

光通訊波長標準

為了應付急遽增加的通訊容量需求，光通訊領域提出了波長密集多工的解決方式，使得光通訊元件的量測參數與波長密切相關，進而引入了對於波長標準的需求。本文除了介紹波長標準的定義、追溯性及國際上相關的光通訊波長標準規範外，並針對光通訊領域的重要量測儀器光學頻譜分析儀和波長儀波長標準的需求提出說明，而目前光通訊波長標準相關的商品化產品和量測方式亦將一併介紹。

藍玉屏

一、前言

國際網路的發展帶動了寬頻技術的成長，光通訊產業以波長密集多工 (wavelength division multiplexing, WDM) 的方法提供了一個解決頻寬的方式，即在一條光纖中同時使用多個波長。當所使用的波長數增多而通道間隔愈來愈窄時，對於波長準確度及穩定度的要求隨之提高，首先面臨的問題是儀器的波長量測精度是否能夠滿足需求？而儀器的量測精度又該如何確保呢？換句話說，你怎麼知道量出來的值準不準？儀器需要經過校正的程序以確保其量測精度，校正的實施則須仰賴標準。國際電信聯盟 (International Telecommunication Union, ITU) 電信標準部門 (Telecommunication Standardization Sector) 於 1998 年 10 月產出的標準文件 ITU-T Recommendation G.692⁽¹⁾，是目前在光通訊領域尤其是 WDM 系統使用波長 (或頻率) 的參考規範，但最源頭的波長標準則來自建議輻射 (recommended

radiation)，是由國際米定義諮詢委員會 (CCDM，已更名為 CCL) 提出⁽²⁾，遺憾的是 CCDM 所提出的十二條建議輻射中，並沒有目前在光通訊領域使用

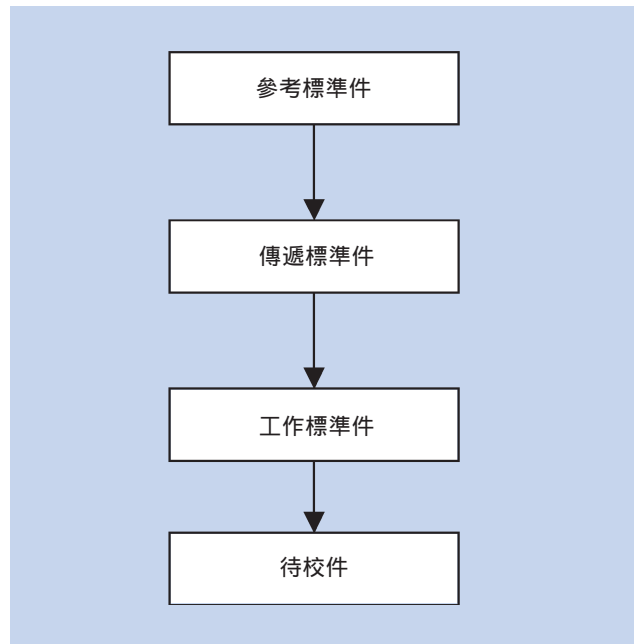


圖 1. 標準追溯鏈。

藍玉屏小姐為國立交通大學光電工程研究所博士候選人，現任工業技術研究院量測技術發展中心研究員。

Molecule	Transition	Frequency (MHz)	Wavelength (fm)	Uncertainty
^1H	1S-2S	1 233 030 706.5937	243 134 624.6260	8.5×10^{-13}
$^{127}\text{I}_2$	43-0,P(13),a ₃	582 490 603.37	514 673 466.4	2.5×10^{-10}
$^{127}\text{I}_2$	32-0,R(56),a ₁₀	563 260 223.48	532 245 036.14	7×10^{-11}
$^{127}\text{I}_2$	26-0,R(12),a ₉	551 579 482.96	543 516 333.1	2.5×10^{-10}
$^{127}\text{I}_2$	9-2,R(47),a ₇	489 880 354.9	611 970 770.0	3×10^{-10}
$^{127}\text{I}_2$	11-5,R(127),a ₁₃	473 612 214.705	632 991 398.22	2.5×10^{-11}
$^{127}\text{I}_2$	8-5,P(10),a ₉	468 218 332.4	640 283 468.7	4.5×10^{-10}
^{40}Ca	$^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_1$	455 986 240.49415	657 459 439.2917	6×10^{-13}
$^{88}\text{Sr}^+$	$5^2\text{S}_{1/2}$ - $4^2\text{D}_{5/2}$	444 779 044.04	674 025 590.95	1.3×10^{-10}
^{85}Rb	$5\text{S}_{1/2}(\text{F} = 3)$ - $5\text{D}_{5/2}(\text{F} = 5)$	385 285 142.378	778 105 421.22	1.3×10^{-11}
CH_4	ν_3 ,P(7),F ₂ ⁽²⁾	88 376 181.60018	3392 231 397.31	3×10^{-12}
OsO_4	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2\text{R}(12)$	29 096 274.95234	10 303 465 254.27	6×10^{-12}

