



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**DISEÑO DE UN ADAPTADOR ÓPTICO PARA REDES DE FIBRA ÓPTICA
MULTIMODO MEDIANTE INTERFERENCIA MULTIMODO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniera en Telecomunicaciones

AUTORA: Allison Melanie Barahona Guzmán
Hugo Emilio Yáñez Valladarez.

TUTOR: Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.

Quito-Ecuador
2024

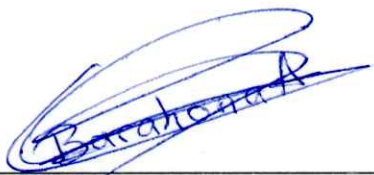
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Allison Melanie Barahona Guzmán con documentos de identificación N° 1750838292 y Hugo Emilio Yáñez Valladarez con documentos de identificación N° 1754307047; manifestamos que:

Somos autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 01 de agosto del año 2024

Atentamente,



Allison Melanie Barahona Guzmán
1750838292



Hugo Emilio Yáñez Valladarez
1754307047

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Allison Melanie Barahona Guzmán con documentos de identificación N° 1750838292 y Hugo Emilio Yáñez Valladarez con documentos de identificación N° 1754307047, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Diseño de un adaptador óptico para redes de fibra óptica multimodo mediante interferencia multimodo”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 01 de agosto del año 2024.

Atentamente,



Allison Melanie Barahona Guzmán
1750838292



Hugo Emilio Yáñez Valladarez
1754307047

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña con documento de identificación N° 1713583126, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN ADAPTADOR ÓPTICO PARA REDES DE FIBRA ÓPTICA MULTIMODO MEDIANTE INTERFERENCIA MULTIMODO, realizado por Allison Melanie Barahona Guzmán con documentos de identificación N° 1750838292, Hugo Emilio Yáñez Valladarez con documentos de identificación N° 1754307047 obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 01 de agosto del año 2024

Atentamente,



Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña MSc.

1713583126

DEDICATORIA

Allison Melanie Barahona Guzmán: A Dios que desde el cielo ha sido mi guía para dar los pasos correctos en la vida estudiantil y familiar para mi desarrollo ante la sociedad. A mis abuelitos Carmela Cantos, Alfonso Barahona y Rosa Recalde que con paciencia y confianza me apoyaron en mi desarrollo desde la niñez hasta la juventud dándome un consejo de buena conducta y aliento para continuar con los estudios frente a las adversidades que pueden presentarse a lo largo de la vida. A mis padres Edgar Barahona y María Guzmán que con incansable sacrificio han dado todo de sí para formarme como persona y profesional, que con infinito amor supieron guiarme en el camino del estudio para alcanzar un logro más en mi vida, siendo una buena cristiana y honrada ciudadana. A mi hermano Damian Barahona quien ha estado en momentos difíciles para escucharme y darme una mano en los estudios. A mis tíos Mónica Guzmán y Juan Hernández que siempre me dieron consejos y estuvieron cuanto más los necesitaba durante los pasos importantes de mi vida. A mi madrina Lourdes Cantos que siempre me ha querido como una hija para llevarme por el camino del bien y aconsejarme que estudie para mi futuro. A mi novio Rodolfo Iguago que ha estado a mi lado desde la juventud en el camino de los estudios y personal dándome un apoyo incondicional para obtener todos mis logros. A todos ellos dedico este trabajo fruto de su sacrificio y esfuerzos constantes para alcanzar una meta más que será para mi futuro como profesional en la vida.

Hugo Emilio Yáñez Valladares: Primeramente, dedico a Dios que me acompaña todos los días y me bendice en cada actividad académica, además me permite regresar a casa con vida y salud para seguir esforzándome y ser una mejor persona como el indica en su palabra. Dedico este trabajo de titulación a mis padres, que son las personas que siempre estuvieron presentes en todo el proceso de la carrera, gracias a ellos estoy aquí desarrollándome como un estudiante honrado y esforzado. Mi madre Maritza nunca permitió que me dirija a la universidad sin el desayuno, además de inculcarme deportivamente en actividades que harían controlar mi enfermedad y el estrés que conlleva el estudio. Dedicar también a mi padre Hugo que se parte la espalda para que yo estuviera en una universidad prestigiosa, además de recordarme que el esfuerzo y la honestidad es parte de un desarrollo personal para la sociedad de hoy en día. También le dedico a mis dos perritos Woody que hace diez años dejó este mundo, al cual prometí esforzarme y llegar a ser una persona que nada le es imposible, y para mi perrito Stuart que ahora me acompaña en esta etapa importante de mi vida, el cual me alegra la vida y además es un miembro más de la familia que hace mucha compañía en casa.




