

Modelado de pérdidas geométricas en sistemas NLOS-UOWC con superficie marina ondulatoria

Paulo Samaniego Rojas, Pedro Salcedo Serrano, Beatriz del Castillo Vázquez, Rubén Boluda Ruiz,
José María Garrido Balsells, Antonio García Zambrana, y Antonio Puerta Notario
{paulo, pss, bcv, rbr, jmgb, agz, apn}@ic.uma.es

Instituto Universitario de Investigación en Telecomunicación (TELMA), Universidad de Málaga, Málaga E-29010, España.

Resumen—This work presents an underwater optical wireless communications (UOWC) channel model, specifically addressing a non-Line-of-Sight (NLOS) configuration, accounting for the presence of a waving sea surface. Our model offers a comprehensive deterministic analysis of the ocean wave impact, accurately determining the variable size of the beamwidth at the receiver plane reflected by the sea surface. Results confirm that oceanic wave variability induces severe misalignments in optical links, creating intermittent opportunities for effective communication. The optical-geometric analysis contributes significantly to understanding the novel impact of ocean waves on NLOS-UOWC systems. These findings enhance preliminary considerations in NLOS link design, particularly in scenarios with autonomous underwater vehicles in constant motion, aiding in reducing pointing errors.

I. INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico en oceanografía se evidencia no sólo en el campo de las ciencias naturales y disciplinas relacionadas, sino también en novedosos sistemas de navegación y exploración. Estos avances posibilitan al sector marítimo realizar investigaciones científicas exhaustivas en mares y océanos, siendo algunas de sus principales motivaciones la búsqueda de recursos como petróleo y gas, la predicción de catástrofes naturales, y el cuidado del medio ambiente. Las tecnologías tradicionales de comunicación inalámbrica submarina, especialmente la acústica, han experimentado avances significativos, pero también presentan limitaciones notables, como un reducido ancho de banda y una elevada latencia, a pesar de contar con un largo alcance. En contraste, la tecnología óptica emerge como una opción prometedora para la investigación y desarrollo de sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas submarinas (*Underwater Optical Wireless Communication, UOWC*). Esta tecnología destaca por su capacidad para ofrecer enlaces de alta velocidad, así como por su alta seguridad, huella de haz pequeña y baja latencia [1]. Los enlaces UOWC pueden configurarse en línea de visión directa (*Line-of-Sight, LOS*) o sin línea de visión directa (*non-Line-of-Sight, NLOS*), siendo los primeros los más comunes y estudiados por la comunidad científica. Sin embargo, diversos factores como la fauna y flora marina, las burbujas de aire, entre otros potenciales factores, pueden obstaculizar la propagación del haz óptico, haciendo necesarios los enlaces NLOS, que permiten sortear estos obstáculos mediante reflexiones en la interfaz océano-aire [2]. En este contexto, disponer de un modelo completo del canal óptico submarino se vuelve fundamental para superar los desafíos inherentes al medio, incluyendo los procesos de absorción y dispersión.

El modelo de canal UOWC basado en una configuración NLOS se sustenta en las características de la interfaz que

divide ambos medios. Por consiguiente, la precisión del modelado depende también de la superficie marina. En este sentido, se han llevado a cabo diversos estudios de modelado del canal para enlaces NLOS [3, 4] (y sus referencias). En [3], se examina un enlace NLOS utilizando un modelo de canal basado en teoría de rayos, donde se calculan tanto la respuesta al impulso del canal como las pérdidas de propagación. En [4], se realiza un análisis geométrico de las características del canal y se calculan las pérdidas de propagación para un enlace NLOS, teniendo en cuenta diversas fuentes de luz y tipos de agua. En estos estudios se asume una superficie marina lisa que actúa como un perfecto espejo. Sin embargo, en un escenario más ajustado a la realidad, la superficie marina cambia, entre otros factores, debido a la velocidad del viento y a las condiciones atmosféricas, traducida en corrientes oceánicas [5]. En la literatura, se pueden encontrar varios estudios de sistemas NLOS-UOWC donde la superficie marina se considera rugosa u ondulatoria [6–8] que evidencian una mayor degradación en la calidad de los enlaces establecidos respecto de la situación de una superficie marina lisa. Estos hallazgos destacan la importancia de continuar investigando y contribuyendo al estudio de sistemas NLOS-UOWC, considerando de manera más precisa y realista las características cambiantes de la superficie marina.

