

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

**TRẦN NGỌC HOÀNG**

**CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 Gbps**

Ngành: Công nghệ kỹ thuật điện tử, truyền thông

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử

Mã số: 60520203

**LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: TS. NGUYỄN NAM HOÀNG**

**Hà Nội – Năm 2016**

## **LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu và kết quả nghiên cứu trong luận văn này là trung thực và chưa hề được sử dụng để bảo vệ một học vị nào.

Tôi xin cam đoan mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện luận văn này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong luận văn đã được chỉ rõ nguồn gốc rõ ràng và được phép công bố.

## MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN .....	1
MỤC LỤC.....	2
DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT .....	4
DANH MỤC CÁC BẢNG .....	6
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ.....	7
MỞ ĐẦU.....	10
CHƯƠNG 1 CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 Gbps .....	12
1.1 Tại sao sử dụng công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps?.....	12
1.2 Diễn tiến của công nghệ truyền dẫn.....	14
1.3 Các tiêu chuẩn cho công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps .....	15
1.3.1 IEEE .....	15
1.3.2 OIF.....	16
1.3.3 ITU-T.....	16
1.4 Hệ thống thông tin quang kết hợp .....	18
1.4.1 Cấu trúc cơ bản của hệ thống thông tin quang kết hợp.....	19
1.4.2 Máy thu tách sóng quang kết hợp .....	21
1.4.3 Vòng khóa pha trong máy thu kết hợp .....	26
CHƯƠNG 2 KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ VÀ SỬA LỖI TRONG TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 Gbps.....	28
2.1 Kỹ thuật điều chế trong truyền tải bước sóng 100 Gbps .....	28
2.1.1 Phương pháp điều chế khóa dịch pha PSK (Phase Shift Keying) .....	29
2.1.2 Điều chế pha hai trạng thái BPSK .....	30
2.1.3 Điều chế pha bốn trạng thái QPSK .....	32
2.1.4 Điều chế pha kết hợp ghép phân cực DP-QPSK .....	34
2.2 Kỹ thuật sửa lỗi (FEC – Forward Error Correction).....	40
CHƯƠNG 3 ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA KHOẢNG CÁCH ĐƯỜNG TRUYỀN LÊN CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 GBPS.....	43
3.1 Tổng quan về phần mềm Optisystem 14.....	43
3.2 Mô phỏng và đánh giá hệ thống 10/ 100 Gbps DP-QPSK không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP .....	44

3.2.1	Hệ thống 10 Gbps DP-QPSK .....	45
3.2.2	Hệ thống 100 Gbps DP-QPSK.....	50
3.3	Mô phỏng hệ thống 100 Gbps DP-QPSK với bộ xử lý tín hiệu số tốc độ cao DSP	53
3.4	Kết luận .....	58
	KẾT LUẬN .....	59
	TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	60

## DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

<b>A</b>	
ASON	Automatically Switched Optical Network: Mạng quang chuyển mạch tự động
<b>B</b>	
BER	Bit Error Ratio: Tỷ lệ lỗi bit
BPSK	Binary Phase Shift Keying: Điều chế pha nhị phân
<b>C</b>	
CD	Chromatic Dispersion: Tán sắc CD
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing: Ghép kênh phân chia theo bước sóng thô
<b>D</b>	
DCC	Data Communication Channel: Kênh truyền dữ liệu
DP-QPSK	Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying: Điều chế pha trực giao phân cực
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex: Ghép kênh phân chia theo bước sóng mật độ cao
DSP	Digital Signal Processing: Xử lý tín hiệu số
<b>F</b>	
FEC	Forward Error Correction: Sửa lỗi trước
<b>G</b>	
Gbps	Gigabits per second: Gigabit/giây
<b>H</b>	
HD-FEC	Hard Decision – Forward Error Correction: Sửa lỗi trước – điều khiển cứng

<b>I</b>	
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers: Tổ chức IEEE
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector: Tổ chức ITU-T
<b>O</b>	
OIF	Optical Internetworking Forum: Tổ chức OIF
OSNR	Optical Signal-To-Noise Ratio: Tỷ lệ tín hiệu quang trên nhiễu
OTN	Optical Transport Network: Mạng truyền tải quang
<b>P</b>	
PMD	Polarization Mode Dispersion: Tán sắc mode phân cực
PSK	Phase Shift Keying: Khóa dịch pha
<b>Q</b>	
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying: Điều chế pha trực giao
<b>S</b>	
SD-FEC	Soft Decision – Forward Error Correction: Sửa lỗi trước – điều khiển mềm

## DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1.1. Chuẩn IEE P802.3 ba [13] .....	16
Bảng 1.2. Tốc độ các đơn vị kênh quang trong OTN.....	17
Bảng 2.1. Đặc tính của các kỹ thuật điều chế bước sóng 100 Gbps [8].....	28
Bảng 2.2. Độ dự trữ hệ thống với các kỹ thuật điều chế bước sóng 100 Gbps [8].....	29
Bảng 2.3. Một số tham số của máy phát 100 Gbps DP-QPSK.....	38
Bảng 2.4. Một số tham số của máy thu 100 Gbps DP-QPSK.....	39

