

Propuesta de un mecanismo dinámico que permita contrarrestar el efecto de FWM en una red MLR-PON



Monografía para optar por el título de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Modalidad Trabajo de Investigación

Santiago Sánchez Echavarría
Andrés Felipe Diago Matta

Tutores:

Phd. Jose Giovanni López Perafán
Phd. Carlos Andres Martos Ojeda

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Programa de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, 28 de noviembre de 2023

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducion	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. METODOLOGÍA	3
2. CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS	4
2.0.1. Four Wave Mixing (FWM)	4
2.0.2. Redes MLR-PON	5
2.0.3. Asignación de Canales Desigualmente Espaciados	5
2.0.4. Reglas de Golomb	6
2.0.5. Algoritmos para Asignación de Canales	6
2.0.6. Simulación por Agentes	6
2.0.7. Mecanismos Dinámicos	6
2.0.8. Efectos No Lineales en Fibra Óptica	6
3. MECANISMO DINÁMICO	7
4. DISEÑO DEL PROCESO	8
4.1. REFERENCIAS	9

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

CNPq	–	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DS	–	Desenvolvimento Sustentável
ITV	–	Instituto Tecnológico Vale
MI	–	Mineração
UFOP	–	Universidade Federal de Ouro Preto

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Introducción

El vertiginoso avance de las tecnologías de comunicación ha llevado a una creciente demanda de sistemas ópticos de transmisión que sean eficientes y capaces de manejar grandes volúmenes de datos. En este contexto, las Redes Ópticas Pasivas con Multiplexación por Longitud de Onda (PON-WDM) han emergido como una solución eficiente para la transmisión de datos en redes de acceso.

Sin embargo, a medida que estas redes evolucionan para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda, se enfrentan a desafíos significativos. Entre ellos, la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) emerge como un fenómeno no lineal que puede afectar la integridad de las señales ópticas, especialmente en arquitecturas de redes Multi-Levelled Ring PON (MLR-PON).

Esta monografía se sumerge en la problemática de la FWM en redes MLR-PON y propone una solución innovadora: un mecanismo dinámico basado en la asignación de canales desigualmente espaciados. Este enfoque busca contrarrestar los efectos perjudiciales de la FWM, mejorando así la calidad y eficiencia de la transmisión óptica en redes MLR-PON.

A lo largo de este documento, se abordarán detalladamente los fundamentos teóricos de la FWM, la estructura y desafíos inherentes a las redes MLR-PON, y se presentará en profundidad el mecanismo dinámico propuesto. Esta investigación contribuye al desarrollo de estrategias avanzadas para la gestión del espectro óptico, promoviendo un mejor rendimiento y fiabilidad en las redes de próxima generación. El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: en la siguiente sección, se detalla el planteamiento del problema, identificando los desafíos actuales asociados a la FWM en redes MLR-PON. Posteriormente, se describen los objetivos, metodologías y alcances de la investigación, proporcionando un marco claro para el desarrollo del estudio. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, el análisis correspondiente y las conclusiones, destacando la relevancia y contribuciones de este trabajo en el campo de las redes ópticas de próxima generación.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El avance tecnológico en las comunicaciones ópticas ha permitido la transmisión de grandes cantidades de información a través de redes de fibra óptica. Estas redes,

pese a sus numerosas ventajas, enfrentan desafíos significativos derivados de fenómenos no lineales. Debido a que, a medida que la señal óptica se propaga por la fibra, hay una interacción entre la luz y el material de la fibra. Estos efectos no lineales son especialmente relevantes en los sistemas de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), donde múltiples canales de diferentes longitudes de onda se transmiten simultáneamente con poca separación entre ellos. Uno de los factores críticos es la intensidad óptica, puesto que, a medida que esta aumenta, los efectos no lineales se vuelven más pronunciados. La alta intensidad óptica generada por la propagación simultánea de numerosos canales de alta potencia en la fibra puede desencadenar en distintos fenómenos críticos que afectan la comunicación óptica. [1] [2].

Dentro de estos efectos no lineales, se tiene el caso de la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), el cual es un efecto óptico no lineal de tercer orden, que ocurre cuando dos o más señales ópticas de frecuencias centrales diferentes que se propagan en una misma fibra, que generan una mezcla entre ellas y generando nuevas componentes de frecuencia en la señal óptica o nuevas longitudes de onda, llamadas armónicos, que tienen una frecuencia igual a la suma o la diferencia de las frecuencias de las ondas originales. Por esta razón, la FWM es el mayor efecto de ruido en sistemas WDM que emplean Asignación de Canales Igualmente Espaciados (ECS, *Equal Channel Spacing*), ya que, dos o más longitudes de onda (o frecuencias) se combinan y producen varios productos de mezcla [3]. En las redes de multiplexación por longitud de onda pasiva reconfigurable (MLR-PON, *Multi-Level Resilience Passive Optical Network*), la FWM puede ser particularmente problemática, debido a que, las señales de los diferentes usuarios se superponen en el mismo espacio.