表 1.
建議輻射。

的 1.3 μm 和 1.5 μm 或 850 nm 波長，因此光通訊在波長標準追溯上無法直接追溯，只能以間接的方式來達成，一些商品化的參考光源或光學頻譜分析儀中所謂的參考光源，嚴格來說，在標準的追溯鏈中(如圖 1) 屬於傳遞標準件 (transfer standard：顧名思義即用來作標準的傳遞) 或工作標準件 (working standard)，而非最高標準的參考標準件 (reference standard)。本文將由波長標準的定義及追溯開始，逐漸導入光通訊波長標準的需求，除了介紹 ITU-T G.692 波長標準相關規範外，並將介紹幾種商品化的參考光源，對於光通訊領域的重要量測儀器，光學頻譜分析儀 (optical spectrum analyzer, OSA) 和波長儀 (wavemeter) 的波長校正及使用上應注意的地方亦將一一介紹。

二、波長標準

根據 1997 年國際米定義諮詢委員會第九次會議的報告，其中提出了十二條雷射建議輻射標準(如表 1)，建議輻射是利用已經被部份實驗室測過頻率的穩頻雷射或光譜燈，從各量測數值中給出各建議輻射的平均中心頻率(波長)及相對不確定度，因此只要依照建議方法與條件建立建議輻射，完成後即可直接使用建議輻射的中心波長與不確定度。最早建議輻射的提出是為了實現長度的單位一公尺的定義，即「光在真空中 1/299792458 秒間所

行走的距離」，其定義為一公尺，可透過干涉儀去實現。建議輻射波長涵蓋的範圍非常廣，由深紫外至遠紅外，精度都在 10^{-10} 以上。

從實際的技術規格來探討對於標準的需求，光通訊所使用的半導體雷射波長精度一般約 10^{-5} - 10^{-6} ($\Delta\lambda/\lambda$)，量測儀器精度約 10^{-6} - 10^{-7} ，因此用來校正量測儀器的物件(稱為傳遞標準件或工作標準件)其精度希望能夠高出一個級數，至少要在 10^{-8} 左右，而做為最高標準的參考標準件精度則必須至少優於 10^{-9} 。十二條建議輻射的精度做為參考標準絕對足夠，但卻沒有任何一條建議輻射的波長與目前在光通訊領域使用波長相符或相近。雷射波長的校正一般是以待校雷射和參考雷射做拍頻，量測待校雷射和參考雷射的頻差，並觀察短期和長期的頻率穩定度，由於光偵測器反應頻寬有限，可量測頻率範圍非常有限，較大的頻差便無法量測，因此無法直接追溯。令人矚目的是第十條 Rb (rubidium) 原子雙光子躍遷 778.1 nm 建議輻射，雖然它的波長不在 1.3 μm 或 1.5 μm ，但其恰為波長 1556.2 nm 之倍頻(圖 2)，使得通訊用波長的追溯能以間接的方式達成。

ITU-T G.692 明確地提出了以 193.1 THz (1552.52 nm) 為主，向兩端延伸取 50 GHz 或 100 GHz 通道間隔的頻率，作為點對點多通道系統的中心頻率，這就是大家所熟知的 ITU-T grid。G.692 附錄 II 中提到，選擇 193.1 THz 並非特別針