AGRADECIMIENTO

Allison Melanie Barahona Guzmán: A Dios por la vida y sus bendiciones para la finalización de este proyecto que me permite alcanzar una profesión que será el sustento de mi vida. A mis padres, hermano y a toda mi familia por su apoyo incondicional para seguir adelante, alcanzar mis metas y objetivos con un arduo trabajo y apoyo moral. A la Universidad Politécnica Salesiana, institución que me permitió alcanzar mis estudios de tercer nivel. A mi tutor Msc. Milton Tipán que siempre estuvo para aclarar, mejorar y alcanzar a terminar mi proyecto que permite ser una profesional en la sociedad. A todos los maestros de la Universidad Politécnica Salesiana quienes con sus enseñanzas sembraron el espíritu de superación en mí para lograr lo que hoy dejo gravado en mi proyecto de carrera profesional.

Hugo Emilio Yáñez Valladarez: Sin día alguna, agradezco a Dios todopoderoso que me permitió llegar a este punto importante en la vida, gracias a él me siento invencible, porque si él está conmigo quien contra mí. Agradezco al Msc. Milton Tipán que siempre estuvo atento a los avances de este trabajo de titulación, además de despejar nuestras dudas y alentarnos en todo sentido para mantener nuestra moral en alto, es un gran profesional que espero trabajar nuevamente con él. Agradecer a toda la Universidad en general, debido a que pusieron todo a disposición para que yo pueda seguir aprendiendo nuevas enseñanzas que trascienden en gran magnitud al mundo actual y del futuro, además de inculcarme buenos valores arraigados a Cristo. Gracias también a cada docente que hizo presencia en su respectivo periodo académico, cada uno fue un aporte importante en la carrera, ya que todos los temas enseñados con profesionalismo, amabilidad y paciencia me ayudó a entender y familiarizarme con la carrera, es por ello que también estoy aquí a las puertas para llegar a ser un ingeniero. Y por supuesto agradecer a los compañeros de la carrera que fueron un gran alivio cómico cada día, hicieron que la universidad sea una alegre experiencia que llevare en mi mente toda la vida.

DISEÑO DE UN ADAPTADOR ÓPTICO PARA REDES DE FIBRA ÓPTICA MULTIMODO MEDIANTE INTERFERENCIA MULTIMODO

DESIGN OF AN OPTICAL ADAPTER FOR MULTIMODE FIBER OPTIC MULTIMODE FIBER OPTIC MULTIMODE INTERFERENCE

Allison M. Barahona¹ , Hugo E. Yáñez² , Milton N. Tipán³ 

Resumen

Este artículo, presenta la optimización de la potencia de transferencia de un adaptador de fibra óptica de dos modos, para compensar la dispersión modal de la fibra óptica multimodo. La estructura se simula usando el método de propagación de haz obteniéndose una distancia del adaptador de $15.66mm$ y una ganancia en la potencia de acoplamiento de aproximadamente 65%, con respecto a la longitud inicial de $16mm$. Esta reducción de la dispersión modal mediante este adaptador permitirá mejorar los sistemas de comunicación de corto alcance de fibra óptica multimodo.

Palabras clave: MMF, FMF, TMF, BPM, DMD.

Abstract

This article presents the transfer power optimization of a two-mode fiber optic adapter to compensate for the modal dispersion of multimode optical fiber. The structure is simulated using the beam propagation method, obtaining an adapter distance of $15.66mm$ and a gain in coupling power of approximately 65%, with respect to the initial length of $16mm$. This reduction in modal dispersion through this adapter will improve short-range multimode fiber optic communication systems.

Keywords: MMF, FMF, TMF, BPM, DMD.

¹Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: abarahonag1@est.ups.edu.ec

²Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: hyanezv@est.ups.edu.ec

³Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

1. Introducción

En la actualidad, las redes de fibra óptica son fundamentales, ofreciendo transmisión de datos a larga distancia, velocidades de transmisión mucho más rápidas y mayor ancho de banda. Particularmente, las redes de fibra multimodo (Multimode Fiber, MMF), se utilizan en centros de datos, estos trabajan generalmente en la interconexión de servidores y almacenamiento de datos. Además, son sistemas de alta velocidad, bajo costo, resistentes a interferencias electromagnéticas y sus distancias de transmisión son cortas [1].

