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบหาค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่เสดงผลที่เกิดจากความผิดพลาดเชิงเส้น

6.3.3.1 เครื่องมือที่เกี่ยงข้องในการหาความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นของระดับกำลังงานที่แสดงผล

ก) แหล่งกำเนิดแสง: ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่สามารถปล่อยแสงที่มีความเสถียร โดยมีค่ากำลังงานแสงระหว่าง 0.1 mW (-10 dBm) ถึง 1 mW (0 dBm) ซึ่งมีการกดโหมดด้านข้างและสัญญาณรบกวนเชิงแสง (optical noise) ที่อยู่ภายนอกค่าแบนด์วิดท์ของแหล่งกำเนิดแสงได้อย่างดี (> 40 dB เมื่อทำการวัดที่ค่าแบนด์วิดท์

สเปกตรัมที่เหมือนกับค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมของเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแสง) โดยค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงควรมีค่าแคบกว่าค่าความละเอียดที่กำหนดไว้ของเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบ แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงที่แสดงในตารางที่ 1 หรือแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอด หรือแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์เส้นใยนำแสง (fiber laser) (มีค่าอัตราส่วนการกดโหมดด้านข้าง (SMSR) มากกว่า 40 dB: ดูหัวข้อ 3.19)

ข) ตัวลดทอนแบบปรับค่าได้ (Variable attenuator): ใช้ตัวลดทอนที่สามารถปรับค่าได้ครอบคลุมกำลังงานแสงที่ใช้ในการทดสอบ

ค) เครื่องวัดกำลังงานแสง: : ใช้เครื่องวัดกำลังงานแสงที่สามารถวัดค่ากำลังแสงได้ถูกต้องในย่านของกำลังงานแสง ความยาวคลื่นแสงและอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ

6.3.3.2 ขั้นตอนการหาความผิดพลาดเชิงเส้นของระดับกำลังงานที่แสดงผล

ก) การเตรียมอุปกรณ์ให้เป็นตามรูปที่ 7 โดยตั้งค่าความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงให้กว้างมากกว่าค่าความกว้างแถบความถี่ของแหล่งกำเนิดแสงและปรับตัวลดทอนแบบปรับค่าได้เพื่อให้ระดับกำลังงานของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงมีค่าเดียวกับระดับกำลังงานที่สอบเทียบภายใต้สภาวะอ้างอิง

ค่ากำลังแสงที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเป็น P_{OSA} และค่ากำลังที่อ่านได้จากเครื่องวัดกำลังงานแสง เป็น P_{REF} และอัตราส่วนของค่าทั้งสองเป็น $P_{\mathrm{LIN,ref}}$

$$P_{\mathrm{LIN,ref}} = \frac{P_{\mathrm{OSA}}}{P_{\mathrm{REF}}} \tag{23}$$

ข) หลังจากนั้นให้ทำการเปลี่ยนระดับกำลังงานแสง P_j ที่ส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง โดยใช้ตัวลดทอนแสงแบบปรับค่าได้ ค่ากำลังงานแสงที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเป็น $P_{\mathrm{OSA},j}$ และค่ากำลังงานแสงที่อ่านได้จากเครื่องวัดกำลังงานแสง เป็น $P_{\mathrm{REF},j}$ อัตราส่วนของค่าทั้งสองเป็น $P_{\mathrm{LIN},j}$

$$P_{LIN,j} = \frac{P_{OSA,j}}{P_{REF,j}} \tag{24}$$

ค่าความผิดพลาดเชิงเส้นที่ระดับกำลังงานแสงของ $P_{LIN,j}$ โดยจากสมการ (25)

$$\Delta P_{\mathrm{LIN},}\left(P_j\right) = \frac{P_{\mathrm{LIN},j}}{P_{\mathrm{LIN,REF}}} - 1 \tag{25}$$

ค) ทำซ้ำขั้นตอนนี้ โดยการเปลี่ยนค่ากำลังงานแสง P_j อย่างน้อย 5 ค่า ที่อยู่ในย่านระดับกำลังงานอินพุตของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

ง) จากค่าทั้งหมดที่วัดได้ให้ค่าสูงสุดของ $\Delta P_{\mathrm{LIN},}\left(P_j\right)$ เป็น $\Delta P_{\mathrm{LIN,MAX}}$ และให้ค่าต่ำสุดเป็น $\Delta P_{\mathrm{LIN,MIN}}$

6.3.3.3 การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น

ค่าเบี่ยงเบนของผลการวัดอันเนื่องมาจากระดับกำลังงานแสงที่เปลี่ยนไป ΔP_{LIN} คำนวณได้จากสมการ (26)

$$\Delta P_{\mathrm{LIN}} = \left(\Delta P_{\mathrm{LIN,MAX}} + \Delta P_{\mathrm{LIN,MIN}}\right)/2 \tag{26}$$

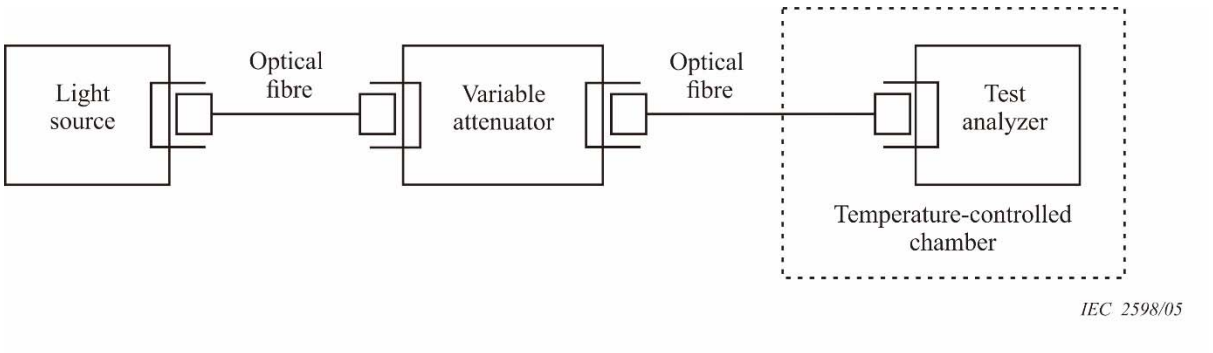
ค่าความไม่แน่นอนของการวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลอันเนื่องมาจากค่าความเป็นเชิงเส้น คำนวณได้จากสมการ (27)

$$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{LIN}}} = \left(\Delta P_{\mathrm{LIN,MAX}} + \Delta P_{\mathrm{LIN,MIN}}\right)/2\sqrt{3} \tag{27}$$

6.3.4 ความแปรผันตามอุณหภูมิ

รูปที่ 8 แสดงรูปแบบการติดตั้งสำหรับการหาค่าความแปรผันตามอุณหภูมิ การทดสอบนี้กระทำภายใต้สภาวะการสอบเทียบอ้างอิง ยกเว้นระดับอุณหภูมิ

หมายเหตุ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ต้องให้ความยาวคลื่นแสงอ้างอิง หากมีความยาวคลื่นแสงอ้างอิงมากกว่าหนึ่งค่าและความแปรผันตามอุณหภูมิของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงและอุณหภูมิ การทดสอบความแปรผันตามอุณหภูมิควรกระทำในแต่ละความยาวคลื่นอ้างอิง



รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อการหาค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่แสดงผลที่เกิดจากความแปรผันตามอุณหภูมิ

6.3.4.1 เครื่องมือสำหรับการหาความแปรผันตามอุณหภูมิที่ระดับกำลังงานที่แสดงผล

ก) แหล่งกำเนิดแสง: ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่สามารถปล่อยแสงที่มีความเสถียร โดยมีค่ากำลังงานแสงระหว่าง 0.1 mW (-10 dBm) ถึง 1 mW (0 dBm) ซึ่งมีการกดโหมดด้านข้างและสัญญาณรบกวนเชิงแสง (optical noise) ที่อยู่ภายนอกค่าแบนด์วิดท์ของแหล่งกำเนิดแสงได้อย่างดี (> 40 dB เมื่อทำการวัดที่ค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมที่เหมือนกับค่าแบนด์วิดท์สเปกตรัมของเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแสง) โดยค่าแบนด์วิดท์

สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงควรมีค่าแคบกว่าค่าความละเอียดที่กำหนดไว้ของเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบ แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงที่แสดงในตารางที่ 1 หรือแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอด หรือแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์เส้นใยนำแสง (fiber laser) (มีค่าอัตราส่วนการกดโหมดด้านข้าง (SMSR) มากกว่า 40 dB: ดูหัวข้อ 3.19)

ข) ตัวลดทอนแบบปรับค่าได้ (Variable attenuator): ใช้ตัวลดทอนที่สามารถปรับค่าได้ครอบคลุมกำลังงานแสงที่ใช้ในการทดสอบ

6.3.4.2 ขั้นตอนการหาความแปรผันตามอุณหภูมิของระดับกำลังงานที่แสดงผล

ก) การเตรียมอุปกรณ์ให้เป็นตามรูปที่ 8 โดยตั้งค่าความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงให้กว้างมากกว่าค่าความกว้างแถบความถี่ของแหล่งกำเนิดแสง หลังจากที่อุณหภูมิของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเข้าสู่สมดุลภายใต้สภาวะอ้างอิง ให้ปรับตัวลดทอนแบบปรับค่าได้เพื่อให้ระดับกำลังงานของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงมีค่าเดียวกับระดับกำลังงานที่สอบเทียบภายใต้สภาวะอ้างอิง ให้ค่ากำลังงานแสงที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงคือ $P_{\mathrm{OSA},T_{\mathrm{ref}}}$

ข) หลังจากนั้นเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของตู้ควบคุมอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเข้าสู่สมดุลทางอุณหภูมิแล้ว (ทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง) ให้อุณหภูมิใหม่มีค่าเป็น T_j และค่ากำลังงานที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง เป็น $P_{OSA,j}$

ความคลาดเคลื่อนของความไว (sentivity error) อันเนื่องมาจากอุณหภูมิ T_j คือ

$$\Delta P\left(T_j\right)=\frac{P_{\mathrm{OSA},j}}{P_{\mathrm{OSA},T_{\mathrm{ref}}}}-1 \tag{28}$$

ค) ทำซ้ำขั้นตอนนี้ที่อุณหภูมิ T_j ต่างๆกัน

ง) จากค่าทั้งหมดที่วัดได้ให้ค่าสูงสุดของ $\Delta P\left(T_j\right)$ เป็น $\Delta P_{\mathrm{TMP,MAX}}$ และให้ค่าต่ำสุดเป็น $\Delta P_{\mathrm{TMP,MIN}}$

6.3.4.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลอันเนื่องมาจากความแปรผันตามอุณหภูมิ

ค่าเบี่ยงเบนของผลการวัดอันเนื่องมาจากความแปรผันตามอุณหภูมิ คำนวณได้จากสมการ (29)

$$\Delta P_{\mathrm{TMP}}=\left(\Delta P_{\mathrm{TMP,MAX}}+\Delta P_{\mathrm{TMP,MIN}}\right)/2 \tag{29}$$

ค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความแปรผันตามอุณหภูมิ คำนวณได้จากสมการ (30)

$$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{TMP}}}=\left(\Delta P_{\mathrm{TMP,MAX}}-\Delta P_{\mathrm{TMP,MIN}}\right)/2\sqrt{3} \tag{30}$$

6.4 การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัดระดับกำลังงานที่แสดงผล

สำหรับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ใช้งานภายใต้สภาวะอ้างอิง ค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัด $U_{P_{\mathrm{ref}}}$ สามารถคำนวณได้ตามสมการ (31) ที่มีค่าตัวประกอบครอบคลุม, *k* คือ

$$U_{P_{\mathrm{ref}}}=\pm k\sigma_{\Delta P_{\mathrm{ref}}} \tag{31}$$

สำหรับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ใช้งานนอกเหนือสภาวะอ้างอิง ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเกิดจากการนำค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่แสดงผลต่าง ๆ รวมกัน $\sigma_{\Delta P_{\mathrm{CU}}}$ สามารถคำนวณได้ตามสมการ (32) ซึ่งเป็นผลรวมของสมการ (13), (17), (22), (27), (30) เมื่อขั้นตอนการสอบเทียบถูกดำเนินการภายใต้สภาวะใช้งาน

$$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{CU}}} = \left(\sigma_{\Delta P_{\mathrm{ref}}}{}^2 + \sigma_{\Delta P_{\lambda}}{}^2 + \sigma_{\Delta P_{\mathrm{POL}}}{}^2 + \sigma_{\Delta P_{\mathrm{LIN}}}{}^2 + \sigma_{\Delta P_{\mathrm{TMP}}}{}^2\right)^{1/2} \tag{32}$$

โดยที่

$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{ref}}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงภายใต้สภาวะใช้งาน

$\sigma_{\Delta P_{\lambda}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง

$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{POL}}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความแปรผันตามโพลาไรเซชันแสง

$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{LIN}}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความเป็นเชิงเส้น

$\sigma_{\Delta P_{\mathrm{TMP}}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจาความแปรผันตามอุณหภูมิ

ความไม่แน่นอนขยายที่มีค่าตัวประกอบครอบคลุม หาได้จากสมการ

$$U_{P_{\mathrm{CU}}} = \pm k\sigma_{\Delta P_{\mathrm{CU}}} \tag{33}$$

ค่าเบี่ยงเบนรวมของระดับกำลังงานที่แสดงผลต่าง ๆ รวมกัน, ΔP_{CU} ได้มาจากผลรวมของสมการ (14), (16), (21), (26), (29) มีค่าเป็น

$$\Delta P_{\mathrm{CU}} = \Delta P_{\mathrm{ref}} + \Delta P_{\lambda} + \Delta P_{\mathrm{POL}} + \Delta P_{\mathrm{LIN}} + \Delta P_{\mathrm{TMP}} \tag{34}$$

ค่าเบี่ยงเบน (ΔP) ค่าความไม่แน่นอน (σ_P) และค่าความไม่แน่นอนขยายระดับกำลังงานที่แสดงผล (U_P) ที่ระดับกำลังงานที่แสดงผล $P(\mathrm{mW})$ ในหน่วยกำลังงานสัมบูรณ์ แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P = \Delta P_{\mathrm{CU}} P(\mathrm{mW}) \tag{35}$$

$$\sigma_P = \sigma_{\Delta P_{\mathrm{CU}}} P(\mathrm{mW}) \tag{36}$$

$$U_P = U_{\Delta P_{\mathrm{CU}}} P(\mathrm{mW}) \tag{37}$$

ในกรณีที่ต้องการแสดงผลของค่าเบี่ยงเบนและค่าความไม่แน่นอนในหน่วย dB ให้แปลงหน่วยโดยใช้สมการ

$$10\log_{10}(1+X)(\mathrm{dB}) \tag{38}$$

โดยที่ $X = \Delta P_{\mathrm{CU}}$ หรือ $\sigma_{\Delta P_{\mathrm{CU}}}$

หมายเหตุ ในกรณีที่ต้องการให้ได้ระดับกำลังงานที่แสดงผลที่ถูกต้องตามผลการสอบเทียบ สามารถดำเนินการด้วยการใช้ซอฟต์แวร์กำหนดค่าที่ถูกต้องให้กับเครื่องมือ หรือ ใช้ค่าแก้ทางคณิตศาสตร์กับผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือเพื่อให้ได้ความถูกต้อง หรือ ใช้การปรับแต่งเครื่องมือ อย่างไรก็ตาม หากดำเนินการปรับแต่งด้วยกรณีใด ควรทำการทดสอบตามขั้นตอนเดิมหลาย ๆ ครั้ง เพื่อยืนยันว่าขั้นตอนการปรับแต่งค่าความถูกต้องได้ถูกดำเนินการอย่างถูกต้องแล้ว ดูภาคผนวก ค