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Các dịch vụ băng rộng.....	12
Hình 1.2. Các băng tần theo chuẩn ITU-T.....	13
Hình 1.3. Suy giảm chất lượng truyền dẫn .....	13
Hình 1.4. Diễn tiến của công nghệ truyền dẫn quang .....	14
Hình 1.5. Các tiêu chuẩn của công nghệ 100Gbps.....	15
Hình 1.6. Cấu trúc khung OTN .....	17
Hình 1.7. Ghép khung OTN [7] .....	18
Hình 1.8. Hệ thống thông tin quang kết hợp [1] .....	20
Hình 1.9. Cấu hình của máy thu kết hợp .....	21
Hình 1.10. Sơ đồ khối tổng quát máy thu Heterodyne .....	22
Hình 1.11. Phổ của a) tín hiệu quang b) tín hiệu được hạ tần IF .....	23
Hình 1.12. Sơ đồ khối tổng quát máy thu Homodyne.....	24
Hình 1.13. Giảm độ pha của tín hiệu thu được và tín hiệu tạo ra bởi dao động nội .....	24
Hình 1.14. Sơ đồ tách sóng Homodyne vuông pha với PD cân bằng.....	25
Hình 1.15. Giảm độ pha của tín hiệu thu được và dao động nội trong trường hợp tách sóng Homodyne vuông pha với PD cân bằng.....	25
Hình 1.16. Phổ của a) tín hiệu quang và b) tín hiệu băng gốc được tách sóng homodyne.....	26
Hình 1.17. Bộ thu vòng khóa pha sóng mang dẫn đường .....	27
Hình 1.18. Bộ thu vòng khóa pha Costas .....	27
Hình 2.1. Điều chế pha tín hiệu nhị phân 10111001 .....	30
Hình 2.2. Sơ đồ nguyên lý điều chế BPSK.....	30
Hình 2.3. Giảm độ và dạng phổ tín hiệu BPSK .....	31
Hình 2.4. Điều chế và giải điều chế BPSK.....	31
Hình 2.5. Bộ điều chế giao thoa March-Zehnder hai cực.....	32
Hình 2.6. Sơ đồ nguyên lý điều chế QPSK.....	33
Hình 2.7. Giảm độ và dạng phổ của tín hiệu QPSK.....	33
Hình 2.8. Mã hóa hai bit dữ liệu vào ký tự quang.....	34
Hình 2.9. Điều chế và giải điều chế QPSK.....	34



Hình 2.10. Sơ đồ nguyên lý điều chế pha DP-QPSK.....	35
Hình 2.11. Sơ đồ khối máy phát DP-QPSK.....	35
Hình 2.12. Sơ đồ khối máy thu DP-QPSK .....	35
Hình 2.13. Thay đổi pha và trạng thái phân cực của tín hiệu trong máy phát [14] .....	37
Hình 2.14. Thay đổi pha và phân cực của tín hiệu trong máy thu [14].....	37
Hình 2.15. Khuyến nghị công suất LO tối đa cho phép .....	39
Hình 2.16. Thuật toán sửa lỗi FEC.....	41
Hình 2.17. So sánh SD-FEC và HD-FEC (Coding Gain, Ovehead) [10] .....	41
Hình 2.18. Kỹ thuật sửa lỗi SD-FEC.....	42
Hình 3.1. Sơ đồ tổng quát của hệ thống thông tin quang .....	44
Hình 3.2. Sơ đồ hệ thống 10/100 Gbps DP-QPSK .....	44
Hình 3.3. Phổ của tín hiệu 10 Gbps sau máy phát .....	46
Hình 3.4. Phổ của tín hiệu sau máy thu 10 Gbps với khoảng cách khác nhau .....	46
Hình 3.5. Tín hiệu trên miền thời gian tại máy phát 10 Gbps (phân cực X).....	47
Hình 3.6. Tín hiệu trên miền thời gian tại máy thu 10 Gbps (phân cực X).....	48
Hình 3.7. Biểu đồ chòm sao tín hiệu 10 Gbps điện trên phân cực X với các khoảng cách khác nhau. ....	48
Hình 3.8. Biểu đồ chòm sao tín hiệu 10 Gbps điện trên phân cực Y với các khoảng cách khác nhau .....	49
Hình 3.9. BER trên hệ thống 10 Gbps DP-QPSK.....	49
Hình 3.10. Phổ của tín hiệu 100 Gbps sau máy phát trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP .....	50
Hình 3.11. Phổ của tín hiệu sau máy thu 100 Gbps trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP với khoảng cách khác nhau .....	51
Hình 3.12. Tín hiệu trên miền thời gian tại máy phát 100 Gbps trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP (phân cực X).....	51
Hình 3.13. Tín hiệu trên miền thời gian tại máy thu 100 Gbps trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP (phân cực X).....	52
Hình 3.14. Biểu đồ chòm sao tín hiệu 100 Gbps điện (phân cực X) trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP với các khoảng cách khác nhau. ....	52
Hình 3.15. Biểu đồ chòm sao tín hiệu 100 Gbps điện (phân cực Y) trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP với các khoảng cách khác nhau .....	53

Hình 3.16. BER trên hệ thống 100 Gbps DP-QPSK không có bộ xử lý số tốc độ cao.	53
Hình 3.17. Hệ thống 100 Gbps DP-QPSK với DSP .....	54
Hình 3.18. Phổ của tín hiệu 100 Gbps sau máy phát của hệ thống có bộ xử lý số tốc độ cao DSP.....	55
Hình 3.19. Phổ của tín hiệu 100 Gbps trên máy thu hệ thống có bộ xử lý số tốc độ cao DSP .....	56
Hình 3.20. Biểu đồ chòm sao (phân cực X) trên hệ thống 100 Gbps trước khi xử lý số .....	56
Hình 3.21. Biểu đồ chòm sao (phân cực Y) trên hệ thống 100 Gbps trước khi xử lý số .....	57
Hình 3.22. Biểu đồ chòm sao (phân cực X) sau khi xử lý số trên hệ thống 100 Gbps với bộ xử lý số tốc độ cao .....	57
Hình 3.23. Biểu đồ chòm sao (phân cực Y) sau khi xử lý số trên hệ thống 100 Gbps với bộ xử lý số tốc độ cao .....	58
Hình 3.24. Kết quả đo BER trên hệ thống 100 Gbps với bộ xử lý số tốc độ cao DSP .....	58

## MỞ ĐẦU

Chúng ta có thể thấy các dịch vụ thông tin băng rộng ngày càng tăng trưởng nhanh chóng: Đó là các thế hệ điện thoại thông minh với dịch vụ 3G/ 4G; các trang video chuyên sâu; các dịch vụ cung cấp data,... Để có thể đáp ứng được sự tăng trưởng không ngừng đó, các công nghệ truyền dẫn mới liên tục được nghiên cứu, triển khai và đưa vào ứng dụng. Đầu tiên, công nghệ thông tin quang SDH ra đời, mở ra giai đoạn phát triển mới cho ngành truyền tải dữ liệu trong viễn thông. Tuy nhiên với tốc độ SDH là 10 Gbps thì không đáp ứng được nhu cầu tăng trưởng ngày càng nhanh chóng của các dịch vụ viễn thông.