La dispersión modal (Modal Dispersion, MD), es un problema en la MMF que genera un impacto significativo en la calidad y la velocidad de transmisión de datos. Esta dispersión se debe a las diferentes velocidades de propagación de la luz en el núcleo de la fibra multimodo, lo que provoca que los modos de propagación lleguen con diferentes retardos al receptor, lo que provoca un ensanchamiento del pulso óptico a la salida de la MMF. Este fenómeno introduce distorsión en la señal disminuyendo la tasa de bits de error (Bit Error Rate, BER) y reduciendo el producto longitud-ancho de banda, lo que hace que, para largas distancias, no sean factibles velocidades de transmisión altas, limitando el sistema de comunicación y reduciendo la confiabilidad del mismo [2], [3], [4].

Para reducir la dispersión modal una de las técnicas ópticas usadas se basa en empalmar la fibra óptica monomodo (Single Mode Fiber, SMF) con la fibra óptica MMF o entre ellas la fibra óptica de pocos modos (Few Mode Fiber, FMF), generando una (pre/post) compensación, esto reduce el número de modos propagados de orden superior y da más energía a los modos de orden bajo. Sin embargo, existe una pérdida de potencia debido a este empalme y a la diferencia de diámetro de estas fibras ópticas, a causa de la falta de coincidencia en el diámetro del campo modal (Modal Fiber Diameter, MFD) entre el modo fundamental de la SMF o FMF y el modo fundamental de la MMF [5], [6], [7].

En este artículo, se propone la optimización de un adaptador de fibra óptica FMF de dos modos, mejorando el diseño de [7], lo que permitirá disminuir las pérdidas debido al empalme entre estas fibras ópticas, logrando incrementar el producto distancia - ancho de banda del enlace.

2. Fundamentación Teórica

2.1. Adaptador de fibra óptica de pocos modos

Para reducir el retardo de dispersión Modal (Delay Modal Dispersion, DMD) de la MMF en [7] se propone un adaptador de fibra FMF colocado entre el pigtail de la fibra óptica SMF y la fibra óptica MMF. El diámetro del campo modal de la MMF es cercano a

$14\mu m$ por lo que se diseña la fibra óptica FMF con este diámetro, así también se define el perfil del índice de refracción escalonado y con valores para el núcleo y el revestimiento de 1.445 y 1.447, respectivamente. Esto permite reducir las pérdidas por acoplamiento y permite una transmisión de $1Gb/s$ a $1310nm$ a más de $300m$.

2.2. Interferencia Multimodo

La interferencia multimodo (Multimode Interference, MMI) que se produce en una estructura de fibra MMF, es producto de las combinaciones entre los diferentes modos de propagación dentro de la fibra multimodo. Esta combinación representa el perfil del campo de entrada que se repite a cierta distancia dentro de la fibra óptica, a este fenómeno es conocido como imagen propia (self-imaging) [6]. Esto ha sido un área activa de investigación debido a su estructura simple, esta permite generar dispositivos de alta estabilidad, baja costo, tamaño pequeño, facilidad de empaque y conexión sencilla al sistema óptico [8].

La teoría de interferencia multimodal es una de las más usadas para el diseño de dispositivos fotónicos, como acopladores ópticos, permitiendo obtener dispositivos óptimos que tengan una baja pérdida de inserción teórica, un tamaño compacto, un gran ancho de banda óptico y una alta tolerancia de fabricación. Entre los métodos usados para su modelamiento están el análisis de propagación modal completo, aproximación por óptica de rayos, análisis de propagación de modo guiado, métodos híbridos, entre otros. [9].

