

# Modelado estadístico del efecto de burbujas de aire en sistemas de comunicaciones ópticos inalámbricos submarinos

Carlos Gómez-García, Jacqueline Iamaguti Debessa, Pedro Salcedo-Serrano, Rubén Boluda-Ruiz, José María Garrido-Balsells, Antonio García-Zambrana, y Antonio Puerta-Notario  
carlosg@ic.uma.es, jacqueline.debessa@gmail.com, pss@ic.uma.es, rbr@ic.uma.es,  
jmgb@ic.uma.es, agz@ic.uma.es, apn@ic.uma.es  
Telecommunication Research Institute (TELMA), Universidad de Málaga, Málaga E-29010, España.

**Resumen**—The studies regarding underwater optical communications require an in-deep characterization of the water itself since its properties of light absorption and scattering directly affect the transmission performance in an optical link. That said, this paper presents the modeling and characterization of the statistical behavior regarding the scattering caused by two density levels of air bubbles in an underwater optical wireless channel at two distances. It also provides the best statistical fitting according to each case. Furthermore, it explains how all the assembly and installation are made at the laboratory in order to achieve the obtained results. It also features the use of a data acquisition card as an easy way to get data in raw.

## I. INTRODUCCIÓN

La evolución de la exploración marina y la necesidad de implementar sistemas de comunicación estables y efectivos en los vehículos de control remoto y los vehículos autónomos subacuáticos ha impulsado el interés por la investigación en los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas subacuáticas (*Underwater Optical Wireless Communication*, UOWC), debido a su alta velocidad de transmisión de datos, bajo consumo de energía y menor coste, en comparación con la tecnología tradicional basada en comunicaciones acústicas y de radiofrecuencia [1], [2]. Sin embargo, el enlace UOWC es difícil de caracterizar puesto que el océano es un medio complejo de estudiar en términos físicos. Además de los procesos de absorción y dispersión (*scattering*), los cuales limitan considerablemente la distancia de los enlaces UOWC, el haz óptico también se ve afectado, aunque en menor medida, por desvanecimientos aleatorios en la intensidad óptica causados por el efecto de la turbulencia oceánica, resultado de variaciones aleatorias del índice de refracción del agua debidas a cambios en la temperatura y/o salinidad [3], [4]. Al mismo tiempo, el efecto de burbujas de aire, menos analizado en la literatura, también puede causar fluctuaciones aleatorias en la potencia recibida. Por ejemplo, las burbujas producidas por la respiración de un buceador podrían obstaculizar un enlace óptico y provocar una reducción de calidad en la transmisión. En [5], se pone de manifiesto que hay muchas más burbujas de aire en los océanos de las que pensamos, y que principalmente son generadas cuando las olas rompen en las orillas y la superficie del mar. Por tanto, se hace necesario modelar estadísticamente, a partir de resultados experimentales, el efecto de la aparición de burbujas de aire en la potencia recibida. Esto se une al reto adicional de recrear las turbulencias del entorno submarino en el laboratorio para

poder obtener una caracterización precisa del canal debido al elevado grado de complejidad, altos costos y dificultades logísticas que presenta realizar mediciones en el mar.