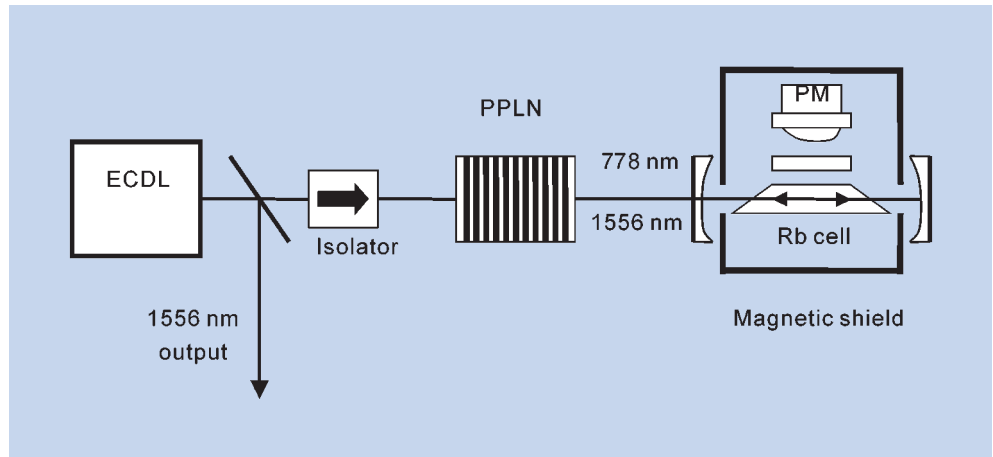


圖 2.
Rb 原子雙光子穩頻絕對
頻率標準。

對某一絕對頻率參考 (absolute frequency reference, AFR)，實際上，193.1 THz 卻與許多 AFR 譜線很接近。AFR 指的是光學頻率參考源，其提供的光學訊號頻率精度與穩定度能夠維持並由頻率標準所確認，頻率標準即前面提到的建議輻射。建議輻射通常由國家標準實驗室建立並維持，AFR 則為一些具足夠精度的原子或分子光譜，一般商品化的參考光源即可作為 AFR 用。AFR 的應用包括：校正 WDM 的測試設備 (如：光譜分析儀)、提供製造和校正 WDM 裝置的頻率參考、直接提供多通道系統的參考頻率以及控制和 (或) 維持光源的頻率。在這裡要特別說明一點，在光頻領域所說的波長和頻率是同一回事，波長 λ 和頻率 ν 由定值光速 c 相關連， $c = \lambda\nu = 299\,792\,458\text{ m/s}$ 。

三、絕對頻率參考源 (AFR)

有一些波段在 $1.3\ \mu\text{m}$ 或 $1.5\ \mu\text{m}$ 的原子或分子光譜，如： C_2H_2 、 HCN 、 NH_4 、 H_2O 及 CH_4 等分子，其精度足以作為絕對頻率參考，因此成為許多人研究的目標。目前市售參考光源大都以 C_2H_2 的譜線為主，此分子的特色在於它所產生的多條吸收譜線涵蓋 $1510 - 1540\ \text{nm}$ ，譜線間隔約 $80 - 90\ \text{GHz}$ ，可作為 WDM 的波長參考； HCN 分子吸收譜線波長範圍自 $1528\ \text{nm}$ 到 $1563\ \text{nm}$ 左右，可涵蓋 EDFA 範圍，但因 HCN 為劇毒，使用上必須非常小心。

美國國家標準暨技術研究院 (NIST) 提供 $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$

(SRM2517) 和 H^{13}CN (SRM2519) 兩種波長參考標準物質 (standard reference materials, SRM)⁽³⁾，分子氣體被密封在熔石英玻璃管中，玻璃管架裝在一儀器盒內，儀器盒的輸出入端為 FC/PC 光纖連結頭，方便使用者接上自己的光源或儀器，內充氣體的吸收譜線被精確的量測並賦予量測不確定度，擴充不確定度為 $0.0006\ \text{nm}$ ，可作為校正用的傳遞標準件。NIST 當初設計 SRM 時的考量主要因為 OSA 的體積大且不適合任意搬動，選擇分子氣體而非 Rb 原子是因倍頻系統較複雜又昂貴，利用分子氣體的另一個好處是，可以提供多條譜線而不僅只是單一條譜線。