7. การสอบเทียบความยาวคลื่น (Wavelength calibration)

7.1 กล่าวนำ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความไม่แน่นอนในการวัดความยาวคลื่นแสงของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบ ประกอบไปด้วย

ก) ค่าความไม่แน่นอนภายในของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบที่เกิดจากสภาวะอ้างอิง

ข) ค่าความไม่แน่นอนย่อยที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นแสงและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะใช้งาน

การสอบเทียบภายใต้สภาวะอ้างอิงถูกกล่าวถึงในหัวข้อ 7.2 ที่ทำให้ได้มาของค่าความไม่แน่นอนภายในของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบที่เกิดจากสภาวะอ้างอิงนั้นเป็นข้อบังคับ ส่วนการสอบเทียบภายใต้สภาวะใช้งานถูกกล่าวถึงในหัวข้อ 7.3 นั้นไม่เป็นข้อบังคับ แต่หากนำเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบไปใช้งานที่ไม่อยู่ภายใต้สภาวะอ้างอิง การสอบเทียบจำเป็นต้องกระทำภายใต้สภาวะใช้งานของเครื่องเช่นกัน

7.2 การสอบเทียบความยาวคลื่นแสงภายใต้สภาวะอ้างอิง

การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการสอบเทียบความยาวคลื่นแสงภายใต้สภาวะอ้างอิงแสดงในรูปที่ 1, 2 และ 3 โดยในรูปที่ 1 แสดงการติดตั้งเครื่องมือโดยใช้เลเซอร์ชนิดแก๊สที่รู้ค่าความยาวคลื่นเป็นตัวมาตรฐาน รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งเครื่องมือ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดที่เป็นบรอดแบนด์ (broad band) และต่อด้วยอุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่งได้ (transmission device) ที่รู้ค่าที่แน่นอน รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งเครื่องมือการวัดโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอดที่ไม่รู้ค่าความยาวคลื่น การทดสอบนี้กระทำภายใต้สภาวะอ้างอิง

7.2.1 เครื่องมือสำหรับสอบเทียบความยาวคลื่นแสงภายใต้สภาวะอ้างอิง

ก) แหล่งกำเนิดแสง: ให้ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่กำหนดสำหรับการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ต้องการทดสอบ หากไม่มีการกำหนดแหล่งกำเนิดแสง ให้ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความกว้างแถบความถี่และค่าความยาวคลื่นที่มีเสถียรภาพเพียงพอ สำหรับค่าขั้นต่ำที่กำหนดเกี่ยวกับความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่ต้องการทดสอบ

แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำในที่นี้มีหลายชนิดดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 กรณีของเลเซอร์ไดโอดหรือแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์อื่น (อาจเป็นชนิดที่ปรับค่าความยาวคลื่นได้) ควรมีค่าความกว้างแถบความถี่แคบกว่าค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงมาก ๆ แหล่งกำเนิดแสงที่เปล่งแสงออกมาหลายความยาวคลื่นในช่วงแถบกว้างก็สามารถนำมาใช้ในการวัดได้หากใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่งได้ ตัวอย่างของอุปกรณ์ส่งผ่านแสงในลักษณะดังกล่าวอาจได้แก่ ตัวกรองแสงชนิดแถบความถี่แคบที่เป็นแบบเดี่ยวหรือแบบต่อร่วมกันเป็นอนุกรม เส้นการดูดกลืนสเปกตรัมแสงของตัวกลางแก๊ส (absorption line in gaseous media) หรืออินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดเฟบรีเปโรต์ (Fabry-Perot)

ภาคผนวก ง แสดงตารางค่าความยาวคลื่นแสงที่มีเสถียรภาพสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิง โดยค่าอ้างอิงที่ใช้ควรมีค่าความยาวคลื่น ค่าความกว้างแถบความถี่สเปกตรัม และค่ากำลังงานแสง ที่มีเสถียรภาพเพียงพอสำหรับการวัดค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่

ข) เครื่องวัดความยาวคลื่นแสง: เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิดแสงต้องมีค่าความเที่ยงตรงในการวัดเพียงพอหรือดีกว่าค่าที่กำหนดในการทดสอบวัดค่าความยาวคลื่นแสง เครื่องมือนี้ใช้ในกรณีของแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอดที่ไม่ทราบค่าความยาวคลื่น (รูปที่ 3)

7.2.2 ขั้นตอนการสอบเทียบความยาวคลื่นแสงภายใต้สภาวะอ้างอิง

ก) การติดตั้งอุปกรณ์สามารถทำได้ดังรูปที่ 1, 2 หรือ 3 โดยตั้งค่าช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต้องการวัดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ต้องการทดสอบให้ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นที่เปล่งออกจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่ใช้วัดควรอยู่ให้อยู่ตำแหน่งกลางหน้าจอแสดงผล ทำการตั้งค่าความละเอียดของความยาวคลื่นของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ให้สอดคล้องกับสมการ (39) และดีกว่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นแสงที่ทำการทดสอบ

$$R_{set} > 10 \cdot S / N \tag{39}$$

โดยที่

R_{set} คือ ค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

S คือ ค่าช่วงความยาวคลื่นที่หน้าจอแสดงผล

N คือ ค่าจำนวนจุดที่หน้าจอแสดงผล

เมื่อใช้รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ เป็นดังรูปที่ 1 หรือ 2 ให้ใช้ค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงหรือค่าที่ได้จากอุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่งได้ให้เป็นค่า λ_{REF} และหากใช้รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3 ให้ใช้ค่า λ_{REF} ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกวัดด้วยเครื่องวัดความยาวคลื่นแสง

โดยกำหนดให้ λ_{REF} เป็นของแหล่งกำเนิดแสง และ ความยาวคลื่นกลาง (centre wavelength) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง คือ $\lambda_{OSA,i}$

ข) ทำการวัดซ้ำอย่างน้อย 10 ครั้งและคำนวณค่าความยาวคลื่นแสงเฉลี่ย

$$\lambda_{OSA_{AV}} = \sum_{i=1}^{m} \lambda_{OSA_i} / m \tag{40}$$

โดยที่ m คือ จำนวนครั้งของการวัด

7.2.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนสำหรับสอบเทียบความยาวคลื่นภายใต้สภาวะอ้างอิง

จากผลการวัด คำนวณหาค่าเบี่ยงเบน $\Delta\lambda_{\text{ref}}$

$$\Delta\lambda_{\text{ref}} = \lambda_{OSA_{\text{AV}}} - \lambda_{\text{ref}} \tag{41}$$

คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด $\sigma_{\lambda\text{OSA}}$ ที่เกิดการวัดค่าความยาวคลื่นแสง $\lambda_{\text{OSA}i}$ โดยใช้สมการ (42)

$$\sigma_{\lambda\text{OSA}} = \left[\sum_{i=1}^{m}(\lambda_{\text{OSA}\,i} - \lambda_{\text{OSA}_{\text{AV}}})^2/(m-1)\right]^{1/2} \tag{42}$$

ค่าความไม่แน่นอน $\sigma_{\Delta\lambda\text{ref}}$ ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นภายใต้สภาวะอ้างอิง เป็นไปตามสมการ (43)

$$\sigma_{\Delta\lambda\text{ref}} = (\sigma^2_{\lambda\text{REF}} + \sigma^2_{\lambda\text{OSA}})^{1/2} \tag{43}$$

เมื่อ

$\sigma_{\lambda\text{ref}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

$\sigma_{\lambda\text{OSA}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของผลการวัดระหว่างการทดสอบ

หมายเหตุ ค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง $\sigma_{\lambda\text{REF}}$ สามารถละทิ้งได้ หากเลเซอร์หรืออุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่ง มีค่าความเสถียรของความยาวคลื่นดีกว่าค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง แต่หากใช้เลเซอร์ไดโอด ต้องทำการวัดค่าความยาวคลื่นด้วยเครื่องวัดความยาวคลื่นแสงหลาย ๆ ครั้ง และให้ค่าความไม่แน่นอนของแหล่งกำเนิดแสงเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, $\sigma_{\lambda\text{REF}}$

7.3 การสอบเทียบความยาวคลื่นแสงภายใต้สภาวะใช้งาน

การสอบเทียบที่อธิบายในหัวข้อนี้จะทำก็ต่อเมื่อเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงนั้นถูกนำไปใช้งานในสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ ที่นอกเหนือไปจากสภาวะอ้างอิง

ก) ความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง

ข) ความแปรผันตามอุณหภูมิ

7.3.1 ความแปรผันตามความยาวคลื่น

การหาค่าความแปรผันตามความยาวคลื่นสามารถใช้การทดลองดังรูปที่ 1, 2 หรือ 3 เหมือนกับการสอบเทียบความยาวคลื่นภายใต้สภาวะอ้างอิง ยกเว้นแหล่งกำเนิดแสง

7.3.1.1 เครื่องมือสำหรับการหาค่าความแปนผันตามความยาวคลื่น

ก) แหล่งกำเนิดแสง : แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ต้องมี 1) ค่าความกว้างแถบความถี่แคบกว่าค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบ และ 2) มีค่าความยาวคลื่นและค่ากำลังงานที่มีเสถียรภาพเพียงพอสำหรับค่าความไม่แน่นอนที่ระบุไว้ในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบ

แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำในที่นี้มีหลายชนิดดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 กรณีของเลเซอร์ไดโอดหรือแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์อื่น (อาจเป็นชนิดที่ปรับค่าความยาวคลื่นได้) ควรมีค่าความกว้างแถบความถี่แคบกว่าค่าความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงมาก ๆ แหล่งกำเนิดแสงที่เปล่งแสงออกมาหลายความยาวคลื่นในช่วงแถบกว้างก็สามารถนำมาใช้ในการวัดได้หากใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่งได้ ตัวอย่างของอุปกรณ์ส่งผ่านแสงในลักษณะดังกล่าวอาจได้แก่ ตัวกรองแสงชนิดแถบความถี่แคบที่เป็นแบบเดี่ยวหรือแบบต่อร่วมกันเป็นอนุกรม เส้นการดูดกลืนสเปกตรัมแสงของตัวกลางแก๊ส (absorption line in gaseous media) หรืออินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดเฟบรีเปโรต์ (Fabry-Perot)

ภาคผนวก ง แสดงตารางค่าความยาวคลื่นแสงที่มีเสถียรภาพสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิง โดยค่าอ้างอิงที่ใช้ควรมีค่าความยาวคลื่น ค่าความกว้างแถบความถี่สเปกตรัม และค่ากำลังงานแสง

ข) เครื่องวัดความยาวคลื่นแสง: เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความยาวคลื่นแสงของแหล่งกำเนิดแสงต้องมีค่าความเที่ยงตรงในการวัดเพียงพอหรือดีกว่าค่าที่กำหนดในการทดสอบวัดค่าความยาวคลื่นแสง เครื่องมือนี้ใช้ในกรณีของแหล่งกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ไดโอดที่ไม่ทราบค่าความยาวคลื่น (รูปที่ 3)

7.3.1.2 ขั้นตอนการหาค่าความแปรผันตามความยาวคลื่น

การติดตั้งอุปกรณ์สามารถทำได้ดังรูปที่ 1 และ 2 โดยให้ค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงหรือค่าอุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นค่าใดค่าหนึ่งได้เป็น $\lambda_{\mathrm{REF},j,}$ และสำหรับการติดตั้ง อุปกรณ์ดังรูปที่ 3 ค่า $\lambda_{\mathrm{REF},j,}$ ของแหล่งกำเนิดเป็นค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความยาวคลื่นแสง

ก) ส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ทำการทดสอบและอ่านค่าความยาวคลื่น $\lambda_{\mathrm{OSA},j,}$ โดยการหาค่าความยาวคลื่นเบี่ยงเบน $\Delta\lambda_{\lambda,j,}$ จากค่าความยาวคลื่นอ้างอิง $\lambda_{\mathrm{REF},j,}$ เป็นไปตามสมการ (44)

$$\Delta\lambda_{\lambda j} = \lambda_{\mathrm{OSA},j} - \lambda_{\mathrm{REF},j} \qquad (44)$$

ข) หลังจากนั้น เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง และทำการวัดค่าอีกครั้งและหาค่าความยาวคลื่นเบี่ยงเบนดังสมการ (44)

ค) ให้ค่า $\Delta\lambda_{\lambda,\mathrm{MAX}}$ ที่เป็นค่าเบี่ยงเบนมากสุดที่ได้และ $\Delta\lambda_{\lambda,\mathrm{MIN}}$ ที่เป็นค่าเบี่ยงเบนน้อยสุดที่ได้

7.3.1.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากความแปรผันตามความยาวคลื่นแสง

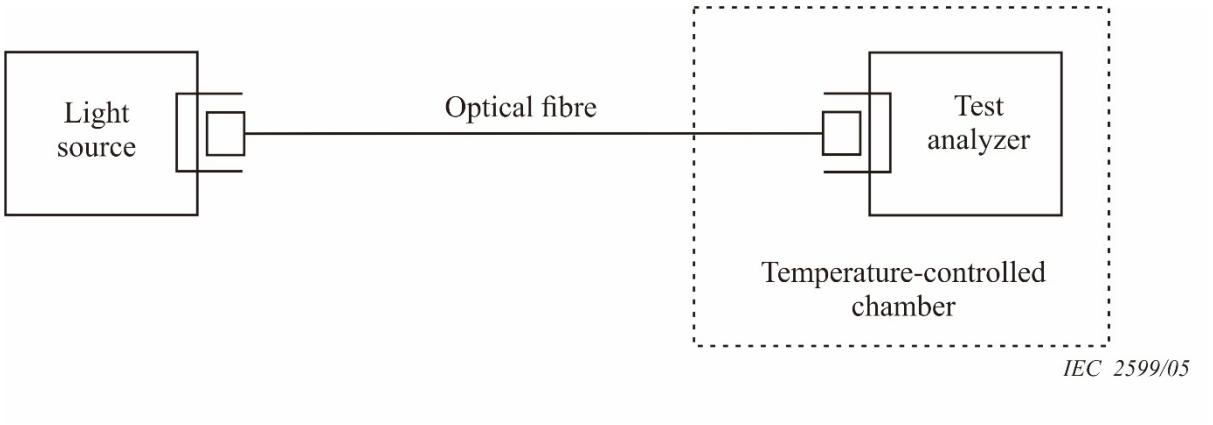
นำค่าเบี่ยงเบนของการวัดหลายครั้งที่ได้หาค่าเบี่ยงเบน $\Delta\lambda_\lambda$ และค่าความไม่แน่นอน $\sigma_{\Delta\lambda\lambda}$ เนื่องจากค่าความแปรผันตามความยาวคลื่นแสงโดยใช้สมการ (45) และ (46)

$$\Delta\lambda_\lambda = (\lambda_{\lambda,\mathrm{MAX}} + \lambda_{\lambda,\mathrm{MIN}})/2 \quad (45)$$

$$\sigma_{\Delta\lambda\lambda} = (\lambda_{\lambda,\mathrm{MAX}} - \lambda_{\lambda,\mathrm{MIN}})/2\sqrt{3} \quad (46)$$

7.3.2 ความแปรผันตามอุณหภูมิ

การหาค่าความไม่แน่นอนความยาวคลื่นที่เกิดจากความแปรผันตามอุณหภูมิติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 9 การทดสอบนี้ปฏิบัติตามภายใต้สภาวะอ้างอิง ยกเว้นอุณหภูมิ



รูปที่ 9 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการหาค่าความไม่แน่นอนความยาวคลื่นที่เกิดจากความแปรผันตามอุณหภูมิ

