

# Método correctivo de la radiación *stray-light* en espectroradiómetros para aplicaciones subacuáticas

Elena Torrecilla<sup>1\*</sup>, Meritxell Vilaseca<sup>2</sup>, Jaume Piera<sup>1</sup> y Jaume Pujol<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Unidad de Tecnología Marina (UTM-CSIC). Paseo Marítimo de la Barceloneta, 37-49 08003  
Barcelona

<sup>2</sup>Centro de Desarrollo de Sensores, Instrumentación y Sistemas (CD6-UPC). Rambla de Sant Nebridi, 10  
08222 Terrassa, Barcelona

<http://www.utm.csic.es>

## 1. Introducción

Durante los últimos años la tecnología hiperespectral ha sido ampliamente utilizada en varios estudios dentro del ámbito de la oceanografía óptica. Los dispositivos con una elevada resolución espectral existentes en la actualidad permiten obtener mucha más información en comparación a las medidas obtenidas tradicionalmente con un número limitado de longitudes de onda. Dichas medidas hiperespectrales en combinación con técnicas de análisis espectral representan una metodología potencialmente efectiva para la clasificación de ambientes oceánicos complejos y la caracterización de propiedades ópticas en la columna de agua. Algunas técnicas de procesado basadas en el análisis de contornos de datos hiperespectrales han contribuido a la caracterización de la dinámica del agua y del ecosistema marino, incluyendo la identificación de diferentes constituyentes presentes en la columna de agua (fitoplancton, materia orgánica disuelta, etc.). La miniaturización y reducción del consumo energético de la instrumentación hiperespectral ha dado lugar a una amplia gama de configuraciones de sensores, adecuadas para su incorporación en plataformas autónomas de muestreo en sistemas de observación oceanográfica. En particular, dos sistemas miniatura hiperespectrales [1] [2], han sido seleccionados para formar parte de un observatorio marino basado en una red de sensores. Ambos instrumentos están basados en espectrógrafos, es decir, espectroradiómetros con un vector de múltiples detectores cuya principal ventaja es la capacidad de adquisición simultánea de la totalidad del espectro. Este tipo de dispositivos han sido extensamente utilizados como herramienta rápida de medición de distribuciones espectrales para aplicaciones radiométricas subacuáticas en las que el tiempo de adquisición es un factor relevante.

El elemento dispersivo en los espectrógrafos se encuentra fijo [3]. De este modo, la selección espectral viene determinada por la imagen de la rendija de entrada en el plano de referencia donde se encuentra el vector de múltiples detectores, así como también por el tamaño de los elementos que constituyen este vector. Idealmente, el elemento imagen en un píxel del vector para una longitud de onda determinada está compuesto solamente por los componentes espectrales de la fuente de luz dentro de la banda de paso del instrumento a esa longitud de onda en particular. Sin embargo en la práctica, la imagen se ve modificada por la presencia de radiación dispersada. Se describe a esta radiación como *stray-light* o radiación de fondo que se ha dispersado debido a imperfecciones en el elemento dispersivo y otros elementos ópticos del instrumento (superficies, órdenes superiores de difracción, etc.) o bien a la presencia de partículas de polvo.

En el ámbito de la óptica marina, el *stray-light* puede causar errores potencialmente significativos en la medición de radiancias dado que las condiciones de luz pueden ser extremadamente reducidas. Estos errores pueden ser especialmente elevados en regiones espectrales como el UV donde la respuesta del espectrógrafo y la relación señal-ruido son pequeñas. Con la finalidad de reducir incertidumbres cuando se utilizan espectrógrafos de estas características en entornos marinos, se hace imprescindible aplicar una

---

\* e-mail: [torrecilla@utm.csic.es](mailto:torrecilla@utm.csic.es)

corrección en la respuesta del sensor por errores surgidos del *stray-light* instrumental. El objetivo de este trabajo es estudiar y corregir el efecto del *stray-light* en la respuesta de los dos espectrómetros.

## 2. Métodos

En este trabajo se ha aplicado una versión modificada del método desarrollado en el National Institute of Standards and Technology (NIST) por Zong et al. [4] para la estimación del *stray-light* espectral en la respuesta de los dos espectroradiómetros. El método se basa en el cálculo de la proporción de radiación *stray-light* que llega a cada píxel respecto a la radiación total que llega a los píxeles de dentro de la banda de paso del espectrógrafo. De este modo, cualquier respuesta medida fuera de la banda de paso del instrumento se asume como señal *stray-light*. En el método original, la proporción se calculaba utilizando 80 láseres con longitudes de onda separadas aproximadamente unos 8 píxeles y los valores en los píxeles intermedios eran obtenidos mediante interpolación. En nuestro caso, se ha utilizado un conjunto de fuentes monocromáticas para el cálculo de la radiación *stray-light* para cada uno de los píxeles del vector de detectores y no ha sido necesaria ninguna interpolación.