En este trabajo, se presenta un modelo de canal NLOS-UOWC, considerando la presencia de una superficie marina ondulatoria. Nuestro modelo de canal ofrece un análisis exhaustivo y determinista del impacto de las olas del mar, permitiendo determinar con precisión el tamaño variable de la huella de haz reflejada por la superficie marina. Además, se identifican meticulosamente los momentos y puntos de incidencia del haz óptico en la superficie ondulatoria, aspectos cruciales para medir la duración de la iluminación del receptor. Entre los resultados obtenidos, se corrobora que la variabilidad de las olas oceánicas induce desalineaciones en el sistema NLOS-UOWC, creando oportunidades intermitentes de comunicación efectiva.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la Fig. 1, se muestra la configuración del sistema NLOS-UOWC propuesto en este estudio. En dicha configuración, el transmisor, Tx, y el receptor, Rx, se encuentran ubicados a una profundidad de h m respecto a la superficie marina, además de estar separados horizontalmente una distancia de z m. De acuerdo a los principios teóricos de la configuración NLOS reflectiva, con el objetivo de que el haz de luz generado por el Tx alcance el Rx, éste propaga su energía apuntando hacia la interfaz océano-aire. En consecuencia, en un escenario

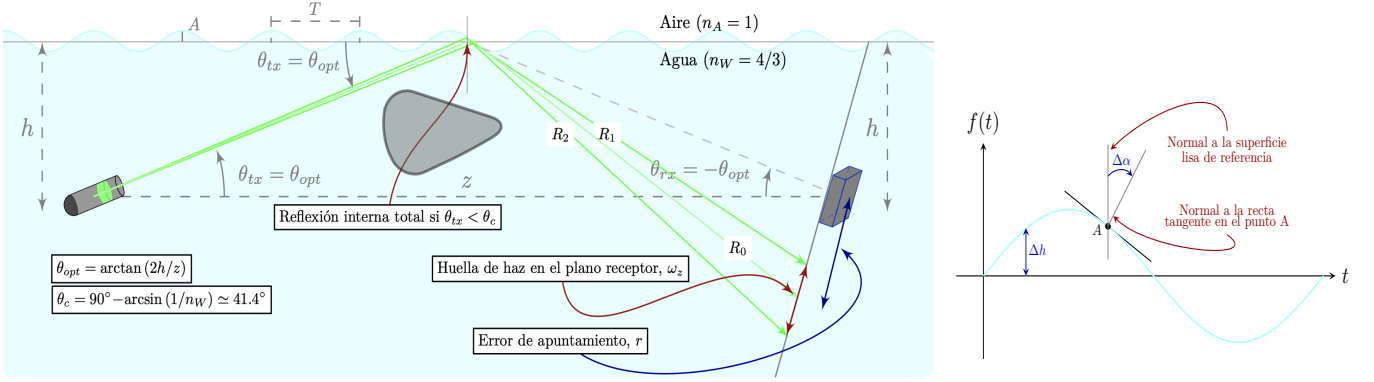


Fig. 1. Configuración del sistema NLOS-UOWC, donde z es la separación horizontal entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx), h es la profundidad a la que se encuentran tanto el Tx como el Rx respecto a la superficie lisa de referencia (color gris), y A y T son la amplitud y el periodo de la ola (ola simple en este caso). Además, se representan las proyecciones de los rayos reflejados R_0 , R_1 y R_2 , siendo R_0 el rayo central sobre el cual se define tanto el ángulo de apuntamiento θ_{tx} como el error de apuntamiento r , y R_1 y R_2 los rayos que delimitan el haz óptico. El error de apuntamiento r se define como el desplazamiento desde el centro del Rx al punto de intersección del rayo central R_0 con el plano del Rx. En consecuencia, se definen los parámetros r_1 y r_2 como los desplazamientos desde el centro del Rx al punto de corte de los rayos R_1 y R_2 con el plano del Rx, respectivamente. Finalmente, el rayo central, R_0 , apunta a la superficie marina ondulatoria con un ángulo $\theta_{tx} = \theta_{opt}$, mientras que los rayos R_1 y R_2 apuntan con ángulos $\theta_{R_1} = \theta_{tx} - \theta_{div}/2$ y $\theta_{R_2} = \theta_{tx} + \theta_{div}/2$, respectivamente. Por propósitos de representación, los parámetros r_1 , r_2 , θ_1 y θ_2 han sido omitidos para no sobrecargar el dibujo.

