

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



VŨ HÀ KHOA

**NGHIÊN CỨU XUYỀN NHIỀU GIỮA CÁC LỖI
TRONG SỢI QUANG ĐA LỖI (MCF)**

LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

Hà Nội – 2021

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



VŨ HÀ KHOA

**NGHIÊN CỨU XUYÊN NHIỄU GIỮA CÁC LỖI
TRONG SỢI QUANG ĐA LỖI (MCF)**

CHUYÊN NGÀNH: Kỹ thuật viễn thông

MÃ SỐ : 8.52.02.08

LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT (KỸ THUẬT VIỄN THÔNG)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: TS. CAO HỒNG SƠN

Hà Nội – 2022

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi.

Các số liệu, kết quả mô phỏng nêu trong luận văn là trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Hà Nội, tháng 5 năm 2022

Tác giả luận văn

VŨ HÀ KHOA

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến các thầy cô, các cán bộ đã và đang công tác tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông đã cho em có được một môi trường học tập hiệu quả. Học viện là nơi đào tạo nhiều tài năng với đội ngũ cán bộ, giảng viên đầy nhiệt huyết và dày dặn kinh nghiệm, nơi có điều kiện học tập cho sinh viên, học viên tốt nhất với cơ sở vật chất khang trang, hiện đại. Tôi chân thành cảm ơn các thầy, cô trong khoa Đào Tạo Sau Đại Học, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông Hà Nội đã tận tình giúp đỡ tôi trong quá trình hai năm tôi học tập và nghiên cứu.

Để hoàn thành luận văn này tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến thầy giáo TS.Cao Hồng Sơn đã tận tình hướng dẫn, chỉ bảo nhiều kiến thức, tài liệu và góp ý trong suốt quá trình thực hiện để tôi hoàn thiện luận văn này.

Bên cạnh đó, tôi không thể quên những tình cảm, sự động viên, giúp đỡ của gia đình, bạn bè, các anh chị trong khóa đã luôn ở bên, tạo điều kiện tốt nhất có thể.

Trong quá trình thực hiện luận văn không thể tránh khỏi những thiếu sót. Rất mong nhận được sự thông cảm, góp ý quý giá từ thầy cô và các anh chị để tôi có thể hoàn thiện hơn.

Cuối cùng, xin kính chúc các thầy cô, gia đình và các anh chị một sức khỏe dồi dào, thành công và nhiệt huyết trong sự nghiệp. Tôi xin chân thành cảm ơn!

Hà Nội, ngày 08 tháng 05 năm 2022

VŨ HÀ KHOA

MỤC LỤC

MỤC LỤC	i
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT	iii
DANH MỤC BẢNG BIỂU	vi
DANH MỤC HÌNH ẢNH.....	vii
MỞ ĐẦU	1
Chương 1: Tổng quan về sợi đa lõi (MCF)	2
1.1 Giới thiệu chung	2
1.2 Sợi quang cho hệ thống SDM.....	3
1.2.1 Mô hình SDM.....	3
1.2.2 Khái quát sợi quang.....	9
1.3 Xuyên nhiễu trong MCF.....	11
1.3.1 Ước tính xuyên nhiễu	11
1.3.2 Hạn chế xuyên nhiễu	13
Chương 2: Các mô hình phân tích cho MCF.....	15
2.1 Mô hình sắp xếp các lõi một vòng.....	16
2.1.1 Mô hình một vòng	16
2.1.2 Mô hình một vòng và lõi trung tâm.....	18
2.2 Mô hình sắp xếp các lõi đa vòng.....	19
2.2.1 Mô hình hai vòng giống nhau.....	19
2.2.2 Mô hình hai vòng và lõi trung tâm	21
2.2.3 Mô hình hai vòng khác nhau	22
2.2.4 Mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm.....	24
2.2.5 Mô hình ba vòng khác nhau	26

2.2.6 Mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm.....	28
2.2.7 Mô hình lục giác.....	30
Chương 3: Khảo sát và đánh giá xuyên nhiễu giữa các lõi MCF.....	34
3.1 Lược đồ đánh giá xuyên nhiễu	34
3.2 Mô tả bài toán.....	35
3.3 Các kết quả tính toán số và phân tích đánh giá xuyên nhiễu.....	36
3.3.1 $CD = 300 \mu m$	36
3.3.2 $CD = 260 \mu m$	39
3.3.3 $CD = 125 \mu m$	46
KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT	48
1. Kết quả đạt được	48
2. Hướng phát triển	48
TÀI LIỆU THAM KHẢO	50

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Từ/Cụm từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
BER	Bit Error Rate	Tỷ lệ lỗi bit
CD	Cladding Diameter	Đường kính lớp vỏ (bọc)
CMT	Coupled-Mode Theory	Lý thuyết ghép mode
CPT	Coupled-Power Theory	Lý thuyết ghép công suất
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia bước sóng mật độ cao
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Bộ khuếch đại sợi quang pha Erbium
FTTH	Fiber to the Home	Cáp quang đến hộ gia đình
LP	Linearly Polarized	Phân cực tuyến tính
MCF	Multi-core Fiber	Sợi đa lõi
MIMO	Multiple In Multiple Out	Nhiều đầu vào nhiều đầu ra
MMF	Multi-mode fiber	Sợi đa mode
MMI	Multi-mode Interference	Nhiều đa mode
OCT	Outer cladding thickness	Độ dày của lớp vỏ ngoài
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu quang
PCF	Photonic Crystal Fiber	Sợi tinh thể quang tử
PDM	Polarization-Division Modulation	Điều chế phân cực
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Điều chế biên độ cầu phương
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying	Khóa dịch pha cầu phương
SDM	Space-Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo không gian
SMF	Single-mode Fiber	Sợi đơn mode
SNR	Signal-to-noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu
SOI	Silicon on insulator	Silicon trên chất cách điện
TDM	Time-Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo thời gian
WDM	Wavelength-Division Multiplexing	Ghép kênh phân chia theo bước sóng

DANH MỤC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Tiếng Anh	Tiếng Việt
λ	Wavelength	Bước sóng
Λ	Core pitch _{a1}	Khoảng cách giữa các lõi
a_1	Core radius	Bán kính lõi
a_2	Cladding radius	Bán kính lớp vỏ
a_3	Trench radius	Bán kính rãnh
R_b	Bending Radius	Bán kính uốn
L	Fiber Length	Chiều dài sợi quang
XT	Inter – core crosstalk	Xuyên nhiễu giữa các lõi
P(Z)	Power at the output of the interference core	Công suất đầu ra của lõi gây nhiễu
P'(Z)	Power at the output of the reference core	Công suất đầu ra của lõi tham chiếu
β_m	Propagation Constant	Hằng số truyền
k_{mn}	Mode coupling coefficient	Hệ số ghép cặp
\bar{h}_{mn}	Power coupling coefficient	Hệ số ghép công suất
N	Number of cores in the Layout	Số lượng lõi trong sợi
M_1	Number of cores in the Outer Ring	Số lượng lõi ở vòng ngoài
M_2	Number of cores in the second most outward ring	Số lượng lõi lân cận ở vòng thứ hai so với vòng gần

M_3	Number of cores in the third most outward ring	Số lượng lõi lân cận ở vòng thứ ba so với vòng gần
r_1	Radius of the Outer Circle	Bán kính của vòng tròn ngoài
r_2	Radius of the second most outward circle	Bán kính vòng tròn thứ hai từ tâm
r_3	Radius of the third most outward circle	Bán kính vòng tròn thứ ba từ tâm
Λ_1	Distance between Outer Cores	Khoảng cách giữa các lõi vòng ngoài
Λ_2	Distance between cores on the second most outward circle	Khoảng cách giữa các lõi trên vòng thứ hai từ tâm
Λ_3	Distance between cores on the third most outward circle	Khoảng cách giữa các lõi trên vòng thứ ba từ tâm
Λ_x	Distance between cores in different rings	Khoảng cách giữa các vòng khác nhau

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1: Các tham số trong mô hình một vòng	17
Bảng 2.2: Các tham số trong mô hình một vòng và lõi trung tâm	19
Bảng 2.3: Các tham số trong mô hình hai vòng giống nhau	20
Bảng 2.4: Các tham số trong mô hình hai vòng và lõi trung tâm.....	22
Bảng 2.5: Các tham số trong mô hình hai vòng khác nhau.....	24
Bảng 2.6: Các tham số trong mô hình hai khác nhau với lõi trung tâm.....	26
Bảng 2.7: Các tham số trong mô hình ba vòng khác nhau	28
Bảng 2.8: Các tham số trong mô hình ba vòng với lõi trung tâm	30
Bảng 2.9: Các tham số trong mô hình lục giác	32
Bảng 3.1: Các tham số cấu trúc của sợi MCF nghiên cứu	36

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1: Sơ đồ hệ thống SDM [3]	4
Hình 1.2: Bộ ghép kênh không gian bó sợi chung ghép N điểm đầu vào từ SMF thành một sợi quang một vài mode sau khi đưa vào các tấm dịch pha phù hợp [3].	5
Hình 1.3: Đèn quang tử sử dụng phần vuốt nhỏ lại các sợi quang đơn mode [3]	6
Hình 1.4: Chip SOI sử dụng ghép ba đầu vào từ SMF thành (a) MCF hoặc (b) MMF [3]	7
Hình 1.5: Kỹ thuật bơm EDFA 32 lõi [3]	9
Hình 1.6: Ví dụ MCF có bảy lõi hỗ trợ rãnh	10
Hình 1.7: Tác động của xuyên nhiễu trong băng tần đối với các định dạng QAM; (a, b): mô hình xuyên nhiễu; (c): Monte Carlo mô phỏng các nhiễu tối thiểu 4-, 16-, 64- và 256-QAM [8]	13
Hình 2.1: Các cách sắp xếp trong sợi quang	16
Hình 2.2: Các lõi trong mô hình một vòng	16
Hình 2.3: Các lõi trong mô hình một vòng và lõi trung tâm	18
Hình 2.4: Các lõi trong mô hình hai vòng	19
Hình 2.5: Các lõi trong mô hình hai vòng và lõi trung tâm	21
Hình 2.6: Các lõi trong mô hình hai vòng khác nhau	23
Hình 2.7: Các lõi trong mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm	25
Hình 2.8: Các lõi trong mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm	27
Hình 2.9: Các lõi trong mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm	29
Hình 2.10: Các lõi trong mô hình lục giác	31
Hình 2.11: Các mô hình lục giác màu (trong đó các lõi được đánh dấu các lần lặp khác nhau)	32
Hình 3.1: Sơ đồ khối lược đồ đánh giá xuyên nhiễu	34
Hình 3.2: Sự phát triển của khả năng truyền dẫn theo từng năm	35
Hình 3.3: Xuyên nhiễu với số lượng lõi tương ứng - $CD = 300 \mu m$	37
Hình 3.4: Mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm, 37 lõi	37
Hình 3.5: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng - Ba vòng khác nhau, $CD = 300 \mu m$	38
Hình 3.6: Mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm – 25 lõi, $CD = 300 \mu m$	38
Hình 3.7: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng	39
Hình 3.8: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng - Mô hình một vòng	39

Hình 3.9: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng – Mô hình một vòng với lõi trung tâm.....	40
Hình 3.10: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng - Mô hình hai vòng.....	41
Hình 3.11: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng - Mô hình hai vòng với lõi trung tâm.....	41
Hình 3.12: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng – Mô hình hai vòng khác nhau.....	42
Hình 3.13: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng – Mô hình hai vòng khác nhau lõi tâm.....	42
Hình 3.14: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng – Mô hình ba vòng khác nhau.....	43
Hình 3.15: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng – Mô hình ba vòng khác nhau lõi trung tâm	43
Hình 3.16: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng – Mô hình lục giác.....	44
Hình 3.17: Xuyên nhiễu so với số lượng lỗi - $CD = 260 \mu m$	44
Hình 3.18: Mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm – 25 lõi – $CD = 260 \mu m$	45
Hình 3.19: Xuyên nhiễu với số lỗi tương ứng.....	46
Hình 3.20: Mô hình một vòng, 4 lõi – $CD = 125 \mu m$	47
Hình 3.21: Mô hình một vòng, 5 lõi – $CD = 125 \mu m$	47

MỞ ĐẦU

Hiện nay, khả năng truyền dẫn của các hệ thống truyền thông quang dựa trên ghép kênh phân chia theo thời gian (TDM) và ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) sử dụng các sợi quang đơn mode (SMF) đang đạt đến giới hạn khoảng vài trăm Tbit/s trên mỗi sợi do các tính chất phi tuyến của sợi và băng thông khuếch đại quang. Để đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng nhanh của lưu lượng dữ liệu trên toàn cầu và để khắc phục tình trạng suy giảm dung lượng, một công nghệ ghép kênh mới sử dụng các sợi quang mới là rất cấp thiết. Ghép kênh phân chia theo không gian (SDM) là một giải pháp đầy hứa hẹn để giải quyết giới hạn dung lượng của các hệ thống truyền thông quang hiện tại dựa trên sợi đơn mode. Trong số các mô hình SDM đề xuất, mô hình SDM dựa trên sợi quang đa lõi (MCF) đã chứng tỏ hiệu quả trong việc gia tăng đáng kể khả năng truyền dẫn trên mỗi sợi quang với độ phức tạp hệ thống ít nhất như đã được chứng minh trong một số thực nghiệm mới nhất về truyền tải dung lượng siêu cao vượt tốc độ Pbit/s.

Tuy nhiên, để tăng khả năng truyền dẫn của MCF thì cần phải tăng tổng số lõi trong MCF, trong khi phải giữ cho xuyên nhiễu (XT) giữa các lõi ở mức thấp vì nó làm suy giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu quang (OSNR) của tín hiệu dữ liệu, làm hạn chế các định dạng điều chế sử dụng và làm hạn chế cự li truyền dẫn. Do đó, việc nghiên cứu về xuyên nhiễu giữa các lõi trong sợi MCF là hết sức cần thiết. Đây cũng là lý do em chọn đề tài “*Nghiên cứu xuyên nhiễu giữa các lõi trong sợi quang đa lõi*” cho luận văn của mình.

Nội dung luận văn bao gồm các phần:

Chương 1: Tổng quan về sợi đa lõi (MCF)

Chương 2: Các mô hình phân tích cho MCF

Chương 3: Khảo sát và đánh giá xuyên nhiễu giữa các lõi MCF

Chương 1: Tổng quan về sợi đa lõi (MCF)

Để vượt qua giới hạn về dung lượng của các SMF, ghép kênh phân chia theo không gian phải được sử dụng để khai thác chiều vật lý cuối cùng là không gian. Một số mô hình SDM được khảo sát là dựa trên sợi một vài mode (FMF), sợi đa mode (MMF), sợi đa lõi (MCF). Nếu dung lượng của mỗi kênh không gian (mode trong trường hợp MMF hoặc lõi trong trường hợp MCF) được giả định là giống nhau, thì dung lượng tổng của hệ thống SDM tăng lên đúng bằng số lượng của lõi/mode trong MCF. Mặt khác, nếu công suất quang trên mỗi lõi MCF được giữ giống như trong SMF, thì mật độ phổ (SE) trong MCF có thể gấp đúng bằng số lõi của sợi MCF. Do đó, SDM là một phương pháp hiệu quả để tăng dung lượng trên mỗi sợi. Động lực để áp dụng MCF/FMF thay cho các bó SMF dựa trên giả thiết là các hệ thống SDM trong tương lai có khả năng sử dụng các phần tử đa lõi (MC)/vài mode (FM) tiết kiệm năng lượng, cũng như siêu kênh SDM cho mạng SDM và giao diện tốc độ cao hơn, những tiềm năng đang được nghiên cứu chuyên sâu để giảm chi phí/bit, năng lượng/bit và không gian/bit.

1.1 Giới thiệu chung

Trong vài thập kỷ qua, nhu cầu truyền tải dữ liệu của các mạng truy cập và đường trục ngày càng tăng lên theo cấp số nhân. Trong những thập kỷ gần đây, nhu cầu về lưu lượng truy cập mạng không ngừng tăng lên, cho thấy tốc độ tăng mạnh từ 20% đến 60% mỗi năm trong thập kỷ qua. Các nhà nghiên cứu dự báo nhu cầu này không có dấu hiệu dừng lại và có thể tăng nữa. Sự xuất hiện của các công nghệ và ứng dụng mới, thay đổi tốc độ và dung lượng chúng ta tiêu thụ dữ liệu, kết hợp với sự gia tăng gần đây của giao tiếp giữa máy và máy và sự ra đời của cái gọi là “Internet of Things”, đã khiến nhu cầu tăng vọt đến mức chưa từng có. Vượt ngoài sức tưởng tượng của các kỹ sư mạng.

Mặc dù các công nghệ như ghép kênh phân chia theo bước sóng (DWDM) và truyền quang liên tục cho phép tăng dung lượng lên gấp nhiều lần trong các hệ thống quang, các kỹ sư vẫn phải tìm cách để đáp ứng nhu cầu lưu lượng truy cập tăng theo cấp số nhân đang thử nghiệm ngày nay. Hơn nữa, các hệ thống hiện tại đang nhanh chóng đạt đến giới hạn về lượng thông tin tối đa có thể được truyền qua một kênh nhất định, dẫn đến sự suy giảm dung lượng.

Để khắc phục giới hạn dung lượng trong hạ tầng thông tin cáp quang hiện có, việc tăng hiệu quả không gian trong tiết diện cáp quang sẵn có là giải pháp hữu hiệu nhất. Sợi

đa lõi (MCF), trong phạm vi ghép kênh phân chia không gian (SDM), tạo nên một giải pháp đầy hứa hẹn cho vấn đề hiệu quả nói trên.

Thực hiện SDM, với việc sử dụng MCF không tách rời, bao gồm một giải pháp đơn giản và mạnh mẽ không yêu cầu xử lý tín hiệu nhiều đầu ra phức tạp ở phía máy thu. Tuy nhiên, vấn đề chính và trọng tâm của luận văn này là có thể tăng số lượng lõi bên trong sợi quang trong khi giữ cho xuyên nhiễu giữa các lõi (XT) ở mức thấp.

Lưu ý rằng việc giữ cho xuyên nhiễu ở mức thấp không chỉ để cho phép dữ liệu đạt được khoảng cách xa hơn, mà còn để có thể sử dụng các định dạng điều chế đa cấp cao.

Các chiến lược khác nhau đã được sử dụng để đạt được điều này. Việc sử dụng một rãnh, để giảm suy hao do sợi bị uốn cong trong các ứng dụng FTTH, đã được chứng minh là rất hiệu quả giảm xuyên nhiễu trong MCF khi áp dụng cho mỗi lõi; tạo ra cái gọi là cấu trúc "hỗ trợ rãnh"[1].