英國國家物理實驗室 (NPL) 為了解決多通道 WDM 系統波長精密量測的需求，提供可用來校正 OSA 的器件，稱之為 ITU grid OSA 校正標準，外型像一台儀器，它包括寬頻光源 LED、一個溫度穩定的 etalon 及 AFR，AFR 是一個鎖在氬 $1547.826\ \text{nm}$ ($193.6861\ \text{GHz}$) 躍遷譜線的 DFB 雷射，寬頻光源加上 etalon 產生間距 $100\ \text{GHz}$ 的譜線，可作為校正用的標定點，而 AFR 提供了絕對穩定度，NPL 所附的校正報告則提供每一標定點的量值。

由國家標準實驗室 (NIST 或 NPL) 所提供的 AFR，與一般業界的 AFR 產品最大的差別在於量測不確定度，頻率會隨著氣體分子壓力的不同而改變，NIST 的 SRM 特別針對內充氣體壓力改變時的頻率作精確的量測，量測不確定度即保證量值的準確度。

四、OSA 和波長儀波長校正

OSA 和波長儀是光通訊領域常用且重要的波長相關量測設備，在 WDM 系統中使用的波長不只一個，目前大都仰賴 OSA 或波長儀來確認中心波長，因此 OSA 和波長儀的校正就格外重要。對於通道間隔 100 GHz 相當於中心波長間隔為 0.8 nm (1.5 μm 波段) 的系統，若以下一位的精度即 0.08 nm 估算，中心波長的精度 ($\Delta\lambda/\lambda$) 至少約 5×10^{-5} ，目前商品化的產品中，OSA 的精度差不多在這個等級，波長儀的精度約 $10^{-6} - 10^{-7}$ ，都可滿足量測精度需求。但當同一個雷射光源經 OSA 和波長儀量到的中心波長值有差異時 (這是常發生的情況)，那一個量值可信呢？測試用的可調式雷射顯示的雷射波長不同時，又該如何處理？圖 3 是雷射經一尚未校正的 OSA 和已校正 OSA 與波長儀量測結果比較，圖 4 則是雷射本身波長顯示值與一已校正的 OSA 和波長儀量測的結果，圖中明白顯示了量測儀器校正的重要性。OSA 和波長儀基本量測原理不同，校正方式自然不同，以下分別說明。

1. OSA 波長校正

OSA 是利用光柵分光的量測原理，一般精度較高的 OSA 都附有參考源 (reference source) 或稱校正源 (calibration source)，依廠牌不同有的是屬於標準配件，有的則為附件選項，由使用者自行決定是否購買。基本上它是個寬頻光源加上分子吸收室

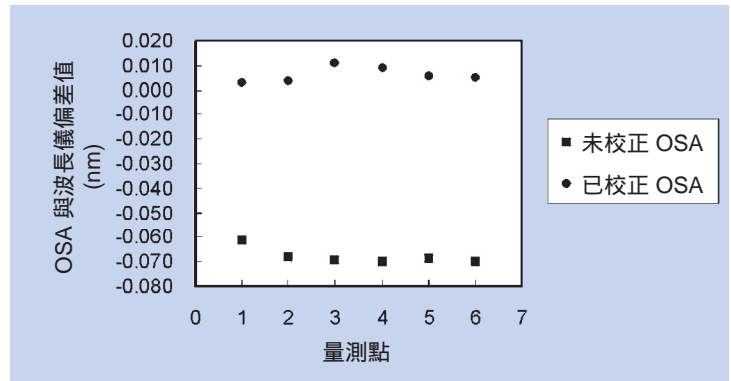


圖 3. OSA 與波長儀量值比較。

(通常是 C_2H_2 氣體分子)，儀器自校時，只要將光纖一端接在儀器面板標明參考輸出或校正輸出的 FC 接頭上，另一端接上輸入端，在一般掃描量測狀態下，可以看見如圖 5 之分子光譜，再依照使用說明，操作校正功能鍵即可。通常在儀器剛到貨或有搬動的情況下，建議要做一次校正，OSA 裡面的光柵若因搬動而造成移位，會嚴重影響量測結果。