ideal, suponiendo que la fuente transmitiese un único rayo infinitamente estrecho, es decir, una fuente óptica ideal sin divergencia, el ángulo óptimo de apuntamiento, θ_{opt} , hacia una superficie lisa de referencia, sería el único ángulo de transmisión para el cual el Rx recibiría la mayor cantidad de energía. En este sentido, θ_{opt} se define geoméricamente como $\theta_{tx} = \arctan(2h/z)$. Por consiguiente, tanto Tx como Rx definen su ángulo de apuntamiento, θ_{tx} y θ_{rx} , respectivamente, respecto al plano horizontal que une ambos nodos, siendo $\theta_{rx} = -\theta_{tx}$. Por otra parte, el fundamento teórico de los enlaces reflectivos señala que, con el objetivo de maximizar la cantidad de luz recibida en el Rx, es necesario cumplir con el criterio del fenómeno de reflexión interna total (*Total Internal Reflection*, TIR). De acuerdo a la segunda ley de Snell, TIR se produce cuando $\theta_{tx} < \theta_c$, siendo θ_c el ángulo crítico. Este ángulo crítico se define como $\theta_c = 90^\circ - \arcsin(n_A/n_W) = 41.4^\circ$, siendo $n_A = 1$ el índice de refracción del aire y $n_W = 4/3$ el índice de refracción del agua.

En un escenario más realista, un sistema NLOS-UOWC se verá afectado tanto por la variabilidad de la superficie marina causada por la influencia dinámica del viento como por las propiedades ópticas del agua. Esto afecta directamente a la transmisión del haz óptico en el medio marino, causando complejas variaciones en la energía transmitida hacia la superficie y posterior reflexión hacia el Rx. Según el estudio realizado en [9], se pueden obtener valores numéricos asociados a parámetros como la altura, A , y periodo de las olas del mar, T . En este trabajo, se asume que la altura de la ola es la distancia vertical desde la cresta (altura máxima) o valle (altura mínima) de la ola hasta el nivel medio del mar, como se puede ver en la Fig. 1. Aquí, se modela la superficie marina ondulatoria como una superposición de N ondas sinusoidales, definida como $f(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i)$, siendo A_i la amplitud, f_i la frecuencia, y ϕ_i la fase relativa de la componente i .

III. MODELADO DE CANAL NLOS-UOWC PROPUESTO

El canal UOWC basado en configuración NLOS se modela como un único coeficiente de pérdidas, L , definido como $L = h_a \times h_p$, donde h_a son las pérdidas de propagación, y

TABLA I
COEFICIENTES DE ABSORCIÓN (a), DISPERSIÓN (b), Y EXTINCIÓN (c).

Tipo de agua	$a[m^{-1}]$	$b[m^{-1}]$	$c[m^{-1}]$
Océano claro	0.114	0.037	0.151
Costa	0.179	0.219	0.398

h_p son las pérdidas geométricas de propagación de una fuente láser debida a la variabilidad de la superficie del mar. Este parámetro permite computar la potencia recibida, P_{Rx} , a partir de la potencia transmitida, P_{Tx} , mediante $P_{Rx} = LP_{Tx}$.