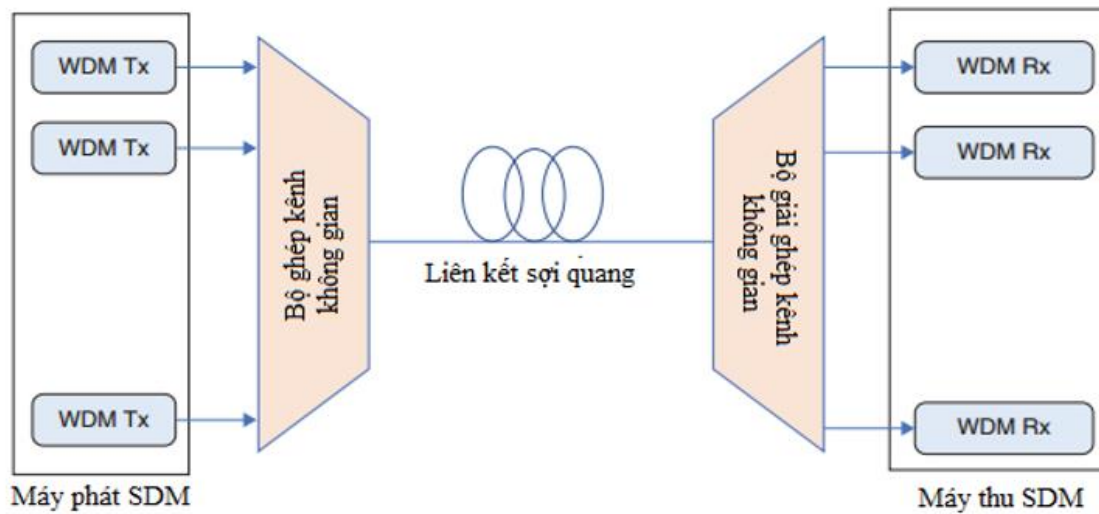
Bằng cách sử dụng các cấu trúc hỗ trợ rãnh này, luận văn sẽ phân tích sợi đa lõi với các bố trí lõi khác nhau nhằm giảm thiểu xuyên nhiễu trong sợi quang. Cuối cùng, với mục đích tối đa hóa công suất của sợi quang, trong luận văn đã mô tả một phương pháp để sắp xếp không gian các lõi giống hệt nhau bên trong MCF bằng cách sử dụng các bố cục đã được đề xuất trước đó.

1.2 Sợi quang cho hệ thống SDM

1.2.1 Mô hình SDM

SDM sử dụng kích thước không gian để phân phối các luồng dữ liệu khác nhau đồng thời bằng cách tạo các kênh không gian song song. Công nghệ này thường được sử dụng trong hệ thống đa đầu ra (MIMO) đa đầu vào, kết hợp ít nhất hai ăng ten ở phía máy phát và ít nhất hai ăng ten ở phía máy thu. Và xử lý tín hiệu MIMO đã được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền dẫn quang kết hợp hiện tại với ghép kênh phân chia phân cực (PDM) trên các sợi đơn mode tiêu chuẩn. Sử dụng sợi đa lõi và chế độ đa biến, có thể đạt được khoảng cách truyền đường dài và tốc độ dữ liệu tốc độ cao với SDM mật độ cao. Ghép kênh phân chia phân cực (PDM) tăng gấp đôi dung lượng truyền so với hệ thống phân cực đơn. Việc xây dựng các định dạng điều chế bốn chiều có thể được thiết kế để tối ưu hóa hiệu suất truyền dẫn quang phổ với chi phí thấp [2].

1.2.1.1 Mô hình hệ thống SDM



Hình 1.1: Sơ đồ hệ thống SDM [3]

Từ hình 1.1 cho thấy nhiều tín hiệu WDM được kết hợp lại với nhau bằng cách sử dụng bộ ghép kênh không gian, được truyền qua một liên kết sợi quang và phân tách bằng bộ giải ghép kênh không gian ở đầu thu. Liên kết sợi quang là một sợi quang cung cấp các đường truyền song song sử dụng sợi quang đa lõi (MCF) và sợi quang đa mode (MMF). Với sợi quang đa lõi sẽ có nhiều lõi được đặt trong cùng một lớp bọc. Khi tất cả các lõi của MCF cách nhau đủ xa để các mode của chúng không chồng lên nhau, mỗi lõi cung cấp một đường dẫn khác nhau mà không có xuyên nhiễu giữa các lõi. MCF tương đương với một bó sợi quang đơn mode (SMF) và việc sử dụng nó có thể làm tăng dung lượng hệ thống lên một hệ số tương đương với số lõi. Sợi quang đa mode (MMF) chỉ có một lõi kích thước lớn có khả năng hỗ trợ nhiều mode, tất cả đều có thể được sử dụng để truyền song song các tín hiệu WDM khác nhau. Tuy nhiên với MMF các mode của sợi quang đều chia sẻ cùng một lõi, các đường dẫn song song trong các sợi đó không được tách biệt về mặt vật lý. Trong một sợi quang lý tưởng, tính trực giao của các mode khác nhau sẽ đảm bảo rằng các mode khác nhau không ghép cặp với nhau, mặc dù chúng chia sẻ cùng một đường dẫn vật lý. Trong thực tế, sự chồng chéo các mode của MMF luôn xảy ra theo kiểu ngẫu nhiên do các biến thể về hình dạng và kích thước của lõi sợi quang dọc theo chiều dài của nó và nó dẫn đến xuyên nhiễu không mong muốn. Mức độ kết hợp giữa hai mode bất kỳ phụ thuộc tỷ lệ nghịch vào sự khác biệt trong hằng số truyền của chúng; nhỏ hơn là sự khác biệt, mạnh hơn trở thành khớp nối. Do đó, hiện nay chủ yếu tập trung nghiên cứu sợi MCF [3].

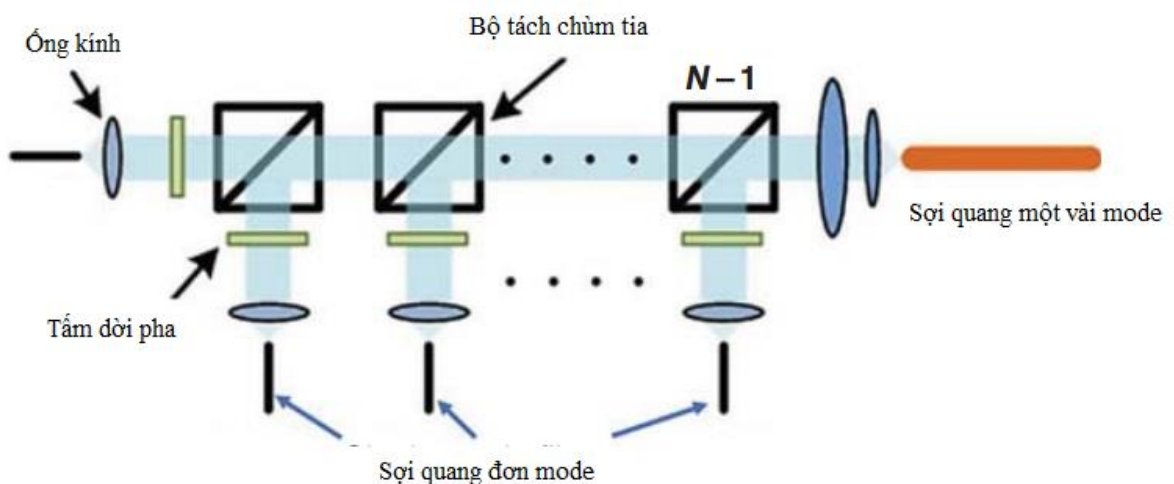
1.2.1.2 Các thành phần trong hệ thống SDM

Các bộ ghép/tách kênh không gian bao gồm: bộ ghép kênh không gian bó sợi, bộ ghép kênh dựa trên sợi quang, bộ ghép kênh tích hợp.

a) Bộ ghép kênh không gian bó sợi

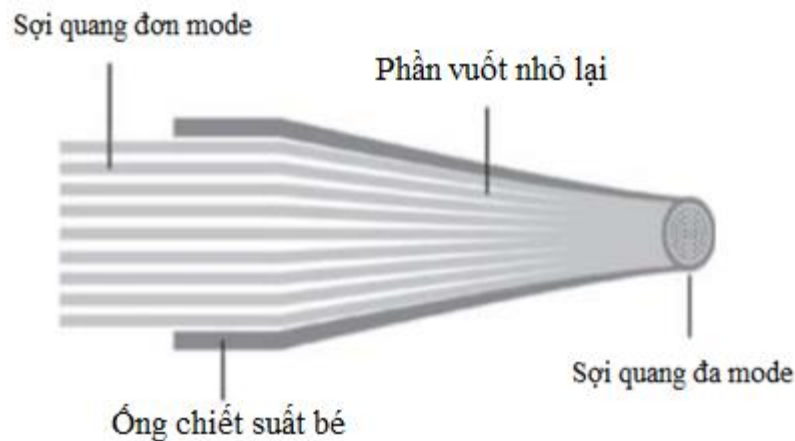
Một bộ ghép kênh không gian cho MCF gồm có gương, lăng kính và thấu kính có thể được sử dụng để hướng các đầu vào từ SMF tới các lõi khác nhau của MCF. Một bộ ghép kênh như vậy đã được sử dụng trong một thí nghiệm năm 2012 để kết nối các đầu vào khác nhau đến từ bảy SMF vào các lõi khác nhau của MCF bảy lõi. Nó thể hiện suy hao xen khoảng 0,6 dB với mức xuyên nhiễu dưới -50 dB. Nhiều lăng kính đã được sử dụng trong một thí nghiệm khác vào năm 2012 để ghép 19 chùm tia đầu vào thành MCF 19 lõi, nhưng bộ ghép kênh không gian tương đối cồng kềnh [3].

Đối với MMF vì tất cả các đầu vào phải được đưa vào lõi đơn của MMF để chúng kích thích các mode khác nhau của cùng một sợi quang. Việc sử dụng các tấm pha cho các mode bậc cao của sợi quang đã được đề xuất ngay từ năm 1994. Ý tưởng sử dụng bản chất không đồng đều của pha quang cho các mode như vậy. Hình 1.2 cho thấy thiết kế của một bộ ghép kênh quang số lượng lớn, có khả năng ghép N chùm đầu vào đến từ các SMF thành một sợi N -mode, sau khi đưa vào các dịch pha phù hợp bằng cách sử dụng các tấm pha khác nhau. Thiết kế này có suy hao xen lớn vì sử dụng bộ chia.



Hình 1.2: Bộ ghép kênh không gian bó sợi chung ghép N điểm đầu vào từ SMF thành một sợi quang một vài mode sau khi đưa vào các tấm dịch pha phù hợp [3].

Vì cổng đầu vào và cổng đầu ra của bộ ghép kênh không gian đều kết nối với sợi quang, nên có thể sử dụng một thiết bị với suy hao xen thấp nếu bộ ghép kênh được chế tạo chỉ sử dụng sợi. Ngay từ năm 2005, người ta đã chỉ ra rằng một thiết bị như vậy có thể được chế tạo bằng cách cắt nhỏ một đoạn SMF để tạo thành MCF, hoặc MMF, ở đầu ra. Kể từ đó, các thiết bị như vậy đã được phát triển rộng rãi và được gọi là đèn quang tử.



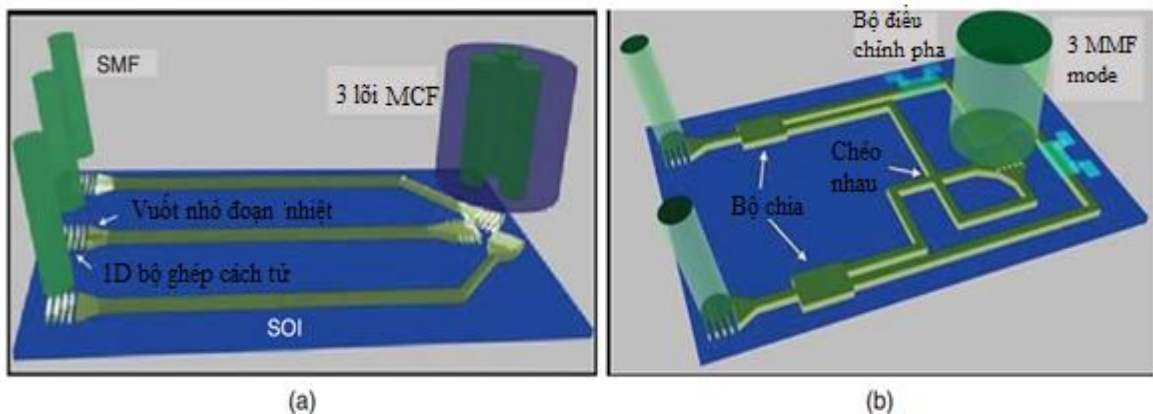
Hình 1.3: Đèn quang tử sử dụng phân vuốt nhỏ lại các sợi quang đơn mode [3]

Hình 1.3 cho thấy cách tạo đèn quang tử từ một bó SMF, được bao bọc bên trong một ống dẫn thủy tinh có chiết suất thấp hơn một chút so với lớp bọc của SMF, có thể giảm dần cho đến khi tất cả các lõi sát gần nhau để giống như MCF và sau đó hợp nhất để tạo thành một khối lớn duy nhất. Giai đoạn ban đầu để ghép kênh không gian thành MCF và giai đoạn sau được sử dụng để ghép kênh không gian thành một MMF. Trong cả hai trường hợp, làm thon nhỏ được thực hiện bằng cách đốt nóng toàn bộ cấu trúc để làm mềm kính và kéo ở một đầu của nó. Kích thước của bó ban đầu phụ thuộc vào số lượng SMF. Vì đường kính lớp bọc của mỗi SMF được cố định ở $125\ \mu\text{m}$, đường kính ban đầu khoảng 1mm và việc thu nhỏ lại làm giảm khoảng một hệ số 10. Trong một biến thể gần đây, việc sử dụng ống mao dẫn đã được dùng và một đầu bó sợi được đốt nóng để gắn tất cả các sợi với nhau. Bó sợi nóng chảy được thuôn nhỏ, cắt nhỏ và nối thành sợi.

Nhiều SMF (không có lớp phủ polyme của chúng) được đưa vào các lỗ gần tâm, trước khi nó được làm nóng và kéo thành sợi. Tất cả các SMF hợp nhất với nhau để tạo thành lõi rộng của MMF được bao quanh bởi một lớp vỏ hình lõi không khí. Theo một cách tiếp cận khác, bó SMF được thay thế bằng cấu trúc kiểu MCF, chứa nhiều vùng chỉ số cao đóng vai trò là lõi. Đường kính ban đầu $230\ \mu\text{m}$ của cấu trúc này được giảm dần để

tạo thành MMF với lõi có đường kính $50\text{ }\mu\text{m}$. Cách tiếp cận thứ ba là sử dụng một PCF ba lõi được làm nóng sao cho ba lõi hợp nhất với nhau để tạo thành một lõi kích thước lớn duy nhất của MMF với một lớp vỏ lõi không khí. Việc hợp nhất các lõi được thực hiện trên một đoạn mà không làm giảm nhiều PCF. Các dịch chuyển pha khác nhau được thực hiện bởi các mode khác nhau trong vùng giảm dần do các hằng số truyền của chúng quy định. Các mô phỏng số đã được sử dụng để chỉ ra rằng sự đóng gói ban đầu của các SMF và hình dạng của các điểm sáng tới đóng một vai trò quan trọng trong hiệu suất của các bộ ghép kênh như vậy. Ban đầu, các hằng số lan truyền trùng nhau đối với các SMF giống hệt nhau. Trong vùng thu nhỏ, các lõi tiến lại gần hơn và hằng số truyền của chúng trở nên khác nhau. Cuối cùng, khi các lõi hợp nhất với nhau để tạo thành lõi đơn của MMF, các hằng số truyền phát triển thành các hằng số được liên kết với các mode của MMF này [3].

Các mô phỏng số cho thấy rằng suy hao xen trung bình có thể được giữ dưới $0,5\text{ dB}$ với thiết kế thích hợp của đèn quang tử. Các thiết bị dựa trên sợi quang như vậy đã được phát triển rộng rãi sau năm 2012 và đạt đến giai đoạn thương mại ngay sau đó.



Hình 1.4: Chip SOI sử dụng ghép ba đầu vào từ SMF thành (a) MCF hoặc (b) MMF [3]

b) Bộ ghép kênh tích hợp

Các mạch tích hợp quang tử dựa trên chip silic trên bộ cách ly (SOI) đã tiến bộ đáng kể trong những năm gần đây. Việc sử dụng công nghệ SOI để thiết kế bộ ghép kênh không gian được nghiên cứu thành công và chip SOI tạo ra một bộ ghép kênh nhỏ gọn có khả năng gửi đầu vào từ một số SMF vào MCF hoặc MMF. Hai ví dụ được thể hiện trong hình 1.4. Trong các thiết bị này, nhiều đầu vào đến từ các SMF được ghép nối với chip bằng cách sử dụng bộ ghép cách tử và hướng về đầu ra thông qua ống dẫn sóng đơn mode và các thành phần tích hợp khác như bộ ghép định hướng và bộ chuyển pha. Ở đầu ra, một

hoặc nhiều bộ ghép cách tử được sử dụng để ghép ánh sáng vào các lõi khác nhau của MCF hoặc các mode khác nhau của MMF.

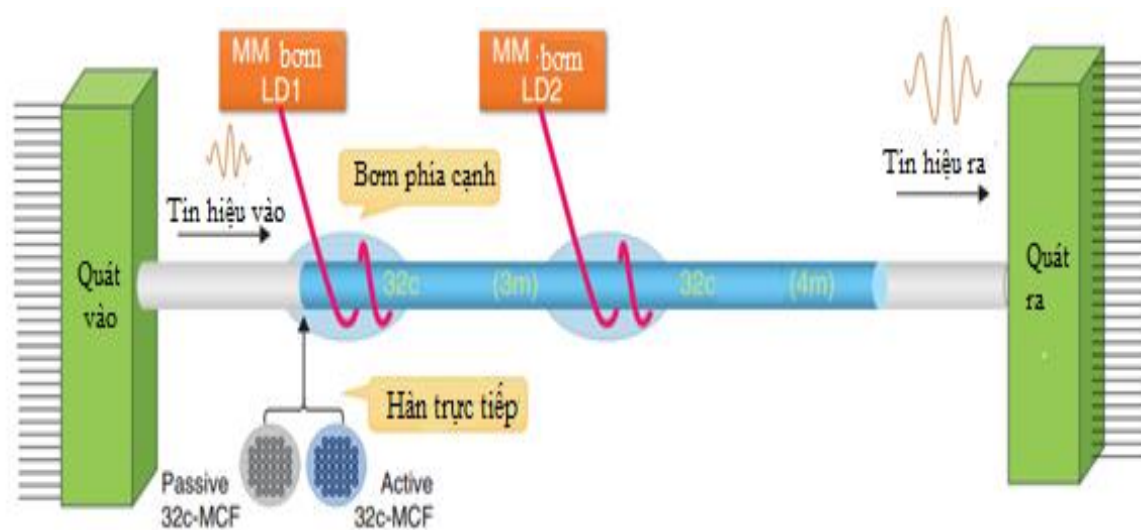
Thiết kế MCF trong *hình 1.4(a)* ba ống dẫn sóng silicon đưa các đầu vào của SMF lại gần nhau gần MCF, nơi một bộ ghép cách tử chuyển mỗi đầu vào đến một lõi khác nhau của MCF. Trường hợp MMF được trình bày trong *hình 1.4(b)* phức tạp hơn vì chip SOI cần phải xây dựng ma trận truyền được cho trong. Điều này được thực hiện thông qua hai bộ ghép nhiều đa mode (MMI) hoạt động như bộ chia và hai phần điều chỉnh pha trong đó phần tử gia nhiệt được sử dụng để thay đổi chiết suất cần thiết cho sự dịch chuyển pha. Bộ ghép kênh không gian nhỏ gọn cũng có thể được chế tạo bằng kỹ thuật dựa trên laser, trong đó các ống dẫn sóng được ghi trực tiếp bên trong tấm kính bằng cách sử dụng xung femto giây ($10^{-15}s$) cường độ cao làm tăng cục bộ chỉ số khúc xạ của tấm kính. Các thiết bị như vậy được gọi là ba chiều (3D) vì bản chất không phẳng của chúng [3].

c) Bộ khuếch đại sợi quang đa lõi và sợi quang đa mode

Hầu hết các hệ thống WDM đường dài sử dụng bộ khuếch đại quang dọc theo liên kết sợi quang theo kiểu tuần hoàn để bù đắp cho suy hao sợi quang. Trong trường hợp của SMF, bộ khuếch đại sợi pha tạp erbium (EDFA) thường được sử dụng cho mục đích này, khuếch đại Raman phân tán cung cấp một giải pháp thay thế trong một số trường hợp. Trong trường hợp của các hệ thống SDM, điều quan trọng là phải phát triển các EDFA đa mode và đa lõi có khả năng khuếch đại đồng thời tất cả các kênh không gian. Một EDFA đa lõi được phát triển vào năm 2011 có khả năng khuếch đại tín hiệu 1550 nm bên trong bảy lõi của nó lên tới 30 dB. EDFA sử dụng MCF, có bảy lõi được pha tạp chất erbium và được bơm bằng tia laser 980 nm. Trong thí nghiệm này, mỗi lõi được bơm riêng lẻ. Một sơ đồ như vậy yêu cầu phân kênh của tất cả các kênh không gian, thêm công suất máy bơm cho mỗi kênh, rồi ghép kênh lại trước khi truyền vào EDFA đa lõi.