Chính vì vậy hệ thống thông tin quang ghép kênh theo bước sóng (WDM) đã ra đời và đóng vai trò quan trọng trong mạng thông tin quang. Các hệ thống truyền dẫn ghép kênh theo bước sóng đã và đang được triển khai trên toàn cầu như là một công nghệ truyền dẫn chính cho mạng đường trục và mạng vùng. Bên cạnh rất nhiều ưu điểm, công nghệ WDM bị hạn chế bởi hiệu suất sử dụng tần số đó là chỉ sử dụng được các tần số trong băng C và băng L. Chính vì vậy không thể tăng số bước sóng ghép trên một sợi quang. Điều đó dẫn đến phải nghiên cứu các công nghệ nhằm tăng dung lượng của một bước sóng.

Công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps đã được các nhà sản xuất và cung cấp thiết bị lớn trên thế giới nghiên cứu và triển khai thành công. Điều đó mở ra triển vọng cho việc nâng cấp các hệ thống 10 Gbps và 40 Gbps đang sử dụng lên 100 Gbps. Trong đó kỹ thuật kết hợp đóng vai trò chủ chốt cho tốc độ 100 Gbps để sử dụng lại hạ tầng mạng hiện đang dùng cho các tốc độ 10G Gbps và 40 Gbps. Hệ thống thông tin quang kết hợp có các kỹ thuật điều chế rất phong phú và đa dạng từ đơn giản như điều chế ASK, FSK, PSK cho đến các kiểu điều chế phức tạp như DB-PSK, DQPSK, RZ-DQPSK, DP-QPSK ... Trong đó DP-QPSK là ứng cử viên sáng giá nhất cho tốc độ 100 Gbps.

Tại Việt Nam, do nhu cầu dịch vụ băng rộng tăng cao, các hệ thống truyền dẫn bước sóng 100 Gbps đang được triển khai rộng rãi bởi các nhà mạng lớn như VNPT, Viettel, Mobifone,... Trong đó có những hệ thống triển khai mới hoàn toàn hoặc nâng cấp lên từ hệ thống truyền dẫn bước sóng 10 Gbps, 40 Gbps. Việc triển khai hệ thống 100 Gbps không chỉ với mạng đường trục mà ngay cả với mạng vùng. Chính vì vậy mà cần có một nghiên cứu sâu sắc về công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps xem các đặc điểm chính của công nghệ là gì, ảnh hưởng của đường truyền lên công nghệ và giải pháp khắc phục. Chính vì vậy tôi đã lựa chọn đề tài: “Công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps”. Nội dung đề tài được chia làm ba chương:

### CHƯƠNG 1. CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 Gbps.

- Lý do ra đời công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps.

- Diễn tiến của công nghệ truyền dẫn.
- Các tiêu chuẩn của công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps.
- Hệ thống thông tin quang kết hợp (kỹ thuật tách sóng kết hợp).

## CHƯƠNG 2. KỸ THUẬT NGHỆ ĐIỀU CHẾ VÀ SỬA LỖI TRONG TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 Gbps

- Kỹ thuật điều chế DP-QPSK trong truyền tải bước sóng 100 Gbps
- Kỹ thuật sửa lỗi SD-FEC trong truyền tải bước sóng 100 Gbps

## CHƯƠNG 3. ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA KHOẢNG CÁCH ĐƯỜNG TRUYỀN LÊN CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 Gbps

- Mô phỏng hệ thống 10 Gbps và 100 Gbps không có bộ xử lý số với các khoảng cách khác nhau và so sánh.
- Mô phỏng hệ thống 100 Gbps có bộ xử lý số ở khoảng cách lớn và kiểm tra lỗi sau bộ xử lý số.

Do kiến thức và thời gian tìm hiểu còn hạn chế nên đồ án không thể tránh khỏi những thiếu sót. Tôi rất mong nhận được những góp ý, bổ sung của thầy cô cũng như bạn đọc để đồ án này được hoàn thiện hơn.

Tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến thầy Nguyễn Nam Hoàng, người đã tận tình chỉ bảo, hướng dẫn trong suốt thời gian qua. Đồng thời, tôi cũng xin chân thành cảm ơn các thầy cô trong Khoa Điện Tử - Viễn Thông, Trường Đại Học Công Nghệ - Đại Học Quốc Gia Hà Nội đã trang bị kiến thức và giúp đỡ tôi hoàn thành đồ án này.