En comparación con la bibliografía relacionada con el modelado del canal óptico submarino y el diseño y análisis de prestaciones de sistemas UOWC en presencia de absorción, *scattering* y turbulencia oceánica, existen estudios limitados no sólo sobre el modelado estadístico del impacto de burbujas de aire en la potencia óptica recibida, sino también sobre el análisis de prestaciones en presencia de burbujas de aire de diferentes tamaños [6]–[9] (y sus referencias). En [6], la probabilidad de error de bit se mide experimentalmente en presencia de burbujas de aire de diferentes tamaños tanto para agua de océano claro como agua de puerto. Se pone de manifiesto que la presencia de burbujas de aire de gran tamaño puede provocar el bloqueo de la señal y, por tanto, fallo en la comunicación. Sin embargo, no se realiza un modelado estadístico del impacto de esas burbujas de aire sobre la potencia recibida. En [7], el efecto de potenciales burbujas de aire en un enlace de comunicación submarina bajo condiciones controladas de laboratorio fue experimentalmente medido y modelado estadísticamente, concluyendo que las distribuciones estadísticas Weibull y Gamma Generalizada son las distribuciones que mejor representan la aleatoriedad de las burbujas en un enlace UOWC. En [8], se mide experimentalmente la probabilidad de error de bit en presencia de burbujas de aire cuando se emplea modulación OOK (*On-Off Keying*) a 1 Gbps. Por último, en [9], se realizó un modelado estadístico basado en la distribución Weibull para diferentes tamaños de burbujas que variaban de 1.35 mm a 2.99 mm de radio donde se pone de manifiesto la probabilidad de bloqueo de la señal debido a burbujas con ese tamaño. A pesar de los avances tanto a nivel teórico como experimental, ninguno de éstos trabajos analizó la dependencia del efecto producido por burbujas de aire respecto a la distancia de propagación de manera experimental.

En este artículo, se realiza un exhaustivo modelado estadístico del efecto de burbujas de aire para diferentes distancias de enlace. Se ha utilizado un diodo láser (*Laser Diode*, LD) como fuente transmisora en la banda óptica del color verde, y una bomba de aire para generar burbujas en torno a 2 mm de diámetro con dos niveles de flujo distintos. Los resultados experimentales muestran la existencia de fluctuaciones aleatorias en la potencia recibida debido a

la aparición de burbujas de aire. Estas fluctuaciones serán modeladas, por primera vez, para estudiar el impacto que tiene la distancia del enlace en un escenario con presencia de burbujas sobre la señal recibida. Para ello, se proponen ajustes de diferentes distribuciones estadísticas cuya precisión será cuantificada mediante el coeficiente de determinación  $R^2$ .

## II. MODELADO ESTADÍSTICO

El estudio de la propagación de la luz en el agua viene definido por las propiedades ópticas inherentes, siendo la absorción,  $a(\lambda)$ , y la dispersión,  $b(\lambda)$ , las que limitan las prestaciones alcanzables tanto en distancia como en potencia recibida [10]. Además, tanto  $a(\lambda)$  como  $b(\lambda)$  están relacionados entre sí por el coeficiente de extinción,  $c(\lambda)$ , siendo éste la suma entre  $a(\lambda)$  y  $b(\lambda)$ . Conviene saber el valor de  $c(\lambda)$  para poder clasificar el tipo de agua con la que se trabaja experimentalmente. Esta clasificación viene dada en la Tabla III del trabajo [1]. A nivel experimental, para la medición de la absorción y de la dispersión, se requiere el uso de dispositivos específicos y costosos, dificultando la comparación de los resultados teóricos con los prácticos. No obstante, se puede encontrar el valor de  $c(\lambda)$  haciendo uso de la ecuación definida por la ley de Beer-Lambert [10],

$$P_r = P_t e^{-c(\lambda)z}, \quad (1)$$

donde  $P_r$  es la potencia óptica recibida,  $P_t$  es la potencia óptica transmitida, y  $z$  es la distancia del enlace UOWC.

Respecto a las burbujas de aire, su efecto está relacionado con la diferencia entre el índice de refracción del agua y el del aire que forma las burbujas, lo que implica la aparición de fenómenos de refracción y difracción descritos por las leyes de Snell, y que se manifiestan de forma diferente en función del tamaño de las burbujas. Al mismo tiempo, la aparición de las mismas y su evolución presentan un carácter aleatorio inherente, susceptible de ser modelado mediante una función de densidad de probabilidad (*Probability Density Function*, PDF) que se ajuste de forma adecuada al histograma de las señales capturadas de forma experimental. En este sentido, se propone aquí la utilización de las distribuciones estadísticas Lognormal, Gamma Generalizada y Weibull como las que mejor se ajustan al comportamiento de dichas variaciones.