7.3.2.1 เครื่องมือสำหรับการหาค่าความแปรผันตามอุณหภูมิ

ก) แหล่งกำเนิดแสง : ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่กำหนดใช้สำหรับการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ถ้าแหล่งกำเนิดแสงนั้นไม่ได้ถูกกำหนด ให้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าความกว้างแถบความถี่แสงและค่าความยาวคลื่นที่มีความเสถียรเพียงพอสำหรับค่าความไม่แน่นอนที่กำหนดของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

แหล่งกำเนิดแสงที่แนะนำในที่นี้มีหลายชนิดดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 หรือเลเซอร์ไดโอดหรือแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์อื่นที่มีสเปกตรัมแบบโหมดเดี่ยว และแหล่งกำหนดแสงช่วงแถบความถี่กว้างที่มีอุปกรณ์ส่งผ่านแสงที่สามารถปล่อยหรือปิดกั้นความยาวคลื่นแสงค่าใดค่าหนึ่งได้

ภาคผนวก ง ตารางแสดงค่าความยาวคลื่นอ้างอิงที่เสถียร

7.3.2.2 ขั้นตอนสำหรับการหาค่าความแปรผันตามอุณหภูมิ

ภายใต้สภาวะอ้างอิงสอบเทียบและภายใต้ช่วงอุณหภูมิใช้งานของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ทำการวัดความยาวคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดแสงอย่างน้อยที่ 5 ค่าอุณหภูมิ (T_j)

ก) กำหนดค่าความยาวคลื่นแสงอินพุตเป็น λ_{REF} และค่าความยาวคลื่นแสงที่อ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง เป็น $\lambda_{\mathrm{OSA}j}$ หาค่าความยาวคลื่นเบี่ยงเบนตามสมการ (47)

$$\Delta\lambda_{Tj} = \lambda_{OSAj} - \lambda_{REF} \quad (47)$$

ข) หลังจากนั้นเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของตู้ควบคุมอุณหภูมิ (temperature controlled chamber) และทำการวัดซ้ำเพื่อหาค่าเบี่ยงเบน เมื่ออุณหภูมิของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเข้าสู่สมดุลทางอุณหภูมิแล้ว (ทิ้งไว้ประมาณ *2* ชั่วโมง)

ค) กำหนด $\Delta\lambda_{T,\mathrm{MAX}}$ เป็นค่าเบี่ยงเบนมากสุดที่ได้และ $\Delta\lambda_{T,\mathrm{MIN}}$ เป็นค่าเบี่ยงเบนน้อยสุดที่ได้ ที่ได้จากค่าความยาวคลื่นเบี่ยงเบนที่วัด $\Delta\lambda_{Tj}$

7.3.2.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นอันเนื่องมาจากความแปรผันตามอุณหภูมิ

การคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนของการวัดความยาวคลื่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ $\Delta\lambda_T$ และค่าความไม่แน่นอน $\sigma_{\Delta\lambda}$ ที่เกิดจากความแปรผันตามอุณหภูมิ ใช้สมการ (48) และ (49) ตามลำดับ

$$\Delta\lambda_T = (\lambda_{T,\mathrm{MAX}} + \lambda_{T,\mathrm{MIN}})/2 \quad (48)$$

$$\sigma_{\Delta\lambda T} = (\lambda_{T,\mathrm{MAX}} - \lambda_{T,\mathrm{MIN}})/2\sqrt{3} \quad (49)$$

7.4 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัดความยาวคลื่นแสง

เมื่อเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงถูกใช้ภายใต้สภาวะอ้างอิงเท่านั้น ค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัด $U_{\lambda ref}$ สามารถคำนวณด้วยค่าตัวประกอบครอบคลุม ตามสมการ (50)

$$U_{\lambda ref} = \pm k\sigma_{\Delta\lambda ref} \quad (50)$$

ค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดเกิดจากการคำนวณค่าความไม่แน่นอนภายใต้สภาวะอ้างอิงการสอบเทียบ และค่าความไม่แน่นอนภายใต้สภาวะใช้งาน ซึ่งเกิดจากการคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนสำหรับการทดสอบของความแปรผันตามความยาวคลื่นแสงและความแปรผันตามอุณหภูมิ เมื่อเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงถูกใช้งานนอกเหนือสภาวะอ้างอิงการสอบเทียบ

ค่าเบี่ยงเบนของความยาวคลื่นรวม $\Delta\lambda_{\mathrm{cu}}$ สามารถคำนวณตามสมการ (51) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากสมการ (41), (45) และ (48)

$$\Delta\lambda_{\mathrm{cu}} = \Delta\lambda_{\mathrm{ref}} + \Delta\lambda_{\lambda} + \Delta\lambda_{T} \quad (51)$$

ค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นแสง $\sigma_{\Delta\lambda\mathrm{cu}}$ สามารถคำนวณตามสมการ (52) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากสมการ (43), (46) และ (49)

$$\sigma_{\Delta\lambda\mathrm{cu}} = (\sigma^2_{\Delta\lambda\mathrm{ref}} + \sigma^2_{\Delta\lambda\lambda} + \sigma^2_{\Delta\lambda T})^{1/2} \quad (52)$$

ค่าความไม่แน่นอนขยายสามารถคำนวณด้วยค่าตัวประกอบครอบคลุม $U_{\lambda cu}$ ตามสมการ (53)

$$U_{\lambda rcu} = \pm k\sigma_{\Delta\lambda cu} \quad (53)$$

หมายเหตุ ในกรณีที่ต้องการให้ได้ค่าความยาวคลื่นแสงที่ถูกต้องตามผลการสอบเทียบ สามารถดำเนินการด้วยการใช้ซอฟต์แวร์กำหนดค่าที่ถูกต้องให้กับเครื่องมือ หรือ ใช้ค่าแก้ทางคณิตศาสตร์กับผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือเพื่อให้ได้ความถูกต้อง หรือ ใช้การปรับแต่งเครื่องมือ อย่างไรก็ตาม หากดำเนินการปรับแต่งด้วยกรณีใด ควรทำการทดสอบตามขั้นตอนเดิมหลาย ๆ ครั้ง เพื่อยืนยันว่าขั้นตอนการปรับแต่งค่าความถูกต้องได้ถูกดำเนินการอย่างถูกต้องแล้ว ดูภาคผนวก ค

8. การบันทึกผล

8.1 ผลการวัดและค่าความไม่แน่นอน

ใบรายงานผลการวัดควรประกอบไปด้วยข้อมูลและค่าความไม่แน่นอนดังต่อไปนี้ โดยการรายงานค่าความไม่แน่นอนควรอยู่ในรูปแบบที่บ่งชี้ระดับความเชื่อมั่น โดยการคูณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วย $\pm k$

ก) ความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ (หากทำการวัด) ตัวอย่างเช่นอัตราส่วนความแตกต่าง ΔR_{diff} สามารถดูรายละเอียดในข้อ 5

ข) ความเบี่ยงเบนของระดับกำลังงานที่แสดงผล ΔP_{cu} และค่าความไม่แน่นอน $\pm k\sigma_{\Delta P\mathrm{cu}}$ ให้รายงานผลในหน่วยของ mW หรือ dB สามารถดูรายละเอียดในข้อ 6

ค) ความเบี่ยงเบนของความยาวคลื่นแสง $\Delta\lambda_{\mathrm{cu}}$ และค่าความไม่แน่นอน $\pm k\sigma_{\Delta\lambda\mathrm{cu}}$ ให้รายงานผลในหน่วยของ nm ในสุญญากาศ สามารถดูรายละเอียดในข้อ 7

8.2 สภาวะการวัด

ขั้นตอนสอบเทียบและวิธีการที่ได้มาของผลการวัดต้องระบุไว้

แต่ละข้อกำหนดควรสอดคล้องกับสถานะของเครื่องมือและสภาวะการวัดที่ได้ปฏิบัติ โดยพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ที่ต้องระบุได้แก่ วันที่ทำการสอบเทียบ ระดับกำลังงานที่แสดงผล ความละเอียดของหน้าจอแสดงผลทั้งแกนตั้งและแกนนอน อุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศและช่วงความยาวคลื่นที่แสดงบนหน้าจอ

หมายเหตุ ผลการสอบเทียบเป็นเพียงสิ่งที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ทำการทดสอบและวิธีการสอบเทียบ

ภาคผนวก ก

พื้นฐานทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ

ส่วนสำคัญของการสอบเทียบคือการประเมินค่าความไม่แน่นอน ภาคผนวกนี้แนะนำรูปแบบมาตรฐานสำหรับการรายงานและการรวมค่าความไม่แน่นอน

เนื้อหาต่อไปนี้อ้างอิงจากเอกสาร ISO/IEC *Guide to the expression of uncertainty in measurement* เอกสารนี้จำแนกการเบี่ยงเบนระหว่างผลการวัดจริงและค่าจริงของปริมาณที่ถูกวัดออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ค่าเบี่ยงเบน (ดูหัวข้อ ก.1) ที่สามารถแก้ค่าได้ ค่าความไม่แน่นอนแบบเอ ที่ได้จากอนุกรมของปริมาณที่ต้องการวัด (measurand) และความไม่แน่นอนแบบบี ที่ได้จากแหล่งอื่น ๆ แต่ละการเบี่ยงเบนอาจมีสาเหตุจากหลายปัจจัยที่มีผลกระทบ ภาคผนวกนี้แสดงรูปแบบมาตรฐานของการประเมิน การรวม และการรายงานผลค่าความไม่แน่นอน

ก.1 ค่าเบี่ยงเบน

ค่าเบี่ยงเบนแสดงลักษณะความคลาดเคลื่อนที่ทราบในผลการวัด ในที่นี้คำว่า “ความคลาดเคลื่อน” สมมูลกับคำว่า “ค่าเบี่ยงเบน”

การรายงานผลการวัดมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ การรายงานผลการวัดในรูปแบบเชิงเส้น เช่น ความยาวคลื่นหรือเปอร์เซ็นต์ และการรายงานผลการวัดในรูปแบบลอการิทึม เช่น กำลังงานแสงในหน่วย dBM ทั้งสองรูปแบบค่าเบี่ยงเบนหรือความคลาดเคลื่อน Δ_y แสดงปริมาณความแตกต่างระหว่างผลการวัดจริง y_{actual} และค่าอ้างอิงของปริมาณที่วัด y_{ref}

$$\Delta y = y_{\text{actual}} - y_{\text{ref}} \qquad \text{(ก.1)}$$

การแก้ค่าสามารถทำได้โดยการลบผลการวัดด้วยค่าเบี่ยงเบน

ก.2 ค่าความไม่แน่นอนแบบเอ

ผลการวัดที่เปลี่ยนแปลงแบบสุ่มควรถูกพิจารณาเป็นค่าความไม่แน่นอนแบบเอ โดยทั่วไปการสุ่มตัวอย่างของการวัดจะมีการแจกแจงแบบปกติ (เกาส์เซียน) ควรทำให้ค่าความไม่แน่นอนนี้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้โดยทำการเฉลี่ยผลการสุ่มตัวอย่างการวัด เพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการสอบเทียบ การประเมินค่าความไม่แน่นอนแบบสุ่ม (แบบเอ) ของเครื่องมือชนิดเดียวกัน สามารถทำได้ใน 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนแรก หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการทดลอง S_{typeA} ของการวัดหลายครั้ง m โดยมีค่ามาตรฐานอ้างอิงเป็นจุดกึ่งกลางของกระจาย

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการทดลอง ซึ่งแสดงลักษณะของความไม่แน่นอนแบบเอ มีค่าโดยประมาณดังนี้

$$S_{\text{typeA}} = \left[\sum_{i=1}^{m} (y_i - y_{\text{mean}})^2 / (m-1) \right]^{1/2} \qquad \text{(ก.2)}$$

เมื่อ

y_i คือ การสุ่มตัวอย่างการวัดของอนุกรมการวัด

y_{mean} คือ ค่าเฉลี่ยของผลการวัด

m คือ จำนวนครั้งของการวัดเพื่อหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดย m ควรมีค่ามาก เช่น มากกว่า 30 ครั้ง

ขั้นตอนที่สอง หาค่าความไม่แน่นอนของแต่ละเครื่องมือนั้น ๆ σ_{typeA} โดยทำการวัดที่มีจำนวนครั้งน้อยลง n เพื่อประหยัดเวลาในการวัด โดยปกติ $n=1$ ดังนั้นผลของค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแบบเอ คือ

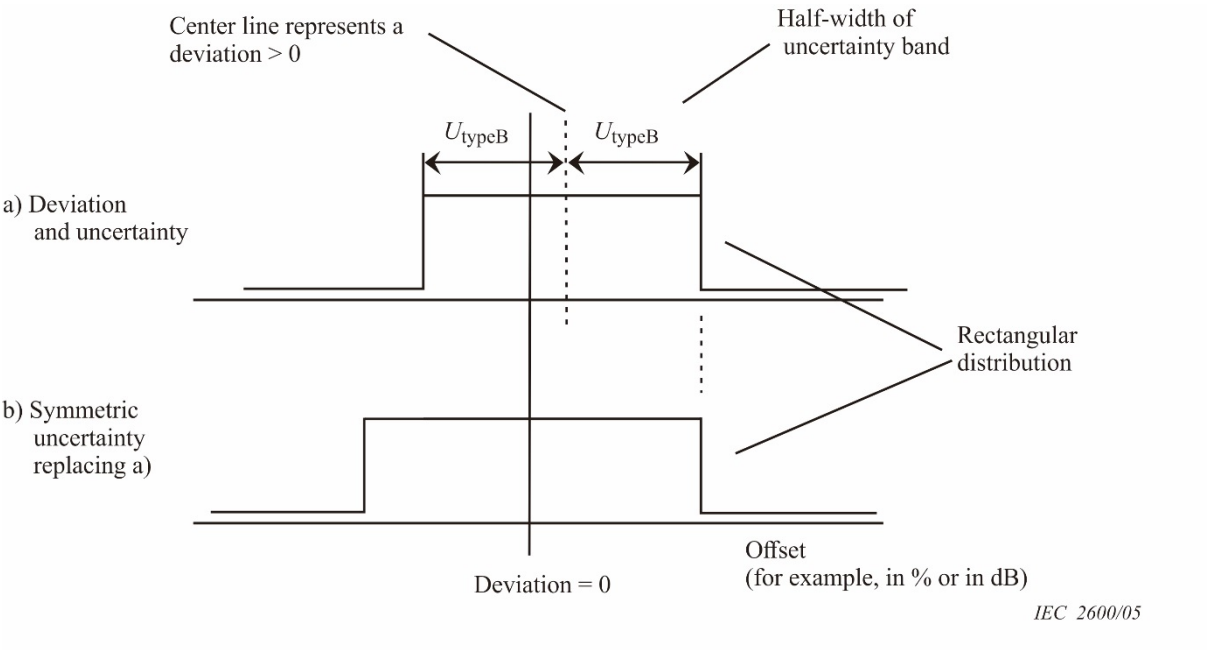
$$\sigma_{\text{typeA}} = S_{\text{typeA}} / n^{1/2} \quad \text{(ก.3)}$$

σ_{typeA} แสดงค่าความไม่แน่นอนของค่าเฉลี่ยของการวัด n ครั้งในการสุ่มตัวอย่าง ขั้นตอนทั้งสองสามารถรวมเป็นขั้นตอนเดียวได้ด้วยการกำหนดให้ $m=n$ ซึ่งอาจใช้เทคนิคทางสถิติอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น สถิติ ที (t-statistics)

ความไม่แน่นอนแบบเอ อาจแสดงในรูปแบบเชิงเส้น เช่น เปอร์เซ็นต์ หรือในรูปลอการิทึม เช่น dB การดำเนินการทางคณิศาสตร์สามารถใช้ได้เหมือนกันหากค่าความไม่แน่นอนมีค่าน้อย