Se define función de dispersión espectral de una línea (Line Spread Function,  $f_{LSF_{i,j}}$ ) como la respuesta relativa a cada elemento  $i$  del vector de detectores dada la excitación del elemento  $j$  por la longitud de onda de excitación monocromática correspondiente  $\lambda_j$ . De esta manera, la respuesta del espectrógrafo se puede dividir en dos regiones: una primera región en el pico de excitación alrededor del elemento  $j$  conteniendo la respuesta dentro de banda ( $IB$ ) y una segunda región que contiene el resto de rangos donde se produce una baja respuesta debida al *stray-light* espectral. La función de distribución de la señal *stray-light* (Signal Distribution Function,  $SDF_{i,j}$ ) se obtiene normalizando la función  $f_{LSF_{i,j}}$  por el área dentro de banda y poniendo a cero los valores de los elementos del vector que están dentro de banda ( $IB$ ):

$$SDF_{i,j} = \frac{f_{LSF_{i,j}}}{\sum_{i \in IB} f_{LSF_{i,j}}} \quad i \notin IB \text{ (píxeles fuera de } IB); \quad SDF_{i,j} = 0 \quad i \in IB \text{ (píxeles dentro de } IB) \quad (1)$$

siendo  $i=1,2,\dots,n$  el número total de píxeles. Para la obtención de la función respuesta del *stray-light* espectral para cada uno de los elementos  $i$  en el vector de detectores, se calcula la función  $SDF_{i,j}$  para cada elemento de excitación  $j$ . De esta manera, la matriz  $D$  de distribución espectral por *stray-light* es generada rellenando cada columna de la matriz  $n \times n$  con cada función  $SDF_{i,j}$  calculada. Una vez obtenida la matriz  $D$ , la ecuación para representar cada medición realizada puede expresarse como:

$$Y_{med} = Y_{IB} + DY_{IB} = IY_{IB} + DY_{IB} = AY_{IB} \quad (2)$$

dónde  $Y_{med}$  es la señal total medida y  $Y_{IB}$  es la señal dentro de banda ( $IB$ ). De la expresión puede deducirse que siempre aparece un término debido a la radiación *stray-light* ( $D$ ) en la señal total medida  $Y_{med}$ . En la segunda parte de la ecuación puede verse como la misma expresión puede ser escrita de forma que  $I$  es la matriz identidad  $n \times n$  y  $A$  equivale a la suma de  $I+D$ . Finalmente, se puede aislar la señal sin efecto *stray-light*  $Y_{IB}$  simplemente mediante la inversión de  $A$ :

$$Y_{IB} = A^{-1}Y_{med} = CY_{med} \quad (3)$$

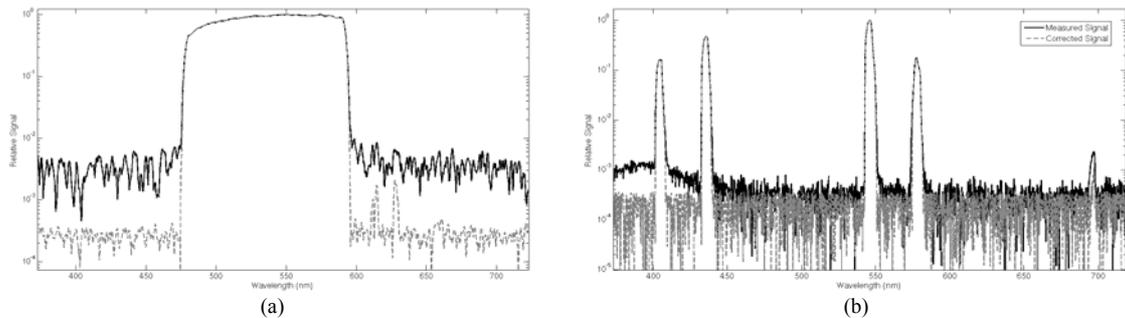
dónde  $C$  es la matriz de corrección *stray-light* espectral. La principal ventaja de aplicar el método aquí descrito es su simplicidad ya que permite aplicar correcciones en tiempo real simplemente multiplicando cada espectro adquirido por la correspondiente matriz de corrección. Por otro lado, es importante destacar que el cálculo de la matriz  $C$  solo debe calcularse una vez para cada dispositivo, siempre y cuando se mantengan las condiciones de adquisición.