A. Atenuación oceánica

La interacción de la luz con el medio submarino provoca la atenuación de su energía y cambios en la dirección de transmisión. Los efectos de la absorción, $a(\lambda)$, y la dispersión, $b(\lambda)$, se pueden cuantificar por medio del coeficiente de extinción, $c(\lambda)$, como $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$. En este sentido, a través de la ley de Beer-Lambert, se pueden computar las pérdidas de propagación cuando un haz de luz se propaga a través del agua como $h_a = e^{-c(\lambda)R_t d}$, donde d es la distancia total recorrida, definida como $d = (h + \Delta h / \sin(\theta_{tx})) + (B / \cos(\beta))$, aquí B y β se definen en III.C, R_t es el coeficiente de reflectancia total de Fresnel para computar también la cantidad de luz reflejada en situaciones en las que no se cumple el fenómeno de TIR. Para ello, se computa R_t como $R_t = (R_p + R_{ll})/2$, donde R_p y R_{ll} representan la polarización perpendicular y paralela de la luz, respectivamente. Algunos valores para el coeficiente de extinción, c , se enumeran en la Tabla I para un valor de longitud de onda de $\lambda = 532$ nm, que modelan dos escenarios prácticos como agua de océano claro y agua de costa que corresponden a concentraciones de clorofila de 0.31 mg/m³ y 0.83 mg/m³, respectivamente.

B. Atenuación debida a pérdidas geométricas

El movimiento de las olas del mar representa un desafío significativo en los enlaces UOWC basados en configuración NLOS, donde la superficie del mar se utiliza como medio de reflexión para sortear obstáculos en la transmisión de información. Este movimiento de las olas genera una fluctuación

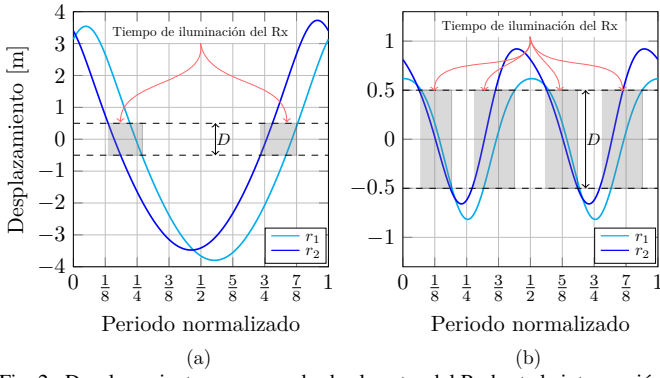


Fig. 2. Desplazamientos, r_1 y r_2 , desde el centro del Rx hasta la intersección de los rayos R_1 y R_2 con el plano del Rx, respectivamente, cuando se considera (a) una ola simple, y (b) una ola compleja, donde el área sombreada se corresponde con el tiempo que permanece iluminado el Rx en relación con el periodo, T , de cada ola.

en el plano del receptor, lo que resulta en un error de apuntamiento inherente. Este error puede causar desalineaciones momentáneas entre el Tx y el Rx, afectando seriamente a la calidad y a la consistencia de la comunicación. Para modelar el error de apuntamiento inherente entre el Tx y el Rx, se usa el modelo propuesto en [10], ampliamente usado en la literatura, donde los efectos de ancho de haz ω_z en el plano del receptor, ángulo de divergencia del haz, θ_{div} , y diámetro de la apertura circular fotodetectora, D , son considerados. Asumiendo un perfil de intensidad Gaussiano con error de apuntamiento, r , en el receptor viene dada por $h_p = A_0 \exp\left(-2r^2/\omega_{z_{eq}}^2\right)$, donde $\omega_{z_{eq}}^2 = \omega_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / 2v \exp(-v^2)$ es el ancho de haz equivalente en el Rx, $v = \sqrt{\pi} D / \sqrt{2} \omega_z$, y $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$ es la fracción de potencia recibida cuando el rayo central R_0 incide en el centro del Rx, es decir $r = 0$, siendo $\text{erf}(\cdot)$ la función error.