En la búsqueda de soluciones para reducir los efectos no lineales, como la FWM en sistemas ópticos WDM, se han propuesto diferentes enfoques, entre ellos, algoritmos de Asignación de Canales Desigualmente Espaciados (USCA, *Unequally Spaced Channel Assignment*). Estos algoritmos han demostrado ser prometedores en la supresión de la diafonía generada por las señales FWM.

Para contrarrestar el efecto de la FWM, es esencial una asignación eficiente de canales en la fibra óptica. Aquí es donde las reglas de Golomb entran en juego. Estas reglas, desarrolladas originalmente en el contexto de la teoría de números, definen conjuntos de números enteros con la particularidad de que todas las sumas o diferencias de dos elementos son distintas. Este principio resulta de especial interés para la asignación de canales, puesto que, al garantizar distancias distintas entre las frecuencias, se puede mitigar el efecto de la FWM.

Sin embargo, el uso de reglas de Golomb para la asignación de canales no es trivial. El proceso de búsqueda y definición de estas reglas es computacionalmente desafiante, y la tarea se torna aún más compleja a medida que se buscan conjuntos de mayor tamaño.

Con ello, surge la necesidad de proponer un mecanismo dinámico que, aprovechando las propiedades matemáticas de las reglas de Golomb, permita contrarrestar el efecto de la FWM en redes MLR-PON de manera eficiente y adaptable a diferentes condiciones y requerimientos de la red.

Para los canales WDM uniformemente espaciados, los términos del producto FWM generados caen sobre otros canales activos en la banda, lo que provoca una diafonía entre canales. El rendimiento puede mejorarse sustancialmente si se evita la genera-

ción de diafonía FWM en las frecuencias del canal. Es por esto que si la separación de frecuencia de cualquier par de canales de un sistema WDM óptico es diferente de la de cualquier otro par de canales, no se generarán señales de diafonía FWM en ninguna de las frecuencias del canal [3]. Por lo tanto, la supresión de la FWM puede tener implicaciones prácticas significativas en los sistemas WDM. Por ejemplo, una reducción en la interferencia de FWM puede permitir el uso de canales más densamente espaciados en el espectro óptico, lo que aumenta la capacidad del sistema. Además, la supresión de la FWM puede mejorar la calidad de la señal, reducir la tasa de errores de bit y aumentar la distancia de transmisión.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, se propone el diseño de un algoritmo soportado en la asignación de canales con espaciado desigual para contrarrestar la diafonía FWM en una red óptica.

En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible contrarrestar los efectos de la FWM utilizando un mecanismo dinámico basado en la asignación desigual de canales?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Proponer un mecanismo dinámico con enfoque en la asignación de canales desigualmente espaciados para contrarrestar los efectos de la mezcla de cuatro ondas en una arquitectura de red MLR-PON.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar a nivel de simulación y en un ambiente controlado una arquitectura de red MLR-PON.
- Definir un algoritmo matemático basado en un mecanismo dinámico para contrarrestar los efectos de la mezcla de cuatro ondas.
- Analizar comparativamente el efecto de la inclusión del mecanismo propuesto.

1.3. METODOLOGÍA

Con respecto a la metodología, se ha decidido utilizar la metodología en cascada, la cual es un enfoque secuencial que permite dividir el proyecto en fases bien definidas. Cada fase debe ser completada antes de avanzar a la siguiente, siguiendo un flujo de trabajo lineal. Aunque esta metodología es ampliamente utilizada en el desarrollo de software, también puede ser aplicada a otros tipos de proyectos.

Capítulo 2

CONCEPTOS Y TECNOLOGÍAS

Una vez definido el motivo y los objetivos del trabajo y antes de dar un enfoque directamente sobre el problema, es necesario saber la situación actual del mismo. Comprender el objetivo, las tecnologías y arquitecturas utilizadas, es esencial para conocer el contexto del problema. En este capítulo hablaremos sobre los conceptos principales que se van a tratar a lo largo del proyecto.

2.0.1. Four Wave Mixing (FWM)

La Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, por sus siglas en inglés *Four Wave Mixing*) es un fenómeno no lineal que se manifiesta en sistemas de fibra óptica. Este efecto surge cuando dos o más señales ópticas, con frecuencias centrales diferentes, coexisten y se propagan a lo largo de una misma fibra.

En condiciones normales, estas señales ópticas deberían viajar independientemente sin interactuar significativamente entre sí. Sin embargo, debido a las no linealidades inherentes a la fibra óptica, como la no linealidad Kerr, las señales pueden influenciarse mutuamente.

El proceso de FWM implica la generación de nuevas componentes de frecuencia en la señal óptica original. Específicamente, se generan sumas y diferencias de las frecuencias originales, dando lugar a componentes espectrales adicionales. Este fenómeno puede introducir interferencias indeseadas entre los canales de comunicación en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM), afectando negativamente la calidad de la señal y, en última instancia, la integridad de la transmisión de datos.

La FWM se convierte en un desafío significativo, especialmente en entornos donde se utilizan múltiples canales con frecuencias cercanas, como en sistemas WDM con canales igualmente espaciados. La supresión efectiva de la FWM es esencial para garantizar un rendimiento óptimo en las redes ópticas y maximizar la capacidad del sistema.