Ambos espectroradiómetros utilizados para este estudio son espectrógrafos comerciales. El primero de ellos es el Ocean Optics USB4000 el cual incorpora el elemento de detección TCD1304AP formado por 3648 detectores tipo CCD. Su resolución digital es de 0.24 nm y su FWHM es de aproximadamente de 6 nm. El segundo dispositivo es el microespectrómetro Boehringer Ingelheim MicroParts GmbH UV/VIS, cuyo elemento de detección Hamamatsu S8378 contiene 256 detectores tipo CMOS. Su resolución digital es de 3.5 nm y su FWHM es <10 nm. La resolución del conversor analógico-digital de ambos

sensores es de 16 bits. El sistema de iluminación utilizado para caracterizar el *stray-light* de ambos sistemas está compuesto por un mon cromador Digikrom 240 con una rendija de entrada de 25  $\mu\text{m}$ , una lámpara halógena (Philips 15V 150W) y una fuente de iluminación DC estable (Hewlett Packard 6642A). Tal y como se ha descrito, la radiación *stray-light* para cada elemento del vector de detectores ha sido estimada como la respuesta medida fuera de la banda de paso del instrumento. Mediante medidas sucesivas de la respuesta de ambos dispositivos a las distintas longitudes de onda cubriendo todo el rango espectral operativo (370-725 nm), se ha obtenido cada matriz de corrección *stray-light*  $C$ . Cada medida ha sido adquirida como una media de 15 adquisiciones para mejorar la relación señal-ruido. Por otro lado, la corriente de oscuridad ha sido previamente substraída.

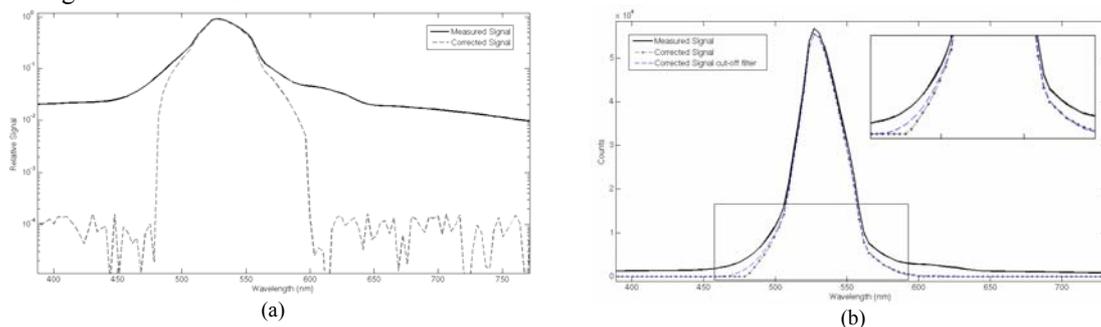
### 3. Resultados y discusión

La efectividad del método ha sido validada mediante el uso de distintas fuentes y filtros de luz. En la Fig. 1a se muestra el resultado de aplicar la corrección al espectrógrafo USB4000 cuando se han utilizado una fuente de luz de amplio espectro (lámpara halógena) junto a un filtro pasabanda en la región verde. En la Fig. 1b se muestra el resultado en caso de utilizar una fuente de luz de calibración espectral Mercurio-Argón que produce líneas de emisión atómica desde 253 a 1700 nm. Puede verse como la señal debida a la radiación *stray-light* fuera de la banda de paso del filtro o de las líneas de la fuente de luz de calibración queda claramente reducida una vez aplicada la corrección.



**Figura 1:** (a) Corrección de la radiación *stray-light* para una fuente de luz de amplio espectro junto a un filtro pasabanda. (b) Corrección de la radiación *stray-light* para una fuente de calibración espectral.

La corrección de la radiación *stray-light* también ha sido validada para el espectroradiómetro MicroParts GmbH, mediante el uso de una lámpara de amplio espectro y un filtro pasabanda. En este caso, como puede verse en la Fig. 2a, la radiación *stray-light* fuera de banda se reduce más de dos órdenes de magnitudes hasta un valor de  $10^{-4}$ .

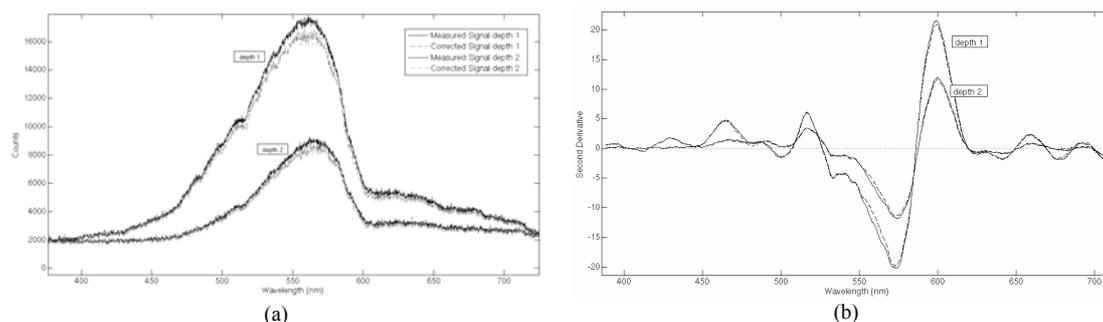


**Figura 2:** (a) Corrección *stray-light* para una fuente de luz de amplio espectro junto a un filtro pasabanda. Espectros medido y corregido normalizados para el espectrómetro MicroParts GmbH. (b) Comparativa de la corrección de la radiación *stray-light* para el espectroradiómetro MicroParts GmbH calculada mediante filtros de corte (línea discontinua) y una fuente de luz monocromática para el cálculo de la matriz de corrección  $C$  (línea discontinua y punteada).