ก.3 ค่าความไม่แน่นอนแบบบี

โดยปกติค่าความไม่แน่นอนแบบบีเป็นปริมาณที่แสดงความแตกต่างแบบคงที่ระหว่างผลการวัดกับค่าจริงของปริมาณที่วัดได้ ค่าความไม่แน่นอนนี้สามารถอธิบายได้ด้วยความกว้างของแถบความไม่แน่นอน ดังแสดงในรูป ก.1 สมมติว่าผลการวัดมีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (สี่เหลี่ยมผืนผ้า)



รูปที่ ก.1 ค่าเบี่ยงเบนและค่าความไม่แน่นอนแบบบีและวิธีการแทนที่ค่าทั้งสองด้วยความไม่แน่นอนที่มากกว่าอย่างเหมาะสม

มาตรฐานนี้แนะนำให้ระบุครึ่งความกว้างของแถบความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ (relative uncertainties) คือ U_{typeB} แถบความไม่แน่นอนสามารถคำนวณได้จากผลคูณของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนยินยอมของปัจจัยที่มีผลกระทบ เช่น อุณหภูมิ และคุณลักษณะของเครื่องมือกรณีที่แย่ที่สุดในสภาวะดังกล่าว การคำนวณนี้ควรอยู่บนพื้นฐานความสัมพันธ์ทางกายภาพที่ทราบ คุณลักษณะของเครื่องมือจากผู้ผลิต ข้อมูลจากใบรับรองผลการสอบเทียบ หรือข้อมูลจากการวัดเพื่อศึกษาคุณลักษณะที่มีจำนวนมากเพียงพอของเครื่องมือชนิดเดียวกัน ในการวัดนี้ ค่าความไม่แน่นอนแบบเอควรทำให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เช่น โดยการเฉลี่ย

การละเลยค่าเบี่ยงเบนสามารถทำได้โดยการกำหนดแถบค่าความไม่แน่นอนที่กว้างขึ้นและมีสมมาตร ดังแสดงในรูป ก.1 แถบค่าความไม่แน่นอนขยายสามารถแสดงได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานสมมูล σ_{typeB}

ค่าความไม่แน่นอนแบบบี (ครึ่งความกว้าง)

U_{typeB} = ครึ่งความกว้างของแถบความคลาดเคลื่อนยินยอมของสภาวะ × ความไวของเครื่องมือ (ก.4)

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแบบบี (จากการคำนวณ)

$$\sigma_{\text{typeB}} = U_{\text{typeB}} / 3^{1/2} \quad \text{(ก.5)}$$

ค่าความไม่แน่นอนแบบบีอาจแสดงในรูปแบบเชิงเส้น เช่น เปอร์เซ็นต์ หรือในรูปลอการิทึม เช่น dB การดำเนินการทางคณิศาสตร์สามารถใช้ได้เหมือนกันหากค่าความไม่แน่นอนมีค่าน้อย

ก.4 การสะสมของค่าความไม่แน่นอน

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมคือการรวมค่าความไม่แน่นอนแต่ละชนิด i ให้เป็นค่าเดียว ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมนี้อยู่บนพื้นฐานทางสถิติของแต่ละความไม่แน่นอน โดยการใช้รากกำลังสองผลรวมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ISO/IEC *Guide to the expression of uncertainty in measurement* การหาค่าเบี่ยงเบนสะสม ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมและค่าความไม่แน่นอนขยายสามารถใช้สมการดังต่อไปนี้

ค่าเบี่ยงเบนสะสม (ความคลาดเคลื่อน): $\Delta y^* = \sum \Delta y_i$ (ก.6)

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม: $\sigma_{std} = \left(\sum_{i=1}^{n} \sigma_{\text{typeB},i}^2 + \sum_{j=1}^{I} \sigma_{\text{typeA},j}^2 \right)^{1/2}$ (ก.7)

เมื่อ

i คือ จำนวนแต่ละองค์ประกอบ ณ ขณะนั้น

$\sigma_{\text{typeB},j}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน (จากการคำนวณ) ซึ่งเป็นตัวแทนความไม่แน่นอนเชิงระบบ (แบบบี) ดูสมการ ก.5

$\sigma_{\text{typeA},j}$ คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานที่แสดงลักษณะของความไม่แน่นอนแบบสุ่ม (แบบเอ) ดูสมการ ก.3

n คือ จำนวนความไม่แน่นอนแบบบี

l คือ จำนวนความไม่แน่นอนแบบเอ

หมายเหตุ ส่วนแรกของสมการ (ก.7) การรวมความไม่แน่นอนแบบบีทั้งหมด และส่วนที่สองรวมความไม่แน่นอนแบบเอทั้งหมด เป็นที่ยอมรับว่าองค์ประกอบความไม่แน่นอนในสมการที่มีค่าน้อยกว่า 1/10 ขององค์ประกอบที่มีค่ามากที่สุดสามารถละทิ้งได้ เนื่องจากการยกกำลังสองจะลดความสำคัญเป็น 1/100 ขององค์ประกอบที่มีค่ามากที่สุด

หากปริมาณข้างต้นถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนอีก ให้นำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม σ_{std} แทรกเข้าไปในสมการ (ก.6) และ (ก.7) และควรพิจารณาว่าให้เป็นค่าความไม่แน่นอนแบบบี ถึงแม้จะมีที่มาจากค่าความไม่แน่นอนแบบเอบางส่วนก็ตาม

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม รวมถึงค่าความไม่แน่นอนแบบเอและบี อาจถูกแสดงในรูปเชิงเส้นหรือลอการิทึม ที่ไม่มีความแตกต่างในการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ดูหัวข้อ ก.2

ค่าความไม่แน่นอนขยาย $$U_{\text{exp}} = \pm k\sigma_{\text{std}} \qquad \text{(ก.8)}$$

เมื่อ k คือ ตัวประกอบครอบคลุม

ในกรณีที่จำนวนครั้งของการวัดที่ใช้ในการหาค่าความไม่แน่นอนแบบเอมีค่ามาก และเลือกระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95 % ทำให้ได้ค่า k = 2 หากเลือกระดับความเชื่อมั่นประมาณ 99 % ทำให้ได้ค่า k=3 ตัวประกอบครอบคลุมมีค่ามากขึ้น หากจำนวนครั้งของการวัดที่ใช้ในการหาความไม่แน่นอนแบบเอมีค่าน้อย เช่น น้อยกว่า 10 ดู ISO/IEC *Guide to the expression of uncertainty in measurement*

ก.5 การรายงานผล

ในใบรายงานผลการสอบเทียบและเอกสารข้อมูลทางเทคนิค ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมควรถูกรายงานในรูปค่าความไม่แน่นอนขยาย รวมถึงระดับความเชื่อมั่นที่ใช้ หากไม่ระบุไว้ให้ระดับความเชื่อมั่น มีค่า 95 % โดยปริยาย

หากจำเป็นควรระบุค่าเบี่ยงเบน

ค่าเบี่ยงเบน $$\Delta y = \Delta y^{*} \qquad \text{(ก.9)}$$

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบ

ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบที่เกี่ยวข้องกับระดับกำลังงานที่แสดงผลและความยาวคลื่น แสดงดังต่อไปนี้

ข.1 การสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผล

ข.1.1 ความไม่แน่นอนภายใต้สภาวะอ้างอิง $\sigma_{\Delta P\text{ref}}$

ความไม่แน่นอนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง $\sigma_{\Delta P\text{ref}}$ ที่เกี่ยวกับระดับกำลังงานที่แสดงผลภายใต้สภาวะการสอบเทียบอ้างอิง สามารถคำนวณดังสมการ (13)

$$\sigma_{\Delta P\text{ref}} = (\sigma^2_{\text{PPM}} + \sigma^2_{\Delta P\text{diff}})^{1/2}$$

เมื่อ

σ_{PPM} คือ ความไม่แน่นอนของเครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิง

$\sigma_{\Delta P\text{diff}}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่วัดระหว่างการทดสอบ

ถ้าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 2.0 % ในใบรับรอง แล้ว

$$\sigma_{\text{PPM}} = 0.02 \qquad \text{(ข.1)}$$

เราสามารถหาค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง โดยการใช้ 10 ชุดข้อมูลของ $P_{\text{ref},i}$ และ $P_{\text{OSA}i}$ ที่วัดด้วยเครื่องวัดกำลังงานแสงอ้างอิงและเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

$P_{\text{ref}\,1}$ = 0.200 mW	$P_{\text{OSA}\,1}$ = 0.210 mW
$P_{\text{ref}\,2}$ = 0.202 mW	$P_{\text{OSA}\,2}$ = 0.205 mW
$P_{\text{ref}\,3}$ = 0.201 mW	$P_{\text{OSA}\,3}$ = 0.203 mW
$P_{\text{ref}\,4}$ = 0.200 mW	$P_{\text{OSA}\,4}$ = 0.215 mW
$P_{\text{ref}\,5}$ = 0.199 mW	$P_{\text{OSA}\,5}$ = 0.195 mW
$P_{\text{ref}\,6}$ = 0.199 mW	$P_{\text{OSA}\,6}$ = 0.190 mW
$P_{\text{ref}\,7}$ = 0.200 mW	$P_{\text{OSA}\,7}$ = 0.197 mW
$P_{\text{ref}\,8}$ = 0.201 mW	$P_{\text{OSA}\,8}$ = 0.213 mW
$P_{\text{ref}\,9}$ = 0.201 mW	$P_{\text{OSA}\,9}$ = 0.215 mW
$P_{\text{ref}\,10}$ = 0.202 mW	$P_{\text{OSA}\,10}$ = 0.220 mW

อัตราส่วนผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงและค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดกำลังงานแสง คำนวณได้ดังสมการ (10)

$\Delta P_{\text{diff}1} = 0.05$ $\Delta P_{\text{diff}2} = 0.015$

$\Delta P_{\text{diff}3} = 0.010$ $\Delta P_{\text{diff}4} = 0.075$

$\Delta P_{\text{diff}5} = -0.02$ $\Delta P_{diff6} = -0.045$

$\Delta P_{\text{diff}7} = -0.015$ $\Delta P_{diff8} = 0.06$

$\Delta P_{\text{diff}9} = 0.07$ $\Delta P_{\text{diff}10} = 0.089$

ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนผลต่าง คำนวณได้จากสมการ (11)

$$\Delta P_{\text{diff}} = \sum_{i=1}^{m} (\Delta P_{\text{diff},i}) / m = 0.289/10 = 0.0289 \quad \text{(ข.2)}$$

$$\sigma_{\Delta P\text{diff}} = \left[\sum_{i=1}^{m} (\Delta P_{\text{diff},i} - \Delta P_{\text{diff}})^2 / (m-1) \right]^{1/2} = (0.01917/9)^{1/2} = 0.0462 \quad \text{(ข.3)}$$

หากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง ($\sigma_{\Delta P\text{diff}} = 0.0462$) มีค่ามากกว่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดกำลังงานแสง ($\sigma_{\text{PPM}} = 0.02$) ให้พิจารณาเป็นค่าความไม่แน่นอนแบบเอของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

จากสมการ (13) ค่าความไม่แน่นอน $\sigma_{\Delta P\text{ref}}$ คือ

$$\sigma_{\Delta Pref} = (\sigma^2_{PPM} + \sigma^2_{\Delta Pdiff})^{1/2} = (0.02^2 + 0.0462^2)^{1/2} = 0.0503 \quad \text{(ข.4)}$$

ค่าเบี่ยงเบนระดับกำลังงานที่แสดงผล ได้จากสมการ (14)

$$\Delta P_{ref} = \Delta P_{diff} = 0.0289 \quad \text{(ข.5)}$$

ข.1.2 ค่าความไม่แน่นอนภายใต้สภาวะใช้งาน

ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงการคำนวณค่าความไม่แน่นอนเมื่อทำการสอบเทียบแยกสำหรับสี่ปัจจัย ได้แก่ ความยาวคลื่น โพลาไรเซชัน ความเป็นเชิงเส้น และอุณหภูมิ

ข.1.2.1 ความแปรผันตามความยาวคลื่น

ความแปรผันตามความยาวคลื่นของระดับกำลังงานสูงสุดที่แสดงผล ($P_{\text{OSA}j}$) ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงและค่าอ้างอิงของเครื่องวัดกำลังงานแสง ($P_{\text{REF},j}$) สำหรับความยาวคลื่นดังแสดงด้านล่าง

$\lambda_1 = 488$ nm $P_{\text{OSA}1} = 0.1225$ μW $P_{\text{REF}1} = 0.1202$ μW

$\lambda_2 = 632.8$ nm $P_{\text{OSA}2} = 0.1307$ μW $P_{\text{REF}2} = 0.1205$ μW

$\lambda_3 = 780$ nm $P_{\text{OSA}3} = 0.1310$ μW $P_{\text{REF}3} = 0.1230$ μW

$\lambda_4 = 850$ nm $P_{\text{OSA}4} = 0.1532$ μW $P_{\text{REF}4} = 0.1470$ μW

λ_5 = 1 500 nm $P_{\mathrm{OSA}5}$ = 0.1605 μW $P_{\mathrm{REF}5}$ = 0.1758 μW

λ_6 = 1 550 nm $P_{\mathrm{OSA}6}$ = 0.1520 μW $P_{\mathrm{REF}6}$ = 0.1620 μW

λ_7 = 1 600 nm $P_{\mathrm{OSA}7}$ = 0.1207 μW $P_{\mathrm{REF}7}$ = 0.1155 μW

จากสมการ (15)

$$\Delta P_{(\lambda_1)} = P_{\mathrm{OSA}1} / P_{\mathrm{REF}1} - 1 = 0.1225 / 0.1202 - 1 = 0.01913$$

$$\Delta P_{(\lambda_2)} = P_{\mathrm{OSA}2} / P_{\mathrm{REF}2} - 1 = 0.1307 / 0.1205 - 1 = 0.08465$$

$$\Delta P_{(\lambda_3)} = P_{\mathrm{OSA}3} / P_{\mathrm{REF}3} - 1 = 0.1310 / 0.1230 - 1 = 0.06504$$

$$\Delta P_{(\lambda_4)} = P_{\mathrm{OSA}4} / P_{\mathrm{REF}4} - 1 = 0.1532 / 0.1470 - 1 = 0.04218$$

$$\Delta P_{(\lambda_5)} = P_{\mathrm{OSA}5} / P_{\mathrm{REF}5} - 1 = 0.1605 / 0.1758 - 1 = -0.08703$$

$$\Delta P_{(\lambda_6)} = P_{\mathrm{OSA}6} / P_{\mathrm{REF}6} - 1 = 0.1520 / 0.1620 - 1 = -0.06173$$

$$\Delta P_{(\lambda_7)} = P_{\mathrm{OSA}7} / P_{\mathrm{REF}7} - 1 = 0.1207 / 0.1155 - 1 = 0.04502$$

จากค่าเหล่านี้

$$\Delta P_{\lambda,\mathrm{MAX}} = \Delta P_{(\lambda_2)} = 0.08465$$

$$\Delta P_{\lambda,\mathrm{MIN}} = \Delta P_{(\lambda_5)} = -0.08703$$

จากสมการ (16)

$$\Delta P_{\lambda} = (\Delta P_{\lambda,\mathrm{MAX}} + \Delta P_{\lambda,\mathrm{MIN}}) / 2 = (0.08465 - 0.08703) / 2 = -0.0012 \qquad \text{(ข.6)}$$

ค่าความไม่แน่นอนที่แปรผันตามความยาวคลื่น $\sigma_{\Delta P\lambda}$ จากสมการ (17)

$$\sigma_{\Delta P\lambda} = (\Delta P_{\lambda,\mathrm{MAX}} - \Delta P_{\lambda,\mathrm{MIN}}) / 2\sqrt{3} = 0.1716 / 2\sqrt{3} = 0.0496 \qquad \text{(ข.7)}$$