Việc đưa ánh sáng bơm vào lớp bọc của EDFA đa lõi cung cấp một cách tiếp cận tốt hơn và sơ đồ như vậy đã được phát triển vào năm 2014. Trong một thí nghiệm năm 2012, công suất bơm từ tia laser đa mode được đưa vào lõi trung tâm của EDFA bảy lõi. Công suất bơm này cũng được hấp thụ bởi sáu lõi bên ngoài được sắp xếp theo mô hình vòng, và kết quả là tín hiệu được khuếch đại trong các lõi này. Khớp nối không gian tự do đã được sử dụng trong một thí nghiệm năm 2014 để đưa công suất bơm vào lớp bọc của

sợi 19 lõi để khuếch đại tín hiệu trong tất cả các lõi đồng thời. Đến năm 2017, một kỹ thuật bơm bên đã được sử dụng để bơm EDFA 32 lõi, tạo ra một bộ khuếch đại toàn sợi nguyên khối. *Hình 1.5* cho thấy sơ đồ bơm. Tất cả các lõi của EDFA dài 3m đều được mã hóa bằng Ytebi và chùm bơm 965 nm được ghép vào lớp bọc của nó thông qua một sợi quấn quanh lớp bọc của EDFA. Tín hiệu đầu vào trong tất cả 32 lõi được khuếch đại khoảng 20 dB ở công suất máy bơm 40 W.



Hình 1.5: Kỹ thuật bơm EDFA 32 lõi [3]

1.2.2 Khái quát sợi quang

Sợi quang đơn lõi là phương tiện truyền dẫn được sử dụng rộng rãi nhất trên thế giới cho các hệ thống thông tin quang. Ánh sáng có thể được truyền dọc theo sợi quang bằng cách lặp lại tổng số phản xạ bên trong tại ranh giới lớp bọc lõi, lõi chỉ số cao được bao quanh bởi lớp bọc lõi chỉ số thấp. Chiết suất bậc được sử dụng trong hầu hết các sợi đơn mode và một số sợi đa mode, trong đó chỉ số khúc xạ được phân bố đồng đều khắp lõi, với sự giảm đột ngột ở giao diện bọc lõi để đảm bảo chiết suất thấp hơn trong lớp phủ. Điện trường rò rỉ và truyền qua lớp bọc ở hầu hết các sợi, dẫn đến các chế độ sợi được dẫn hướng yếu có thể được đơn giản hóa bằng cách sử dụng các chế độ phân cực tuyến tính (LP).

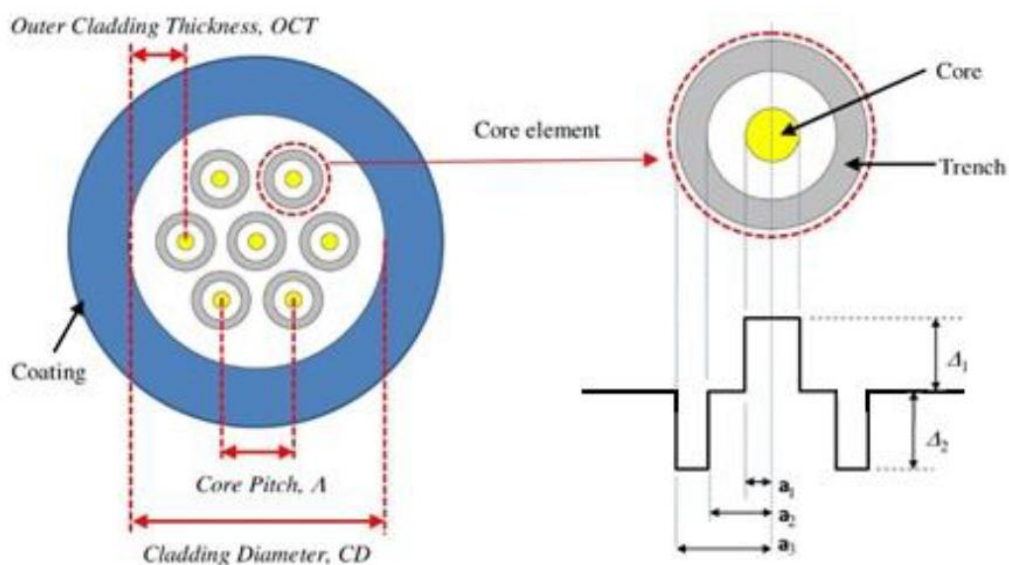
Sợi đa mode nằm ngoài phạm vi của luận văn này sử dụng các mode lan truyền để tăng công suất bằng cách cho phép truyền nhiều tín hiệu cùng một lúc.

Sợi quang đa lõi (MCF) được sản xuất lần đầu tiên bởi Furukawa Electric vào năm 1979, MCF bao gồm một cấu trúc bao gồm nhiều lõi trong một lớp bọc duy nhất. Hiện

đang là một sản phẩm đánh giá cao về tiềm năng đầy hứa hẹn của nó trong việc cải thiện hiệu quả của SDM, MCF có thể được phân loại thành loại sợi ghép cặp và loại không ghép cặp. Loại đầu tiên sử dụng một số lõi được đặt theo cách cho phép các lõi ghép cặp với nhau. Giống như trong MMF, MCF loại ghép tận dụng các chế độ truyền để thực hiện ghép kênh không gian mà không yêu cầu cấu hình phức tạp của các sợi quang đa mode (MMF) nâng cao.

Loại MCF, loại không ghép cặp, yêu cầu mỗi lõi phải được bố trí hợp lý bên trong sợi quang để giữ cho xuyên nhiễu giữa các lõi đủ thấp để đáp ứng các ứng dụng truyền dẫn đường dài. Ngoài việc sắp xếp các lõi một cách hợp lý bên trong MCF loại không ghép đôi, một số cách khác đã được nghiên cứu để giảm nhiễu hơn nữa. Một cấu trúc được hỗ trợ bởi rãnh, với khả năng hạn chế ánh sáng, sử dụng trong các tình huống nghiên cứu. Sợi quang đa lõi hỗ trợ rãnh giúp giảm xuyên nhiễu giữa các lõi thấp hơn so với MCF có chiết suất bậc nhờ sự tồn tại của lớp rãnh chỉ số thấp có thể giảm sự chòng chèo của trường điện từ giữa các lõi lân cận. Số lượng lõi được đặt bên trong một sợi quang phụ thuộc vào các tham số: vật liệu bên ngoài, độ dày lớp vỏ, đường kính của lớp bọc, khoảng cách giữa các lõi.

Hình 1.6 minh họa một MCF có bảy lõi hỗ trợ rãnh được chọn có các tham số chính để tính toán xuyên nhiễu cho các cách sắp xếp lõi (hoặc bố cục) với các cách khác nhau.



Hình 1.6: Ví dụ MCF có bảy lõi hỗ trợ rãnh

Nghiên cứu này xem xét ba loại sợi quang khác nhau, tất cả đều có bộ thông số giống hệt nhau ngoại trừ đường kính lớp bọc (CD). Trong các tình huống được đặt ra, các thông số còn được gọi là đường kính sợi quang và định lượng khoảng cách giữa hai cạnh đối diện của sợi quang và có một giá trị khác nhau.

Độ dày của lớp vỏ (OCT) hay khoảng cách của lõi ngoài và lớp vỏ không nhỏ hơn $30\mu m$ nhằm giảm sự suy hao xuyên nhiễu [4]. Chiều dài sợi quang (L) là khoảng cách giữa hai đầu của sợi quang. Các lõi đồng nhất được đặt bên trong sợi quang, tất cả đều có cùng kích thước và chỉ số khúc xạ, sẽ được bao bọc bởi một rãnh hạn chế ánh sáng vào bên trong lõi. Độ dày của rãnh (wtr) của cả lớp bọc và lõi sẽ giống nhau, làm cho bán kính của lớp bọc ($a2$) và rãnh ($a3$) lớn hơn lần lượt hai và ba lần so với bán kính của lõi ($a1$). Chỉ số khúc xạ tương đối của lớp bọc lõi ($\Delta1$) và lớp bọc rãnh ($\Delta2$) là giống nhau, Với thiết lập chiết suất lớp bọc ($n2$) có thể suy ra chiết suất lõi và chiết suất rãnh ($n3$).

Khoảng cách phân tách giữa hai lõi, cao độ lõi (Λ), chúng khác nhau về chức năng với các cách đặt vị trí khác nhau và số lượng lõi được tích hợp. Tham số này liên hệ trực tiếp với XT, là yếu tố quan trọng trong việc cân bằng giá trị các giá trị xuyên nhiễu bên trong sợi quang. Ngoài ra phải đảm bảo khoảng cách tối thiểu $3\mu m$ giữa các mép rãnh bảo vệ tiếp xúc giữa các rãnh khi sợi quang bị uốn cong [5].

1.3 Xuyên nhiễu trong MCF

1.3.1 Ước tính xuyên nhiễu

Sự nhiễu loạn của đường truyền gây ra bởi điện trường hoặc từ trường của một tín hiệu thông tin khác được gọi là xuyên nhiễu. Với mật độ lõi dày đặc được sắp xếp trong một lớp vỏ MCF quản lý nhiễu là rất quan trọng khi xử lý khớp nối và dẫn đến sự suy giảm tín hiệu truyền.

$P'(Z)$ là công suất ở đầu ra của lõi tham chiếu và $P(Z)$ là công suất ở đầu ra của lõi gây nhiễu, xuyên nhiễu được mô tả bằng biểu thức sau:

$$XT(Z) = 10 \times \log_{10} \frac{P'(Z)}{P(Z)} [dB] \quad (1.1)$$

Nếu không thể giảm nhiễu sẽ khiến sợi quang không đạt được tối đa về hiệu suất và dung lượng. Để xử lý xuyên nhiễu đúng cách, cần phải có một phương pháp chính xác để ước tính nó trong MCF. Hai phương pháp áp dụng: định luật chế độ ghép cặp (CMT) và định luật công suất ghép cặp (CPT).

Chế độ ghép cặp (CMT) phân tích sự liên kết trong các hệ thống dao động, có tính giao thoa giữa các chế độ quang từ cả hai ống dẫn sóng khi chúng được đặt đủ gần nhau. Trong trường hợp phân bố trường điện từ sau khi ghép chế độ về cơ bản không khác nhiều so với trước đó, phương pháp này có thể được sử dụng để phân tích các đặc tính lan truyền của các ống dẫn sóng. Mặc dù phương pháp này ước tính chính xác xuyên nhiễu trong khi tính đến các tác động xoắn và uốn mà sợi quang phải chịu, nhưng cần phải có một số lượng lớn các mô phỏng để ước tính giá trị của xuyên nhiễu. Mặt khác, định luật công suất ghép cặp dựa trên việc đo lường công suất mà tín hiệu được truyền trong một lõi đang chuyển sang lõi gần nó. Không giống như CMT, CPT có thể ước tính nhanh và chính xác về xuyên nhiễu giữa các lõi trong MCF bằng cách tính trung bình các tác động uốn và xoắn dọc theo sợi quang, sử dụng chiều dài được xác định trước [6].

Áp dụng CPT, xuyên nhiễu giữa hai lõi trong sợi quang có chiều dài L được ước tính [7]:

$$XT = \tanh(\bar{h}_{mn}L) \quad (1.2)$$

Hơn nữa, nếu xuyên nhiễu rất nhỏ [7]:

$$XT = \bar{h}_{mn}L \quad (1.3)$$

Trong đó \bar{h}_{mn} là tỷ lệ trung bình giữa lõi m và lõi n . Trong trường hợp sợi có bán kính uốn nhỏ, trung bình có thể được biểu thị bằng [7]:

$$\bar{h}_{mn} = 2k_{mn}^2 R_b / \beta_m \Lambda_{mn} \quad (1.4)$$

Trong đó R_b là bán kính uốn, Λ bước lõi và β_m hằng số truyền dẫn, k_{mn} , hệ số ghép cặp, được cho bởi:

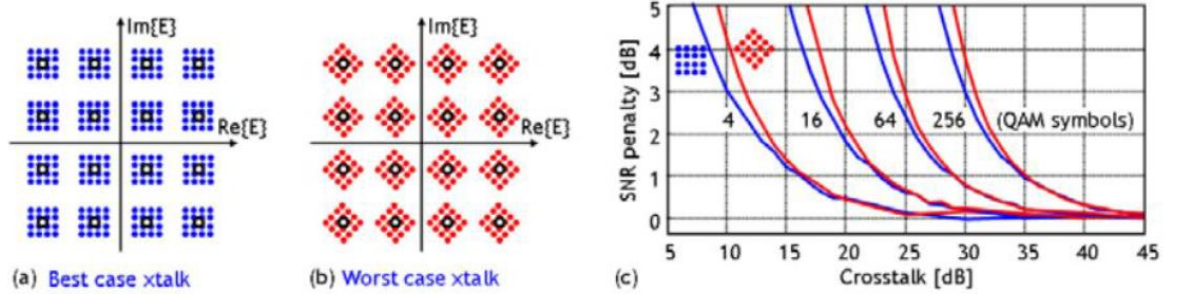
$$k_{mn} = \frac{w\epsilon_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (N^2 - N_n^2) E_m^* \cdot E_m dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u_c \cdot (E_m^* \times H_m + E_m \times H_m^*) dx dy} \quad (1.5)$$

Với w là tần số góc của trường điện từ, ϵ_0 là hệ số chân không được phép $N^2(x,y)$ sự phân bố chiết suất trong vùng ghép cặp và N_n^2 sự phân bố chiết suất của ống dẫn sóng n .

1.3.2 Hạn chế xuyên nhiễu

Nhằm tăng lưu lượng truyền dẫn, tìm kiếm các hiệu suất phổ lớn hơn bằng các sơ đồ điều chế biên độ cầu vuông góc (QAM) mức cao hơn. Những điều chế này, cùng với tỷ số tín hiệu nhiễu quang (OSNR) tối thiểu mà chúng gây ra, đặt ra một số hạn chế đối với giá trị xuyên nhiễu tối đa cho phép bên trong mỗi lõi của sợi quang đa lõi.

Hình 1.7 minh họa OSNR như một chức năng của xuyên nhiễu, theo mô phỏng Monte Carlo với 2^{17} ký hiệu, tượng trưng cho SNR mỗi biểu tượng cần thiết để đạt được tỷ lệ lỗi bit (BER) là 10^{-3} cho các biên độ vuông góc 4-, 16-, 64- và 256-QAM. Cả hình 1.7(a) và hình 1.7(b) đều cho thấy cùng một biên độ 16-QAM. Hình đầu tiên có biên độ 16-QAM trong pha với tín hiệu và sau này là biên độ giao thoa 16-QAM với vòng quay 45° so với tín hiệu. Như dự kiến, trường hợp với can thiệp xoay bị ảnh hưởng mạnh hơn do khoảng cách tối thiểu giữa các ký hiệu, như đã thấy trong hình 1.7.



Hình 1.7: Tác động của xuyên nhiễu trong băng tần đối với các định dạng QAM; (a, b): mô hình xuyên nhiễu; (c): Monte Carlo mô phỏng các nhiễu tối thiểu 4-, 16-, 64- và 256-QAM [8]

Ba loại sợi quang khác nhau sẽ được phân tích trong luận văn này và đối với mỗi trường hợp, đặt ra một giới hạn về lượng xuyên nhiễu tối đa mà bất kỳ lõi nào của sợi quang chịu được. Hai tình huống cho một liên kết cáp quang được hình thành, chia sẻ cùng chiều dài sợi quang và khác nhau về định dạng điều chế đã chọn.

1.4 Kết luận chương 1

Kết thúc chương 1 luận văn đã tìm hiểu tổng quát về sợi quang đa lõi: cấu tạo bên trong, nguyên lý hoạt động của mô hình SDM, xuyên nhiễu ảnh hưởng gây gián đoạn đến

tín hiệu đường truyền và sử dụng các điều chế vào các mô hình khác nhau nhằm giảm xuyên nhiễu. Các mô hình được đề xuất thử nghiệm nhằm giảm trực tiếp xuyên nhiễu được nghiên cứu, phân tích trong chương tiếp theo.

Chương 2: Các mô hình phân tích cho MCF

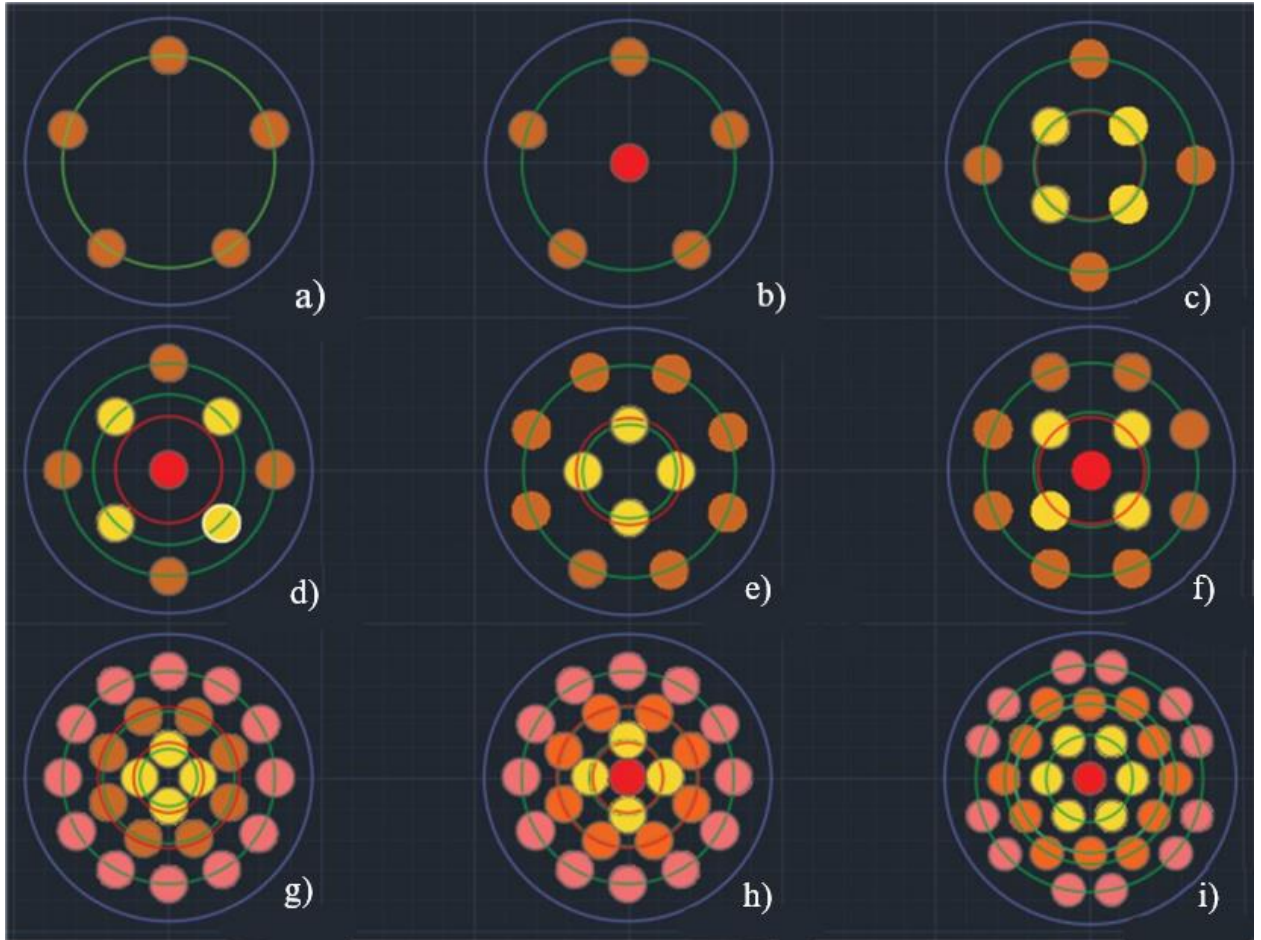
SDM dựa trên MCF là một lựa chọn đơn giản và thiết thực vì không yêu cầu bất kỳ một xử lý tín hiệu MIMO nào ở phía máy thu. Để tăng dung lượng của hệ thống truyền dẫn quang sử dụng MCF, cần thiết phải tăng tổng số lõi trong MCF ở một tiết diện cố định, dẫn đến khoảng cách giữa các lõi ngày càng nhỏ hơn. Xuyên nhiễu (XT) giữa các lõi tính bằng dB của MCF tỷ lệ nghịch với khoảng cách giữa các lõi và XT phải nhỏ hơn mức qui định vì XT cao dẫn đến độ thiệt thòi OSNR nghiêm trọng trong các hệ thống truyền dẫn quang sử dụng các định dạng điều chế tiên tiến. Do đó, các phương pháp giảm XT phải được áp dụng để tăng số lượng lõi trong MCF.