Hà Nội, ngày.....tháng.....năm 2016

Sinh viên

Trần Ngọc Hoàng

## CHƯƠNG 1 CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 Gbps

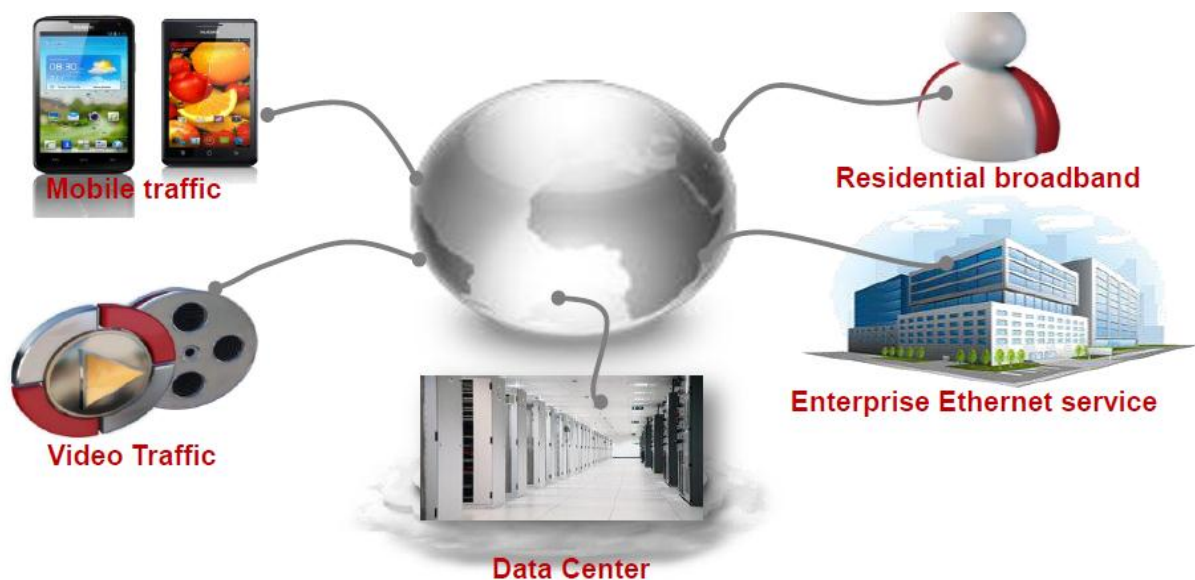
Trong chương này, chúng ta sẽ đi tìm hiểu xem tại sao lại ra đời công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps, diễn tiến của công nghệ truyền tải trên thế giới. Đồng thời, chương này cũng chỉ ra:

+ Các tiêu chuẩn để làm cơ sở triển khai công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps.

+ Kỹ thuật tách sóng được sử dụng trong truyền tải 100 Gbps.

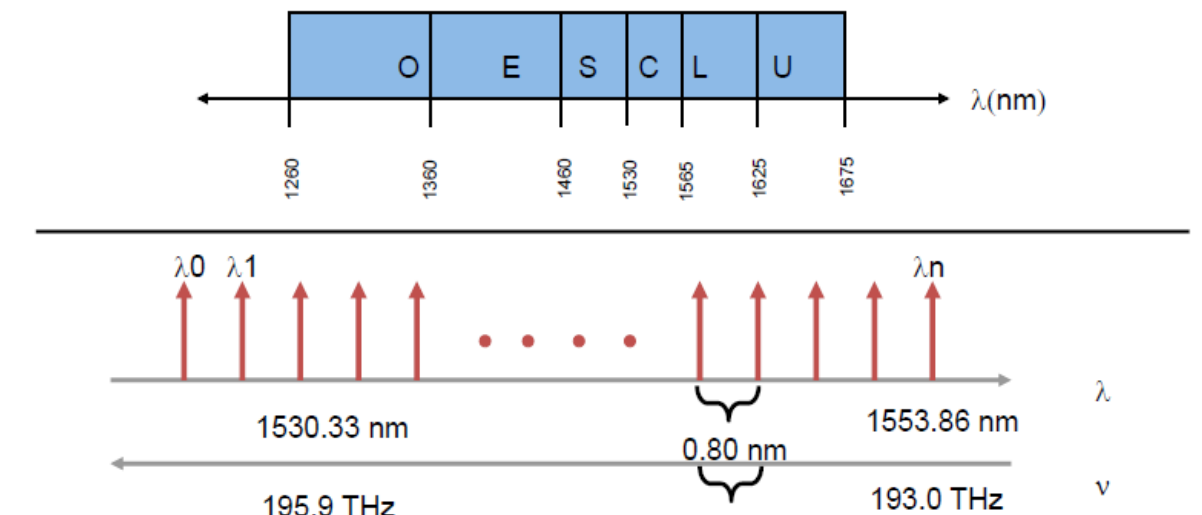
### 1.1 Tại sao sử dụng công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps?

Trong khoảng 5-10 năm qua đã cho thấy một sự gia tăng rất lớn trong yêu cầu băng thông internet. Điều đó là do các dịch vụ dữ liệu kinh doanh tăng cao, các điện thoại thông minh với dịch vụ 3G/4G, các trang web video chuyên sâu phổ biến như Youtube, Netflix, Hulu,..ngày càng phát triển. Điều này dẫn tới kết quả tất yếu là làm xuất hiện các mạng truyền tải cực lớn.



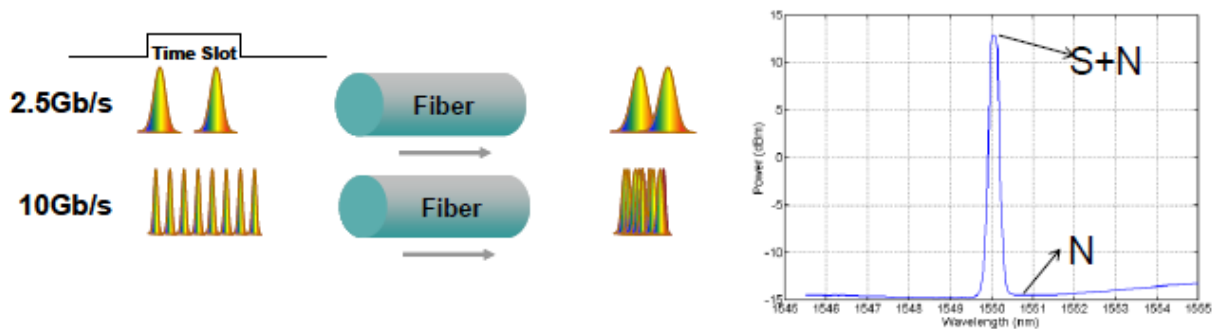
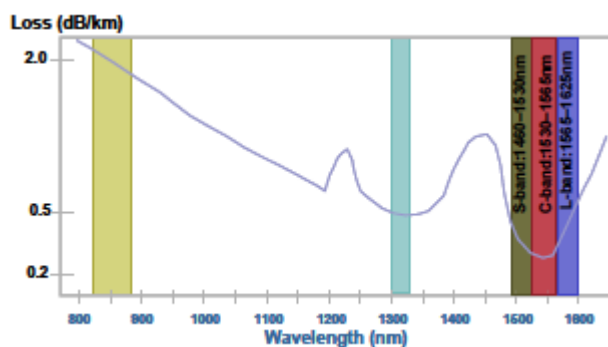
**Hình 1.1. Các dịch vụ băng rộng**

Vấn đề hiệu suất sử dụng phổ tần số trong thông tin quang cũng là một trong những lý do ra đời công nghệ 100 Gbps. ITU chia dải tần các bước sóng thành Grid; Grid được chia thành các Bands. Trong đó Band L và C được sử dụng cho DWDM.