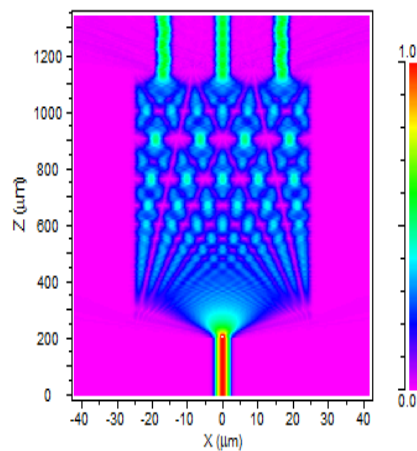


Figura 1. Interferencia modal

El modelado de dispositivos fotónicos puede realizarse también mediante el método de propagación de haz (Beam Propagation Method, BPM), este se ha convertido en una de las técnicas más populares y poderosas para modelar la propagación de ondas electromagnéticas en circuitos planos de ondas de luz

(Planar Light Wave Circuit, PLC) o circuitos fotónicos integrados (Photonic Integrated Circuit, PIC), debido a la simplicidad de su implementación y la efectividad de su procesamiento computacional, proporcionando una evaluación más precisa de las propiedades modales de una distribución de índice de refracción determinado [10] - [15].

La Figura 1 representa un ejemplo de la distribución de las ondas electromagnéticas dentro de un splitter fotónico simulado mediante BPM. En ella se observa como la energía del láser se distribuye dentro de la estructura fotónica desde el ingreso de la potencia del láser hasta las tres salidas donde se divide la potencia para cada una por igual.

3. Configuración de la simulación

Un adaptador de un enlace óptico basado en MMF fue simulado mediante el método BPM en el software BeamPROP de la empresa Synopsys, tomando en consideración las medidas dadas en [7]. Un láser simulado como un haz gaussiano a media altura (Full Width at Half Maximum, FWHM) de $5.8\mu\text{m}$, fue ingresado en una estructura óptica formada por una fibra óptica SMF de perfil de índice de refracción paso de un 1mm de largo (simular acople del pigtail), radio de $4.25\mu\text{m}$, e índices de refracción del núcleo y recubrimiento de 1.4667, 1.447 respectivamente.

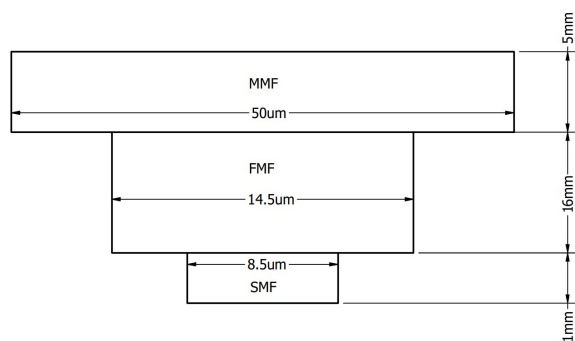


Figura 2. Configuración de la estructura óptica SMF-FMF-MMF

Esta fibra óptica está conectada a una fibra óptica FMF (adaptador) de dos modos con 16mm de longitud, $14.5\mu\text{m}$ de diámetro, perfil de índice de refracción paso, índice de refracción del núcleo de 1.445, e índice de refracción del recubrimiento de 1.447. Finalmente, la estructura se acopla a una fibra óptica MMF de longitud 5mm (para observar el acoplamiento) y $50\mu\text{m}$ de diámetro, perfil de índice de refracción paso, índice de refracción del núcleo de 1.4667 y el índice de refracción del revestimiento de 1.447. Esta estructura se muestra en la Figura 2, la cual fue simulada a una longitud de onda de 1310nm .

4. Resultados y análisis

Para iniciar la simulación, el láser es colocado al ingreso de la fibra óptica SMF en el centro de la misma, cuya potencia es normalizada a 1 para observar el efecto de las caídas de potencia en los empalmes de las diferentes fibras ópticas. Las longitudes de las fibras ópticas SMF y MMF se eligió con el fin de observar el comportamiento del campo electromagnético dentro de la estructura de fibras ópticas. Este comportamiento inicial se indica en la Figura 3, donde se observa que el primer segmento (SMF) mantiene la potencia en el valor normalizado máximo, que es de uno. Al pasar al segundo segmento (FMF) la potencia varía en el rango de 0.4 a 1 de manera periódica, con una potencia al final del segmento de aproximadamente 0.9. Esto produce una atenuación considerable al pasar al tercer segmento, cuya potencia oscila entre 0.9 bajando hasta cero y subiendo a 0.35 al final del segmento simulado. Además, se puede observar que existe la formación del patrón de la imagen propia lo que convierte a la FMF en un dispositivo MMI, sin embargo, esta no está con una distribución de potencia adecuada lo que se muestra en la figura del patrón de propagación (izquierda) y se corrobora en la figura del comportamiento de la potencia (derecha). Lo anterior, indica que existe una longitud de la fibra óptica FMF que puede entregar mayor potencia a la MMF, permitiendo mejorar la transmisión del sistema.