Các lõi bên trong SM-MCF có thể sắp xếp theo nhiều cách khác nhau, thành các vòng, hình lục giác hoặc thậm chí không theo một cấu trúc hình học nào. Các cách được nêu ra đều làm cân bằng xuyên nhiễu giữa các lõi, đảm bảo rằng nó ở mức tối thiểu đối với từng lõi trong cấu trúc, tìm ra cách tối ưu nhất cho từng sợi đa lõi trong thực tế. Trong chương 2 sẽ nghiên cứu các cách bố cục khác nhau, mỗi cách có đường kính sợi quang khác nhau, tất cả các bố cục sẽ có khả năng mở rộng (thêm lõi) bằng cách sử dụng sự sắp xếp chính xác khi được tạo. Hơn nữa, thiết kế còn phải tối ưu về mặt tài chính, nên tính đối xứng hình học rất có quan trọng. Trong *hình 2.1* dưới đây là các cách sắp xếp các lõi được nghiên cứu trong luận văn:

- a) Mô hình một vòng
- b) Mô hình một vòng và lõi trung tâm
- c) Mô hình hai vòng
- d) Mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm
- e) Mô hình hai vòng khác nhau
- f) Mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm
- g) Mô hình ba vòng khác nhau
- h) Mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm
- i) Mô hình lục giác

Do cao độ lõi có ảnh hưởng chính đến xuyên nhiễu, tối đa hóa khoảng cách giữa các lõi cạnh nhau khi sắp xếp bố cục là điều quan trọng, nên nhiều hình dạng khác nhau thử sắp xếp vòng tròn dựa trên lập luận này. Trong một nghiên cứu chỉ ra rằng, sự sắp xếp dày

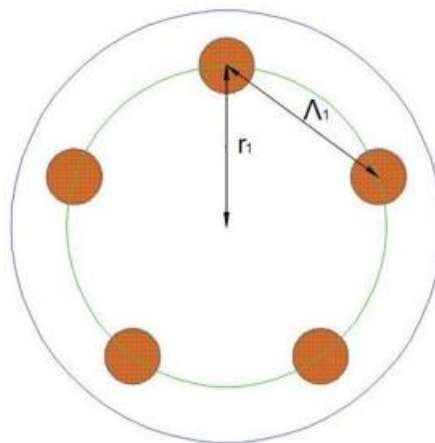
đặc nhất của các vòng tròn giống hệt nhau trong một mặt phẳng hình lục giác như tổ ong có kết quả tốt về tối đa hóa khoảng cách giữa các lõi lân cận.



Hình 2.1: Các cách sắp xếp trong sợi quang

2.1 Mô hình sắp xếp các lõi một vòng

2.1.1 Mô hình một vòng



Hình 2.2: Các lõi trong mô hình một vòng

Sử dụng các sắp xếp một vòng, các lõi được đặt cách đều nhau trên một vòng tròn(hình 2.2). Bán kính của vòng tròn (r_1), được gọi là vòng tròn ngoài. Khoảng cách giữa chúng càng lớn càng đảm bảo khoảng cách giữa các lõi quy định bởi các thông số sợi. Hai lõi đầu được đặt trong sợi nằm trên vòng tròn đã xác định trước đó, cách nhau bằng một đường kính của cùng một vòng tròn đó. Sau đó, nhiều lõi hơn được thêm vào sợi, mỗi lần một, với khoảng cách bằng nhau giữa mỗi lõi và các lõi lân cận của nó cho đến khi các sợi khiến không thể thêm bất kỳ lõi nào nữa. Tính toán xuyên nhiễu cho mỗi lõi sẽ chỉ tính đến nhiễu từ hai lõi bên cạnh nó với công thức:

$$XT_{core} = 2 \times XT(\Lambda_l) \quad (2.1)$$

$$\Lambda_l = 2r_1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2N}\right) \quad (2.2)$$

Điều này cho giá trị nhiễu gần giống như khi xét đến tất cả các lõi. Sự gần đúng này, cũng xuất hiện trong các tính toán xuyên nhiễu của các cách bố trí khác, Đối với trường hợp chỉ có hai lõi kết hợp sợi quang ($N = 2$), tính toán xuyên nhiễu sẽ được thực hiện khác vì chỉ có một lõi lân cận. Khi đó:

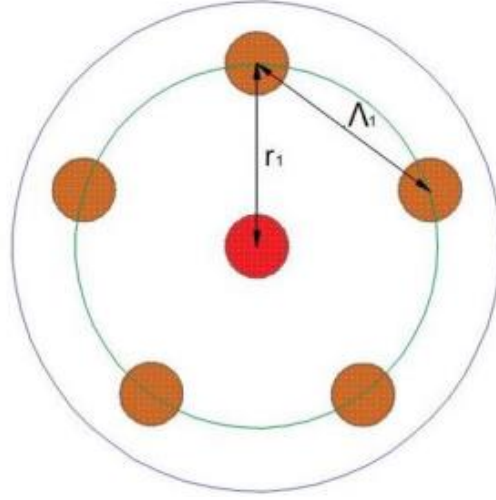
$$XT_{core} = XT(\Lambda_l) \quad (2.3)$$

Các tham số trên được nêu trong bảng 2.1:

Bảng 2.1: Các tham số trong mô hình một vòng

Tham số	Công thức
Bán kính vòng ngoài	r_1
Khoảng cách giữa các lõi vòng ngoài	$\Lambda_1 = 2r_1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2N}\right)$

2.1.2 Mô hình một vòng và lõi trung tâm



Hình 2.3: Các lõi trong mô hình một vòng và lõi trung tâm

Giữ nguyên bố cục các lõi ở vòng ngoài và thêm một lõi ở giữa phía trong (hình 2.3). Ban đầu, một lõi được đặt ở trung tâm của sợi quang được che bởi ba lõi khác. Sau đó, nhiều lõi hơn được thêm vào sợi, từng lõi một vào vòng ngoài, luôn duy trì khoảng cách bằng nhau giữa các lõi cho đến khi các giới hạn về không gian.

Từ phương trình:

$$XT = \frac{2k'_{mn}{}^2 R_b L}{\beta \Lambda} \quad (2.4)$$

và biết xuyên nhiễu của các lõi đặt ở vòng ngoài, chủ yếu sẽ đến từ lõi trung tâm và hai lõi lân cận của nó, xuyên nhiễu của lõi ngoài được xác định (2.6). Tính toán xuyên nhiễu cho lõi trung tâm sẽ tính đến tất cả các lõi bao quanh nó (2.5):

$$XT_{Central\ Core} = (N - 1) \times XT(r_1) \quad (2.5)$$

$$XT_{Outer\ Core} = XT(r_1) + 2 \times XT(\Lambda_1) \quad (2.6)$$

Trong đó khoảng cách giữa các lõi bên ngoài:

$$\Lambda_1 = 2r_1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2(N-1)}\right) \quad (2.7)$$

Các tham số trên được nêu trong *bảng 2.2*:

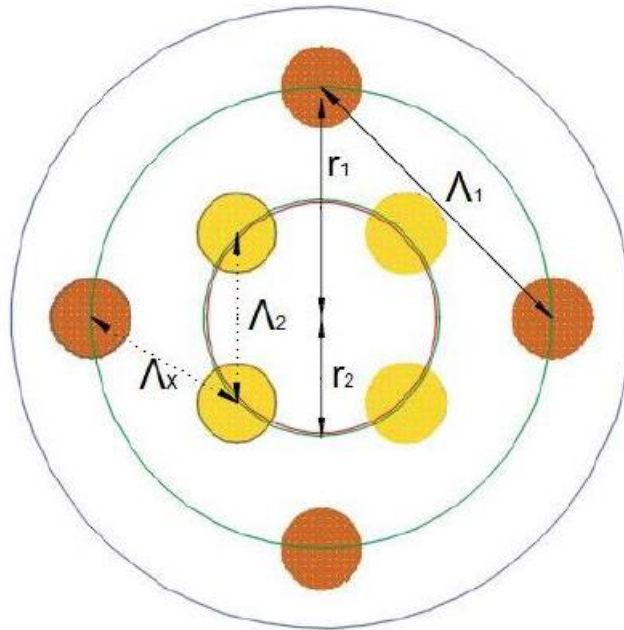
Bảng 2.2: Các tham số trong mô hình một vòng và lõi trung tâm

Tham số	Công thức
Bán kính vòng ngoài	r_1
Khoảng cách giữa các lõi vòng ngoài	$\Lambda_1 = 2r_1 \times \sin(\frac{2\pi}{2(N-1)})$

2.2 Mô hình sắp xếp các lõi đa vòng

2.2.1 Mô hình hai vòng giống nhau

Trong bố cục hai vòng (*hình 2.4*), các lõi nằm trong hai vòng tròn với hai bán kính khác nhau. Với vòng ngoài có bán kính lớn hơn (r_1), vòng trong bé hơn là (r_2), mỗi vòng chứa cùng một lượng lõi nhất định. Khi hai vòng có cùng số lõi, khoảng cách giữa các lõi bên trong (Λ_2) sẽ nhỏ hơn khoảng cách giữa các lõi bên ngoài (Λ_1), do đó sẽ có các lõi bên trong có giá trị xuyên nhiễu tốt nhất.



Hình 2.4: Các lõi trong mô hình hai vòng

Để cân bằng các giá trị của xuyên nhiễu và tính khoảng cách giữa các lõi bên trong là nhỏ nhất, có thể đặt các lõi bên trong ra xa hơn cho đến khi khoảng cách giữa chúng lớn bằng khoảng cách giữa hai lõi nằm trong các vòng khác nhau (Λ). Bán kính của vòng tròn bên trong, chứa các lõi bên trong, do đó sẽ thay đổi và phụ thuộc vào số lượng lõi được sử

dụng trong bố cục này. Bằng cách thực hiện chỉnh bán kính này giúp thu được kết quả xuyên nhiễu tốt nhất có thể cho loại sắp xếp này.

Ban đầu, sáu lõi được đặt trong sợi quang, ba lõi trong mỗi vòng, tối đa hóa khoảng cách giữa các lõi trong các vòng khác nhau. Sau đó, nhiều lõi hơn được thêm vào sợi, mỗi lần hai lõi, tăng số lõi trong mỗi vòng một cho đến khi các giới hạn không gian của sợi không thêm được nữa.

Sử dụng phương trình (2.4) tính giá trị xuyên nhiễu của lõi bên trong bằng cách xem xét hai lõi gần nó và hai lõi ngoài gần nhất (2.8). Tương tự, khi tính toán giá trị xuyên nhiễu cho một lõi ngoài, chỉ cần hai lõi lân cận và hai lõi trong gần nhất của nó được tính đến (2.9):

$$XT_{Inner\ Core} = 2 \times XT(\Lambda_2) + 2 \times XT(\Lambda_x) \quad (2.8)$$

$$XT_{Outer\ Core} = 2 \times XT(\Lambda_l) + 2 \times XT(\Lambda_x) \quad (2.9)$$

Các tham số trên được nêu trong bảng 2.3:

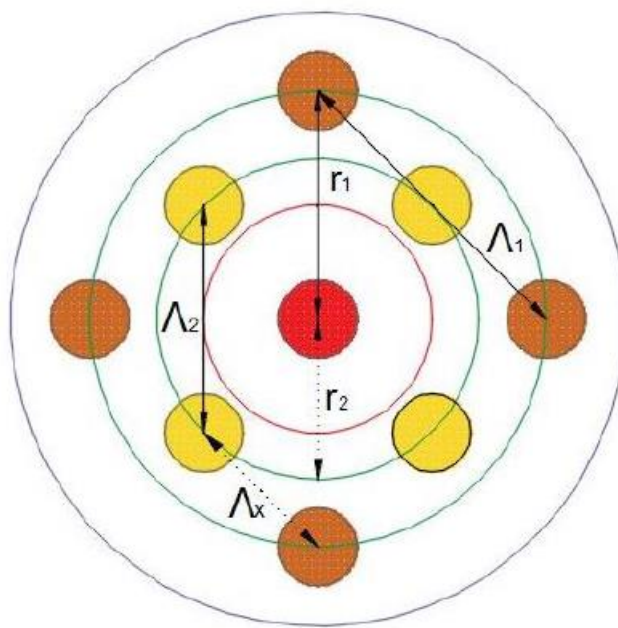
Bảng 2.3: Các tham số trong mô hình hai vòng giống nhau

Tham số	Công thức
Bán kính vòng ngoài	r_1
Khoảng cách giữa các lõi vòng ngoài	$\Lambda_l = 2r_1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right)$
Bán kính vòng trong	$r_2 = \frac{(2r_1 \times \cos\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right)) - \sqrt{(-2r_1 \times \cos\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right))^2 - 4 \times (1 - 4\sin^2\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right)) \times (r_1^2)}}{2 \times (1 - 4\sin^2\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right))}$
Khoảng cách giữa các lõi vòng trong	$\Lambda_2 = 2r_2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right)$

Khoảng cách các lõi vòng ngoài với vòng trong	$\Lambda_x = \Lambda_2$
---	-------------------------

2.2.2 Mô hình hai vòng và lõi trung tâm

Hai vòng với lõi trung tâm (hình 2.5) phân bố số lượng các lõi của nó thành hai vòng giống nhau, với một lõi bổ sung ở trung tâm. Vòng ngoài, với bán kính lớn hơn, nằm cách tâm là bán kính r_1 trong khi vòng trong là r_2 .



Hình 2.5: Các lõi trong mô hình hai vòng và lõi trung tâm

Bán kính vòng trong sẽ phụ thuộc vào số lượng lõi, luôn lớn hơn một nửa bán kính vòng ngoài, đảm bảo khoảng cách từ lõi bên trong đến lõi trung tâm bằng với khoảng cách từ lõi bên trong đến lõi bên ngoài gần nhất. Điều này giúp cân bằng tốt hơn các giá trị của xuyên nhiễu khi so sánh với một cấu trúc tương tự trong đó các lõi bên trong sẽ được đặt ở một nửa bán kính vòng ngoài.

Ban đầu, bảy lõi được đưa vào trong sợi quang, ba lõi trong mỗi vòng sao cho tối đa khoảng cách hợp lý giữa các lõi trong các vòng khác nhau, cộng với một lõi bổ sung ở trung tâm. Sau đó, nhiều lõi hơn được thêm vào sợi, mỗi lần hai lõi, tăng dần số lõi trong mỗi vòng cho đến khi các giới hạn không gian của sợi khiến không thể thêm bất kỳ lõi nào nữa.

Từ phương trình (2.4), tính được giá trị xuyên nhiễu của lõi bên trong bằng cách xét đến hai lõi kế bên, lõi ngoài gần nhất và lõi trung tâm:

$$XT_{Inner\ Core} = XT(r_2) + 2 \times XT(\Lambda_2) + 2 \times XT(\Lambda_2) \quad (2.10)$$

Tương tự, khi tính toán xuyên nhiễu của lõi ngoài, chỉ tính đến hai lõi gần nhất của, lõi bên trong gần nhất và lõi trung tâm:

$$XT_{Outer\ Core} = XT(r_1) + 2 \times XT(\Lambda_1) + 2 \times XT(\Lambda_x) \quad (2.11)$$

Với lõi trung tâm sẽ tính bao gồm các lõi bao quanh nó:

$$XT_{Central\ Core} = M_1 \times XT(r_1) + M_2 \times XT(r_2) \quad (2.12)$$

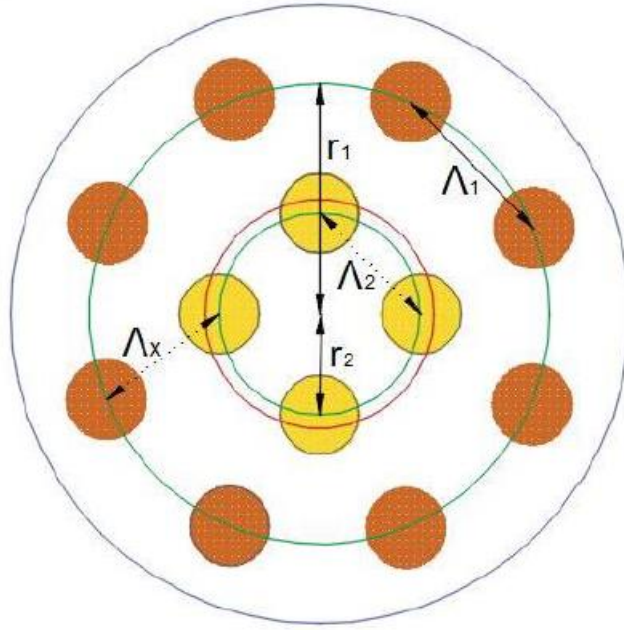
Các tham số trên được nêu trong *bảng 2.4*.

Bảng 2.4: Các tham số trong mô hình hai vòng và lõi trung tâm

Tham số	Công thức
Bán kính vòng ngoài	r_1
Khoảng cách giữa các lõi vòng ngoài	$\Lambda_1 = 2r_1 \times \sin(\frac{2\pi}{2M_1})$
Bán kính vòng trong	$r_2 = \frac{\frac{r_1}{2}}{\cos(\frac{2\pi}{2M_1})}$
Khoảng cách giữa các lõi bên trong	$\Lambda_2 = 2r_2 \times \sin(\frac{2\pi}{2M_2})$
Khoảng cách lõi ngoài với lõi trong	$\Lambda_x = r_2$

2.2.3 Mô hình hai vòng khác nhau

Số lượng lõi hai vòng khác nhau (*hình 2.6*), trong đó vòng trong có số lõi bằng một nửa so với vòng ngoài. Cách bố trí hai vòng này để cân bằng đồng đều hơn khoảng cách giữa các lõi lân cận trong cả hai vòng, trong đó Vòng ngoài được đặt ở khoảng cách r_1 từ tâm và vòng trong ở khoảng cách r_2 . Tương tự như bố cục “Hai vòng”, xuyên nhiễu lõi bên trong là yếu tố hạn chế trong bố cục này. Để giảm thiểu nhiễu của lõi bên trong, phải điều chỉnh bán kính vòng trong để đảm bảo rằng khoảng cách giữa các lõi lân cận của vòng trong (Λ_2) bằng với khoảng cách giữa lõi bên trong và các lõi bên ngoài gần nhất (Λ_x) nói cách khác, phải đảm bảo rằng lõi bên trong được đặt cách đều với lõi gần nhất và lõi bên ngoài với nó.