ข.1.2.2 ความแปรผันตามโพลาไรเซชัน

ความแปรผันตามโพลาไรเซชันหาได้จากค่าต่อไปนี้ของ $\Delta P_{\mathrm{MAX}}(\lambda_j)$ และ $\Delta P_{\mathrm{MIN}}(\lambda_j)$ ที่วัดโดยการหมุนแผ่น ½ ความยาวคลื่น เพื่อปรับระนาบโพลาไรเซชันของแหล่งกำเนินแสงจาก 0 ถึง 180 องศา

λ_1 = 850 nm $P_{\mathrm{MAX}}(\lambda_1)$ = 0.310 μW $P_{\mathrm{MIN}}(\lambda_1)$ = 0.292 μW

λ_2 = 1 310 nm $P_{\mathrm{MAX}}(\lambda_2)$ = 0.204 μW $P_{\mathrm{MIN}}(\lambda_2)$ = 0.194 μW

λ_3 = 1 550 nm $P_{\mathrm{MAX}}(\lambda_3)$ = 0.206 μW $P_{\mathrm{MIN}}(\lambda_3)$ = 0.193 μW

จากสมการ (18) และ (19) ค่าความแปรปรวนของ $\Delta P_{\mathrm{UL}}(\lambda_j)$ และ $\Delta P_{\mathrm{LL}}(\lambda_j)$ และค่าความแปรปรวนเฉลี่ย $P_{\mathrm{AVE}}(\lambda_j)$ ในระดับกำลังงานเนื่องจากโพลาไรเซชันที่ความยาวคลื่น λ_j คือ

$P_{\mathrm{AVE}}(\lambda_1)$ = 0.301 mW $\Delta P_{\mathrm{UL}}(\lambda_1)$ = 0.310/0.301 - 1 = 0.0299

$\Delta P_{\mathrm{LL}}(\lambda_1)$ = 0.292/0.301 - 1 = -0.0299

$P_{\mathrm{AVE}}(\lambda_2)$ = 0.199 mW $\quad \Delta P_{\mathrm{UL}}(\lambda_2)$ = 0.204/0.199 - 1 = 0.0251

$\Delta P_{\mathrm{LL}}(\lambda_2)$ = 0.194/0.199 - 1 = -0.0251

$P_{\mathrm{AVE}}(\lambda_3)$ = 0.1995 mW $\quad \Delta P_{\mathrm{UL}}(\lambda_3)$ = 0.206/0.1995 - 1 = 0.0326

$\Delta P_{\mathrm{LL}}(\lambda_3)$ = 0.193/0.1995 - 1 = -0.0326

จากค่าเหล่านี้

$$\Delta P_{\mathrm{POL,MAX}} = \Delta P_{\mathrm{UL}(\lambda_3)} = 0.0326$$

$$\Delta P_{\mathrm{POL,MIN}} = \Delta P_{\mathrm{LL}(\lambda_3)} = -0.0326$$

ค่าเบี่ยงเบนของค่าที่วัดได้ที่ขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชันและความยาวคลื่นแสง ΔP_{POL} ได้จากสมการ (21)

$$\Delta P_{\mathrm{POL}} = (\Delta P_{\mathrm{POL,MAX}} + \Delta P_{\mathrm{POL,MIN}})/2 = (0.0326 - 0.0326)/2 = 0 \qquad \text{(ข.8)}$$

ค่าความไม่แน่นอนของความแปรปรวนระดับกำลังงานเนื่องจากโพลาไรเซชัน $\sigma_{\Delta\mathrm{PPOL}}$ ได้จากสมการ (22)

$$\sigma_{\Delta\mathrm{PPOL}} = (\Delta P_{\mathrm{POL,MAX}} - \Delta P_{\mathrm{POL,MIN}})/2\sqrt{3} = (0.0326 + 0.0326)/2\sqrt{3} = 0.0188 \qquad \text{(ข.9)}$$

ข.1.2.3 ความเป็นเชิงเส้น

ความเป็นเชิงเส้นสามารถหาได้จากการค่า $P_{\mathrm{LIN,ref}}$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังงานแสงที่วัดได้โดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงต่อค่ากำลังงานแสงที่วัดได้โดยเครื่องวัดกำลังงานแสง และ $P_{\mathrm{LIN},j}$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังงานแสงที่วัดได้โดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงต่อค่ากำลังงานแสงที่วัดได้โดยเครื่องวัดกำลังงานแสง เมื่อระดับกำลังงานเปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวลดทอนสัญญาณแบบปรับค่าได้ ความคลาดเคลื่อนของความเป็นเชิงเส้น $\Delta P_{\mathrm{LIN}}(P_j)$ ที่ระดับกำลังงาน P_j คำนวณได้จากสมการ (25)

$P_{\mathrm{LIN,ref}}$ = 1.025

P_{LIN1} = 0.998 $\quad \Delta P_{\mathrm{LIN}}(P_1)$ = -0.02634

P_{LIN2} = 0.985 $\quad \Delta P_{\mathrm{LIN}}(P_2)$ = -0.03902

P_{LIN3} = 1.011 $\quad \Delta P_{\mathrm{LIN}}(P_3)$ = -0.01366

P_{LIN4} = 1.009 $\quad \Delta P_{\mathrm{LIN}}(P_4)$ = -0.01561

P_{LIN5} = 1.055 $\quad \Delta P_{\mathrm{LIN}}(P_5)$ = 0.02927

จากค่าเหล่านี้

$$\Delta P_{\mathrm{LIN,MAX}} = 0.02927$$

$$\Delta P_{\mathrm{LIN,MIN}} = -0.03902$$

ค่าเบี่ยงเบนของค่าที่วัดได้ ΔP_{LIN} หาได้จากสมการ (26)

$$\Delta P_{\mathrm{LIN}} = (\Delta P_{\mathrm{LIN,MAX}} + \Delta P_{\mathrm{LIN,MIN}})/2 = (\,0.02927 - 0.03902)/2 = -0.0049 \qquad \text{(ข.10)}$$

ค่าความไม่แน่นอนของความเป็นเชิงเส้น $\sigma_{\Delta P\mathrm{LIN}}$ หาได้จากสมการ (27)

$$\sigma_{\Delta P\mathrm{LIN}} = (\Delta P_{\mathrm{LIN,MAX}} - \Delta P_{\mathrm{LIN,MIN}})/2\sqrt{3} = (0.02927 + 0.03902)/2\sqrt{3} = 0.0197 \qquad \text{(ข.11)}$$

ข.1.2.4 ความแปรผันตามอุณหภูมิ

ความแปรผันตามอุณหภูมิสามารถคำนวณได้จากค่าต่อไปนี้ เมื่อ $P_{\mathrm{OSA},T\mathrm{ref}}$ คือ กำลังงานแสงอ้างอิงที่วัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่อุณหภูมิภายใต้สภาวะสอบเทียบอ้างอิง และ $P_{\mathrm{OSA}j}$ คือ กำลังงานแสงที่วัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับแสงอินพุตจากเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำที่มีความยาวคลื่น λ = 1 310 nm และมีกำลังงานแสงอินพุต 0.200 mW (ค่าสำหรับการทดสอบภายใต้สภาวะอ้างอิง) ความคลาดเคลื่อนของความไว $\Delta P(T_j)$ ที่อุณหภูมิ T_j หาได้จากสมการ (28) ดังนี้

$P_{\mathrm{OSA},T\mathrm{ref}}$ = 0.200 mW

$T1$ = 10 °C	P_{OSA1} = 0.202 mW	$\Delta P(T_1)$ = 0.010
$T2$ = 15 °C	P_{OSA2} = 0.204 mW	$\Delta P(T_2)$ = 0.020
$T3$ = 20 °C	P_{OSA3} = 0.199 mW	$\Delta P(T_3)$ = -0.005
$T4$ = 25 °C	P_{OSA4} = 0.197 mW	$\Delta P(T_4)$ = -0.015
$T5$ = 30 °C	P_{OSA5} = 0.200 mW	$\Delta P(T_5)$ = 0.0
$T6$ = 35 °C	P_{OSA6} = 0.207 mW	$\Delta P(T_6)$ = 0.035

จากค่าเหล่านี้

$$\Delta P_{\mathrm{TMP,MAX}} = 0.035$$

$$\Delta P_{\mathrm{TMP,MIN}} = -0.015$$

ค่าเบี่ยงเบนของค่าที่วัดได้ ΔP_{TMP} หาได้จากสมการ (29)

$$\Delta P_{\mathrm{TMP}} = (\Delta P_{\mathrm{TMP,MAX}} + \Delta P_{\mathrm{TMP,MIN}})/2 = (\,0.035 - 0.015)/2 = 0.010 \qquad \text{(ข.12)}$$

ความไม่แน่นอนเนื่องจากการขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ $\sigma_{\Delta P\mathrm{TMP}}$ หาได้จากสมการ (30)

$$\sigma_{\Delta P\mathrm{TMP}} = (\Delta P_{\mathrm{TMP,MAX}} - \Delta P_{\mathrm{TMP,MIN}})/2\sqrt{3} = (0.035 + 0.015)/2\sqrt{3} = 0.0144 \qquad \text{(ข.13)}$$

ข.1.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยาย

ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงการคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายเมื่อทำการสอบเทียบภายใต้สภาวะใช้งาน

$$\Delta P_{\mathrm{CU}} = \Delta P_{\mathrm{ref}} + \Delta P_{\lambda} + \Delta P_{\mathrm{POL}} + \Delta P_{\mathrm{LIN}} + \Delta P_{\mathrm{TMP}}$$
$$= 0.0289 - 0.0012 + 0 - 0.0049 + 0.010$$
$$= 0.0328 \qquad \text{(ข.14)}$$

ค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่แสดงผล หาได้จากสมการ (32)

$$\sigma\Delta P_{\mathrm{CU}} = (\sigma\Delta P_{\mathrm{ref}}^2 + \sigma\Delta P_{\lambda}^2 + \sigma\Delta P_{\mathrm{POL}}^2 + \sigma\Delta P_{\mathrm{LIN}}^2 + \sigma\Delta P_{\mathrm{TMP}}^2)^{1/2}$$
$$= (0.0503^2 + 0.0496^2 + 0.0188^2 + 0.0197^2 + 0.0144^2)^{1/2}$$
$$= (0.00594)^{1/2} = 0.0771 \qquad \text{(ข.15)}$$

ดังนั้น ค่าเบี่ยงเบนและค่าความไม่แน่นอน ΔP และ σ_P ของค่าที่วัดได้สำหรับ P = 0.2 mW สามารถหาได้จากสมการ (35) และ (36)

$$\Delta P = \Delta P_{\mathrm{cu}}\, P = 0.0328 \times 0.2 = 0.0066 \quad (\mathrm{mW}) \qquad \text{(ข.16)}$$

$$\sigma_P = \sigma_{\Delta P\mathrm{cu}}\, P = 0.0771 \times 0.2 = 0.0154 \quad (\mathrm{mW}) \qquad \text{(ข.17)}$$

ค่าความไม่แน่นอนขยาย U_P ที่มีตัวประกอบครอบคลุม k = 2 สำหรับระดับความเชื่อมั่น 95.5 % หาได้จากสมการ (37)

$$U_P = U_{P\mathrm{cu}} P = \pm k\sigma_P = \pm 2 \times 0.0154 = \pm 0.0308 \quad (\mathrm{mW}) \qquad \text{(ข.18)}$$

ΔP และ σ_P ในหน่วย dB หาได้จากสมการ (38)

$$\Delta P \ (in\ dB) = 10\log_{10}(1 + 0.0328) = 0.14 \quad (\mathrm{dB}) \qquad \text{(ข.19)}$$

$$\sigma_{\Delta P\mathrm{cu}} \ (in\ dB) = 10\log_{10}(1 + 0.0771) = 0.32 \quad (\mathrm{dB}) \qquad \text{(ข.20)}$$

ข.2 การสอบเทียบความยาวคลื่นแสง

ข.2.1 ค่าความไม่แน่นอนภายใต้สภาวะอ้างอิง $\sigma_{\Delta\lambda\mathrm{ref}}$

ความไม่แนนอนภายใต้สภาวะอ้างอิงของเครื่องวิเคราะห์เสปกตัมแสง $\sigma_{\Delta\lambda\mathrm{ref}}$ ที่เกี่ยวข้องกับความยาวคลื่นสามารถหาได้จากสมการ (43)

$$\sigma_{\Delta\lambda\mathrm{ref}} = (\sigma_{\lambda\mathrm{REF}}^2 + \sigma_{\lambda\mathrm{OSA}}^2)^{1/2}$$

เมื่อ

$\sigma_{\lambda REF}$ คือ ความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง

$\sigma_{\lambda OSA}$ คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าที่วัดได้ระหว่างการทดสอบ

ความไม่แน่นอนสามารถหาได้จากค่าความยาวคลื่นกลาง $\lambda_{\mathrm{OSA}i}$ จำนวน 10 ค่า ที่วัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ของเลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น λ_{REF} = 633.0 nm

$\lambda_{\mathrm{OSA1}} = 632.9$ nm $\quad\quad$ $\lambda_{\mathrm{OSA6}} = 633.0$ nm

$\lambda_{OSA2} = 633.0$ nm $\quad\quad$ $\lambda_{\mathrm{OSA7}} = 632.8$ nm

$\lambda_{\mathrm{OSA3}} = 632.8$ nm $\quad\quad$ $\lambda_{\mathrm{OSA8}} = 632.7$ nm

$\lambda_{\mathrm{OSA4}} = 632.8$ nm $\quad\quad$ $\lambda_{\mathrm{OSA9}} = 632.8$ nm

$\lambda_{\mathrm{OSA5}} = 632.9$ nm $\quad\quad$ $\lambda_{\mathrm{OSA10}} = 632.7$ nm

จากสมการ (42) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่วัดได้คำนวณได้ดังนี้

ทำการคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน $\sigma_{\lambda\mathrm{OSA}}$ ของค่า $\lambda_{\mathrm{OSA}i}$ ที่วัดได้ โดยใช้สมการ (42)

$$\sigma_{\lambda\mathrm{OSA}} = \left[\sum_{i=1}^{m}(\lambda_{\mathrm{OSA}i} - \lambda_{\mathrm{OSA_{AV}}})^2/(m-1)\right]^{1/2}$$

$$\sigma_{\lambda OSA} = \left[(632.9-632.84)^2 + (633.0-632.84)^2 + \ldots + (632.7-632.84)^2/(10-1)\right]^{1/2}$$

$$= 0.107 \text{ nm} \quad \text{(ข.21)}$$

ค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นจากแหล่งกำเนิดแสง $\sigma_{\lambda\mathrm{ref}}$ มีค่าประมาณ 10^{-5} ถึง 10^{-6} ซึ่งเพียงพอที่จะให้ค่าประมาณ $\sigma_{\lambda\mathrm{ref}}$ เท่ากับ 0 ได้ ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนภายใต้สภาวะอ้างอิง $\sigma_{\Delta\lambda\mathrm{ref}}$ ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงสามารถหาได้จากสมการ (43)

$$\sigma_{\Delta\lambda\mathrm{ref}} = (\sigma^2_{\lambda\mathrm{REF}} + \sigma^2_{\lambda\mathrm{OSA}})^{1/2} = (0.0 + 0.107^2)^{1/2} = 0.107 \text{ nm} \quad \text{(ข.22)}$$

ค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ $\lambda_{\mathrm{OSA_{AV}}}$ หาได้จากสมการ (40)

$$\lambda_{\mathrm{OSA_{AV}}} = \sum_{i=1}^{m}\lambda_{\mathrm{OSA}_i}/m = 6328.4/10 = 632.84 \text{ nm} \quad \text{(ข.23)}$$