C. Análisis del error de apuntamiento

El punto de incidencia del haz óptico en la ola es influenciado tanto por las variaciones de altura, Δh , como por las del ángulo de la normal local a $f(t)$ en dicho punto, representadas por $\Delta\alpha$. Por otro lado, la proyección del haz óptico hacia la superficie marina genera una huella de haz en la misma, la cual se ve afectada por Δh y $\Delta\alpha$. El fenómeno de TIR causará que parte de la energía irradiada regrese al medio incidente y ocasionalmente ilumine el Rx. Los desplazamientos r_1 y r_2 , medidos desde el centro del Rx hasta el punto de intersección de los rayos reflejados R_1 y R_2 con el plano del Rx, respectivamente, representan la huella reflejada al medio incidente. Tras manipulaciones trigonométricas complejas, se deriva que el error de apuntamiento r_i asociado al rayo reflejado R_i , puede obtenerse como $r_i = \sqrt{A - B}$, donde

$$A = \left(\frac{\sqrt{(h+\Delta h)^2 + (z - (\cot(\theta_{tx})(h+\Delta h)))^2}}{\cos(\beta)} \right)^2,$$

$$B = \sqrt{(h+\Delta h)^2 + (z - (\cot(\theta_{tx})(h+\Delta h)))^2},$$

con $\beta = \theta_i + \varphi - \frac{\pi}{2}$, $\theta_i = \frac{\pi - 2(\theta_{tx} - \Delta\alpha)}{2}$, $\varphi = \arccos(C)$ y

$$C = \frac{z \times \cos(\Delta\alpha) - (h + \Delta h / \sin(\theta_{tx})) \cos(\theta_{tx} - \Delta\alpha)}{\sqrt{(h + \Delta h)^2 + (z - (\cot(\theta_{tx})(h + \Delta h)))^2}}.$$

Una vez obtenidos los valores de r_1 y r_2 mediante estas expresiones, se calcula el error de apuntamiento como $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$.

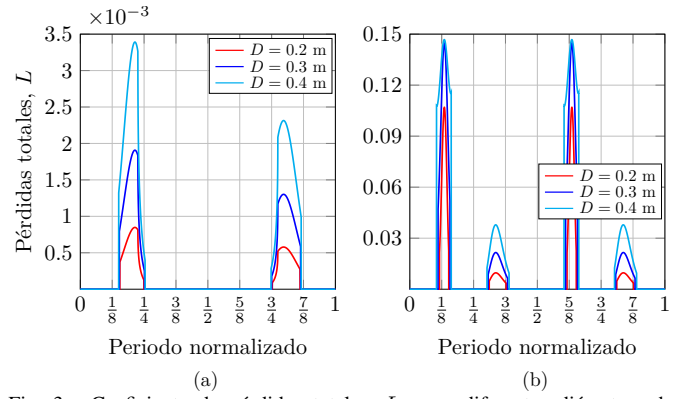


Fig. 3. Coeficiente de pérdidas totales, L , para diferentes diámetros de apertura receptora cuando se considera (a) una ola simple, y (b) una ola compleja.

De forma equivalente, la anchura en el plano receptor del haz reflejado, ω_z , viene dada por $\omega_z = |r_1 - r_2|$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se presentan los resultados numéricos del estudio realizado para dos tipos de olas diferentes, considerando agua de océano claro, y una separación entre Tx y Rx de $z = 10$ m cuando ambos se encuentran a una profundidad de $h = 4$ m de la superficie lisa de referencia. Se asume también un Rx con una apertura nominal de $D = 10$ cm y un campo de visión de 180° , así como una fuente láser que opera a una longitud de onda de $\lambda = 520$ nm con un ángulo de divergencia de $\theta_{div} = 15$ mrad. En términos generales, la Fig. 2 muestra los desplazamientos r_1 y r_2 desde el centro del Rx hasta la intersección de los rayos R_1 y R_2 con el plano del Rx, así como el porcentaje de tiempo que permanece iluminado el Rx en relación con el periodo, T , de la ola considerada. La Fig. 3 muestra los coeficientes de pérdidas totales, L , para diferentes diámetros de apertura receptora, y la Fig. 4 muestra el ancho de haz, ω_z , en función del periodo de la ola considerada, T . Hay que destacar que todos los resultados se analizan para dos tipos de olas: a) ola simple ($N = 1$) mediante una sinusoide con $A_1 = 0.07$ m y $f_1 = 0.6$ Hz; y b) ola compleja ($N = 2$) mediante la suma de dos sinusoides con $A_1 = 0.17$ m, $A_2 = 0.25$ m, $f_1 = 0.2$ Hz y $f_2 = 0.1$ Hz.