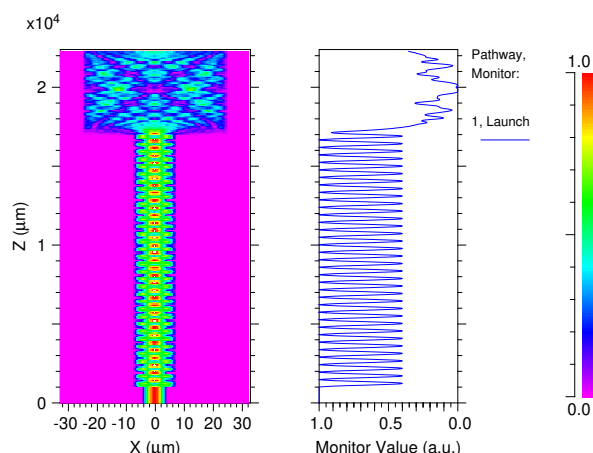


Figura 3. Simulación de la estructura sin optimizar

Entonces, la longitud de la fibra FMF, es recortada a 15.66mm , donde se tiene el pico máximo en este segmento. Lo anterior, permitió que la potencia en el tercer segmento se incremente a uno al inicio y final del segmento, como se indica en Figura 4. Se observa claramente en la figura izquierda, como se replica el haz de entrada al inicio del tercer segmento, con el haz al final del mismo. Este efecto es esperado debido al MMI dentro de esta estructura. Con esto se logró

optimizar la potencia de transferencia al segmento de fibra óptica MMF.

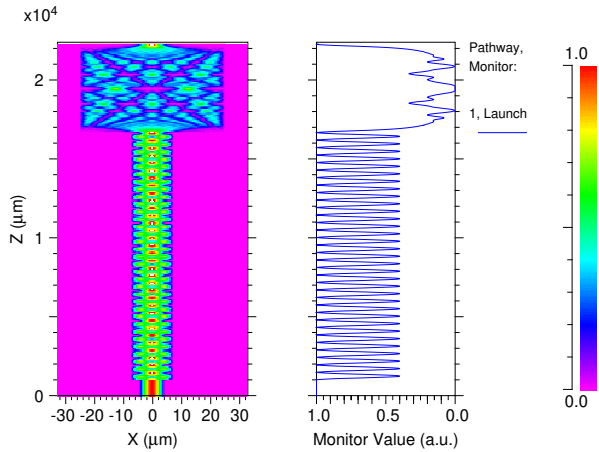


Figura 4. Simulación de la estructura optimizada

Finalmente, para comprobar su propagación dentro de la fibra óptica MMF, se incrementó su longitud a 43mm . En el primer segmento se observa que la potencia permanece en el máximo valor, sin embargo, al pasar al segundo segmento se encuentran las variaciones de energía periódicas, con la potencia máxima al final de este segmento, como se observa en la Figura 5. Esta potencia se acopla al tercer segmento e incrementa la potencia de salida del tercer segmento de manera periódica, lo que permite mejorar la potencia al final de la fibra MMF, consiguiendo un mejor enlace.

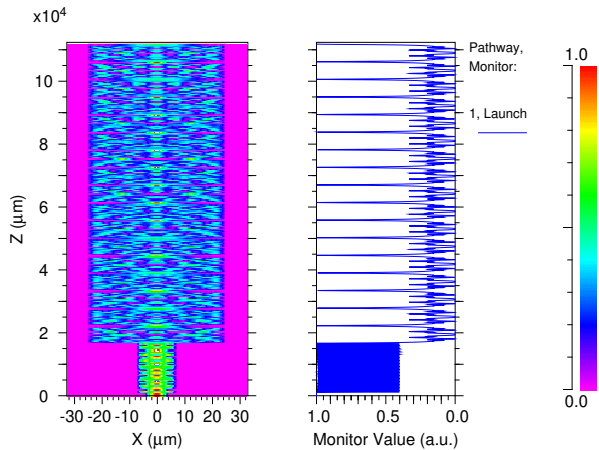


Figura 5. Simulación de la estructura optimizado con una $20\mu\text{m}$ de MMF

Una propagación periódica de la potencia con picos máximos de uno, indica que la longitud de la fibra FMF fue optimizada de manera adecuada, logrando un mejor acoplamiento de las fibras dentro de la estructura simulada.