Por un lado, la PDF de la distribución Lognormal, LN  $(\mu, \sigma)$ , donde  $\mu$  es la media y  $\sigma$  es la desviación típica. Por otro lado, la PDF de la Gamma Generalizada,  $\Gamma(\alpha, \beta, \mu, \sigma)$ , viene definida por

$$\Gamma(x; \alpha, \beta, \gamma, \mu) = \gamma \left( \frac{x - \mu}{\beta} \right)^{\alpha\gamma - 1} \times \frac{e^{-((x - \mu)/\beta)^\gamma}}{\beta\Gamma[\alpha]}, \quad (2)$$

donde  $\alpha$  y  $\gamma$  son parámetros de forma,  $\beta$  de escala, y  $\mu$  de ubicación. Esta distribución es el caso general para diversas distribuciones, inclusive para la distribución Weibull,  $W(\gamma, \beta)$ , cuando  $\alpha = 1$  y  $\mu = 0$ , para  $x > 0$ .

## III. MONTAJE DEL SISTEMA BAJO ANÁLISIS

En el ámbito de los sistemas UOWC, el montaje e instalación de los equipos se hace tan importante como las medidas experimentales. En este trabajo, se ha realizado el montaje de la Fig. 1, en el que se ha utilizado un tanque de agua de sección cuadrangular de  $150 \times 20 \times 30$  cm, un LD que opera a una longitud de onda de 520 nm, y una lente convergente

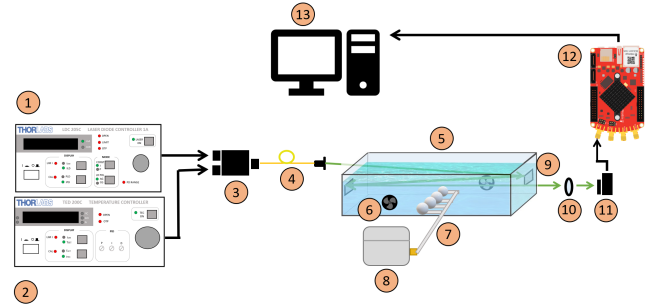


Fig. 1. Esquema de los equipos elegidos y de la conexión de los mismos. (1) Controlador de corriente LDC205C de Thorlabs. (2) Controlador de temperatura TED200 de Thorlabs. (3) Montura de láser LDM9LP de Thorlabs; (4) Diodo láser de fibra de tipo pigtail de 520 nm de Thorlabs (LP520-SF15). (5) Tanque de agua de 150x20x30 cm. (6) Generador de olas MP10 de VorTech. (7) Tubo para el paso de aire con difusores en la punta. (8) Bomba de aire Pawfly MC-3000. (9) Espejos BBSQ2-E02 de Thorlabs. (10) Lente plano convexa KPX100 de Newport. (11) Fotodetector PDA10A-EC de Thorlabs. (12) RedPitaya STEMLab 125-14. (13) Ordenador para procesamiento de datos.

junto a un fotodetector para la recepción de la señal óptica. En conjunto con el LD, se han empleado un controlador de corriente para fijar el punto de trabajo de cada medida, y un controlador de temperatura para mantener la temperatura de trabajo a 25° C. La montura del láser tiene salida en fibra óptica junto a un colimador adaptado a espacio libre. Se han utilizado espejos reflectantes para reflejar el haz y aumentar la distancia del enlace a 3 m y a 6 m.