A. Análisis del tiempo de iluminación del Rx, $\%T_{ilu}$

Tal como se comentó anteriormente, r_1 y r_2 representan los desplazamientos desde el centro del Rx hasta la intersección de los rayos R_1 y R_2 con el plano del Rx, respectivamente. Por tanto, en la Fig. (2), se representan dichos desplazamientos en función del periodo, T , de la ola simple y de la ola compleja. Esto determina si el Rx recibe potencia óptica y durante cuánto tiempo. Además, en ambas figuras, se representan dos líneas discontinuas horizontales que hacen las veces de diámetro del Rx sobre el eje de ordenadas. Nótese que, por propósitos de representación, se ha usado para ambas gráficas un diámetro académico con tal de definir el porcentaje de tiempo de iluminación del Rx en relación con el periodo de la ola como el área definida por los cortes de r_1 y r_2 sobre las líneas discontinuas que forman el diámetro del Rx. En la Fig. 2(a), se obtienen porcentajes de tiempo de iluminación en relación con el periodo de la ola simple de $\%T_{ilu} = \{20.27, 21.25, 22.16\} \%$ cuando se consideran diámetros de apertura receptora de $D = \{0.2, 0.3, 0.4\}$ m.

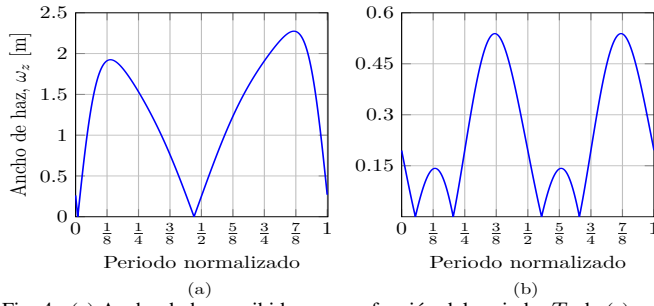


Fig. 4. (a) Ancho de haz recibido, ω_z , en función del periodo, T , de (a) una ola simple, y (b) una ola compleja.

Mientras que en la Fig. 2(b), se obtienen porcentajes de tiempo de iluminación en relación con el periodo de la ola compleja de $\%T_{ilu} = \{20.5, 24.58, 28.83\} \%$ cuando se consideran los mismos diámetros.

B. Análisis del coeficiente de pérdidas totales, L

En la Fig. (3), se computan los coeficientes de pérdidas totales, L , en función del periodo de la ola normalizado cuando hay cobertura. Con el fin de evaluar el impacto del tamaño de la apertura receptora, L se computa para diferentes diámetros de apertura receptora, $D = \{0.2, 0.3, 0.4\}$ m. En la Fig. (3)(a), las curvas representan los momentos en el periodo de la ola simple en los cuales se ilumina el Rx, recibiendo por tanto potencia óptica. Las curvas de la izquierda corresponden a la cresta de la ola, mientras que las de la derecha corresponden a su valle. El porcentaje de tiempo en el que se iluminan cresta y valle es asimétrico, tal y como se puede observar. Esto justifica el escalamiento de las curvas. Además, es evidente la influencia del tamaño del diámetro de la apertura del Rx para las condiciones del enlace, su incremento mejora la potencia recibida, viéndose reflejado en el ensanchamiento de las curvas. En la Fig. 3(b), se muestran las pérdidas en el Rx cuando el haz de luz incide tanto en cresta como en valle al considerar una ola compleja. Ambas gráficas permiten también analizar cómo influyen los coeficientes de Fresnel en el cálculo de pérdidas tras el cumplimiento o no del fenómeno de TIR. La influencia de estos coeficientes dependerá de los parámetros del enlace. Su impacto tiende a variar las curvas de pérdidas de forma irregular.