5. Conclusiones

La potencia de transferencia de un adaptador óptico basado en fibra óptica de dos modos FMF, ha sido optimizado para un enlace óptico de fibra MMF. Una mejora de 65% respecto al potencia transferida es conseguida cuando la longitud de la FMF pasa de 16mm a 15.66mm . Esto permitió reducir la dispersión modal de la fibra multimodo y con ello incrementar la distancia del enlace. Una simulación de este adaptador en redes multimodo de corto alcance, a distintas velocidades de transmisión, será realizada en el futuro, con el fin de evaluar el desempeño de este adaptador.

Referencias

- [1] T. Cseh and T. Berceci, "Efficient compensation methods for modal dispersion in radio over multimode fiber links," *2014 20th Int. Conf. Microwaves, Radar Wirel. Commun. MIKON 2014*, pp. 3–5, 2014, doi: 10.1109/MIKON.2014.6899953.
- [2] P. Shanmugapriya and R. Raveena, "Analysis of various types of fiber dispersion for fiber optical communication," *2020 7th Int. Conf. Smart Struct. Syst. ICSSS 2020*, 2020, doi: 10.1109/ICSSS49621.2020.9202086.
- [3] X. Liu, X. Zhu, Y. Guo, X. Zhang, and Z. Yang, "Mutual influences of modal dispersion and mode-dependent loss in multiple-mode fibers," *2023 21st Int. Conf. Opt. Commun. Networks, IC-OCN 2023*, no. 6, pp. 1–3, 2023, doi: 10.1109/IC-OCN59242.2023.10236050.
- [4] X. Liu, X. Zhang, Y. Guo, H. Li, M. Cao, and Z. Yang, "Frequency diversity of modal dispersion in mode-division multiplexing systems from strong to weak coupling regimes," *Results Phys.*, p. 107721, 2024, doi: 10.1016/j.rinp.2024.107721.
- [5] Y. F. Ma and D. W. Huang, "A compact silicon-on-insulator MMI-based polarization splitter," *2007 IEEE/LEOS Int. Conf. Opt. MEMS Nanophotonics, OMENS*, pp. 121–122, 2007, doi: 10.1109/OMEMS.2007.4373870.
- [6] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications," *J. Light. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 615–627, 1995, doi: 10.1109/50.372474.
- [7] X. Chen et al., "Fundamental mode transmission around 1310-nm over OM1 and OM2 multimode fibers enabled by a universal fiber modal adapter," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 69, pp. 1–9, 2022, doi: 10.1016/j.yofte.2022.102848.

- [8] X. Chen et al., “A fiber modal adapter for upgrading 850 nm multimode fiber links to 1310 nm single-mode transmission,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 56, no. February, pp. 2–6, 2020, doi: 10.1016/j.yofte.2020.102210.
- [9] R. Alabedra et al., “Multiple access optical devices in organic-mineral material,” *Conf. Optoelectron. Microelectron. Mater. Devices, Proceedings, COMMAD*, vol. 2000-Janua, pp. 279–284, 2000, doi: 10.1109/COMMAD.2000.1022943.
- [10] S. Wu and J. Xiao, “A Pseudospectral Reflective Beam Propagation Method for Optical Waveguides,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 29, no. 5, pp. 435–438, 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2655080.
- [11] D. Yevick and B. Hermansson, “New Formulations of the Matrix Beam Propagation Method: Application to Rib Waveguides,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 25, no. 2, pp. 221–229, 1989, doi: 10.1109/3.16266.
- [12] H. M. Masoudi and M. S. Akond, “Stable time-domain beam propagation method for modeling ultrashort pulse propagation in dispersive optical structures,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 9, pp. 769–771, 2012, doi: 10.1109/LPT.2012.2188135.
- [13] K. Morimoto and Y. Tsuji, “Analysis of multiple waveguide discontinuities using propagation operator method and beam propagation method,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 55, no. 4, 2019, doi: 10.1109/JQE.2019.2923041.
- [14] D. Yevick and B. Hermansson, “Efficient Beam Propagation Techniques,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 1, pp. 109–112, 1990, doi: 10.1109/3.44923.
- [15] Y. Nakamura, Y. Bandai, Y. Okamoto, H. Osawa, H. Aoi, and H. Muraoka, “Turbo equalization effect for nonbinary LDPC code in BPM R/W channel,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 4602–4605, 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2194989.