ค่าเบี่ยงเบนของค่าที่วัดได้ $\Delta\lambda_{\mathrm{ref}}$ หาได้จากสมการ (41)

$$\Delta\lambda_{\mathrm{ref}} = \lambda_{\mathrm{OSAAV}} - \lambda_{\mathrm{REF}} = 632.84 - 633.0 = -0.16 \text{ nm} \quad \text{(ข.24)}$$

ข.2.2 ค่าความไม่แน่นอนภายใต้สภาวะการใช้งาน

ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงการคำนวณค่าความไม่แน่นอนเมื่อความแปรผันตามความยาวคลื่นและอุณหภูมิได้รับการสอบเทียบ

ข.2.2.1 ความแปรผันความยาวคลื่นแสง

ความแปรผันตามความยาวคลื่นแสงสามารถหาได้จากค่าความยาวคลื่นกลางที่วัดจากแหล่งกำเนิดแสงจำนวน 5 แหล่ง ที่มีความยาวคลื่นอื่น นอกเหนือจาก λ_{ref}

$\lambda_{\mathrm{OSA1}} = 650.4$ nm $\quad\quad$ $\lambda_{\mathrm{REF1}} = 650.6$ nm

λ_{OSA2} = 780.5 nm λ_{REF2} = 780.3 nm

λ_{OSA3} = 850.2 nm λ_{REF3} = 850.1 nm

λ_{OSA4} = 1 310.5 nm λ_{REF4} = 1 310.7 nm

λ_{OSA5} = 1 552.1 nm λ_{REF5} = 1 552.0 nm

ค่าเบี่ยงเบนของค่าที่วัดได้สำหรับแหล่งกำเนิดแสงแต่ละชนิด คำนวณจากสมการ (44) สำหรับแต่ละความยาวคลื่น

$$\Delta\lambda_{\lambda 1} = 650.4 - 650.6 = -0.2 \ \text{nm}$$

$$\Delta\lambda_{\lambda 2} = 780.5 - 780.3 = 0.2 \ \text{nm}$$

$$\Delta\lambda_{\lambda 3} = 850.2 - 850.1 = 0.1 \ \text{nm}$$

$$\Delta\lambda_{\lambda 4} = 1310.5 - 1310.7 = -0.2 \ \text{nm}$$

$$\Delta\lambda_{\lambda 5} = 1552.1 - 1555.0 = 0.1 \ \text{nm}$$

จากค่าเหล่านี้

$$\Delta\lambda_{\lambda,\mathrm{MAX}} = 0.2 \ nm$$

$$\Delta\lambda_{\lambda,\mathrm{MIN}} = -0.2 \ nm$$

ความไม่แน่นอนของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการความแปรผันความยาวคลื่น $\sigma_{\Delta\lambda\lambda}$ หาได้จากสมการ (46)

$$\sigma_{\Delta\lambda\lambda} = (\lambda_{\lambda,\mathrm{MAX}} - \lambda_{\lambda,\mathrm{MIN}})/2\sqrt{3} = 0.4/2\sqrt{3} = 0.115 \qquad \text{(ข.25)}$$

ดังนั้น ค่าเบี่ยงเบนเนื่องจากความแปรผันตามความยาวคลื่นหาได้จากสมการ (45)

$$\Delta\lambda_{\lambda} = (\lambda_{\lambda,\mathrm{MAX}} + \lambda_{\lambda,\mathrm{MIN}})/2 = 0 \qquad \text{(ข.26)}$$

ข.2.2.2 ความแปรผันตามอุณหภูมิ

ค่าความยาวคลื่นกลางต่อไปนี้ ถูกวัดที่อุณภูมิต่าง ๆ โดยใช้เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียมนีออน λ_{REF} = 633.0 nm เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแปรผันตามอุณหภูมิ

T_1 = 10 ˚C λ_{OSA1} = 632. nm

T_2 = 15 ˚C λ_{OSA2} = 632.7 nm

T_3 = 20 ˚C λ_{OSA3} = 632.8 nm

T_4 = 25 ˚C λ_{OSA4} = 632.9 nm

T_5 = 30 ˚C λ_{OSA5} = 633.1 nm

T_6 = 35 ˚C λ_{OSA6} = 633.2 nm

$$\Delta\lambda_{T1} = 632.8 - 633.0 = -0.2 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{T3} = 632.8 - 633.0 = -0.2 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{T4} = 632.9 - 633.0 = -0.1 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{T5} = 633.1 - 633.0 = 0.1 \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{T6} = 633.2 - 633.0 = 0.2 \text{ nm}$$

จากสมการ (49) และ (48)

$$\sigma_{\Delta\lambda T} = (\lambda_{T,\text{MAX}} - \lambda_{T,\text{MIN}})/2\sqrt{3} = (0.2 + 0.3)/2\sqrt{3} = 0.144 \text{ nm} \quad \text{(ข.27)}$$

$$\Delta\lambda_{T} = (\lambda_{T,\text{MAX}} + \lambda_{T,\text{MIN}})/2 = (0.2 - 0.3)/2 = -0.0.05 \text{ nm} \quad \text{(ข.28)}$$

ข.2.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยาย

ตัวอย่างต่อไปนี้แสดงการคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายเมื่อทำการสอบเทียบภายใต้สภาวะใช้งาน เราสามารถหาค่าความไม่แน่นอนสะสมจากสมการ (52)

$$\begin{aligned}\sigma_{\Delta\lambda\text{CU}} &= \left(\sigma^2_{\Delta\lambda\text{ref}} + \sigma^2_{\Delta\lambda\lambda} + \sigma^2_{\Delta\lambda T}\right)^{1/2} \\ &= (0.107^2 + 0.115^2 + 0.144^2)^{1/2} \\ &= (0.045)^{1/2} = 0.213 \text{ nm}\end{aligned} \quad \text{(ข.29)}$$

ค่าเบี่ยงเบนความยาวคลื่นแสงสามารถหาได้จากสมการ (51)

$$\Delta\lambda_{\text{cu}} = \Delta\lambda_{\text{ref}} + \Delta\lambda_{\lambda} + \Delta\lambda_{T} = -0.16 + 0.0 - 0.05 = -0.21 \text{ (nm)} \quad \text{(ข.30)}$$

ดังนั้น เราสามารถหาความไม่แน่นอนขยาย $U_{\lambda\text{cu}}$ ที่มีตัวประกอบครอบคลุม k = 2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

$$U_{\lambda\text{cu}} = \pm k\sigma_{\Delta\lambda\text{cu}} = \pm 2 \times 0.213 = \pm 0.43 \text{ nm} \quad \text{(ข.31)}$$

ภาคผนวก ค

การใช้ผลการสอบเทียบ

ค.1 ทั่วไป

ค.1.1 ขอบข่าย

การนำเครื่องมือไปใช้งานอาจเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่แตกต่างจากสภาวะที่เครื่องมือถูกสอบเทียบ เช่น การวัดความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่อยู่ระหว่าง 2 จุดความยาวคลื่นที่ได้รับการสอบเทียบ จำเป็นต้องใช้เทคนิคการประมาณค่าในช่วง (interpolation techniques) ซึ่งแสดงสาระสำคัญในภาคผนวกนี้

การประมาณค่าในช่วงของผลการสอบเทียบสามารถใช้ได้กับบางพารามิเตอร์และจำกัดอยู่ในขอบเขตที่การประมาณค่าในช่วงนั้นสามารถใช้ได้

ค.1.2 พารามิเตอร์

วิธีการที่แสดงในภาคผนวกนี้สามารถประยุกต์ใช้กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ เครื่องมือ ดังต่อไปนี้

ก) การสอบเทียบความยาวคลื่นแสงในฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

ข) การสอบเทียบความละเอียดของความกว้างแถบความถี่ในฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

ค) การสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลในฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

ง) การสอบเทียบความเป็นเชิงเส้นของกำลังงานในฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

วิธีการที่แสดงในภาคผนวกนี้ไม่รวมถึง

จ) ความแปรผันตามโพลาไรเซชัน

ค.1.3 ข้อจำกัด

วิธีการประมาณค่าในช่วงในภาคผนวกนี้อยู่ภายใต้ข้อจำกัด ดังต่อไปนี้

ก) ผู้ปฏิบัติงานต้องมั่นใจว่าจำนวนจุดสอบเทียบเพียงพอในการทวนสอบว่าการประมาณค่าในช่วงสามารถใช้ได้

ข) การประมาณค่าแก้ของการสอบเทียบสำหรับพารามิเตอร์ที่อยู่นอกช่วงของจุดสอบเทียบไม่สามารถกระทำได้

ค) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงบางชนิดใช้อุปกรณ์การเลี้ยวเบนแสงในการเลือกความยาวคลื่นและใช้ตัววัดแสงหลายตัวเพื่อให้ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นของเครื่องมือนั้น การประมาณค่าแก้ของการสอบเทียบที่นอกเหนือเงื่อนไขของเครื่องมือที่สอบเทียบขณะนั้นไม่สามารถกระทำได้

ง) หากใช้แบบจำลองพหุนาม (polynomial fit model) ดีกรีของพหุนามนั้นควรมีค่าน้อยกว่าจำนวนจุดของการสอบเทียบอย่างมีนัยสำคัญ

จ) ต้องกำหนดช่วงการใช้งานของฟังก์ชันประมาณค่าในช่วงเสมอ

ฉ) หากจุดสอบเทียบมีการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ อาจจำเป็นต้องถ่วงน้ำหนักค่าการสอบเทียบในการฟิตเส้นกราฟที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองการประมาณค่าในช่วง การเลือกค่าการถ่วงน้ำหนักควรได้รับการรับรองโดยนักสถิติหรือเจ้าหน้าที่มีคุณสมบัติเหมาะสม

ค.2 ค่าแก้แบบผลบวก

ค.2.1 พารามิเตอร์

ในหัวข้อนี้ ตัวอย่างและสัญลักษณ์ทั้งหมดสัมพันธ์กับการสอบเทียบความยาวคลื่นแสงของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงโดยการใช้การฟิตเส้นกราฟแบบเชิงเส้น

ค.2.2 การวัดความยาวคลื่นแสงที่ใกล้กับความยาวคลื่นแสงอ้างอิงสอบเทียบ

หากใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงวัดความยาวคลื่นแสงที่ใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสงอ้างอิงที่ใช้ในการสอบเทียบ สามารถทำการแก้ค่าความยาวคลื่นที่วัดเพื่อให้มีค่าประมาณเป็นความยาวคลื่นในสุญญากาศ λ_c โดยการจัดเรียงสมการ (44) ดังนี้

$$\lambda_c = \lambda_{\mathrm{OSA}} - \Delta\lambda_{\lambda,j} \qquad \text{(ค.1)}$$

เมื่อ

λ_{OSA} คือ ความยาวคลื่นแสงที่วัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

$\lambda_{\lambda,j}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนของความยาวคลื่นแสงที่ได้มาจากผลการสอบเทียบ

ค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นแสงที่แก้ค่า $\sigma_{\lambda c}$ หาได้จากการผลรวมขององค์ประกอบที่มาจากการวัดและการแก้ค่า

$$\sigma_{\lambda c} = \left(\sigma^2_{\Delta\lambda_\lambda} + \sigma^2_{\mathrm{OSA}}\right)^{1/2} \qquad \text{(ค.2)}$$

เมื่อ

$\sigma_{\Delta\lambda_\lambda}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงอันเนื่องมาจากความแปรผันตามความยาวคลื่น

$\sigma_{\lambda\mathrm{osa}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของค่าที่วัดได้ระหว่างการสอบเทียบ

ค.2.3 การวัดความยาวคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นแสงอื่น ๆ

โดยทั่วไป ความยาวคลื่นแสงอ้างอิงมีจำนวนไม่มากตลอดช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน ในกรณีนี้อาจแสดงค่าเบี่ยงเบนความยาวคลื่นแสงโดย

$$\Delta\lambda_{\mathrm{OSA}}(\lambda_{\mathrm{OSA}}) = \Delta S_\lambda \lambda_{\mathrm{OSA}} + \Delta\lambda_o \qquad \text{(ค.3)}$$

เมื่อ ΔS_λ คือ ตัวประกอบสเกล ซึ่งในอุดมคติควรมีค่าเป็นศูนย์ และ $\Delta\lambda_o$ คือ ค่าความแตกต่างที่มีค่าคงที่ ซึ่งในอุดมคติควรมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่วัดได้และความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศจริงหาได้จาก

$$\lambda_{\text{vac}}(\lambda_{\text{osa}}) = \lambda_{\text{osa}} + \Delta\lambda_{\text{osa}}(\lambda_{\text{osa}}) + \varepsilon(\lambda_{\text{osa}}) \qquad \text{(ค.4)}$$

เมื่อ $\lambda_{\text{vac}}(\lambda_{\text{osa}})$ คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ และ $\varepsilon(\lambda_{\text{osa}})$ แสดงความคลาดเคลื่อนเพิ่มเติมที่ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือ เช่น เครื่องมือที่ประกอบด้วยกลไกไซน์บาร์ (sine-bar mechanism) อาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนแบบคาบไซน์บาร์ ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวรวมองค์ประกอบค่าความไม่แน่นอนแบบเอ (เชิงสุ่ม) ด้วย

การฟิตผลการสอบเทียบด้วยสมการ (ค.3) ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ ΔS_λ และ $\Delta\lambda_o$

หมายเหตุ หากมีความยาวคลื่นแสงอ้างอิงที่เพียงพอ ความแตกต่างความยาวคลื่นสามารถฟิตได้ด้วยสมการที่มีอันดับสูงกว่า ลักษณะเชิงระบบหรือเชิงฟังก์ชันของ $\varepsilon(\lambda)$ จะปรากฏออกมาที่อันดับสูงขึ้นและสามารถนำมาใช้แก้ค่าความยาวคลื่นแสงที่วัดได้ ต้องใช้ความระมัดระวังในการการฟิตสมการสำหรับลักษณะของ $\varepsilon(\lambda)$ และจำนวนความยาวคลื่นแสงอ้างอิงที่ใช้

ความคลาดเคลื่อนแบบรากกำลังสองเฉลี่ยเนื่องจากการฟิตข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ $\sigma_{\varepsilon\lambda}$ สามารถคำนวณได้จากความคลาดเคลื่อนคงเหลือ (residual error) ที่ค่าอ้างอิง

$$\sigma_{\varepsilon\lambda} = \left[\left(\sum_{i=1}^{n} (\Delta\lambda_{\lambda,i} - \Delta\lambda_{\text{osa}}(\Delta\lambda_{\text{osa},i}))^2 \right) / (n-2) \right]^{1/2} \qquad \text{(ค.5)}$$

หมายเหตุ จำนวนจุดข้อมูล คือ $n-2$ ซึ่งเป็นผลมากจากสองพารามิเตอร์ ได้แก่ ความชันและจุดตัดแกนของกราฟ

ความยาวคลื่นแสงที่วัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง สามารถแก้ค่าโดยลบ λ_{OSA} ด้วย $\Delta\lambda(\lambda_{\text{OSA}})$

$$\lambda_c = \Delta\lambda_{\text{OSA}} - \Delta\lambda(\lambda_{\text{OSA}}) \qquad \text{(ค.6)}$$

ค่าความไม่แน่นอนของความคลาดเคลื่อนความยาวคลื่นแสงที่คำนวณ/ค่าแก้ $\sigma_{\Delta\lambda}$ หาได้จาก

$$\sigma_{\Delta\lambda} = (\sigma^2_{\lambda OSA} + \sigma^2_{\lambda REF} + \sigma^2_{\varepsilon\lambda})^{1/2} \qquad \text{(ค.7)}$$