**Hình 1.2. Các băng tần theo chuẩn ITU-T**

Công nghệ 100Gbps ra đời nhằm giải quyết bài toán về suy giảm chất lượng truyền dẫn. Đó là các vấn đề về suy hao (suy giảm theo chiều dài tuyến cáp, giới hạn khoảng cách truyền); tán sắc (dãn rộng/biến dạng xung ánh sáng khi lan truyền, giới hạn khoảng cách truyền); OSNR (tỉ số tín hiệu trên nhiễu gây ra bởi nhiễu trên đường truyền).



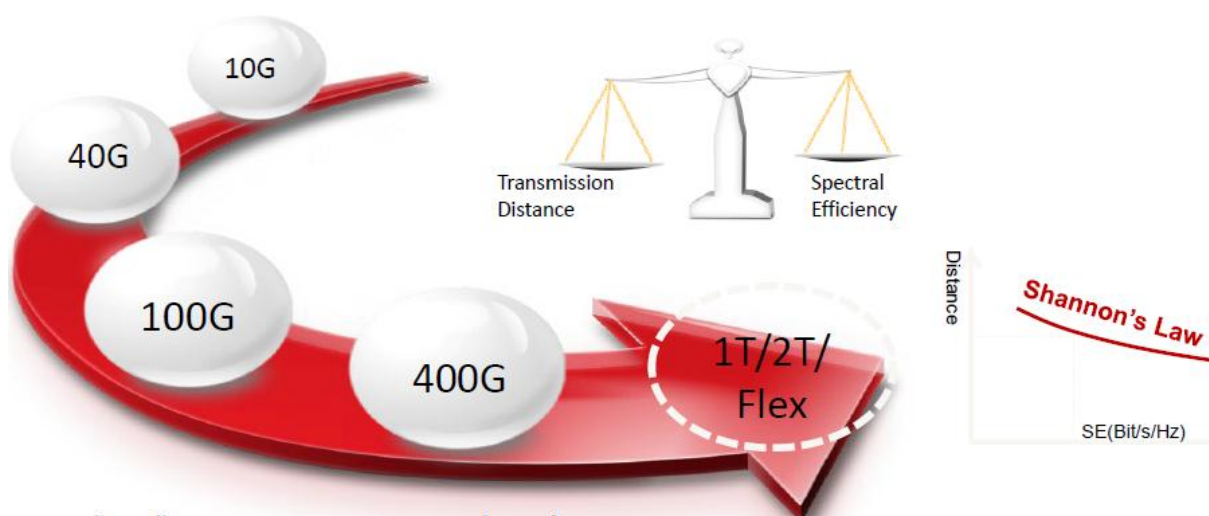
**Hình 1.3. Suy giảm chất lượng truyền dẫn**

Công nghệ 100Gbps ra đời giúp giảm giá thành/bit. Theo ước tính thì công nghệ 100Gbps ra đời sẽ giảm giá thành từ 10-30% so với công nghệ 40Gbps, từ đó tăng cơ hội tiết kiệm chi phí cho mạng DWDM, IP.

## 1.2 Diễn tiến của công nghệ truyền dẫn

Theo các số liệu điều tra vào đầu những năm 2000, tăng trưởng lưu lượng của Internet ở mức từ 70-150% một năm [6]; kể từ năm 2009, tỉ lệ này nằm ở mức 40-50% [19]. Rõ ràng với mức độ tăng trưởng đó thì hệ thống mạng sử dụng tốc độ 10Gb/s sẽ không đáp ứng được. Nhiều nhà khai thác mạng lớn đã lập kế hoạch mở rộng một cách đáng kể năng lực mạng lưới để đáp ứng nhu cầu tăng trưởng của lưu lượng IP. Theo số liệu của hãng nghiên cứu thị trường Dell'Oro thì các sản phẩm truyền dẫn có tốc độ 100 Gbps sẽ phát triển mạnh từ sau năm 2012 với tổng giá trị sản phẩm khoảng 30 triệu USD và sẽ đạt khoảng 500 triệu USD vào năm 2014. Còn hãng nghiên cứu thị trường Heavy Reading thì dự báo thị phần các ứng dụng có tốc độ kênh từ 40 Gbps đến 100 Gbps sẽ chiếm hơn phân nửa (55%) vào năm 2013, trong đó ứng dụng 40 Gbps chiếm 26% và 100 Gbps là 29%; gần phân nửa thị trường còn lại (45%) là của các ứng dụng 10 Gbps [15]. Hình 1.4 thể hiện xu hướng phát triển về tốc độ truyền dẫn trên các hệ thống mạng DWDM.

Truyền dẫn quang đã và đang tiến triển từ 10/40 Gbps lên 100 Gbps và thậm chí còn cao hơn (lên đến Tbps). Đối với công nghệ bước sóng 400 Gbps trở lên thì mối quan hệ giữa SE (hiệu suất phổ) và cự ly truyền dẫn trở thành bất biến.



**Hình 1.4. Diễn tiến của công nghệ truyền dẫn quang**

Hiện nay, công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps đang được triển khai rộng rãi trên toàn thế giới.