Hình 2.6: Các lõi trong mô hình hai vòng khác nhau

Ban đầu, chín lõi được đặt trong sợi, sáu lõi ở vòng ngoài cộng với ba lõi ở vòng trong đảm bảo khoảng cách giữa các lõi trong các vòng khác nhau. Sau đó, nhiều lõi hơn được thêm vào sợi, ba lõi một lần, cứ tăng số lượng lõi lên cho đến khi các giới hạn không gian của sợi.

Từ (2.4) tính toán giá trị xuyên nhiễu của lõi bên trong bằng cách xét hai lõi lân cận và hai lõi ngoài gần nhất với công thức:

$$XT_{Inner\ Core} = 2 \times XT(\Lambda_2) + 2 \times XT(\Lambda_x) \quad (2.13)$$

Khi tính toán xuyên nhiễu của lõi bên ngoài, hai lõi lân cận và lõi bên trong gần nhất của nó với:

$$XT_{Outer\ Core} = 2 \times XT(\Lambda_1) + XT(\Lambda_x) \quad (2.14)$$

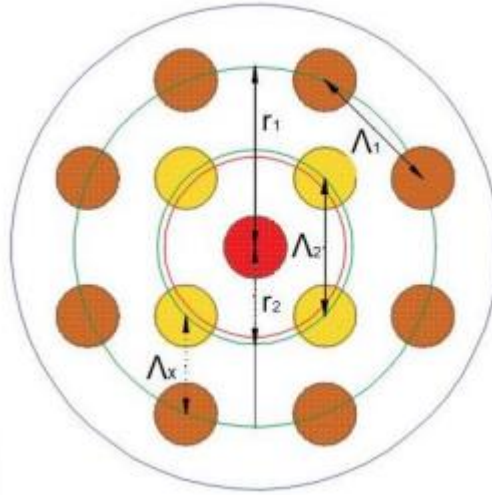
Các tham số được nêu trong bảng 2.5 dưới đây:

Bảng 2.5: Các tham số trong mô hình hai vòng khác nhau

Tham số	Công thức
Bán kính vòng ngoài	r_1
Khoảng cách giữa các lõi bên ngoài	$\Lambda_1 = 2r_1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right)$
Bán kính vòng trong	$r_2 = \frac{(2r_1 \times \cos\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right)) - \sqrt{(-2r_1 \times \cos\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right))^2 - 4 \times (1 - 4\sin^2\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right)) \times (r_1^2)}}{2 \times (1 - 4\sin^2\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right))}$
Khoảng cách giữa các lõi bên trong	$\Lambda_2 = 2r_2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right)$
Khoảng cách giữa các lõi bên trong với bên ngoài	$\Lambda_x = \Lambda_2$

2.2.4 Mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm

Hai vòng với lõi trung tâm (hình 2.7) sắp xếp các lõi thành hai vòng cộng với một lõi khác ở trung tâm, trong đó vòng trong bằng một nửa số lõi vòng ngoài. Vòng ngoài, với bán kính lớn hơn, khoảng cách r_1 và vòng trong cách tâm là r_2 . Bán kính vòng trong sẽ phụ thuộc vào số lượng lõi, luôn lớn hơn một nửa bán kính vòng ngoài, để đảm bảo khoảng cách từ lõi bên trong đến lõi trung tâm bằng với khoảng cách từ lõi bên trong đến lõi bên ngoài gần nhất. Bằng cách đó, giúp cân bằng tốt hơn các giá trị xuyên nhiễu khi so sánh với một cấu trúc tương tự trong đó các lõi bên trong sẽ được đặt ở một nửa bán kính vòng ngoài. Ban đầu bảy lõi được đặt vào trong, một ở trung tâm, bốn ở vòng ngoài và hai ở vòng trong, khoảng cách đảm bảo giữa lõi trong các vòng khác nhau. Sau đó, nhiều lõi hơn được thêm vào sợi, ba lõi một lần, tăng tương ứng một và hai số lõi ở vòng trong và vòng ngoài cho đến khi giới hạn không gian không thể thêm nữa.



Hình 2.7: Các lõi trong mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm

Để tính giá trị xuyên nhiễu của lõi bên trong xét đến hai lõi lân cận của nó, hai Lõi ngoài gần nhất và lõi trung tâm

$$XT_{Inner\ Core} = XT(r_2) + 2 \times XT(\Lambda_2) + 2 \times XT(\Lambda_x) \quad (2.15)$$

Từ (2.4), khi tính toán giá trị xuyên nhiễu cho một lõi ngoài xét hai lõi lân cận nó, lõi bên trong và lõi trung tâm gần nhất bằng

$$XT_{Outer\ Core} = XT(r_1) + 2 \times XT(\Lambda_1) + XT(\Lambda_x) \quad (2.16)$$

Tính xuyên nhiễu cho lõi trung tâm sẽ tính đến tất cả các lõi bao quanh nó

$$XT_{Central\ Core} = M_1 \times XT(r_1) + M_2 \times XT(r_2) \quad (2.17)$$

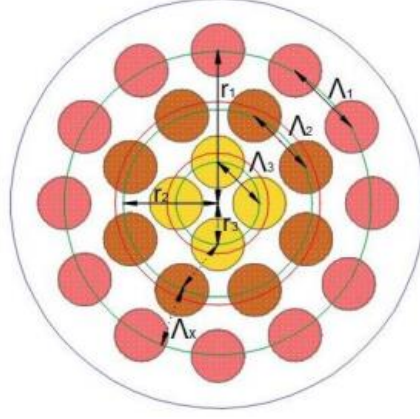
Các giá trị trên được nêu trong bảng 2.6 dưới đây:

Bảng 2.6: Các tham số trong mô hình hai khác nhau với lõi trung tâm

Tham số	Công thức
Bán kính vòng ngoài	r_1
Khoảng cách giữa các lõi vòng ngoài	$\Lambda_1 = 2r_1 \times \sin(\frac{2\pi}{2M_1})$
Bán kính vòng trong	$r_2 = \frac{\frac{r_1}{2}}{\cos(\frac{2\pi}{2M_1})}$
Khoảng cách giữa các lõi vòng trong	$\Lambda_2 = 2r_2 \times \sin(\frac{2\pi}{2M_2})$
Khoảng cách lõi vòng trong với vòng ngoài	$\Lambda_x = r_2$

2.2.5 Mô hình ba vòng khác nhau

Mô hình ba vòng với số lượng lõi khác nhau (hình 2.8), với số lượng lõi trung tâm bằng một phần ba vòng ngoài và hai phần ba vòng giữa. Vòng ngoài, với bán kính lớn nhất, nằm ở khoảng cách r_1 từ tâm, trong khi vòng trong nằm ở khoảng cách r_3 . Vòng ở giữa hai vòng này được nằm ở khoảng cách r_2 từ tâm của mô hình. Kích thước bán kính vòng giữa và vòng trong sẽ phụ thuộc vào số lượng lõi, duy trì khoảng cách giữa các vòng trong lân cận giống như cả khoảng cách giữa lõi trong và lõi giữa gần nhất, giữa lõi giữa và lõi ngoài cùng. Điều quan trọng là khoảng cách giữa lõi ngoài và lõi giữa gần nhất của nó sẽ phụ thuộc vào lõi bên ngoài được chọn, đó là lý do tại sao cần tạo khoảng cách giữa các vùng lân cận vòng trong giống như khoảng cách giữa lõi giữa và vòng tròn bên ngoài, để đảm bảo phần sau này bằng hoặc nhỏ hơn khoảng cách giữa vòng giữa và lõi bên ngoài. Thuật toán này tạo ra kết quả xuyên nhiễu tốt hơn khi so sánh với một cấu trúc tương tự trong đó các vòng cách đều nhau.



Hình 2.8: Các lõi trong mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm

Ban đầu, mười tám lõi được đặt vào trong sợi, chín lõi ở vòng ngoài, sáu ở vòng giữa và ba ở vòng trong theo cách tối đa hóa khoảng cách giữa các lõi trong các vòng khác nhau. Sau đó, nhiều lõi hơn được thêm vào sợi, sáu lõi một lần, tăng tương ứng một, hai và ba số lượng lõi ở vòng trong, vòng giữa và vòng ngoài cho đến khi giới hạn không gian.

Để tính xuyên nhiễu của lõi bên trong cùng bằng cách tính đến các lõi lân cận và hai lõi vòng giữa gần nhất

$$XT_{Inner\ Core} = 2 \times XT(\Lambda_3) + 2 \times XT(\Lambda_x) \quad (2.18)$$

Từ (2.4) tính xuyên nhiễu của lõi giữa, xét hai lõi lân cận cùng vòng và lõi ngoài gần nhất với nó

$$XT_{Middle\ Core} = XT(\Lambda_x) + XT(\Lambda_x) + 2 \times XT(\Lambda_2) \quad (2.19)$$

Đối với xuyên nhiễu của lõi ngoài cùng, được tính bằng hai lõi cùng vòng và lõi giữa gần nhất của nó

$$XT_{Outer\ Core} = 2 \times XT(\Lambda_1) + XT(\Lambda_x) \quad (2.20)$$

Các tham số trên được nêu trong bảng 2.7 dưới đây:

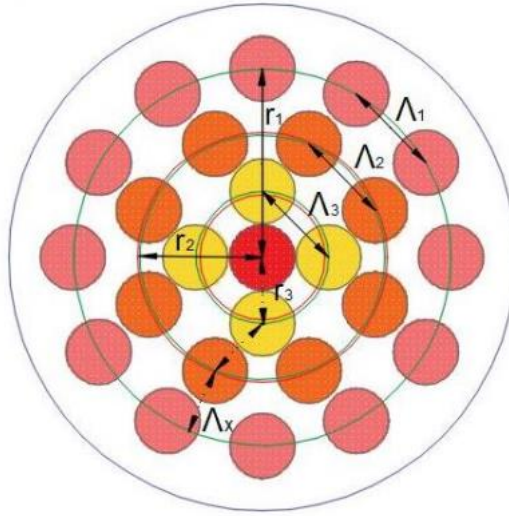
Bảng 2.7: Các tham số trong mô hình ba vòng khác nhau

Tham số	Công thức
Bán kính vòng ngoài	r_1
Khoảng cách giữa các lõi vòng ngoài	$\Lambda_1 = 2r_1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_1}\right)$
Bán kính vòng trong	$r_3 = \frac{2r_1 \times \cos\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right) + 4r_1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_3}\right) - \sqrt{\left(-2r_1 \times \cos\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right) - 4r_1 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_3}\right)\right)^2 - 4 \times \left(1 + 4 \sin\left(\frac{2\pi}{2M_3}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right)\right) \times (r_1^2)}}{2 \times \left(1 + 4 \sin\left(\frac{2\pi}{2M_3}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right)\right)}$
Khoảng cách các lõi vòng trong	$\Lambda_3 = 2r_3 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_3}\right)$
Bán kính vòng giữa	$r_2 = r_1 - \Lambda_3$
Khoảng cách các lõi vòng giữa	$\Lambda_2 = 2r_2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{2M_2}\right)$
Khoảng cách các vòng	$\Lambda_x = \Lambda_3$

2.2.6 Mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm

Mô hình ba vòng khác nhau với lõi trung tâm (hình 2.9) là một cách sắp xếp thành ba vòng và một lõi trung tâm, trong đó cả vòng trong và vòng giữa lần lượt có một phần ba và hai phần ba số lõi của vòng ngoài. Vòng ngoài, có bán kính lớn nhất, nằm ở khoảng cách r_1 từ tâm trong khi vòng giữa và vòng trong ở khoảng cách tương ứng, r_2 và r_3 từ tâm. Bán kính vòng giữa và vòng trong sẽ phụ thuộc vào số lượng lõi, thay đổi để duy trì

khoảng cách không đổi từ lõi trung tâm đến lõi bên trong, từ lõi trong đến lõi giữa và từ lõi giữa đến vòng ngoài. Điều quan trọng là khoảng cách giữa lõi ngoài và lõi giữa gần nhất của nó sẽ phụ thuộc vào lõi bên ngoài, đó là lý do tại sao cần tạo khoảng cách từ lõi trung tâm đến lõi bên trong bằng với khoảng cách giữa lõi giữa và lõi bên ngoài, để đảm bảo khoảng cách sau này bằng hoặc nhỏ hơn khoảng cách giữa lõi giữa và lõi ngoài. Thuật toán này tạo ra kết quả xuyên nhiễu tốt hơn khi so sánh với cấu trúc tương tự trong đó các vòng cách đều nhau.



Hình 2.9: Các lõi trong mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm

Ban đầu, 19 lõi được đặt trong lõi, một ở trung tâm, 9 ở vòng ngoài, 6 ở vòng giữa và ba ở Vòng trong theo cách tối đa hóa khoảng cách giữa các lõi trong các vòng khác nhau. Sau đó, nhiều lõi hơn được thêm vào sợi, 6 lõi tại một thời điểm, tăng tương ứng 1,2 và 3 tại một thời điểm số lượng lõi ở vòng trong, vòng giữa và vòng ngoài cho đến khi các giới hạn không gian của sợi không thể thêm được nữa.

Xác định xuyên nhiễu của lõi bên trong cần xét hai lõi cạnh nó, hai lõi vòng giữa gần nhất và lõi vòng trung tâm:

$$XT_{Inner\ Core} = XT(r_3) + 2 \times XT(\Lambda_3) + 2 \times XT(\Lambda_x) \quad (2.21)$$

Từ (2.4) tính xuyên nhiễu của lõi vòng giữa, hai lõi gần nhất cùng vòng cũng như lõi vòng trong và lõi ngoài gần nhất của nó:

$$XT_{Middle\ Core} = XT(\Lambda_x) + XT(\Lambda_x) + 2 \times XT(\Lambda_2) \quad (2.22)$$

Với xuyên nhiều của lõi ngoài, tương tự ta có:

$$XT_{Outer\ Core} = 2 \times XT(\Lambda_1) + XT(\Lambda_x) \quad (2.23)$$

Còn tính xuyên nhiều cho lõi trung tâm sẽ kể đến tất cả các lõi bao quanh nó:

$$XT_{Central\ Core} = M_1 \times XT(r_1) + M_2 \times XT(r_2) + M_3 \times XT(r_3) \quad (2.24)$$

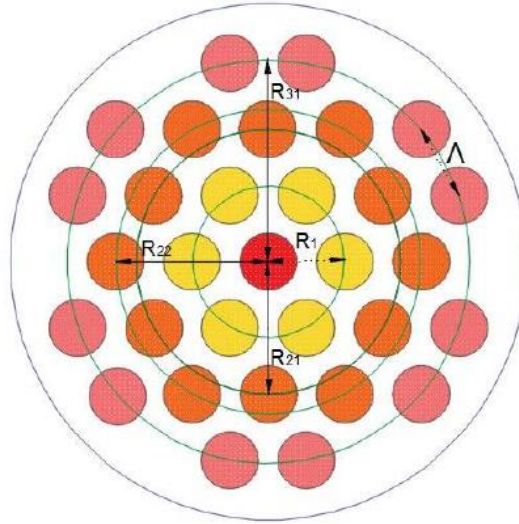
Các tham số trên được nêu trong *bảng 2.8* dưới đây:

Bảng 2.8: Các tham số trong mô hình ba vòng với lõi trung tâm

Tham số	Công thức
Bán kính vòng ngoài	r_1
Khoảng cách giữa các lõi bên ngoài	$\Lambda_1 = 2r_1 \times \sin(\frac{2\pi}{2M_1})$
Bán kính vòng giữa	$r_2 = \frac{r_1}{1+2\cos(\frac{2\pi}{2M_2})}$
Khoảng cách giữa các lõi vòng giữa	$\Lambda_2 = 2r_2 \times \sin(\frac{2\pi}{2M_2})$
Bán kính vòng trong	$r_3 = r_1 - r_2$
Khoảng cách giữa các lõi vòng trong	$\Lambda_3 = 2r_3 \times \sin(\frac{2\pi}{2M_3})$
Khoảng cách giữa các lõi vòng trong, giữa và ngoài	$\Lambda_x = r_3$

2.2.7 Mô hình lục giác

Với mô hình lục giác (*hình 2.10*), có ba vòng khác nhau nhưng các lõi được sắp đặt thành hình lục giác. Các lõi khác nhau trong cùng một vòng có thể có khoảng cách đến tâm khác nhau, nghĩa là các vòng không giống như trong các mô hình trước, đặc điểm có tất cả lõi đều cách đều tâm. Để đặt lõi trung tâm trong mô hình này cần đảm bảo khoảng cách giữa các vòng, giữa hai lõi lân cận bất kỳ là không đổi. Cách thêm lõi vào mô hình này phức tạp hơn những mô hình khác. Các lõi không thể thêm vào sợi một cách đơn giản cho đến khi các giới hạn không gian của sợi cho phép, vì một số lõi trong cùng một vòng có thể khác nhau về khoảng cách đến lõi trung tâm; nghĩa là một số lõi có thể nằm gọn bên trong sợi trong còn những lõi khác thì không. Vì lý do này, bất cứ khi nào các lõi được thêm vào sợi quang, chúng đều có cùng bán kính; nghĩa là các vòng được xây dựng trong một, hai, ba và đôi khi nhiều pha hơn.



Hình 2.10: Các lõi trong mô hình lục giác

Ban đầu, bảy lõi được đặt trong sợi, vì có sáu cặp lõi tạo thành vòng đầu tiên có cùng bán kính R_1 . Sau đó, bố trí một phần của vòng thứ hai bằng cách thêm các lõi gần tâm nhất R_{21} trước khi có thể hoàn thành bằng cách thêm các lõi còn lại ở khoảng cách R_{22} từ tâm. Ở vòng thứ hai, được sắp xếp hai lần lặp lại, thêm nhiều lõi hơn một vài lõi cùng một lúc, chỉ từng vòng trên mỗi lần lặp cho đến khi không thể lắp thêm bất kỳ lõi nào trong sợi nữa. Các hình lục giác màu trong hình 15, trong đó các lõi được đánh dấu các lần lặp lại khác nhau.