2. 波長儀波長校正

波長儀一般是利用干涉的方式量測，儀器內部有一支紅光 633 nm 氦氖雷射，此氦氖雷射波長的準確性和穩定性決定了波長儀的精度，是波長儀波長量測的參考依據，精度高的機型會使用穩頻雷射。因此校正波長儀時必須要先校正內部的雷射，

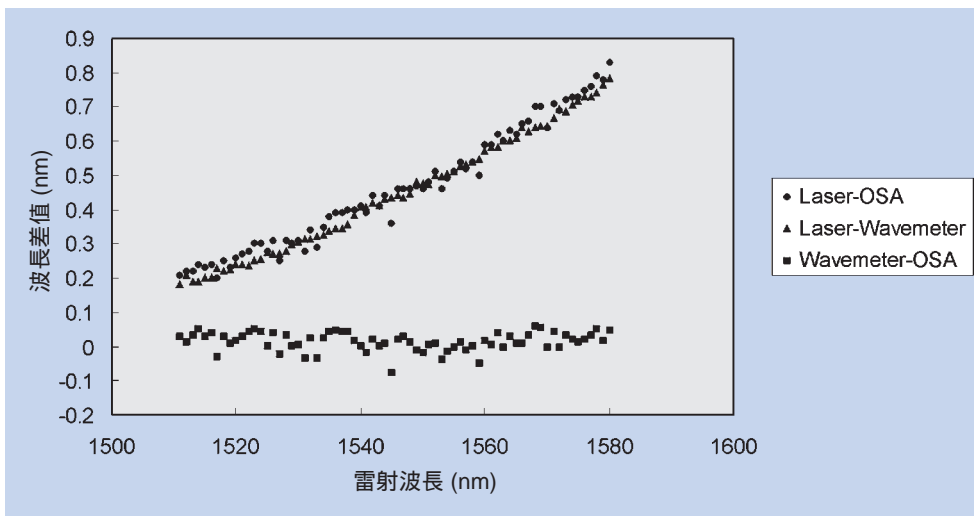


圖 4. 雷射波長顯示值和 OSA 與波長儀量值比較。

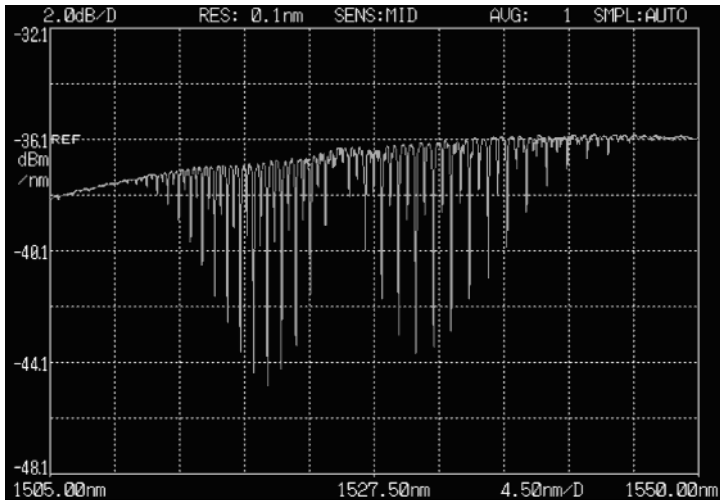


圖 5. C_2H_2 分子光譜。

通常使用者無法自行進行此類的校正，必須送至國家標準實驗室做雷射波長校正。標準實驗室利用建議輻射之一的碘穩頻紅光氬氙雷射，量測被校雷射的中心波長及隨時間的飄移量（圖 6），校正報告中之量測記錄值包括雷射頻率、中心波長及量測不確定度。雷射波長會隨時間而改變，在要求高精度量測的情況下，定期校正是必要的。

OSA 和波長儀的使用不是僅針對單一波長，而是一個波段，以光通訊領域的使用範圍來考量，可以選用 600 - 1800 nm 左右波段，或更局限在 1500 - 1600 nm 波段（視需求而定），因此除了波長顯示值外，波長使用範圍的線性度也必須校正，NIST 的 SRM2517 或 SRM2519 可以提供此類的校正，圖 7(a) 和 7(b) 為利用 SRM 校正 OSA 和可調