Para caracterizar las fluctuaciones en la potencia óptica recibida debido al efecto de las burbujas de aire se ha utilizado un dispositivo de adquisición de datos, más concretamente, una RedPitaya STEMLab 125-14 basada en un procesador Dual-Core ARM Cortex-A9 MPCore con una FPGA Xilinx Zynq 7010, haciendo uso de uno de los canales de 14 bits a 125 MSamples/s de los que se dispone. Los datos fueron captados durante períodos de 5 min a una frecuencia de muestreo de 25 kHz y exportados al software Matlab. En primer lugar, se calcula la potencia recibida a partir del voltaje obtenido en el fotodetector. Después, se divide entre la potencia media con el objetivo de normalizar las fluctuaciones medidas. Finalmente, los ajustes de las distribuciones propuestas y comentadas en el Apartado II se realizan con el software Wolfram Mathematica.

Para la creación de burbujas, se ha utilizado una bomba de aire de intensidad variable conectada a un tubo con un adaptador en su extremo. Dicho adaptador dirige el flujo de aire en cuatro salidas conectadas a llaves que lo regulan. En cada una de las salidas se ha conectado un tubo corto, y en el extremo de éstos se han colocado difusores en forma de piedra porosa para crear burbujas de aproximadamente 2 mm de diámetro. Mediante la regulación de las llaves, se han emulado dos escenarios para dos niveles de densidad de burbujas diferentes, denominados en este trabajo Nivel 1 y Nivel 2, tal como se puede observar en Fig. 2. Además, se han empleado dos generadores de olas, siempre encendidos, con el fin de emular el movimiento del agua y conseguir una mejor distribución de las burbujas por todo el tanque de agua.

## IV. RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados experimentales en forma de histogramas de las fluctuaciones obtenidas sobre

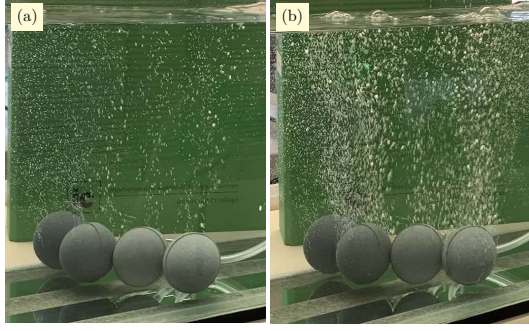


Fig. 2. Representación del escenario recreado para una densidad de burbujas de aproximadamente 2 mm de diámetro, generadas por cuatro difusores, donde (a) es el Nivel 1, y (b) es el Nivel 2.

la potencia recibida por la presencia de burbujas de aire, así como el ajuste numérico propuesto para cada uno. En primer lugar, es necesario conocer el tipo de agua en la que se trabaja. Para ello, se utiliza el coeficiente de extinción,  $c(\lambda)$ , calculado con la Eq. (1), siendo  $P_t$  la potencia transmitida por el LD, y  $P_r$  la potencia recibida por el fotodetector a una distancia dada. Usando agua de grifo de la ciudad de Málaga, se obtiene una  $c(\lambda)$  de aproximadamente  $0.15 \text{ m}^{-1}$ , lo que indica que el agua usada en este trabajo puede simular un agua de océano claro, que tiene una  $c(\lambda)$  de  $0.151 \text{ m}^{-1}$ , valor extraído de la Tabla III del trabajo [1].

En la Fig. 3, se muestran los resultados de las variaciones de potencia obtenidas para una distancia de enlace de 3 m. En dicha figura se presentan dos escenarios diferentes. En la primera columna, Fig. 3(a), se caracterizan las fluctuaciones para un flujo de burbujas de Nivel 1, mientras que en la segunda, Fig. 3(b), se aumenta el flujo de burbujas hasta el Nivel 2. En la parte superior de cada subfigura, se representa la potencia recibida normalizada respecto a la potencia media. En la subfigura inferior, se representa el histograma asociado a las fluctuaciones de potencia. Las variaciones de la señal se muestran por medio de un histograma, junto con las curvas de los ajustes propuestos. Para comprobar la precisión de estos ajustes, se usa el coeficiente de determinación,  $R^2$ , que indica la bondad del ajuste frente a los resultados. En la Tabla I, se muestran los diferentes valores de  $R^2$  para tres tipos de distribuciones estadísticas: Lognormal, Gamma Generalizada y Weibull, cuyos parámetros numéricos se presentan en la Tabla II. Para la distancia de enlace de 3 m, la Gamma Generalizada presenta un valor muy cercano a 1, demostrando la alta fidelidad del ajuste propuesto a esta distribución. Estos resultados corroboran los obtenidos en [7], donde tanto la Gamma Generalizada como la Weibull son las que mejor resultado presentan. Con el objetivo de confirmar la precisión de estas distribuciones, en este análisis se considera una distancia de enlace mayor a las que se han presentado en la literatura hasta ahora.