C. Análisis del ancho de haz, ω_z

En la Fig. (4), se presenta la variación del ancho del haz, ω_z , en el plano del receptor en función del periodo de la ola, T . Es importante destacar que este ancho de haz varía debido al impacto directo de las olas del mar, una característica novedosa en comparación con los enlaces UOWC en configuración LOS, donde el ancho de haz permanece constante. Por un lado, la relación entre el ancho de haz y la divergencia de la fuente láser, θ_{div} , es fundamental, ya que un aumento en θ_{div} resulta en un ancho de haz o huella reflejada más amplia en el plano del receptor, lo que a su vez reduce la potencia óptica recibida. Por otro lado, estos hallazgos ofrecen una valiosa perspectiva sobre la variabilidad del ancho de haz en entornos submarinos hostiles, y podrán ser utilizados para llevar a cabo análisis estadísticos que consideren diferentes comportamientos de olas más complejos.

V. CONCLUSIONES

El estudio realizado constituye una contribución significativa al comprender de una forma más detallada y novedosa el impacto de las olas del mar en sistemas NLOS-UOWC. Se ha observado que la variabilidad de la superficie marina afecta tanto el tamaño como a la posición del ancho de haz a lo largo del plano del receptor, lo que permite optimizar la transmisión en momentos de iluminación del receptor. Estos resultados pueden mejorar las consideraciones preliminares en el diseño de sistemas UOWC basados en configuración NLOS. Se sugiere realizar un estudio estocástico del comportamiento de la superficie marina para futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Andaluz de Investigación Desarrollo e Innovación (PAIDI) 2021 bajo el proyecto P21_00390.

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] S. Arnon and D. Kedar, "Non-line-of-sight underwater optical wireless communication network," *JOSA A*, vol. 26, no. 3, pp. 530–539, 2009.
- [3] W. Liu, D. Zou, Z. Xu, and J. Yu, "Non-line-of-sight scattering channel modeling for underwater optical wireless communication," in *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2015, pp. 1265–1268.
- [4] P. Samaniego-Rojas, P. Salcedo-Serrano, R. Boluda-Ruiz, J. M. Garrido-Balsells, and A. García-Zambrana, "Novel link budget modelling for NLOS submarine optical wireless links," in *Imaging and Applied Optics Congress 2022*. Optica, 2022, pp. PW3F–2.
- [5] S. R. Massel, "On the geometry of ocean surface waves," *Oceanologia*, vol. 53, no. 2, pp. 521–548, 2011.
- [6] B. R. Angara, P. Shanmugam, and H. Ramachandran, "Influence of sea surface waves and bubbles on the performance of underwater-to-air optical wireless communication system," *Optics & Laser Technology*, vol. 174, p. 110652, 2024.
- [7] C. Fang, S. Li, Y. Wang, and K. Wang, "Investigation of non-line-of-sight underwater optical wireless communications with wavy surface," *Opt. Express*, vol. 32, no. 4, pp. 4799–4815, 2024.
- [8] S. Xu, P. Yue, and X. Yi, "Non-line-of-sight multiple reflection underwater wireless optical communications channel model based on a capillary waves rough sea surface," *JOSA A*, vol. 40, no. 6, pp. 1116–1127, 2023.
- [9] J. Le Roux, "Characteristics of developing waves as a function of atmospheric conditions, water properties, fetch and duration," *Coastal Engineering*, vol. 56, no. 4, pp. 479–483, 2009.
- [10] A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 25, no. 7, pp. 1702–1710, 2007.