En el contexto de este trabajo, la propuesta de un mecanismo dinámico para contrarrestar la FWM en una red MLR-PON busca abordar este desafío, utilizando estrategias como la asignación de canales desigualmente espaciados y algoritmos optimizados para mitigar los efectos perjudiciales de la FWM.

2.0.2. Redes MLR-PON

Una Red de Acceso de Largo Alcance con Múltiples Longitudes de Onda (MLR-PON, por sus siglas en inglés *Long-Reach Multiple Wavelength Passive Optical Network*) es una variante evolucionada de la Red Óptica Pasiva (PON). A diferencia de las PON convencionales, las MLR-PON están específicamente diseñadas para proporcionar alcances extendidos, lo que las hace adecuadas para entornos donde se requiere cobertura en áreas geográficas más extensas.

Las redes MLR-PON logran este aumento en el alcance mediante el empleo de múltiples longitudes de onda en la transmisión de señales ópticas a través de la fibra. Cada longitud de onda puede considerarse como un canal independiente, lo que permite la transmisión simultánea de datos a diferentes velocidades y servicios.

Este enfoque de múltiples longitudes de onda no solo extiende el alcance de la red, sino que también proporciona una mayor flexibilidad y capacidad de ancho de banda. Además, las MLR-PON son compatibles con servicios de voz, datos y video, ofreciendo una solución integral para las demandas crecientes de conectividad en entornos residenciales y empresariales.

La implementación de MLR-PON se ha vuelto crucial para superar las limitaciones de distancia asociadas con las PON tradicionales, especialmente en áreas geográficas dispersas. En el contexto de este trabajo, la propuesta de un mecanismo dinámico para contrarrestar la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) se enfoca en optimizar el rendimiento de las MLR-PON, abordando los desafíos específicos asociados con la interferencia no lineal en este tipo de redes.

2.0.3. Asignación de Canales Desigualmente Espaciados

La asignación de canales desigualmente espaciados es una estrategia de gestión del espectro en sistemas de transmisión óptica, donde las longitudes de onda utilizadas para la transmisión no siguen una separación uniforme. En contraste con la asignación de canales igualmente espaciados, donde la distancia entre las longitudes de onda adyacentes es constante, la asignación desigual implica una distribución no uniforme de las longitudes de onda a lo largo del espectro óptico.

Esta técnica se utiliza para abordar problemas específicos relacionados con la interferencia y la diafonía en sistemas ópticos, especialmente en entornos de multiplexación por división de longitud de onda (WDM). La asignación desigual de canales puede optimizarse para minimizar la interferencia no lineal, como la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, por sus siglas en inglés *Four Wave Mixing*), que puede ocurrir cuando las señales ópticas tienen intensidades significativas y se propagan simultáneamente en la fibra.

Esta estrategia permite adaptar la distribución de las longitudes de onda a las características específicas de la red óptica, teniendo en cuenta las propiedades de transmisión de la fibra y los efectos no lineales asociados. Al asignar desigualmente las longitudes de onda, se pueden evitar ciertos patrones que contribuyen a la interferencia no deseada, mejorando así el rendimiento del sistema.

En el contexto de este trabajo, la propuesta de un mecanismo dinámico para contrarrestar la FWM en una red MLR-PON se centra en la asignación de canales desigualmente espaciados como una estrategia clave para mitigar los efectos no lineales y mejorar la calidad de la transmisión en este tipo de arquitecturas.

2.0.4. Reglas de Golomb

Las reglas de Golomb, y su generalización, las reglas g-Golomb, son conjuntos de enteros positivos con propiedades específicas utilizadas en la asignación de canales en sistemas ópticos.

2.0.5. Algoritmos para Asignación de Canales

Existen diversos algoritmos para asignar canales en redes ópticas, algunos se centran en la optimización de la distancia entre canales.

2.0.6. Simulación por Agentes

El uso de técnicas de simulación por agentes permite modelar y simular el comportamiento dinámico de la red.

2.0.7. Mecanismos Dinámicos

Un mecanismo dinámico implica la capacidad de adaptarse y cambiar en respuesta a las condiciones cambiantes de la red.

2.0.8. Efectos No Lineales en Fibra Óptica

Además de la FWM, otros efectos no lineales como la dispersión y la atenuación deben considerarse al diseñar una red óptica.

Capítulo 3

MECANISMO DINÁMICO

Capítulo 4

DISEÑO DEL PROCESO

4.1. REFERENCIAS

Bibliografía

- [1] J. Toulouse, «Optical Nonlinearities in Fibers: Review, Recent Examples, and Systems Applications,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, n.º 11, págs. 3449-3465, 2005.
- [2] S. P. Singh y N. Sing, *Nonlinear effects in optical fibers: Origin, management and applications*, Department of Electronics and Communication University of Allahabad, 2007.
- [3] S. Bansal, «A Comparative Study of Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms in Search of Near-to-optimal Golomb Rulers for the FWM Crosstalk Elimination in WDM Systems,» Electronics y Communication Engineering Department, Punjab Engineering College, 2019.