A la luz de los resultados presentados, se puede observar la existencia de fluctuaciones significativas en la potencia de la señal recibida a medida que aumenta el flujo de burbujas, a pesar de la corta distancia considerada. Este comportamiento se puede apreciar en la Fig. 4, donde se muestran cuatro

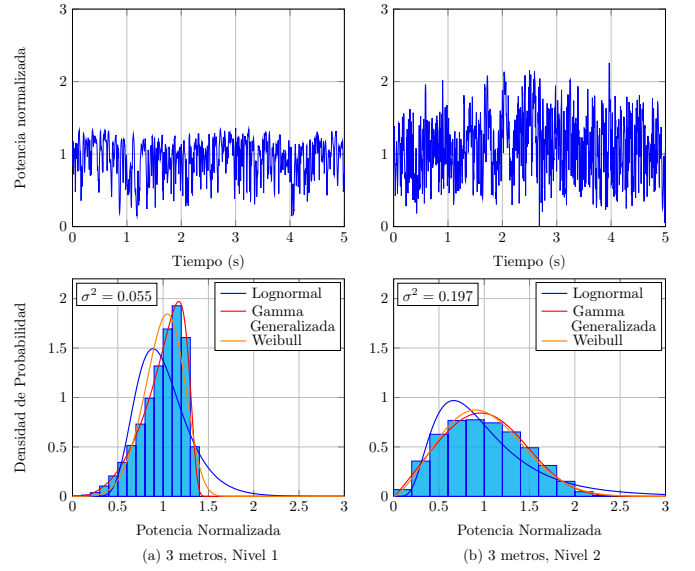


Fig. 3. Ajuste de las distribuciones estadísticas propuestas con el correspondiente histograma y varianza para cada medida. En (a), se muestra la potencia recibida normalizada respecto a la potencia media en función del tiempo, y debajo el histograma que describe las fluctuaciones para el Nivel 1 de burbujas. En (b), para el Nivel 2.

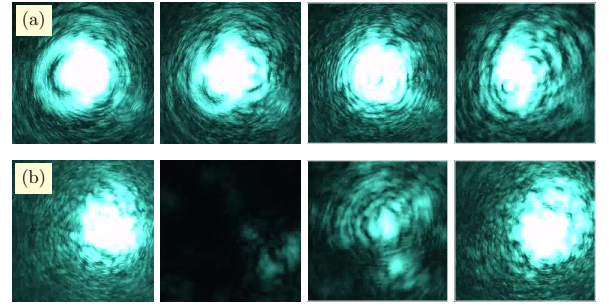


Fig. 4. Fotografías consecutivas obtenidas de la huella óptica recibida en un enlace de 3 m ante la presencia de burbujas de aire para los dos niveles de intensidad generados: (a) Nivel 1, y (b) Nivel 2.

fotogramas consecutivos obtenidos de la huella óptica recibida. Se puede ver como para el escenario con burbujas de Nivel 2, el haz óptico sufre bloqueos que darían lugar a potenciales fallos en la comunicación. Este aumento de las fluctuaciones se puede comprobar con el incremento de la varianza asociada a cada una de las medidas.