เมื่อ $\sigma_{\lambda\text{REF}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของความยาวคลื่นแสงอ้างอิงที่ใช้ในการสอบเทียบ เนื่องจากมีการใช้หลายความยาวคลื่นแสง $\sigma_{\lambda\text{REF}}{}^2$ สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของ $(\sigma_{\lambda\text{REF},i})^2$ ที่ใช้ในการสอบเทียบ หากมีการใช้เลเซอร์/เส้นการเปล่งแสงของแก๊สในการสอบเทียบ สามารถละเว้นค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวได้

ค.3 ค่าแก้แบบผลคูณ

ค.3.1 พารามิเตอร์

ในหัวข้อนี้ ตัวอย่างและสัญลักษณ์ทั้งหมดสัมพันธ์กับการสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงในฟังก์ชันของความยาวคลื่น

ค.3.2 การวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลที่ความยาวคลื่นใกล้กับความยาวคลื่นแสงอ้างอิงสอบเทียบ

หากใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงวัดกำลังงานแสงที่ความยาวคลื่นใกล้กับความยาวคลื่นแสงอ้างอิงที่ใช้ในการสอบเทียบกำลังงานแสง สามารถทำการแก้ค่ากำลังงานแสงที่วัดได้ให้มีค่าประมาณกับกำลังงานแสงจริง P_c โดยการจัดเรียงสมการ (10) ได้ดังนี้

$$P_c = P_{\mathrm{OSA}} /(1+\Delta P_{\mathrm{diff}}) \qquad \text{(ค.8)}$$

ค่าความไม่แน่นอนของกำลังงานแสงที่แก้ค่า σ_{Pc} หาได้จากการผลรวมค่าความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานแสงที่วัดได้และการสอบเทียบกำลังงานแสงที่แสดงผล

หมายเหตุ ค่าความไม่แน่นอนกำลังงานแสงที่ได้จากการวัดและจากการแก้ค่าเป็นแบบผลบวก ในขณะที่ความไม่แน่นอนของระดับกำลังงานที่แสดงผลเป็นแบบผลคูณ

$$\sigma_{Pc} = P_c(\sigma^2_{\Delta P\mathrm{diff}} + \sigma^2_{P\mathrm{osa}} / P^2_{\mathrm{OSA}})^{1/2} \qquad \text{(ค.9)}$$

ค.3.3 การวัดระดับกำลังงานที่แสดงผลที่ความยาวคลื่นอื่น ๆ

โดยทั่วไป จุดสอบเทียบระดับกำลังงานที่แสดงผลมีจำนวนไม่มากตลอดช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน ในกรณีนี้อาจแสดงความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบโดยสมการ

$$\Delta P_{\mathrm{diff}}(\lambda_{\mathrm{osa}}) \quad = \quad \Delta S_P \lambda_{\mathrm{osa}} + \Delta P_{\mathrm{o}} \qquad \text{(ค.10)}$$

เมื่อ ΔS_P คือ ตัวประกอบสเกล ซึ่งในอุดมคติควรมีค่าเป็นศูนย์ และ ΔP_{o} คือ ค่าความแตกต่างที่มีค่าคงที่ ซึ่งในอุดมคติควรมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานแสงที่วัดได้และกำลังงานแสงจริงหาได้จาก

$$P_{true}(\lambda_{osa}) \quad = \quad P_{OSA} /(1+\Delta P_{diff}(\lambda_{osa}) + \varepsilon_P(\lambda_{osa})) \qquad \text{(ค.11)}$$

$\varepsilon_P(\lambda_{osa})$ แสดงความคลาดเคลื่อนเพิ่มเติมที่ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือ เช่น เครื่องมือที่ประกอบด้วยตัววัดแสงชนิดหล่อเย็น อาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่มาจากอนุพันธ์ของการตอบสนองของตัววัดแสง ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวรวมองค์ประกอบค่าความไม่แน่นอนแบบเอ (เชิงสุ่ม) ด้วย

การฟิตผลการสอบเทียบด้วยสมการ (ค.10) ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ ΔS_P และ ΔP_o ความคลาดเคลื่อนแบบรากกำลังสองเฉลี่ยเนื่องจากการฟิตข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ $\sigma_{\varepsilon P}$ สามารถคำนวณได้จากความคลาดเคลื่อนคงเหลือ ที่ค่าอ้างอิง

$$\sigma_{\varepsilon P} = \left[(\sum_{i=1}^{n} (\Delta P_{diff,\lambda i} - \Delta P_{diff}(\Delta\lambda_i))^2 / (n-2) \right]^{1/2} \quad \text{(ค.12)}$$

หมายเหตุ จำนวนจุดข้อมูล คือ $n-2$ ซึ่งเป็นผลมากจากสองพารามิเตอร์ ได้แก่ ความชันและจุดตัดแกนของกราฟ

กำลังงานที่แสงวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง สามารถทำการแก้ค่าได้ดังนี้

$$P_c(\lambda_{OSA}) \quad = \quad P_{OSA} / (1 + \Delta P_{diff}(P_{OSA}) \quad \text{(ค.13)}$$

ค่าความไม่แน่นอนของค่าแก้กำลังงานแสงคล้ายกับสมการ ค.9 โดยเพิ่มความคลาดเคลื่อน $\sigma_{\varepsilon P}$

$$\sigma_{Pc}(\lambda_{OSA}) = P_c(\lambda_{OSA}) \left[\sigma^2_{\Delta P_{diff}} + \sigma^2_{\varepsilon P} + \sigma^2_{P_{osa}} / P^2_{OSA}(\lambda_{OSA})^2 \right]^{1/2} \quad \text{(ค.14)}$$

ค.4 ผลการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง (ค่าแก้แบบผลบวก)

ในตัวอย่างต่อไปนี้ ใช้วิธีการที่แสดงใน ค.2 สอบเทียบความยาวคลื่นของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ความยาวคลื่นอ้างอิงคือเส้นการเปล่งแสงของแก๊สคริปทอน (ดูภาคผนวก ง)

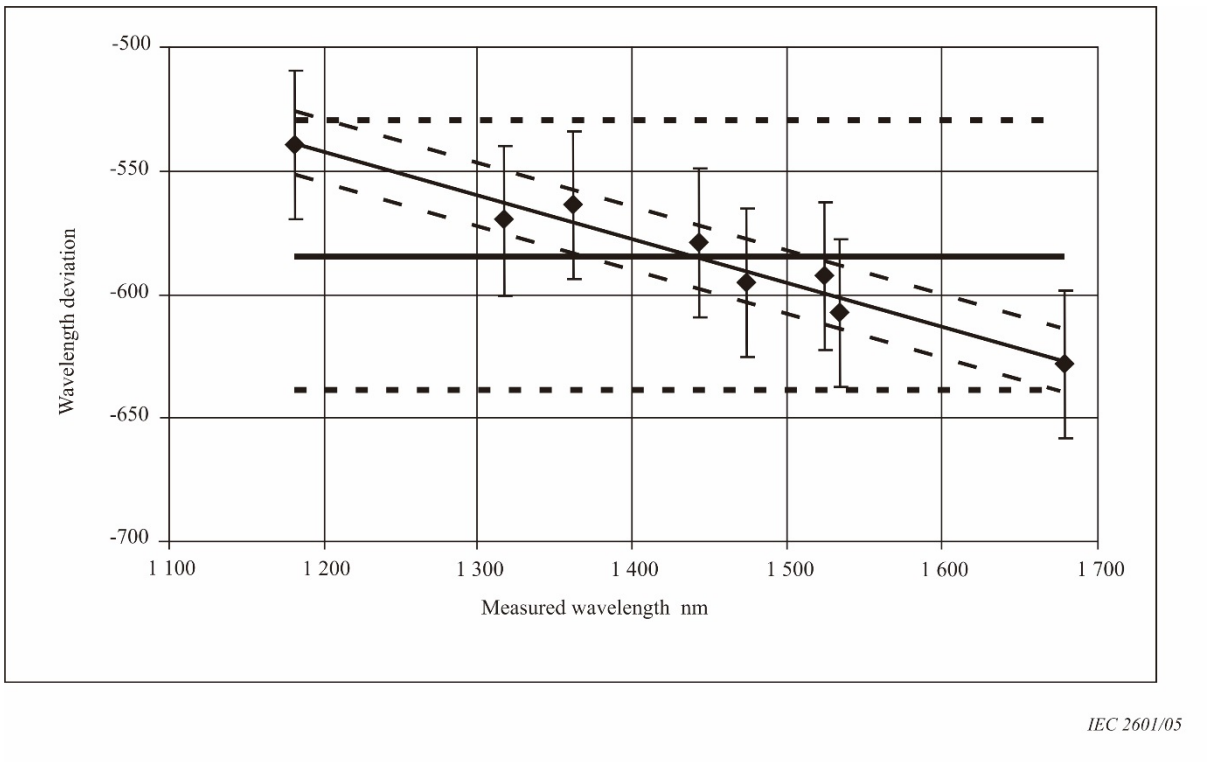
ตาราง ค.1 ผลการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

λ_{REF} (nm)	λ_{OSA} (nm)	$\lambda_{OSA} - \lambda_{REF}$ (pm)	$\lambda_c - \lambda_{REF}$ (pm)	$\sigma_{\Delta\lambda c}$ (pm)
1 182.261	1 181.721	-540	-0.8	$\pm$ 15
1 318.102	1 317.532	-570	-7.0	$\pm$ 15
1 363.795	1 363.231	-564	7.0	$\pm$ 15
1 443.074	1 442.495	-579	5.9	$\pm$ 15
1 473.846	1 473.251	-595	-4.7	$\pm$ 15
1 524.378	1 523.786	-592	7.1	$\pm$ 15
1 533.915	1 533.308	-607	-6.2	$\pm$ 15
1 678.971	1 678.343	-628	-1.8	$\pm$ 15
		<-584.4> 88 pk-pk	<-0.8> 14.2 pk-pk	

ตาราง ค.2 สรุปพารามิเตอร์ในการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความยาวคลื่นน้อยสุด	λ_{MIN}	1183	nm
ความยาวคลื่นมากสุด	λ_{MAX}	1678	nm
ความชัน	ΔS	-1.753×10^{-4}	-
จุดตัดแกน	$\Delta\lambda_o$	-332	pm
ค่าความไม่แน่นอนของค่าแก้ความยาวคลื่น	σ_ε	$\pm$ 6.4	pm
ค่าความแตกต่างที่มีค่าคงที่ของความยาวคลื่น	$\Delta\lambda_\lambda$	-584.4	pm
ค่าความไม่แน่นอนความยาวคลื่น	$\sigma_{\Delta\lambda\lambda}$	$\pm$ 27.3	pm

หมายเหตุ คอลัมน์ที่ 4 ของตาราง ค.1 ผลจาก σ_ε มีอิทธิพลมากที่สุดต่อ $\lambda_c - \lambda_{REF}$



แสดงช่วงระดับความเชื่อมั่น 95 %

รูปที่ ค.1 การสอบเทียบความยาวคลื่นแสงของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงโดยใช้เส้นการเปล่งแก๊สคริปทอน

ภาคผนวก ง

ความยาวคลื่นแสงอ้างอิง

ภาคผนวกนี้ แสดงรายการของเลเซอร์และเส้นการเปล่งแสงของหลอดไฟ, ลักษณะการดูดกลืน การเปลี่ยนสถานะออปโต-กัลวานิก (opto-galvanic transitions) ที่มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้เป็นจุดอ้างอิงความยาวคลื่นแสงสำหรับการสอบเทียบเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสง ตารางเหล่านี้แสดงความยาวคลื่นสุญญากาศของการเปลี่ยนสถานะเด่นเท่านั้น

เส้นการเปล่งแสงของแก๊สเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มสูง (มากกว่า 1 mW) และมีความยาวคลื่น (ความถี่) ที่ระบุชัดเจน เส้นการเปล่งแสงของหลอดไฟที่มีความเข้มแสงต่ำ โดยทั่วไปอยู่ในระดับนาโนวัตต์สามารถส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว ที่ความดันแก๊สต่ำ การดูดกลืนและการเปลี่ยนสถานะออปโตกัลวานิกมีลักษณะแคบ โดยทั่วไปอยู่ในช่วงร้อยเมกะเฮิรตซ์ ปกติการเปลี่ยนสถานะเหล่านี้ทำให้ความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำมีเสถียรภาพและใช้เป็นค่าอ้างอิง การเปลี่ยนสถานะการดูดกลืนกว้างขึ้นเมื่อความดันแก๊สสูง และสามารถดูได้โดยตรงจากเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงเมื่อใช้หลอดไฟหรือไดโอดเปล่งแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสง และเส้นอ้างอิงนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยเนื่องจากการชน การเปลี่ยนแปลงเส้นอ้างอิงที่เกิดจากความดันไม่ได้ถูกศึกษาทุกค่าอ้างอิงที่แสดงในภาคผนวก NIST ทำการวัดของแถบ $\nu_1 + \nu_3$ ของอะเซทิลีน $^{12}C_2H_2$ และแถบ $2\nu_3$ ของไฮโดรเจนไซยาไนด์ $H^{13}C^{14}N$ [1,2][1)] การวัดนี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงเส้นอ้างอิงที่เกิดจากความดันมีค่ามากถึง 2 pm สำหรับแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่ความดัน 13 kPa (ประมาณ 100 Torr) การเปลี่ยนแปลงเส้นอ้างอิงที่เกิดจากของความดันอะเซทิลีนมีค่าน้อยกว่า แต่เมื่อความดันสูงขึ้นจะมีค่าเกิน 1 pm ค่ากลางของเส้นที่แสดงด้านล่างถูกวัดในช่วงความดันต่ำ แม้ว่าค่ากลางของเส้นบางอันถูกวัดด้วยความแม่นที่สูงกว่า 1 pm แต่ตารางได้แสดงความยาวคลื่นที่ความเที่ยงแค่ 1 pm เนื่องจากความแปรปรวนที่เป็นไปได้ของค่ากลางของเส้นที่ระดับนี้

ง.1 เส้นเลเซอร์ชนิดแก๊ส (Gas laser lines)

ตาราง ง.1 ความยาวคลื่นในสุญญากาศ (nm) ของเส้นเลเซอร์ชนิดแก๊สที่เลือก

เลเซอร์ชนิดแก๊สอาร์กอน	488.122	เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียมนีออน	632.991
	514.673		1 152.590
			1 523.488

ง.2 เส้นอ้างอิงแก๊สเฉื่อย (Noble gas reference lines)

แก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม นีออน คริปทอน อาร์กอน และ ซีนอน มีเส้นการเปลี่ยนสถานะที่ทราบแน่ชัดและสามารถใช้เป็นจุดอ้างอิงความยาวคลื่นแสงได้ ตาราง ง.2 แสดงเส้นที่เด่นชัด [3,4] ข้อมูลที่มีเครื่องหมายดอกจันสังเกตโดยใช้ปรากฏการณ์ออปโตกัลวานิก [5-9]