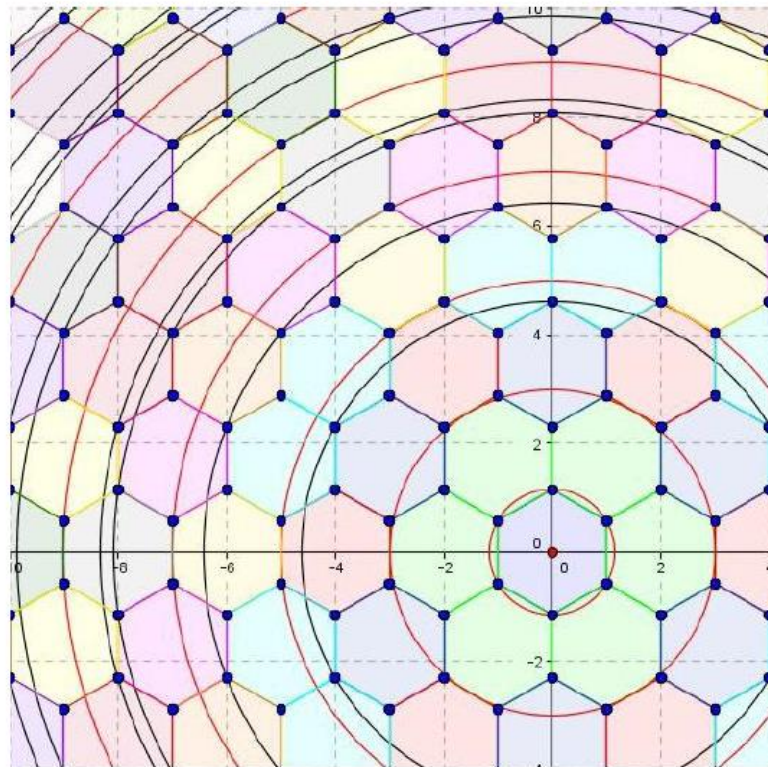
Khoảng cách giữa các lõi lân cận bất kỳ trong cấu trúc, để tính toán xuyên nhiễu, chỉ cần nhân giá trị của xuyên nhiễu giữa hai lõi bất kỳ với số lõi lân cận với nó:

$$XT_{Given\ Core} = N^{\circ}Adjacent\ Cores \times XT(\Lambda) \quad (2.25)$$

Các tham số trên được nêu trong *bảng 2.9* dưới đây:

Bảng 2.9: Các tham số trong mô hình lục giác

Tham số	Công thức
Độ cao lõi	Λ
Vòng thứ nhất – xanh lá	$R_1 = \Lambda$
Vòng thứ hai (1) – xanh dương	$R_{21} = 2\Lambda \times \cos(30)$
Vòng thứ hai (2) – đỏ	$R_{22} = 2\Lambda$
Vòng thứ ba (1) – xanh lam	$R_{31} = \sqrt{7} \Lambda$
Vòng thứ ba (2) – vàng	$R_{32} = 3\Lambda$
Vòng thứ tư (1) – cam	$R_{41} = 4\Lambda \times \cos(30)$
Vòng thứ tư (2) – hồng	$R_{42} = \sqrt{13} \Lambda$
Vòng thứ tư (3) – xanh lơ	$R_{43} = 4\Lambda$



Hình 2.11: Các mô hình lục giác màu (trong đó các lõi được đánh dấu các lần lặp khác nhau)

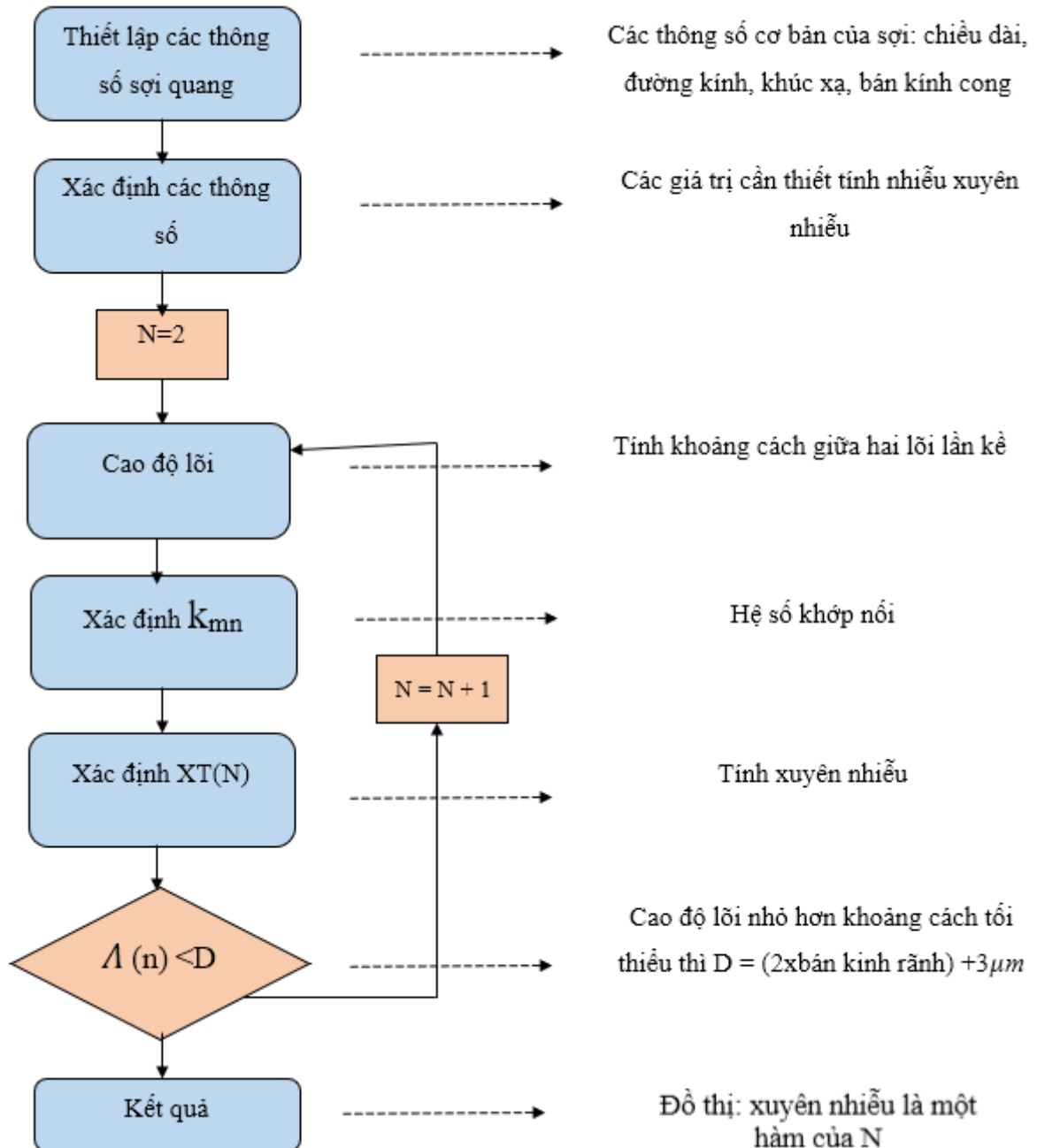
2.3 Kết luận chương 2:

Nội dung chương 2 phân tích các mô hình được đề xuất cho sợi quang đa lõi, các bộ cục được đề xuất cân bằng xuyên nhiễu qua các lõi, với xuyên nhiễu thấp nhất với mỗi lõi trong từng cấu trúc. Chương cuối sẽ mô phỏng và đánh giá xuyên nhiễu áp dụng các mô hình đã đề xuất trong chương 2.

Chương 3: Khảo sát và đánh giá xuyên nhiễu các lõi MCF

3.1 Lược đồ đánh giá xuyên nhiễu

Để khảo sát và đánh giá xuyên nhiễu giữa các lõi MCF sử dụng ngôn ngữ lập trình MatLab thông qua các kết quả tính toán số, đối với mỗi mô hình được đề xuất, các giá trị xuyên nhiễu khác nhau như một hàm của số lõi có trong mô hình đó.

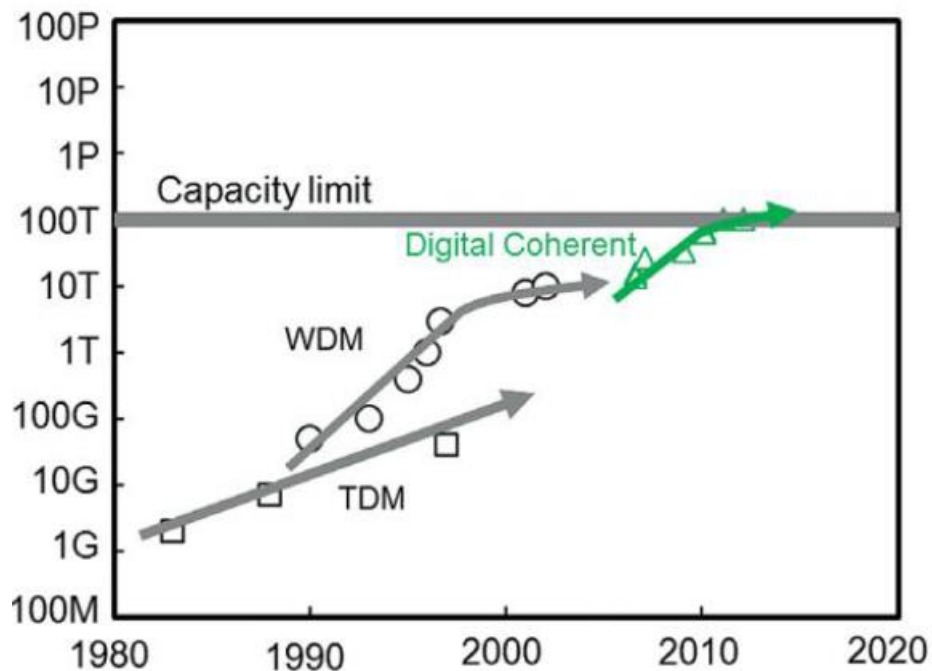


Hình 3.1: Sơ đồ khối lược đồ đánh giá xuyên nhiễu

Hình 3.1 mô tả việc sử dụng thuật toán cho mô hình lý thuyết đầu tiên là mô hình sắp xếp một vòng. Trong mô hình này, số lượng lõi ban đầu là hai và cách để tăng thêm số lõi là mỗi lần tăng sẽ tăng thêm một.

3.2 Mô tả bài toán

Hệ thống truyền dẫn cáp quang đơn mode phát triển mạnh mẽ, nhanh chóng đạt đến giới hạn truyền dẫn, khoảng 100Tb/s trên mỗi sợi [10] sử dụng nhiều kỹ thuật ghép kênh (hình 3.2). Để khắc phục tình trạng suy giảm công suất xảy ra, kết hợp ghép kênh phân chia không gian với sử dụng sợi quang đa lõi, như một giải pháp tối ưu để khắc phục những giới hạn dung lượng.



Hình 3.2: Sự phát triển của khả năng truyền dẫn theo từng năm

Sợi chứa nhiều lõi với giá trị xuyên nhiễu tối ưu sẽ đạt được dung lượng lớn hơn so với những sợi chỉ có một lõi. Điều này muốn nói đến một phương pháp để thiết lập vị trí các lõi và giảm thiểu xuyên nhiễu của chúng. Để phù hợp với các thông số sợi quang được đề cập trong bảng 3.1, một số cách sắp xếp đã được đề xuất và kết quả xuyên nhiễu được tính toán bằng mô phỏng MatLab. Phân tích các kết quả này giúp xác định số lõi cần được đặt bên trong sợi quang để tối đa hóa công suất của nó. Ba tình huống khác nhau sẽ được xem xét và phân tích, tương ứng đường kính lớp bọc là 260 μm , 300 μm và 125 μm .

Bảng 3.1: Các tham số cấu trúc của sợi MCF nghiên cứu

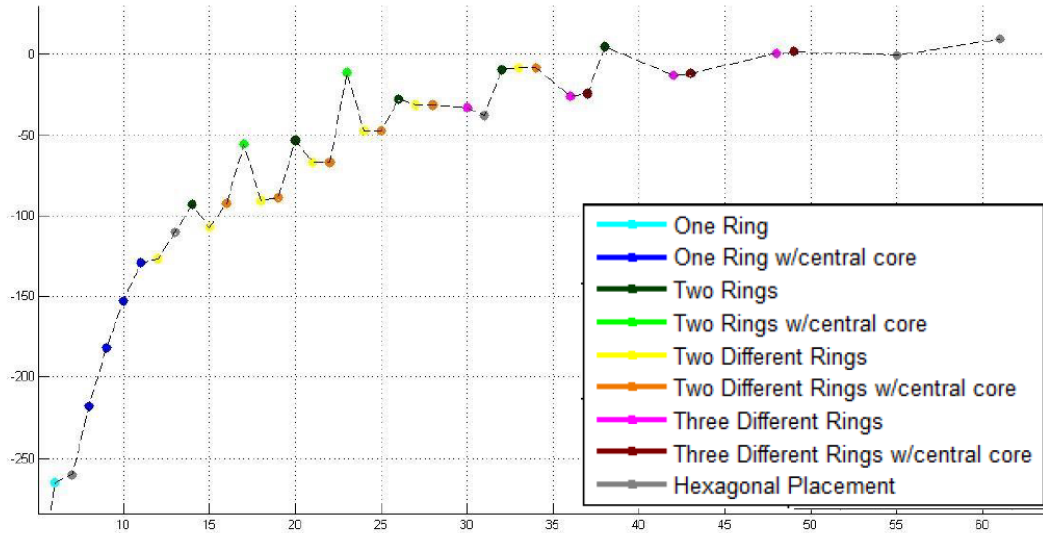
Tham số	Đơn vị	Giá trị
C_d	$[\mu m]$	125, 260, 300
OCT	$[\mu m]$	30
L	$[km]$	100
a_1	$[\mu m]$	4.5
a_3/a_1	--	3
a_2/a_1	--	2
wtr/a_1	--	1
n_1	--	1.4551
Δ_1	%	0.35
Δ_2	%	0.35
λ	$[nm]$	1550
R_b	$[mm]$	140

3.3 Các kết quả tính toán số và phân tích đánh giá xuyên nhiễu

Cung cấp một giải pháp tối ưu cho vấn đề phân bố lỗi trong MCF là một nhiệm vụ khó thực hiện. Nhiều cách sắp xếp đã được đề xuất cho sự phân bố lỗi bên trong sợi quang nhưng chỉ sau khi nghiên cứu kỹ lưỡng về xuyên nhiễu trong mỗi bố cục thì mới có thể kết luận mô hình nào tối ưu. Ba trường hợp khác nhau sẽ được nghiên cứu riêng biệt, mỗi trường hợp có một sợi quang với thông số được xác định rõ ràng. Đường kính lớp bọc, thông số duy nhất thay đổi giữa các trường hợp 260 μm , 300 μm , 150 μm . Các bố cục được đề xuất sau đó sẽ được sử dụng để phân phối không gian các lỗi trong sợi quang và với sự trợ giúp của MatLab, sau đó so sánh giữa các kết quả của mỗi trường hợp.

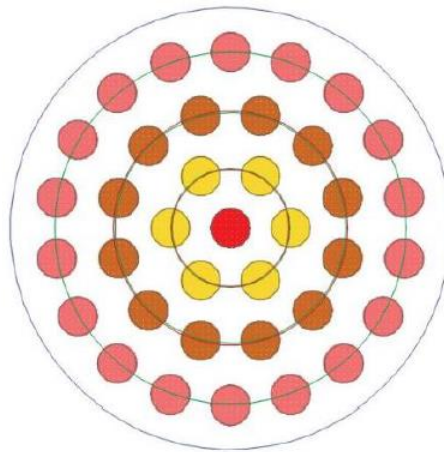
3.3.1 $CD = 300 \mu m$

Việc sử dụng sợi có đường kính bọc lớn cho phép đặt nhiều lỗi hơn bên trong sợi, điều này ảnh hưởng trực tiếp với việc tăng công suất. Để chọn cách bố trí lỗi tốt nhất cho hai tình huống được đề xuất có các điều chế khác nhau, nhiều mô phỏng khác nhau đã được thử nghiệm. Biết được dung sai xuyên nhiễu cho từng trường hợp và có một hình tóm tắt kết quả xuyên nhiễu tốt nhất thu được cho sợi quang có đường kính 300 μm (hình 3.3), có thể rút ra một số kết luận.

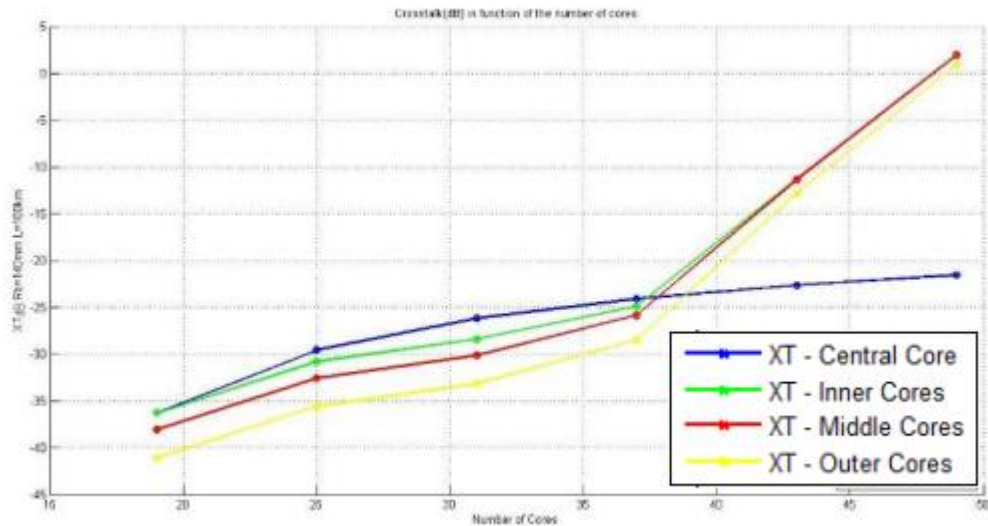


Hình 3.3: Xuyên nhiễu với số lượng lõi tương ứng - $CD = 300 \mu m$

Đối với cáp quang sử dụng QPSK chỉ có thể chịu tối đa giá trị xuyên nhiễu đến -20 dB , mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm (hình 3.4) là cách sắp xếp mang lại kết quả tốt nhất. Bằng cách chọn cách sắp xếp này, có thể lắp được 37 lõi trong sợi quang mà không vượt ngưỡng giới hạn nhiễu (hình 3.5). Cách sắp xếp này vượt trội hơn mô hình mô hình lục giác khi lắp nhiều lõi hơn trong sợi quang, đây là một dấu hiệu tốt cho thấy cách sắp xếp nhiều lõi này gần như tối ưu vì việc đặt các lõi theo hình lục giác luôn hiển thị kết quả tốt. Xuyên nhiễu trong tất cả các lõi luôn cân bằng, không bao giờ lớn hơn -24 dB .

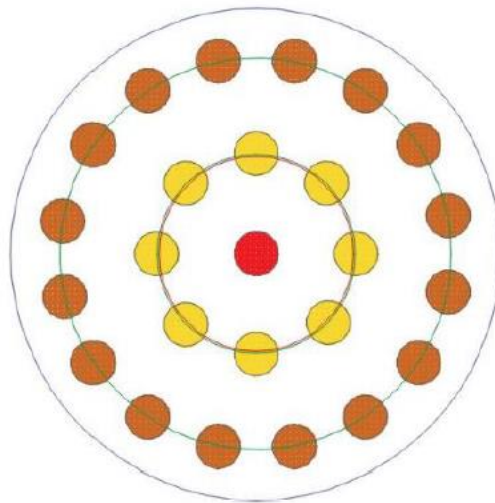


Hình 3.4: Mô hình ba vòng khác nhau và lõi trung tâm, 37 lõi

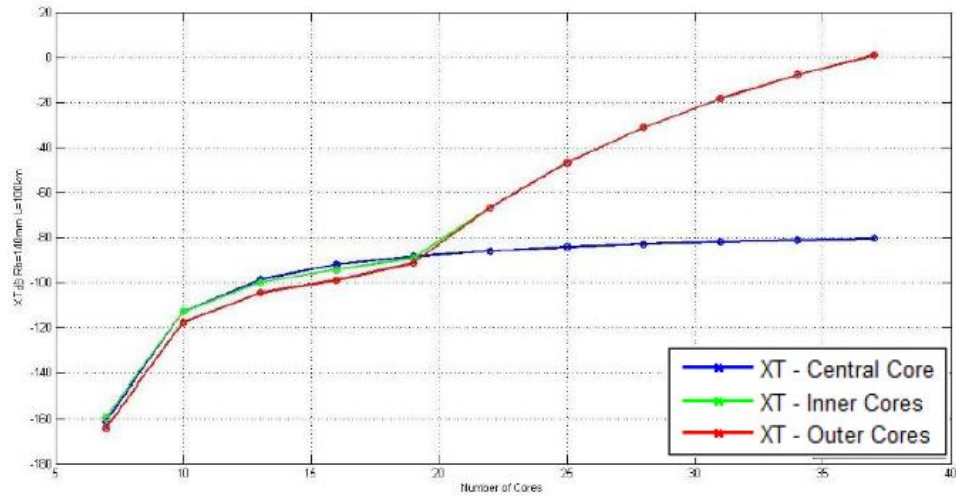


Hình 3.5: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng - Ba vòng khác nhau, $CD = 300 \mu m$

Đối với trường hợp khác, có 256-QAM với giới hạn chỉ -40 dB cho xuyên nhiễu tối đa, mô hình hai vòng và lõi trung tâm (hình 3.6) nên là mô hình phù hợp. Bố cục này cân bằng hoàn hảo xuyên nhiễu trong cả hai vòng trong khi lõi trung tâm nhỏ hơn. Các lõi trong cả hai vòng sẽ có -47 dB nhiễu xuyên âm, lõi trung tâm sẽ chỉ có $-84,5 \text{ dB}$ (hình 3.7). Nếu giới hạn xuyên nhiễu cho trường hợp này thấp hơn khoảng $-37,7 \text{ dB}$, thì nó sẽ là có thể chứa 31 lõi theo mô hình lục giác.