Về mặt công nghệ, truyền tải 100 Gbps chủ yếu là vấn đề điều chế mã 100 Gbps, kỹ thuật mã sửa lỗi trước FEC (forward error correction) và các công nghệ truyền tải đường. Kỹ thuật điều chế mã tiên tiến là cần thiết cho việc thực hiện truyền tải WDM dung lượng cao và truyền đường dài. Một số hãng trên lớn trên thế giới đã nghiên cứu các vấn đề này, ví dụ như Huawei đã phát triển các kỹ thuật điều chế mã tiên tiến như sDQPSK, oPDM-DQPSK, và ePDM-QPSK. Kỹ thuật sDQPSK sử dụng

kỹ thuật kiểm soát phân cực để giảm tác động phi tuyến trong hệ thống DWDM tốc độ cao, cho phép hệ thống truyền tín hiệu trên khoảng cách 1,200 km. Bằng việc thực thi phần cứng kết hợp với các thuật toán tiên tiến, kỹ thuật oPDM-DQPSK tạo điều kiện theo dõi một cách nhanh chóng phân cực quang và giúp truyền tải tới 80 bước sóng tín hiệu tại 100 Gbps. Các đặc tính cách tân của công nghệ ePDM-QPSK có thể kể đến như bộ chuyển đổi tín hiệu tương tự – số tốc độ cao (ADC), bộ xử lý số tốc độ cao (DSP). Dựa trên các thuật toán tiên tiến, DSP có thể theo dõi sự phân cực, khôi phục đồng hồ, pha và thông tin dữ liệu, thực hiện bù tán sắc và bù tán sắc phân cực (PMD). Công nghệ ePDM-QPSK có thể truyền tải lên tới 80 bước sóng của tín hiệu tại 100 Gbps trên khoảng cách 1500 km. Kỹ thuật FEC là một đặc tính quan trọng khác cho truyền tải đường dài. Để loại trừ ảnh hưởng của nhiễu làm suy giảm các tín hiệu quang, một hệ thống 100 Gbps yêu cầu FEC cao hơn các hệ thống truyền tải hiện nay [4].

### 1.3 Các tiêu chuẩn cho công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps

Các tiêu chuẩn của công nghệ 100Gbps được hình thành bởi nhiều tổ chức chuyên về phát triển và cải tiến các chuẩn thông tin quang trong các lĩnh vực như Ethernet, module quang và mạng truyền tải OTN.



Hình 1.5. Các tiêu chuẩn của công nghệ 100Gbps

#### 1.3.1 IEEE

IEEE chịu trách nhiệm cho các chuẩn liên quan đến giao diện phía client cũng như việc mapping Ethernet. IEEE đã phát triển IEEE 802.3ba như chuẩn cho giao diện Ethernet 100 Gbps.

Chuẩn Ethernet tốc độ 40/100 Gbps (IEEE P802.3ba) được thông qua vào ngày 17/06/2010, mở đường cho một làn sóng kết nối máy chủ Ethernet tốc độ cao và hệ thống chuyển mạch lõi. Thiết bị OME 6500 của Ciena cũng đã cung cấp giao diện khách hàng 100 GbE, thuận tiện cho kết nối giữa mạng WDM và mạng Metro hoặc mạng vùng. Như vậy tín hiệu 100Gb/s trên mạng lõi có thể chia thành 10 x 10 GbE client, 10 x 10 Gb/s multi-rate client hoặc 100 GbE client. Với giao diện 100 GbE, cho



phép truyền tín hiệu 100 GbE từ thiết bị truyền dẫn đến các Router lõi. Chuẩn IEEE P802.3ba được trình bày trong bảng 1.1 [11]:

	100 GbE	40 GbE
Tốc độ	103,125 Gb/s	41,25 Gb/s
1m backplane		40GBASE-KR4
10m cáp đồng	100 GBASE- CR10	40GBASE-CR4
100m MMF	100GBASE-SR10 (10 x 10Gb/s – 10sợi/hướng)	40GBASE-SR4
10km SMF	100GBASE-LR4 (4 x 25Gb/s CWDM-800 GHz)	40GBASE-LR4
40km SMF	100GBASE-ER4 (4 x 25Gb/s CWDM-800 GHz)	

**Bảng 1.1. Chuẩn IEE P802.3 ba [13]**

### 1.3.2 OIF

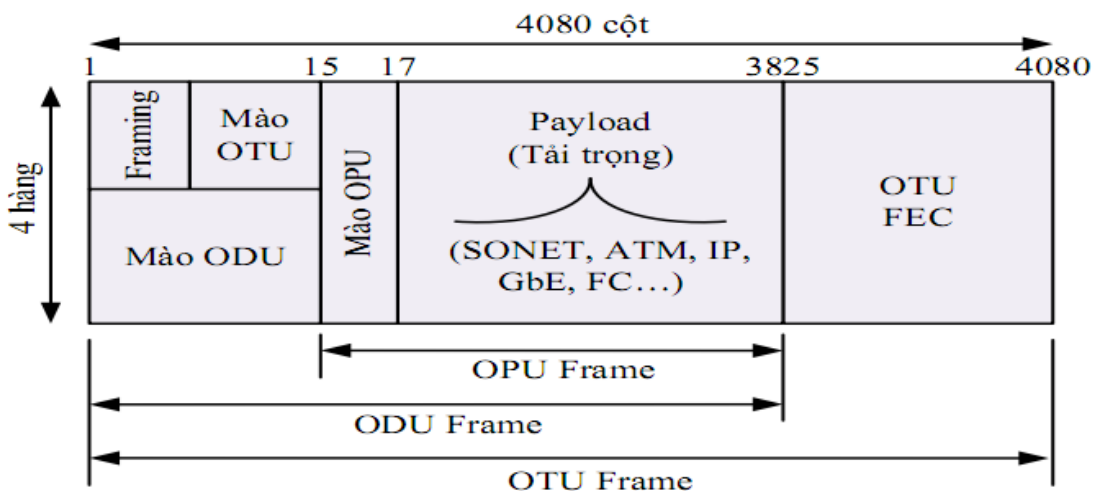
OIF đảm trách việc thiết lập ra các định chuẩn cho các module quang hệ thống đường line DWDM 100Gbps. Các định chuẩn này bao gồm các module thu phát (transceiver), công nghệ chỉnh lỗi phía thu (FEC – Forward Error Correction), cũng như các đặc tính điện và cơ khí của các module. Khác với IEEE thường không quan tâm đến kỹ thuật điều chế tín hiệu, OIF đã tập trung vào nghiên cứu các kỹ thuật điều chế cho 100 Gbps đường dài và đã lựa chọn DP-QPSK làm định dạng điều chế chuẩn cho tốc độ 100 Gbps [17].