Al igual que en la Fig. 3, en las Figs. 5(a) y 5(b), se muestran los resultados obtenidos para una distancia de enlace de 6 m para los dos mismos niveles de burbujas. En términos

TABLA I  
COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN  $R^2$  PARA CADA DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA Y ESCENARIO

Fig.	Lognormal	Gamma Generalizada	Weibull
3(a)	0.601	0.998	0.898
3(b)	0.809	0.982	0.977
5(a)	0.755	0.999	0.979
5(b)	0.982	0.994	0.973

TABLA II  
PARÁMETROS OBTENIDOS PARA CADA DISTRIBUCIÓN PROPUESTA

Fig.	LN ( $\mu, \sigma$ )	$\Gamma (\alpha, \beta, \gamma, \mu)$	W ( $\gamma, \beta$ )
3(a)	(-0.035, 0.288)	(0.182, 1.297, 19.28, 0.0056)	(5.35, 1.09)
3(b)	(-0.122, 0.537)	(0.655, 1.345, 3.153, 0.0079)	(2.42, 1.13)
5(a)	(-0.0445, 0.319)	(0.474, 1.251, 6.95, 0.0289)	(4.36, 1.1)
5(b)	(-0.123, 0.514)	(14.26, 0.012, 0.5954, -0.098)	(2.19, 1.13)

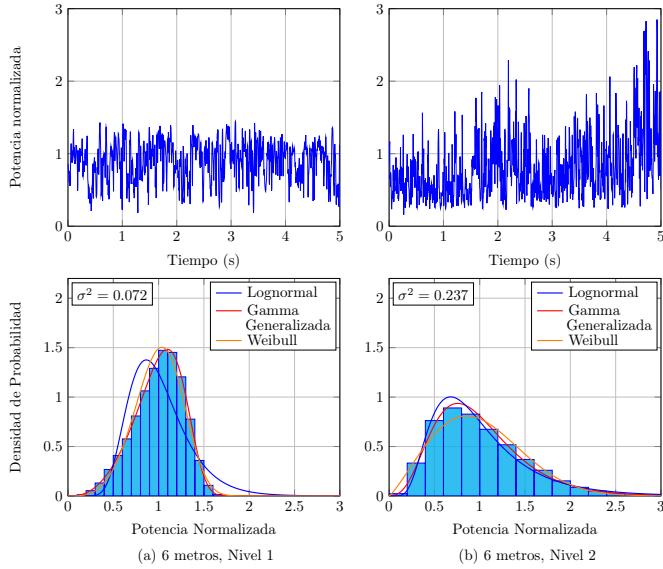


Fig. 5. Ajuste de las distribuciones estadísticas propuestas con el correspondiente histograma y varianza para cada medida.

generales, se pueden extraer las mismas conclusiones a las ya obtenidas en la Fig. 3. Sin embargo, se aprecia un notable crecimiento en la fuerza de las fluctuaciones de la potencia recibida, lo que se traduce en un incremento de la varianza respecto a las medidas realizadas a 3 m. Por otro lado, como en la Fig. 4, también aparecen bloqueos para el Nivel 2 de intensidad de burbujas de aire en la Fig. 6. Además, se puede ver como el haz óptico se ensancha notablemente al aumentar la distancia, lo que hace que sea más susceptible a deformarse.

Finalmente, se puede concluir que cuanto mayor es la distancia de enlace y la densidad de burbujas, mayor es la fuerza de las fluctuaciones generadas. En otras palabras, mayor es la varianza obtenida. A la vista de los resultados obtenidos y presentados en la Tabla II, comparando directamente las distribuciones estadísticas de dos parámetros, se puede observar cómo la distribución Weibull se ajusta de forma más fiel respecto a una distribución Lognormal, en línea con los resultados de [7].