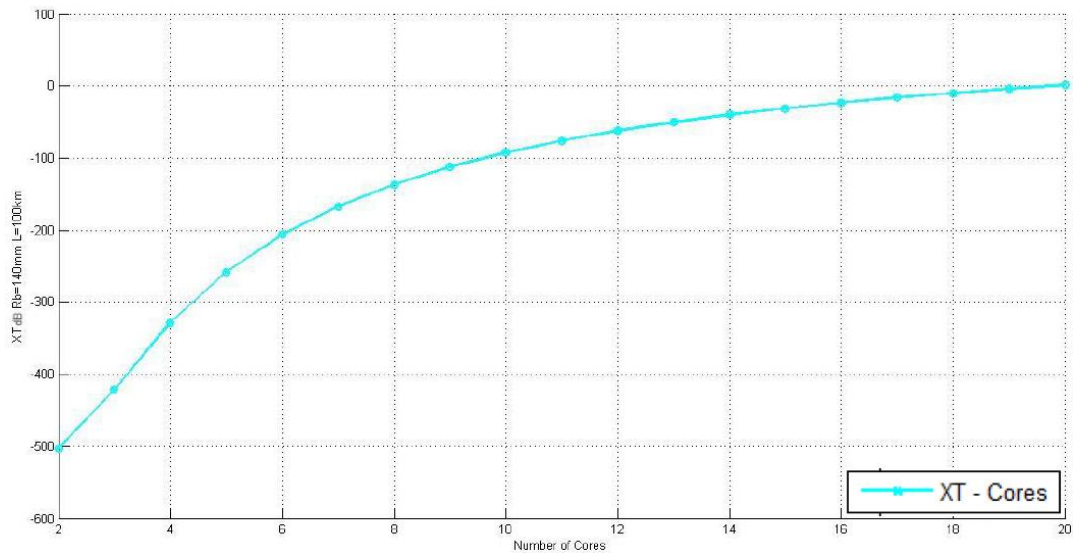
Hình 3.6: Mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm – 25 lõi, $CD = 300 \mu m$



Hình 3.7: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng

3.3.2 $CD = 260 \mu m$

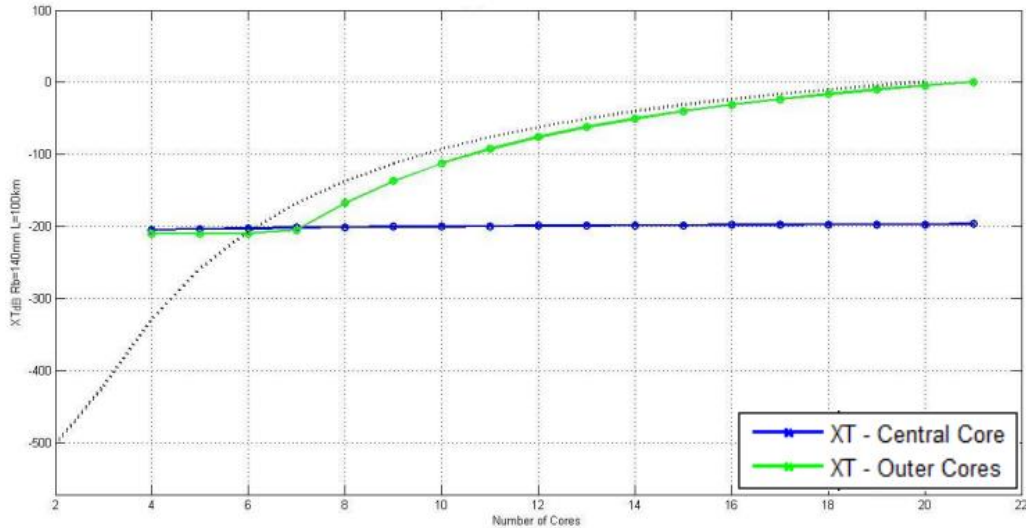
Mô hình một vòng (hình 3.8): để xác định mô hình nào phù hợp nhất với một số lõi nhất định, cần phân tích xuyên nhiễu như một hàm của số lõi cho tất cả các mô hình được đề xuất. Trong phân tích dưới đây, các dấu chấm biểu thị các giá trị của nhiễu cho một số lõi nhất định trong khi đường nét liền mô tả một tập hợp các giá trị xuyên nhiễu nhất định.



Hình 3.8: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng - Mô hình một vòng

Xuyên nhiễu của một lõi (đơn vị: dB), tăng lên khi ngày càng nhiều lõi thêm vào. Tỷ lệ nghịch với khoảng cách giữa các lõi. Có thể thấy rằng khi đặt các lõi theo cách này, không quá hai mươi lõi đặt được vào bên trong sợi quang.

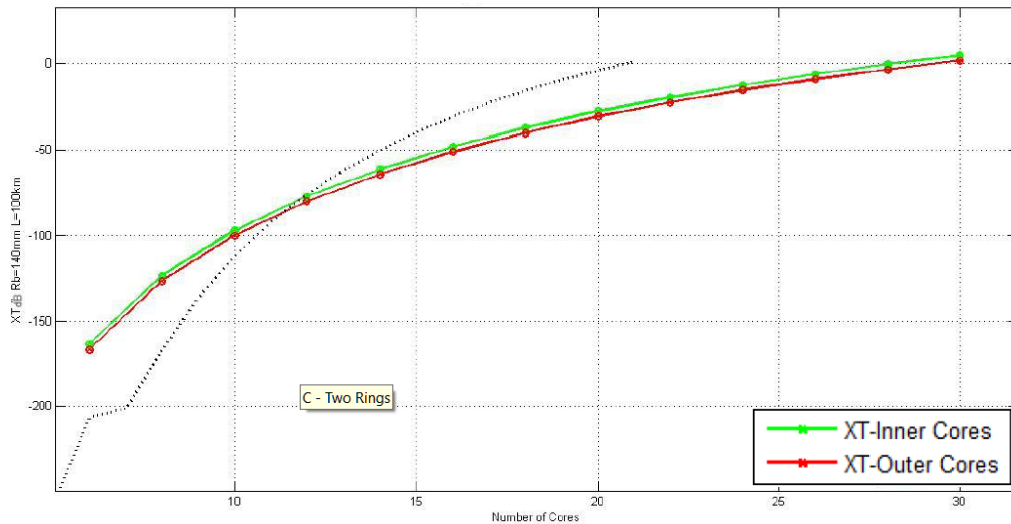
Mô hình một vòng với lõi trung tâm (hình 3.9): đường nét đứt biểu diễn kết quả tốt nhất từ mô hình trước đó, để có thể so sánh với mô hình hiện tại. Trong trường hợp này là mô hình một vòng.



Hình 3.9: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng – Mô hình một vòng với lõi trung tâm

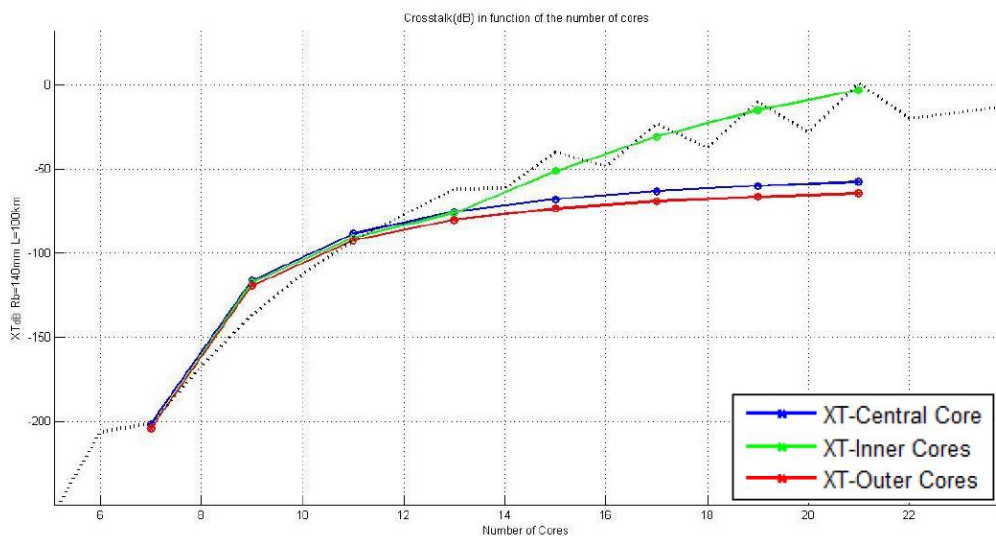
Đường xanh lá biểu diễn giá trị nhiễu cho lõi trung tâm, đường xanh dương biểu diễn cho lõi vòng ngoài. Ban đầu, nhiễu của lõi trung tâm gần giống với các lõi lân cận. Tuy nhiên, khi nhiễu lõi được thêm vào, các lõi bên ngoài càng gần nhau hơn khiến xuyên nhiễu các lõi bên ngoài tăng lên. Điều đó cho thấy xuyên nhiễu của lõi trung tâm đến từ sự tương tác của nó với các lõi bên ngoài và chúng luôn ở cùng một khoảng cách với nó, nhiễu của lõi trung tâm sẽ tăng lên khi có nhiều lõi vòng ngoài hơn. Qua đó thấy rằng kết quả của mô hình này tốt hơn so với mô hình một vòng dù bảy lõi hoặc nhiều lõi hơn trong sợi quang.

Mô hình hai vòng (hình 3.10): hai đường xanh lá và đỏ tương ứng xuyên nhiễu của lõi lần lượt vòng ngoài và vòng trong. Còn đường nét đứt cho kết quả tốt nhất từ những mô hình trước. Bằng cách phân tích hình vẽ, rõ ràng mô hình này hoạt động tốt hơn mô hình trước đó với mười hai lõi trở lên. Xuyên nhiễu trong cả hai vòng đều rất giống nhau đối với bất kỳ số lượng lõi nào, điều này có thể thực hiện được bằng cách điều chỉnh bán kính của vòng trong.



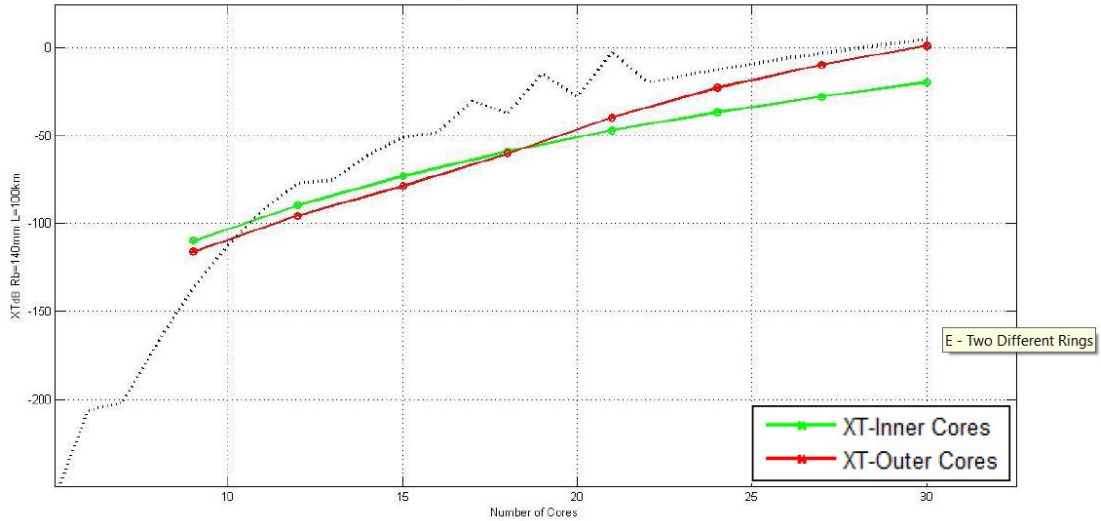
Hình 3.10: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng - Mô hình hai vòng

Mô hình hai vòng với lõi trung tâm (hình 3.11): cần có ba đường đồ thị phân tích hiệu suất của bố cục này, mỗi ô đại diện cho một loại cốt lõi khác nhau trong cấu trúc. Chúng ta có thể thấy rằng bố cục này tốt hơn bất kỳ nào trước đó cho 13, 15, 17, 19 và 21 lõi. Khi mô hình này bao gồm bảy lõi, nó giả định cấu trúc giống như “Một vòng với lõi trung tâm”, do đó hiển thị chính xác các kết quả nhiễu. Điều này xảy ra là do thuật toán giảm thiểu nhiễu được sử dụng khi điều chỉnh bán kính vòng trong. Việc đặt các lõi Bên trong ở cùng một khoảng cách với lõi trung tâm và bên ngoài là ưu điểm sắp xếp mô hình này.



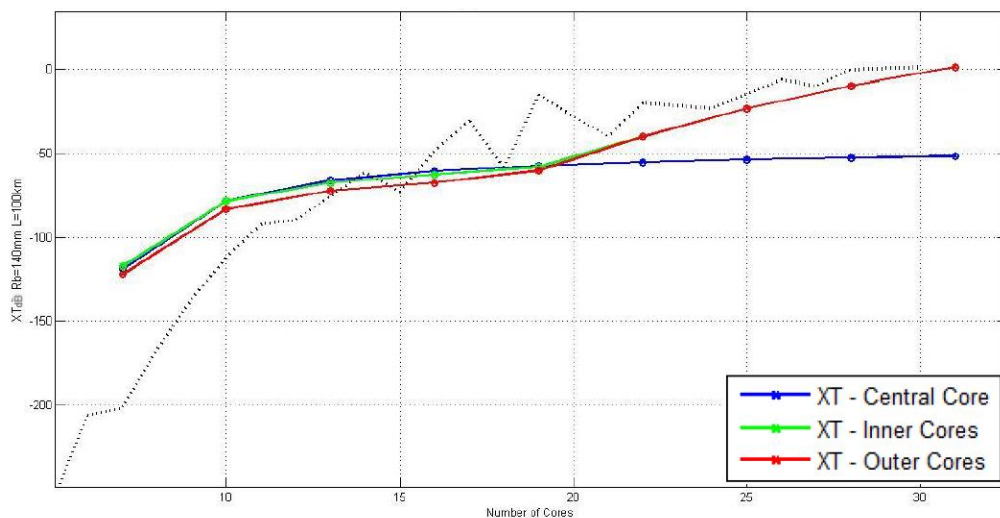
Hình 3.11: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng - Mô hình hai vòng với lõi trung tâm

Mô hình hai vòng khác nhau (hình 3.12): xuyên nhiễu của lõi bên trong và vôi ngoài được biểu thị lần lượt bằng các đường màu xanh lá và đỏ. Nó có sự phân bố cân bằng vì cả hai đường không lệch nhau quá nhiều. Mô hình này phổ biến hơn trong hầu hết các biến thể của nó, khả năng tối ưu hơn tất cả các mô hình trước đó từ mười hai lõi trở đi.



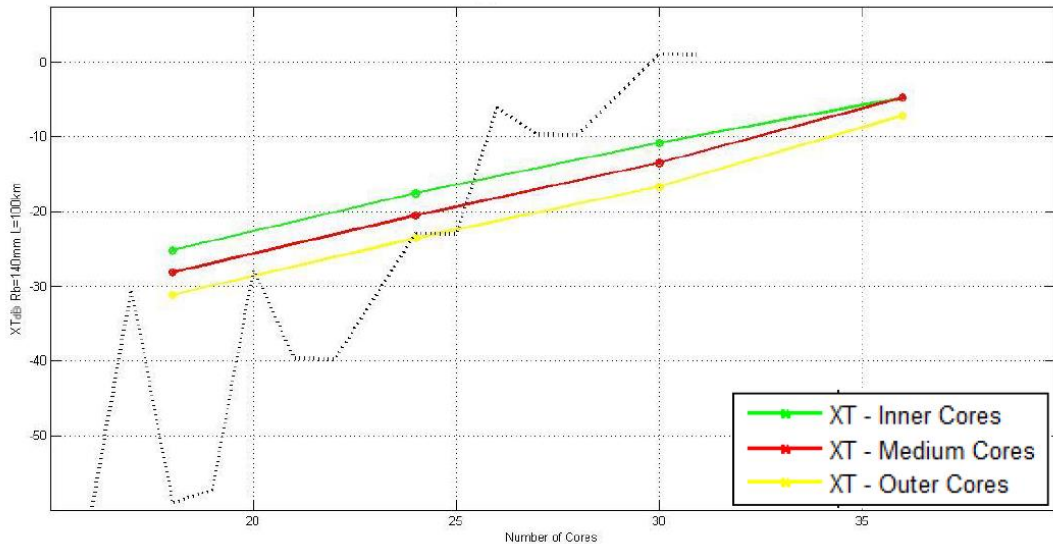
Hình 3.12: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng – Mô hình hai vòng khác nhau

Mô hình hai vòng khác nhau với lõi trung tâm (hình 3.13): mô hình này đa phần lớn kết quả mang lại tốt hơn rõ ràng so với những kết quả thu được trước đó. Mặc dù không cân đối, nhưng hiển thị kết quả tối ưu mạnh mẽ hơn bất kỳ mô hình nào trước đó từ mười sáu lõi trở đi.



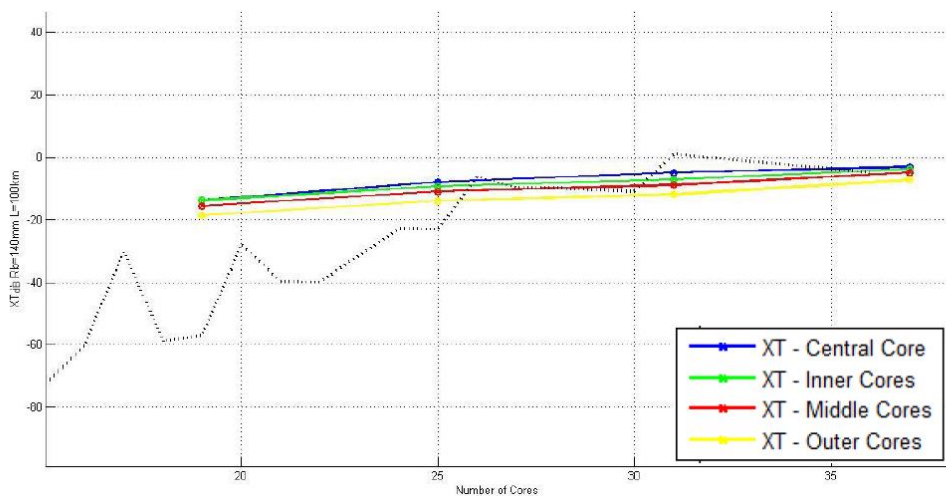
Hình 3.13: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng – Mô hình hai vòng khác nhau lõi tâm

Mô hình ba vòng khác nhau (hình 3.14): ưu tiên sử dụng mô hình ba vòng khác nhau cho ba mươi và ba mươi sáu lõi, mặc dù cả hai biến thể đã mang lại giá trị nhiễu cao hơn giá trị hợp lý. Cách sắp xếp này, mặc dù không khả thi đối với trường hợp 260 μm , nhưng cho thấy hứa hẹn sử dụng cho các sợi có đường kính lớp bọc lớn hơn vì tất cả các lõi của nó mang lại xuyên nhiễu cân bằng rõ ràng.