### 1.3.3 ITU-T

ITU-T đảm trách việc thiết lập các chuẩn cho các mạng của các nhà khai thác, đưa ra các định nghĩa ODU4/OTU4, việc ánh xạ và đóng khung 100G OTN. Bao gồm các khuyến nghị G.872, G.709, G.798 cho mạng truyền tải quang (OTN). [3]

Những ưu điểm của OTN: tính trong suốt trong toàn miền quang, tối ưu hóa cho chuyển gói trên mạng quang, tích hợp FEC để tăng khoảng cách truyền dẫn, chuyển đổi dễ dàng lên tốc độ 40Gb/s và 100Gb/s... Đặc biệt với giao diện G.709 cho phép đơn giản hóa cơ chế ghép kênh và hỗ trợ đa giao thức (IP, Ethernet, SONET/SDH..) trong mạng OTN. Chuẩn ITU-T G.709 cho phép tín hiệu khách hàng (client signal)

được đóng gói và sắp xếp (mapping) vào các khung, tương tự như các khung trong SONET/SDH. Cấu trúc khung trong G.709 được minh họa như trên hình 1.6, trong đó:



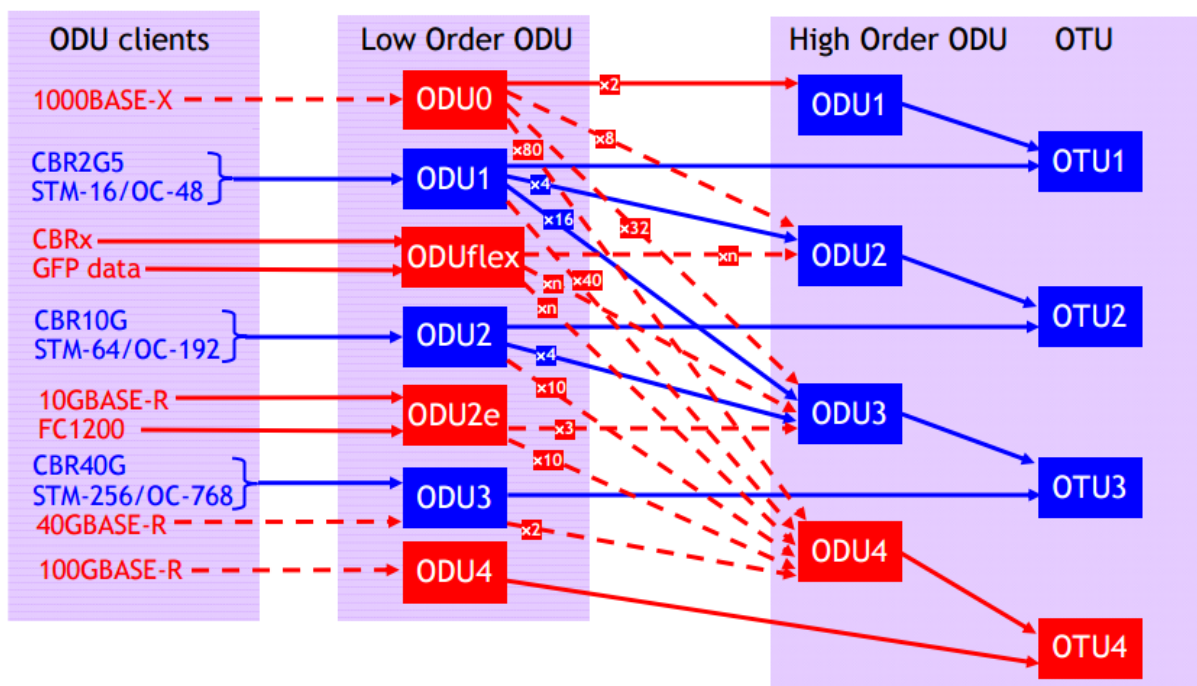
**Hình 1.6. Cấu trúc khung OTN**

- Payload: là dữ liệu khách hàng, bao gồm SONET/SDH, ATM, GbE...
- OPU: Optical channel Payload Unit: khối tải trọng kênh quang.
- ODU: Optical channel Data Unit: khối dữ liệu kênh quang.
- OTU: Optical channel Transport Unit: khối truyền tải kênh quang.
- FEC: Forward Error Correction: mã sửa lỗi trước.

OTU	ODU	Tốc độ làm tròn Gb/s	Tốc độ OUT Gb/s	Tốc độ ODU Gb/s	Tín hiệu khách hàng
	0	1,25		1,244160	1GbE
1	1	2,5	2,666057	2,498775	STM-16/OC-48
2	2	10	10,709225	10,037274	STM-64/OC-192
3	3	40	43,018414	40,319219	STM-256/OC-768
4	4	100	111,809973	104,794446	100GbE
2e	2e	10	11,095730	10,399525	10GbE
3e1	3e1	40	44,570975	41,774364	4 x ODU2e
3e2	3e2	100	44,583356	41,785969	4 x ODU2e

**Bảng 1.2. Tốc độ các đơn vị kênh quang trong OTN**

Các khung dữ liệu sẽ được ghép chéo như trên hình 1.7 và tín hiệu cuối cùng được truyền đi là OTU1 – OTU4, tốc độ các khung xem trên bảng. Như vậy đối với mạng truyền tải 100 Gbps, nếu tín hiệu khách hàng là 100GbE, thì sẽ được mapping vào ODU4 (ODU4 + FEC = OTU4). Nếu là các tín hiệu khác sẽ được mapping vào các ODU bậc thấp hơn, sau đó thực hiện ghép theo các hệ số như trên hình dưới để được tín hiệu ODU4.