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presenta un modelado estadístico de las fluctuaciones de potencia óptica recibida generadas por la presencia de burbujas de aire a partir de un enlace óptico submarino bajo condiciones controladas de laboratorio. Los resultados demuestran que la fuerza de las fluctuaciones en la potencia óptica recibida aumenta de forma drástica para las diferentes distancias de enlace, así como para los dos niveles de densidad de burbujas generados. Hay que

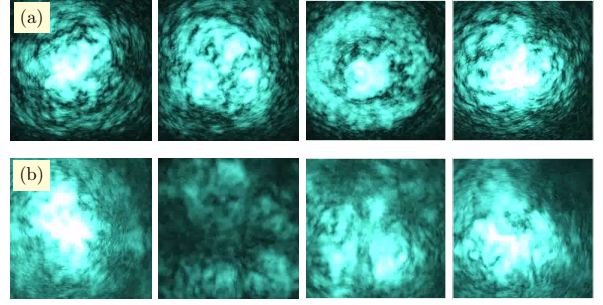


Fig. 6. Fotogramas consecutivos obtenidos de la huella óptica recibida en un enlace de 6 m ante la presencia de burbujas de aire para los dos niveles de intensidad generados: (a) Nivel 1, y (b) Nivel 2.

destacar que, hasta nuestro mejor entender, esto no se había descubierto experimentalmente en la literatura. Por otro lado, se han propuesto varios ajustes estadísticos para los escenarios analizados, concluyendo que la distribución Gamma Generalizada es la que mejor describe las fluctuaciones en base al coeficiente de determinación  $R^2$ . Finalmente, como trabajos futuros, se planea verificar experimentalmente el impacto de dichas fluctuaciones debido a las burbujas de aire en una transmisión de información real en términos de probabilidad de error de bit.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el proyecto PID2019-107792GB-I00, el Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI) 2021 bajo el proyecto P21\_00390, y la Universidad de Málaga.

## REFERENCIAS

- [1] Z. Zeng, S. Fu, H. Zhang, Y. Dong, and J. Cheng, "A survey of underwater optical wireless communications," *IEEE Commun. Surv. & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 204–238, 2017.
- [2] X. Sun, C. H. Kang, M. Kong, O. Alkhazragi, Y. Guo, M. Ouhsain, Y. Weng, B. H. Jones, T. K. Ng, and B. S. Ooi, "A review on practical considerations and solutions in underwater wireless optical communication," *J. Lightwave Technol.*, vol. 38, no. 2, pp. 421–431, 2020.
- [3] S. A. Thorpe, *The turbulent ocean*. Cambridge University Press, 2005.
- [4] R. Boluda-Ruiz, A. García-Zambrana, B. Castillo-Vázquez, and S. Hranilovic, "Impact of angular pointing error on BER performance of underwater optical wireless links," *Opt. Express*, vol. 28, no. 23, pp. 34 606–34 622, 2020.
- [5] L. Liebermann, "Air bubbles in water," *Journal of Applied Physics*, vol. 28, no. 2, pp. 205–211, 1957.
- [6] H. M. Oubei, R. T. ElAfandy, K.-H. Park, T. K. Ng, M.-S. Alouini, and B. S. Ooi, "Performance evaluation of underwater wireless optical communications links in the presence of different air bubble populations," *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–9, 2017.
- [7] M. V. Jamali, A. Mirani, A. Parsay, B. Abolhassani, P. Nabavi, A. Chizari, P. Khorramshahi, S. Abdollahramezani, and J. A. Salehi, "Statistical studies of fading in underwater wireless optical channels in the presence of air bubble, temperature, and salinity random variations," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 10, pp. 4706–4723, 2018.
- [8] D. Chen, J. Wang, S. Li, and Z. Xu, "Effects of air bubbles on underwater optical wireless communication," *Chinese Optics Letters*, vol. 17, no. 10, p. 100008, 2019.
- [9] M. Shin, K.-H. Park, and M.-S. Alouini, "Statistical modeling of the impact of underwater bubbles on an optical wireless channel," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 808–818, 2020.
- [10] C. D. Mobley, *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic press, 1994.