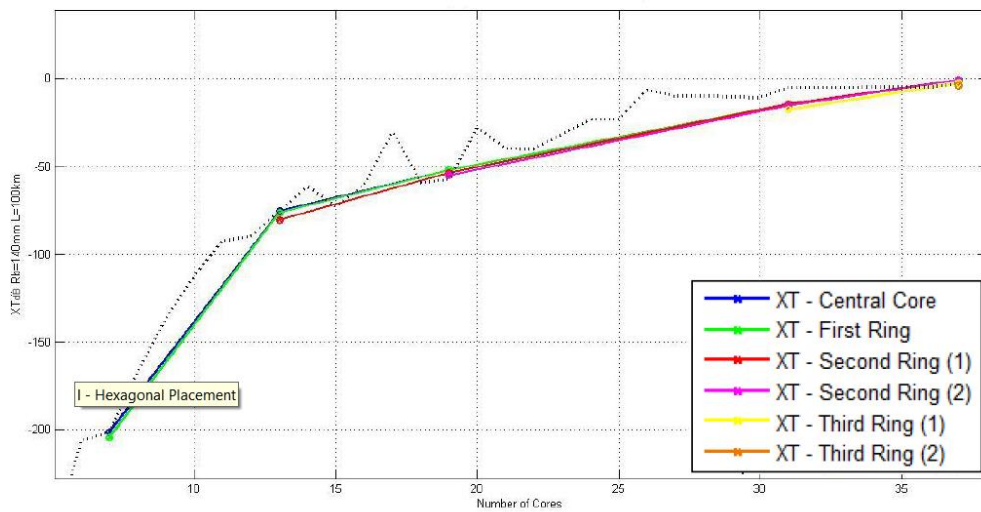
Hình 3.14: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng – Mô hình ba vòng khác nhau

Mô hình ba vòng khác nhau với lõi trung tâm (hình 3.15): cách sắp xếp này có rất ít vị trí trên sợi quang có 260 μm , vì giá trị xuyên nhiễu của nó khá cao. Khi lắp 31 và 37 lõi, nó hoạt động tốt hơn bất kỳ mô hình nào trước đó, mặc dù mô hình này mong đợi mang lại kết quả thực tế cho các sợi quang lớn hơn.



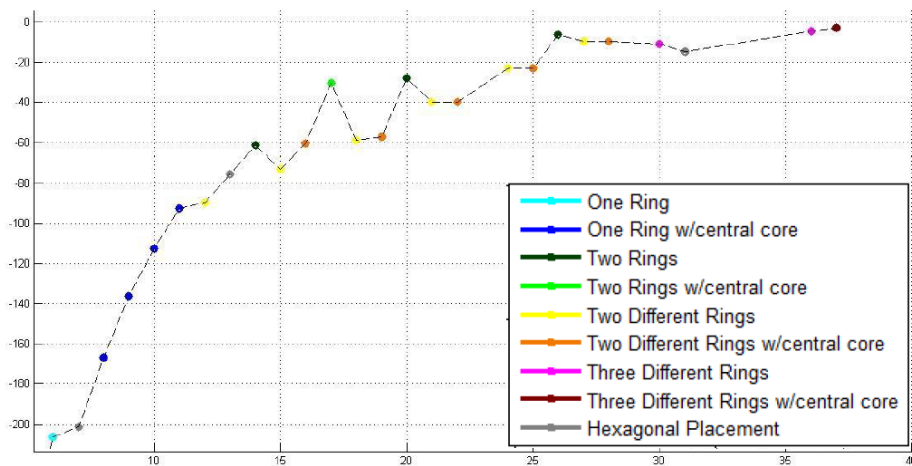
Hình 3.15: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng – Mô hình ba vòng khác nhau lõi trung tâm

Mô hình lục giác (hình 3.16): việc đặt các lõi theo cấu trúc lục giác đảm bảo các giá trị xuyên nhiễu cân bằng độc lập với số lõi được quyết định đặt bên trong sợi quang. Khi đặt 7 và 13 lõi vào bên trong sợi quang, cách sắp xếp này giả định cấu trúc tương tự như trong “Một vòng với lõi trung tâm” và “Hai vòng với lõi trung tâm”, hiển thị cùng một kết quả xuyên nhiễu. Đối với mười chín lõi, kết quả kém hơn một chút so với bố cục “Hai vòng khác nhau với lõi trung tâm” và đối với 31 thì tốt hơn bất kỳ mô hình sắp xếp nào trước đó.



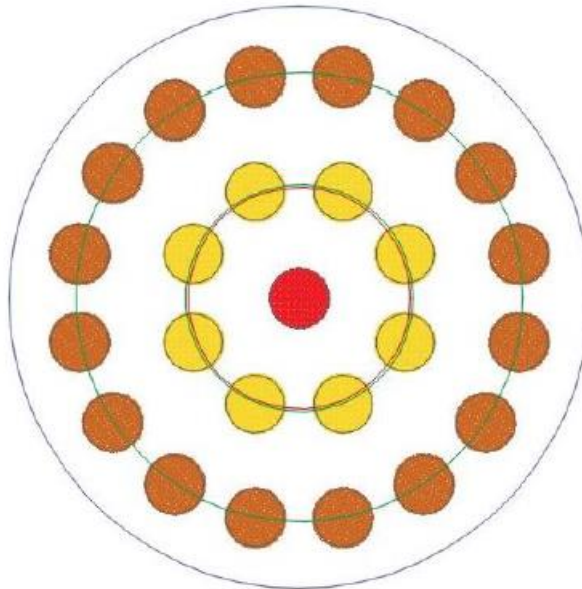
Hình 3.16: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng – Mô hình lục giác

Cuối cùng, đã thu được kết quả xuyên nhiễu cho tất cả các mô hình được đề xuất (hình 3.17), so sánh chúng, để xem xét một cách toàn diện hơn về kết quả thu thập được.



Hình 3.17: Xuyên nhiễu so với số lượng lõi - $CD = 260 \mu m$

Các dấu chấm thể hiện kết quả xuyên nhiễu tốt nhất thu được đối với một số lõi nhất định. Màu của chúng xác định loại mô hình được sử dụng để đạt được giá trị xuyên nhiễu này. Điều quan trọng là những giá trị này đại diện cho sự xuyên nhiễu của những lõi hoạt động kém hơn trong mỗi mô hình hay giá trị cao nhất của nhiễu trong mô hình. Nếu muốn sử dụng QPSK trong khoảng cách 1000 km với tỷ lệ 4 dB OSNR, xuyên nhiễu không quá -20 dB trong bất kỳ lõi nào của sợi quang. Trong trường hợp này, mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm (hình 3.18) là mô hình tối ưu vì không có mô hình nào khác có thể phù hợp với nhiễu lõi (25 lõi) trong sợi quang. Bố cục này sẽ bao gồm 16 lõi ở vòng ngoài và 8 lõi ở vòng trong, tất cả đều có cùng giá trị nhiễu: -23 dB. Chỉ lõi trung tâm trong mô hình này sẽ mang lại giá trị xuyên nhiễu khác biệt đáng kể so với các lõi khác, khoảng -53 dB.



Hình 3.18: Mô hình hai vòng khác nhau và lõi trung tâm – 25 lõi – $CD = 260 \mu m$

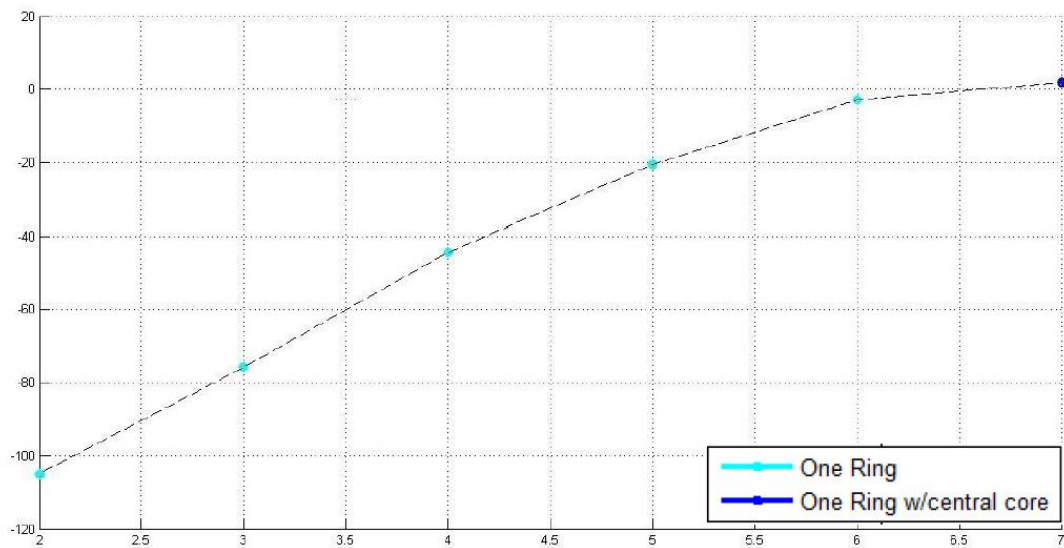
Nếu muốn sử dụng 256-QAM trên khoảng cách 100 km với tỷ lệ 4 dB OSNR, phải đảm bảo dưới -40 dB xuyên nhiễu trong bất kỳ lõi nào của sợi quang. Trong trường hợp này, nên sử dụng bố cục "Hai vòng khác nhau với một lõi trung tâm" nhưng lần này chỉ có 13 lõi. Mô hình này sẽ được cấu tạo bởi 14 ở vòng ngoài và 7 ở vòng trong, tất cả đều có nhiễu xấp xỉ -40 dB. Lõi trung tâm có -55dB, vẫn khác biệt đáng kể so với các giá trị xuyên nhiễu của các lõi còn lại trong cấu trúc, giống như trong liên kết trước sử dụng QPSK.

Sau khi chọn mô hình phù hợp cho mỗi tình huống. Mô hình sắp xếp lục giác của 31 lõi là một cách tối ưu nhất để giảm thiểu xuyên nhiễu, được chứng minh là giải pháp tốt

nhất hiện có để bố trí số lõi chính xác đó. Nhưng, việc đặt số lõi chính xác với các thông số đã đề cập trên một sợi có đường kính $260\ \mu\text{m}$ tạo ra các giá trị nhiễu cao hơn những giá trị được cho là có thể sử dụng được. Vì lý do đó, các mô hình mới phải được tìm kiếm để đảm bảo tuân thủ các giá trị xuyên nhiễu khác nhau.

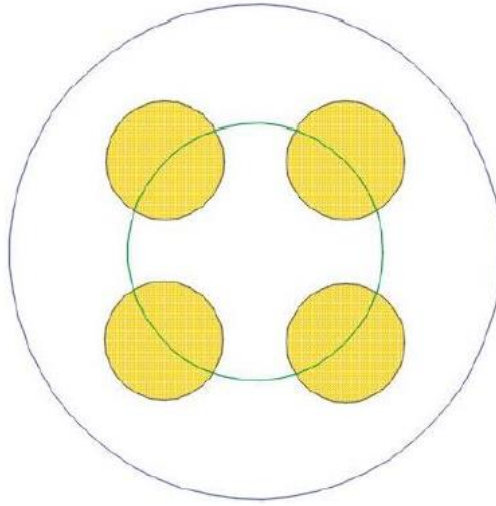
3.3.3 $CD = 125\ \mu\text{m}$

Đối với một sợi quang nhỏ như thế này, chỉ có hai mô hình có thể được áp dụng, kết quả xuyên nhiễu của chúng có thể được biểu diễn trong *hình 3.19* cùng với đường đứt nét theo hướng tăng dần của chúng.

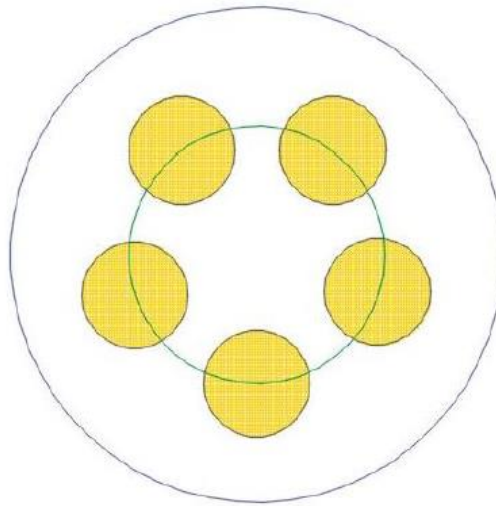


Hình 3.19: Xuyên nhiễu với số lõi tương ứng

Đối với sợi quang sử dụng QPSK có giới hạn $-20\ \text{dB}$, mô hình một vòng nên được sử dụng 5 lõi, mỗi lõi có xuyên nhiễu khoảng $-20,5\ \text{dB}$. Đối với sợi quang sử dụng 256-QAM với giới hạn $-40\ \text{dB}$, Một vòng cũng là bố cục phù hợp vì với bốn lõi, xuyên nhiễu sẽ là $-44,5\ \text{dB}$ trong mỗi lõi. Cả hai cấu trúc này, một cho mô hình sử dụng QPSK (*hình 3.21*) và một cho mô hình sử dụng QAM-256 (*hình 3.20*):



Hình 3.20: Mô hình một vòng, 4 lõi – $CD = 125 \mu m$



Hình 3.21: Mô hình một vòng, 5 lõi – $CD = 125 \mu m$

3.4 Kết luận chương 3:

Chương 3 đã trình bày kết quả so sánh các mô hình phân tích cho sợi quang đề xuất ở chương 2, thông qua các chỉ số đường kính lớp bọc, từ đó rút ra kết luận từng chỉ số có những mô hình với xuyên nhiễu tối ưu nhất sử dụng các điều chế khác nhau.

KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT

1. Kết quả đạt được

Luận văn đã trình bày tổng quan về sợi đa lõi (MCF) sử dụng cho ghép kênh theo không gian (SDM) và ảnh hưởng xuyên nhiễu giữa các lõi trong MCF. Bên cạnh đó luận văn đã đề cập đến phương pháp tối đa hóa dung lượng truyền dẫn, mô tả cách sắp xếp không gian tốt nhất các lõi bên trong ba sợi khác nhau ($Cd = 125, 260, 300 \mu m$).

Một thuật toán ước tính xuyên nhiễu đã được nghiên cứu và chín mô hình được đề xuất để thực hiện việc sắp xếp không gian này của các lõi được phân tích từ góc độ xuyên nhiễu. Từ phân tích này, các bố trí tốt nhất để đặt số lõi nhất định nào trong sợi quang đã được xác định.

Hai tuyến sợi quang có chiều dài $L=1000 \text{ km}$ sử dụng các điều chế khác nhau có xuyên âm thực tế là $-10dB$ và $-30dB$ và phù hợp với ngưỡng giới hạn, được quy cho một sắp xếp cho sự phân bố không gian của các lõi của chúng. Một cách sắp xếp khác được cho là do cả hai đường truyền cáp quang cho mỗi một trong ba loại sợi khác nhau được nghiên cứu. Đối với sợi $260 \mu m$ được phân tích kỹ lưỡng nhất trong luận văn này, có thể đặt được 25 lõi vào trong sợi khi sử dụng điều chế QPSK, trong khi chỉ có 22 lõi khi sử dụng 256-QAM. Cả hai trường hợp trên sử dụng bố cục sắp xếp hai vòng với lõi trung tâm để phân phối các lõi. Trên sợi lớn nhất, đường kính lớp bọc $300 \mu m$, đặt 37 lõi có thể nằm bên trong sử dụng điều chế QPSK trong khi chỉ có 25 lõi sử dụng điều chế 256-QAM. Đối với sợi nhỏ nhất, đường kính $125 \mu m$, bố cục một vòng phù hợp để sắp xếp các lõi với điều chế.

So sánh với các cách phân bố lõi như đã trình bày ở trên, cách sắp xếp hình lục giác với 31 lõi (hình 2.10) được nghiên cứu trong phần 2.2.7, có thể kết luận rằng phương pháp cho lõi sự phân bố được đưa ra trong luận văn này là hợp lý về mặt chức năng do kết quả của nó phù hợp với các giải pháp tiên tiến.

2. Hướng phát triển

Việc phát triển một thuật toán tối ưu hóa nhiễu cho các sợi đa lõi và sợi đơn mode, dựa trên cách mô hình được đề xuất trong luận văn này, có thể xác định loại nào phù hợp nhất với sợi có đường kính lớp bọc xác định.

Tích hợp thuật toán tối ưu hóa tham số có khả năng giảm hơn nữa xuyên nhiễu của các lõi sau khi lựa chọn cách sắp xếp.

Phát triển một thuật toán ước lượng xuyên nhiễu cho các bộ ghép kênh không gian, sử dụng các bố cục cũng như phương pháp lựa chọn được trình bày trong luận án này, có thể giảm thiểu xuyên nhiễu trong các thiết bị này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Li, T. (1993) “The impact of optical amplifiers on long-distance lightwave telecommunications”, *Proceedings of the IEEE*, 81(11), pp.1568-1579.
- [2] Essiambre, R. and Tkach, R. (2012), “Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks”, *Proceedings of the IEEE*, 100(5), pp.1035-1055.
- [3] Govind P Agrawal (2021), “Chapter 11: Space-Division Multiplexing. Fiber-Optic Communication Systems, John Wiley & Sons Inc, pp.413–450.
- [4] Takenaga, Arakawa, Sasaki, Tanigawa, Matsuo, Saitoh and Koshiha (2011) A large effective area multi-core fiber with an optimized cladding thickness. *Opt. Express*, 19(26), p.B543.
- [5] Ye, Tu, Saitoh K and Morioka T, (2014), Simple analytical expression for crosstalk estimation in homogeneous trench-assisted multi-core fibers. *Opt. Express*, 22(19), p.23007.
- [6] Koshiha M, Saitoh K, Takenaga K and Matsuo S, (2011), Multi-core fiber design and analysis: coupled-mode theory and coupled-power theory. *Opt. Express*, 19(26), p.B102.
- [7] Tapia L, (2015), Investigation on Crosstalk in Multi-core Optical Fibers. BarcelonaTech.
- [8] P. Winzer, A. Gnauck, A. Konczykowska, F. Jorge, and J. Dupuy, (2011), "Penalties from In-Band Crosstalk for Advanced Optical Modulation Formats," in 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, OSA Technical Digest.
- [9] Mathworld.wolfram.com, (2016), Circle Packing -- from Wolfram MathWorld. [online] Available at: <http://mathworld.wolfram.com/CirclePacking.html> [Accessed 14 Sep. 2016].
- [10] Saitoh K and Matsuo S, (2013), Multicore fibers for large capacity transmission. *Nanophotonics*, 2(5-6).

BẢN CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đã thực hiện việc kiểm tra mức độ tương đồng nội dung luận văn qua phần mềm DoIT một cách trung thực và đạt kết quả mức độ tương đồng 2% toàn bộ nội dung luận văn. Bản luận văn kiểm tra qua phần mềm là bản cứng luận văn đã nộp để bảo vệ trước hội đồng. Nếu sai tôi xin chịu các hình thức kỷ luật theo quy định hiện hành của Học viện.

Hà Nội, tháng 5 năm 2022

Tác giả luận văn

Vũ Hà Khoa



BÁO CÁO KIỂM TRA TRÙNG LẶP

Thông tin tài liệu

Tên tài liệu:	Luận văn
Tác giả:	Vũ Hà Khoa
Điểm trùng lặp:	2
Thời gian tải lên:	15:15 23/05/2022
Thời gian sinh báo cáo:	15:17 23/05/2022
Các trang kiểm tra:	60/60 trang



Kết quả kiểm tra trùng lặp



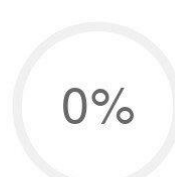
Có 2% nội dung trùng
lặp



Có 98% nội
dung không
trùng lặp



Có 0% nội dung
người dùng loại
trừ



Có 0% nội dung
hệ thống bỏ qua

Nguồn trùng lặp tiêu biểu

123docz.net tailieu.vn