ตาราง ง.2 ความยาวคลื่นในสุญญากาศ (nm) ของเส้นเลเซอร์แก๊สเฉื่อย

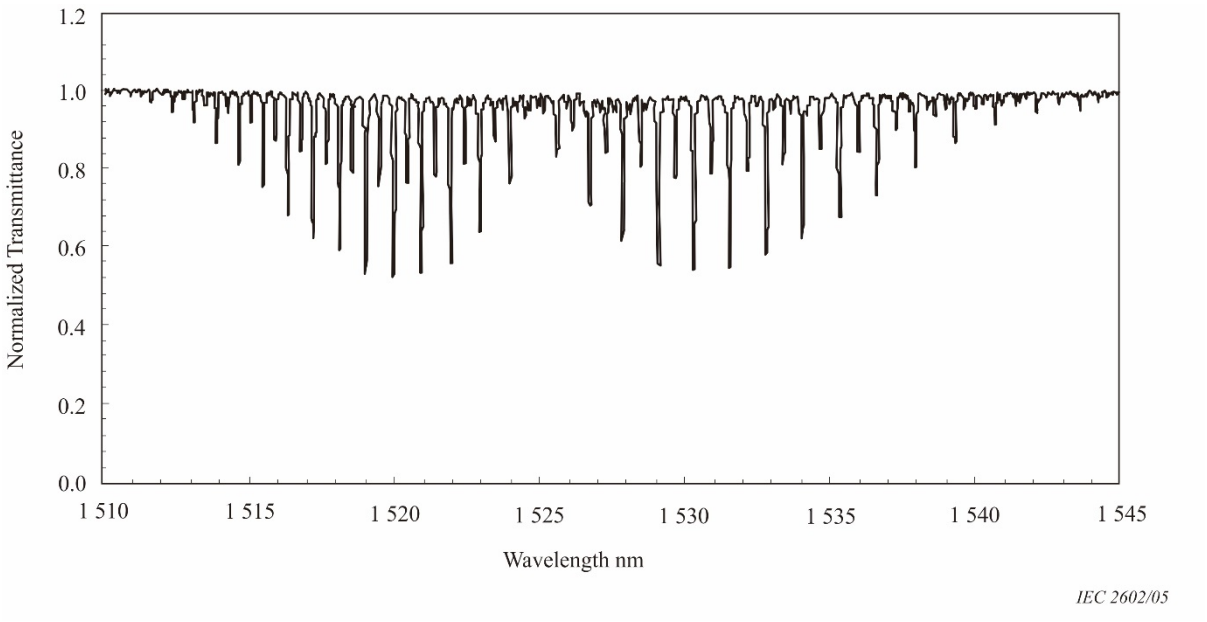
Kr	810.659	Ne	1 114.607	Kr	*1 298.884		Kr	*1 496.598
Kr	811.513	Ne	1 118.059	Ar	*1 301.182		Kr	*1 500.941
Kr	819.231	Ne	1 139.355	Kr	*1 318.102		Kr	*1 501.914
Kr	826.551	Ne	1 141.226	Ne	*1 321.761		Ar	*1 505.062
Kr	830.039	Ne	1 152.590	Ne	*1 322.286		Ar	*1 517.694
Kr	851.121	Ne	1 152.818	Ar	1 323.172		Kr	*1 521.368
Kr	877.916	Ne	1 153.950	Ar	1 327.627		Ne	*1 523.488
Kr	893.114	Ne	1 161.726	Ar	1 331.685		Kr	*1 524.378
Ar	912.547	Ne	1 177.001	Ar	1 337.077		Kr	*1 533.067
Ar	922.703	Ne	1 179.227	Ar	1 350.788		Ar	*1 533.353
Ar	935.679	Kr	1 182.261	Kr	1 362.614		Kr	*1 533.915
Ar	966.044	Ne	1 198.819	Ar	1 362.638		Kr	*1 537.624
Ne	966.807	Ne	1 206.964	Kr	1 363.795		Xe	1 542.261
Kr	975.443	Ne	1 246.280	Xe	1 366.079		Kr	*1 543.795
Ar	978.719	Ar	*1 249.108	Kr	1 366.213		Kr	*1 547.825
Xe	980.239	Xe	1 262.684	Ar	1 372.233		Kr	*1 563.978
Xe	992.591	Ne	1 269.267	Kr	1 374.261		Kr	*1 568.533
Kr	1 022.426	Ar	*1 270.576	Kr	1 404.950		Kr	*1 577.614
Ne	1 029.824	Ar	*1 273.690	Xe	1 414.631		Kr	*1 582.441
Ar	1 047.292	Ar	*1 274.972	Xe	1 424.485		Xe	1 605.767
Ne	1 056.530	Ar	*1 280.624	Kr	1 443.074		Xe	1 673.272
Ne	1 080.103	Kr	*1 286.541	Xe	1 473.680		Kr	1 678.971
He	1 083.322	Ne	*1 291.555	Kr	*1 473.846		Kr	1 685.809
He	1 083.331	Ar	*1 293.673	Kr	*1 476.671		Kr	1 690.137
Ne	1 084.745	Ar	*1 296.020	Kr	*1 476.951		Kr	1 694.043
							Xe	1 733.050

ง.3 เส้นการดูดกลืนของโมเลกุล (Molecular absorption line)

ตาราง ง.3 ง.4 และ ง.5 แสดงเส้นชุดข้อมูลของเส้นการดูดกลืนของโมเลกุล ในช่วงความยาวคลื่น 1 510 nm – 1 565 nm สำหรับใช้สอบเทียบความยาวคลื่นแสงในย่านโทรคมนาคม

ตาราง ง.3 ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ (nm) สำหรับแถบ $\nu_1 + \nu_3$ ของเส้นการดูดกลืนอะเซทิลีน $^{12}C_2H_2$ [11]

R27	1 512.452	R13	1 518.213	P1	1 525.760	P15	1 534.099
R26	1 512.823	R12	1 518.672	P2	1 526.314	P16	1 534.742
R25	1 513.200	R11	1 519.137	P3	1 526.874	P17	1 535.393
R24	1 513.583	R10	1 519.608	P4	1 527.441	P18	1 536.049
R23	1 513.972	R9	1 520.086	P5	1 528.014	P19	1 536.713
R22	1 514.368	R8	1 520.570	P6	1 528.594	P20	1 537.382
R21	1 514.770	R7	1 521.060	P7	1 529.180	P21	1 538.058
R20	1 515.178	R6	1 521.557	P8	1 529.772	P22	1 538.741
R19	1 515.593	R5	1 522.060	P9	1 530.371	P23	1 539.430
R18	1 516.014	R4	1 522.570	P10	1 530.976	P24	1 540.125
R17	1 516.441	R3	1 523.085	P11	1 531.588	P25	1 540.827
R16	1 516.875	R2	1 523.608	P12	1 532.206	P26	1 541.536
R15	1 517.314	R1	1 524.136	P13	1 532.830	P27	1 542.251
R14	1 517.760	R0	1 524.671	P14	1 533.461		
หมายเหตุ เส้นที่เป็นหมายเลขคี่เป็นเส้นที่มีความเข้มสูงกว่า							



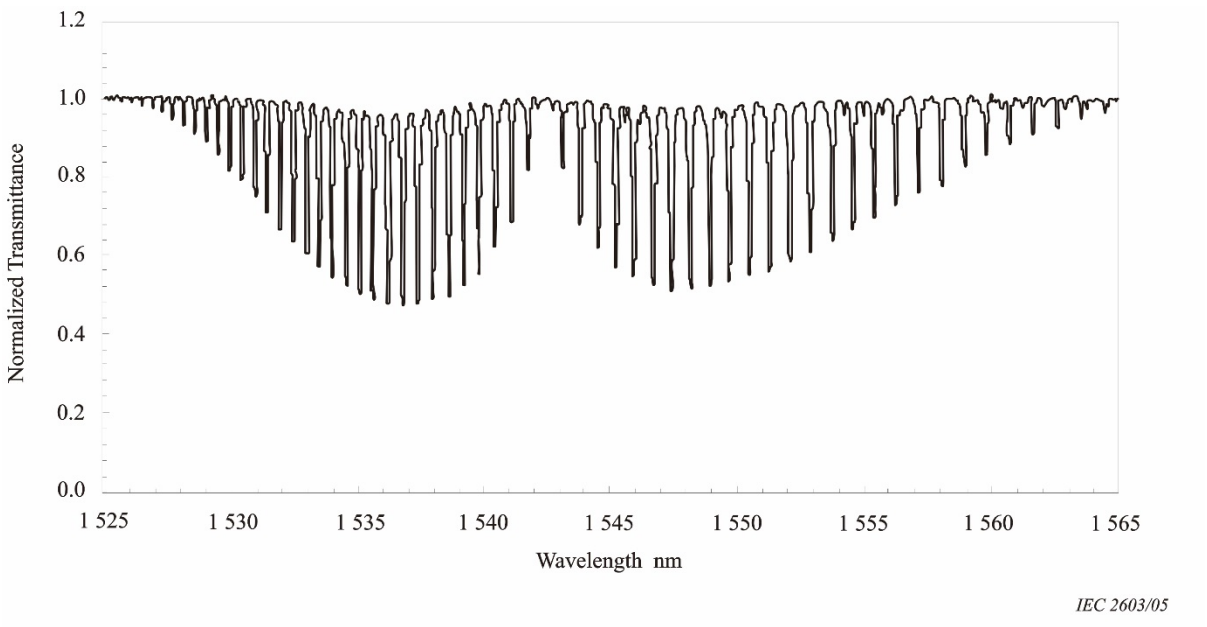
รูป ง.1 การดูดกลืนแสงที่เปล่งจากไดโอดเปล่งแสงของอะเซทิลีน $^{12}C_2H_2$

ตาราง ง.4 ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ (nm) สำหรับแถบ $\nu_1+\nu_3$ ของเส้นการดูดกลืนอะเซทิลีน $^{12}C_2H_2$ [11]

R23	1 522.332	R9	1 528.326	P1	1 533.818	P15	1 541.772
R22	1 522.723	R8	1 528.797	P2	1 534.350	P16	1 542.384
R21	1 523.119	R7	1 529.274	P3	1 534.887	P17	1 543.001
R20	1 523.521	R6	1 529.757	P4	1 535.430	P18	1 543.624
R19	1 523.929	R5	1 530.245	P5	1 535.978	P19	1 544.253
R18	1 524.343	R4	1 530.739	P6	1 536.532	P20	1 544.887
R17	1 524.763	R3	1 531.238	P7	1 537.091	P21	1 545.528
R16	1 525.188	R2	1 531.744	P8	1 537.656	P22	1 546.174
R15	1 525.619	R1	1 532.254	P9	1 538.227	P23	1 546.827
R14	1 526.056	R0	1 532.770	P10	1 538.803	P24	1 547.485
R13	1 526.498			P11	1 539.385	P25	1 548.149
R12	1 526.947			P12	1 539.974	P26	1 548.819
R11	1 527.401			P13	1 540.567	P27	1 549.495
R10	1 527.860			P14	1 541.167	P28	1 550.178
หมายเหตุ เส้นที่เป็นหมายเลขคู่เป็นเส้นที่มีความเข้มสูงกว่า							

ตาราง ง.5 ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ (nm) ของเส้นการดูดกลืนไฮโดรเจนไซยาไนด์ $H^{13}C^{14}N$ ที่เลือก [12]

R25	1 528.054	R12	1 534.415	P1	1 543.114	P14	1 552.931
R24	1 528.485	R11	1 534.972	P2	1 543.809	P15	1 553.756
R23	1 528.926	R10	1 535.540	P3	1 544.515	P16	1 554.591
R22	1 529.376	R9	1 536.117	P4	1 545.230	P17	1 555.436
R21	1 529.836	R8	1 536.704	P5	1 545.955	P18	1 556.292
R20	1 530.306	R7	1 537.300	P6	1 546.690	P19	1 557.157
R19	1 530.786	R6	1 537.907	P7	1 547.435	P20	1 558.033
R18	1 531.275	R5	1 538.523	P8	1 548.190	P21	1 558.919
R17	1 531.774	R4	1 539.149	P9	1 548.955	P22	1 559.814
R16	1 532.283	R3	1 539.786	P10	1 549.731	P23	1 560.720
R15	1 532.801	R2	1 540.431	P11	1 550.516	P24	1 561.636
R14	1 533.329	R1	1 541.087	P12	1 551.311	P25	1 562.563
R13	1 533.867	R0	1 541.753	P13	1 552.116	P26	1 563.499



รูปที่ ง.2 การดูดกลืนแสงที่เปล่งจากไดโอดเปล่งแสงของไฮโดรเจนไซยาไนด์ ($H^{13}C^{14}N$)

ง.4 เอกสารอ้างอิง

1) GILBERT, SL. and SWANN, WC. *Standard Reference Materials: Acetylene* C_2H_2 $^{12}C_2H_2$ *Absorption reference for 1510-1540 nm Wavelength Calibration* – SRM 2517. NIST Spec. Publ. 260-133 (1998);

2) GILBERT, SL., SWANN, WC. and WANG, CM. *Standard Reference Material: Hydrogen cyanide* $(\mathrm{H}^{13}\mathrm{C}^{14}\mathrm{N})$ $H^{13}C^{14}N$ *Absorption Reference for 1530-1560 nm Wavelength Calibration* – SRM 251. NIST Spec. Publ. 260-137, 1998.

3) HUMPHREYS, DA. Accurate wavelength calibration for optical spectrum analyzers, in *Technical Digest – Symposium on Optical Fiber Measurements.* NIST Spec. Publ. 905, 1996, p. 97-100.

4) KAUFMAN, V. and EDLEN, B. Reference wavelengths from atomic spectra in the range 15 A to 25000 A. *J. Phys. Chem. Ref. Data,* 1974, vol. 3, no. 4, p. 825-895

5) LUCERO, AJ., Chung, YC and TKACH, RW. Survey of optical transitions for absolute frequency locking for ligthwave systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, vol. 3, No 5, p. 484-486

6) FISCHER, UP. And VON HELMOLT, C. Absorption spectra of excited Kr 84 states between 1.5 and 1.58 μm and their use for absolute frequency locking. *J. Lightwave Technol.,* 1996, vol. 14, No 2, p. 139-142.

7) CHUNG, YC. Frequency-locked 1.3- and 1.5-μm semiconductor lasers for lightwave systems applications. *J. Lightwave Technol.,* June, 1990, vol. 8, no. 6, p. 869.

8) HUMPHREYS, DA. and CAMPBELL, C. Preliminary results of L-band exited-state optical frequency reference survey, in *Conference Digest – 6th Optical Fiber Measurement Conference.* NPL, UK, 2001, p. 179-182.

9) HUMPHREYS, DA., CAMPBELL, C., BERNARD, F., and PATEL, P. Recent developments of excited-state optical frequency standard for telecommunications', in *Technical Digest – Symposium on Optical Fiber Measurements.* NIST Spec. Publ. 988, 2002, p. 79-82

10) GILBERT, SL., DRAPELA, TJ. and FRANZEN, DL. Moderate-Accuracy Wavelength Standards for Optical Communications, in *Technical Digest – Symposium on Optical Fiber Measurment.* NIST Spec. Publ. 839, 1992, p. 191 – 194.

11) NAKAGAWA, K., DE LABACHELERIE, M., AWAJI, Y. and KOUROGI, M. Accurate optical frequency atlas of the 1.5 μm bands of acetylene. *Journal of the Optical Society of America B (JOSA B),* December 1996, vol. 13, no. 12, p. 2708-2714

12) SASADA, H. and YAMADA, K. Calibration lines of HCN in the 1.5-μm region. *Appl. Opt.,* 1990, vol. 29, p. 3535-3547.

ภาคผนวก จ

เอกสารอ่านเพิ่มเติมและอ้างอิงสำหรับการสอบเทียบความยาวคลื่นแสง

การใช้งานเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงที่ระดับความสูงอาจมีผลต่อค่าความแม่นของความยาวคลื่นแสง เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแสงจากบางผู้ผลิตอาจไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากการใช้งานในทำนองนี้ ในขณะที่เครื่องจากบางผู้ผลิตอาจมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าดรรชนีหักเหของแสงในอากาศมีค่าขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศและความชื้นรวมถึงอุณหภูมิ เอกสารอ้างอิงที่น่าสนใจเกี่ยวกับเรื่องนี้คือ

1) EDLEN, B. The refractive index of air, *Metrologia*, 1966, Vol. 2, No. 2

2) PECK, ER. And REEDER, K. Dispersion of Air. *JOSA*, 1972, Vol. 62, No. 8.