Una alternativa para la corrección de la radiación *stray-light* es el método basado en el uso de filtros de corte (cut-off filters, GG495), propuesto usualmente por los fabricantes de espectroradiómetros [5]. Se ha realizado una comparativa entre los resultados de corrección de *stray-light* obtenidos mediante el algoritmo propuesto por el fabricante y el descrito en este estudio. En la Fig. 2b se puede ver como mediante la metodología propuesta en este trabajo se obtienen mejores resultados ya que el uso de líneas

de excitación monocromática permite cubrir de forma precisa la totalidad del rango espectral operativo.

Una vez caracterizada la contribución del *stray-light* en ambos dispositivos, y con el objetivo de evaluar su efecto en datos de campo, se ha aplicado el método correctivo a medidas espectrales subacuáticas realizadas en la Bahía de los Alfacs (Delta del Ebro). La Fig. 3a muestra los espectros, medidos y corregidos, correspondientes a dos profundidades en la columna de agua. Para ambas profundidades la señal corregida de *stray-light* es de magnitud ligeramente menor. A pesar de que se observa una reducción general de la señal a cada profundidad, cabe destacar que dicha corrección tiene una variabilidad a lo largo del espectro. La diferencia en porcentaje entre cada espectro y su espectro corregido oscila entre valores de 3 al 14% dependiendo de la longitud de onda.



**Figura 3:** (a) Corrección de la radiación *stray-light* aplicadas a medidas subacuáticas adquiridas a dos profundidades en la Bahía de los Alfacs con el espectrómetro USB4000. (b) Análisis de la segunda derivada de los espectros de la Fig. 3a.

La aplicación de la corrección de la radiación *stray-light* puede ser importante si se desea aplicar espectroscopía derivativa a los datos obtenidos con los espectroradiómetros considerados. Muchos estudios recientes en el campo de la oceanografía óptica se basan en la aplicación de técnicas de análisis de la derivada de medidas espectrales de las propiedades ópticas de la columna de agua [6], [7]. El uso de dichas técnicas permite evidenciar pequeñas fluctuaciones en los espectros y su aplicación en medidas subacuáticas hiperespectrales permite extraer información cualitativa o cuantitativa en relación a los componentes presentes en el agua. Como ejemplo, se ha aplicada espectroscopía derivativa a los dos espectros de la Fig. 3a. En la Fig. 3b puede observarse la combinación de picos asociados a las características espectrales de los espectros adquiridos. Se hacen fácilmente evidentes las diferencias entre el espectro derivado antes y después de aplicar la corrección *stray-light* (líneas discontinuas). Estas diferencias pueden ser de importancia si la información del espectro derivado es utilizada por otras técnicas de análisis posterior (análisis de clústeres, redes neuronales, etc.) para la caracterización de la muestra de agua a la que corresponden.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido financiado por el proyecto VARITEC-SAMPLER (CMT2004-0442-C02-2/MAR), Ministerio de Educación y Ciencia.

## Bibliografía

- [1] S. Pons, I.F. Aymerich, E. Torrecilla, J. Piera, “Monolithic spectrometer for environmental monitoring applications”, IEEE/OEE Oceans Conference and Exhibition (2007).
- [2] E. Torrecilla, I. F. Aymerich, S. Pons, J. Piera, “Effect of spectral resolution in hyperspectral data analysis”, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 910-913 (2007).
- [3] C. Palmer, E. Loewen, Diffraction Grating Handbook, 6th edition, (Newport Corporation, New York, 2005).
- [4] Y. Zong, S.W. Brown, B.C. Johnson, K.R. Lykke, Y. Ohmo, “Simple spectral *stray light* correction method for array spectroradiometers”, Applied Optics, vol. 45, pp. 1111-1119 (2006).
- [5] *Stray light Compensation SC30*, Boehringer Ingelheim MicroParts, Germany (2003).
- [6] E.M. Louchard, P. Reid, C.F. Stephens, C.O. Davis, R.A. Leathers, T.V. Downes, R. Maffione, “Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments”, Optics Express, vol. 10, no. 26, pp. 1573-1584 (2002).
- [7] C. J. Sullivan, M. E. Martinez, S. E. Garner, “Wavelet analysis of sodium iodide spectra”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53 (issue 5) part 2, pp. 2916-2922 (2006).