圖 6. 當待校雷射穩頻熱機 10 分鐘後的差頻變化。

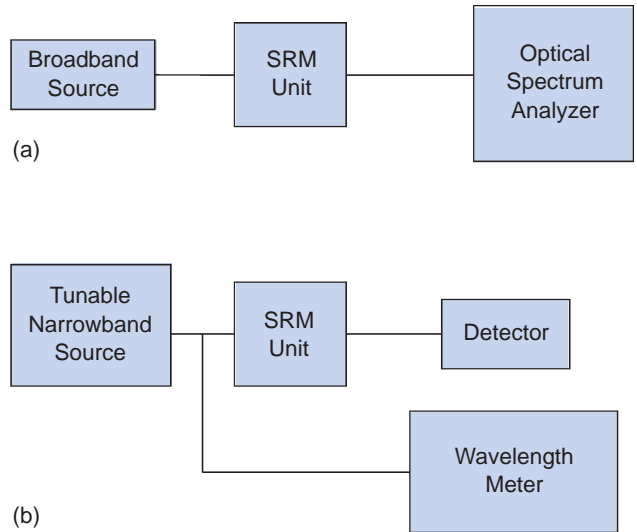
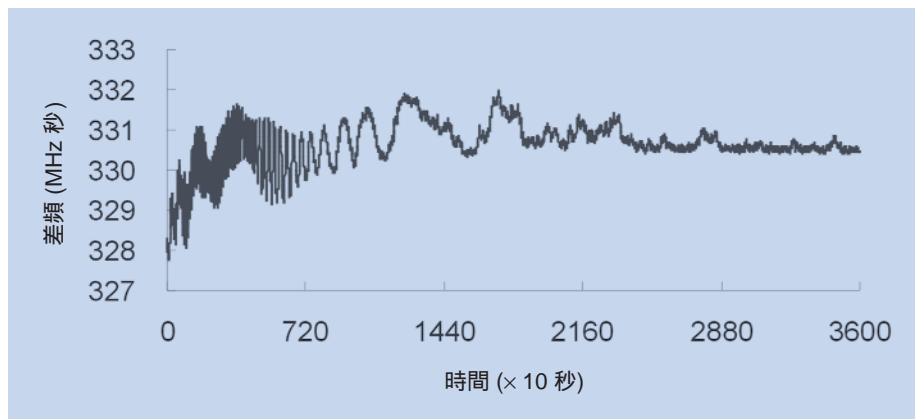


圖 7. (a) 利用 SRM 和寬頻光源校正 OSA，(b) 利用 SRM 和窄頻光源校正可調式光源或波長儀。

式光源或波長儀的簡單架構圖。

此外，在做波長量測或校正時要特別注意，顯示或表示的波長為真空波長或空氣中的波長值，ITU-T grid 193.1 THz 相當於波長 1552.52 nm，這裡指的是真空波長，但波長會隨空氣折射率的改變而變，空氣中的波長值等於真空波長除以空氣折射率。舉例來說，真空波長 1552.52 nm 在空氣折射率為 1.00027（國家標準實驗室環境）時，得到空氣中的波長值為 1552.10 nm，若以 50 GHz 通道間隔的波長密集多工系統來看，相差 0.4 nm 相當於偏移了一個通道，產生嚴重的誤差。因此在使用 OSA 和波長儀時，要特別注意儀器顯示值為真空

或是空氣中的波長，記錄時也要說明，以免造成不必要的爭議。也因而可以理解為何 ITU-T grid 是以頻率表示為主而非波長，因為頻率是固定不變的。

五、結語

光通訊的波長標準可說還沒有一個明確的規範，若要嚴肅的考慮追溯性，目前只能以間接倍頻的方式追溯到第十條建議輻射 Rb 原子雙光子穩頻 778.1 nm，對於波長相關的量測儀器如 OSA 和波

長儀，則可以傳遞標準件 AFR 來確認其量測精度。而如何提供波長多工系統準確又方便的多波長校正方式，則是目前國家標準實驗室努力的方向。

參考文獻

1. *International Telecommunication Union*, ITU-T, G.692 (1998).
2. Bureau International des Poids et Mesures, *Report of the 9th Meeting*, Paris, 95 (1997).
3. S. L. Gilbert and W. C. Swann, *NIST Special Publication*, 260 (1998).