Hình 1.7. Ghép khung OTN [7]

Chú thích:

- + STM: Synchronous Transport Module: khối truyền tải đồng bộ (SDH)
- + OC: Optical Carrier: khối vận tải quang (SONET).
- + L: Lower Order ODU: ODU bậc thấp hơn.
- + H: Higher Order ODU: ODU bậc cao hơn.
- + ODUflex: hỗ trợ các dữ liệu với tốc độ khác nhau.
- + FEC sử dụng trong ITU-T G.709 là mã Reed Solomon (255,239).

#### 1.4 Hệ thống thông tin quang kết hợp

Tách sóng trực tiếp tín hiệu quang đã điều chế cường độ cơ bản là quá trình đếm số lượng hạt photon đến bộ thu. Quá trình này bỏ qua pha và sự phân cực của sóng mang được tạo ra từ linh kiện quang.

Hệ thống IM/DD sử dụng bộ thu tách sóng trực tiếp có nhược điểm là nhiễu tạo ra từ bộ tách sóng quang và bộ tiền khuếch đại cao. Do đó độ nhạy của hệ thống tách

sóng theo qui luật bình phương nhỏ hơn độ nhạy của hệ thống sử dụng tách sóng theo giới hạn nhiễu lượng tử từ 10dB đến 20dB.

Do đó, để tăng độ nhạy của bộ thu quang chúng ta có thể sử dụng kỹ thuật tách quang kết hợp (như tách sóng heterodyne và homodyne). Đối với tách sóng trực tiếp, tín hiệu quang được chuyển đổi trực tiếp thành tín hiệu điện đã được giải điều chế. Còn tách sóng kết hợp, trước tiên bộ thu quang sẽ cộng tín hiệu quang tới với tín hiệu quang được tạo ra tại chỗ, sau đó tách tín hiệu quang tổng này thành tín hiệu điện. Như vậy, dòng điện kết quả này là sự dịch tần từ miền quang sang miền vô tuyến, và chúng ta có thể áp dụng các kỹ thuật xử lý tín hiệu và giải điều chế tín hiệu điện lên tín hiệu này. Bộ thu kết hợp lý tưởng hoạt động trong vùng bước sóng 1,3 $\mu$ m đến 1,6 $\mu$ m cần năng lượng của tín hiệu chỉ từ 10 đến 20 photon/bit cũng có thể đạt BER =  $10^{-9}$ . Như vậy tách sóng Kết hợp cho ưu điểm lớn nhất trong hệ thống tốc độ cao hoạt động trong vùng bước sóng dài.

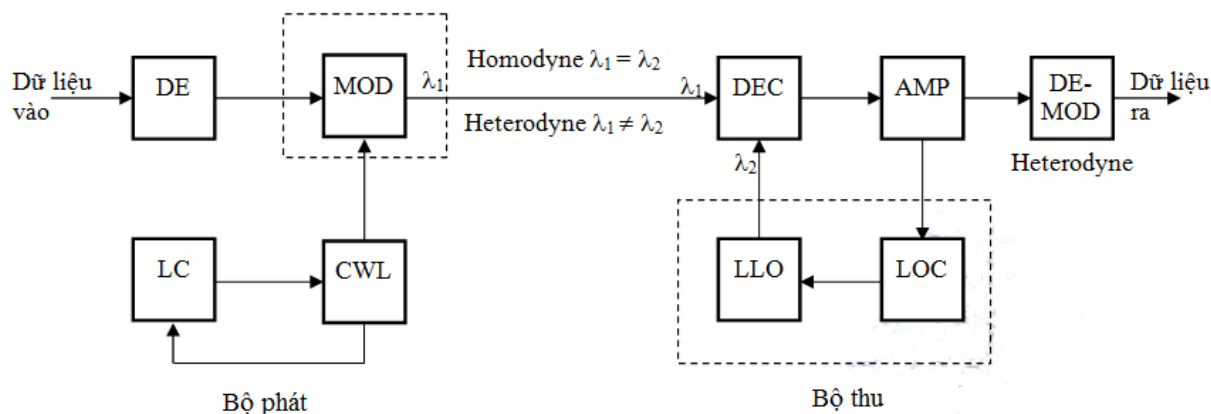
Do độ nhạy của bộ thu quang kết hợp hơn bộ thu tách sóng trực tiếp từ 10dB đến 20 dB nên bộ thu kết hợp cho phép chúng ta:

- Tăng khoảng cách trạm lặp cho hệ thống trên đất liền và dưới biển;
- Tăng tốc độ truyền dẫn mà không cần giảm khoảng cách trạm lặp;
- Tăng quỹ công suất để bù các suy hao tại coupler và các thiết bị ghép tách bước sóng;
- Cải thiện độ nhạy cho thiết bị đo quang như máy OTDR.

Các dạng điều chế trong hệ thống thông tin quang kết hợp cũng giống như trong hệ thống vô tuyến. Chẳng hạn trong truyền dẫn số có thể áp dụng kỹ thuật điều chế ASK, FSK hay PSK.

#### **1.4.1 Cấu trúc cơ bản của hệ thống thông tin quang kết hợp**

Sơ đồ khối của hệ thống thông tin quang kết hợp được minh họa ở hình 1.8. Trong sơ đồ khối này, khối được đặt trong hình chữ nhật có đường đứt nét là những phần tử chính để phân biệt sự khác biệt giữa hệ thống kết hợp và hệ thống IM/DD.



**Hình 1.8. Hệ thống thông tin quang kết hợp [1]**

Trong đó:

**DE** (Drive Electronic): khối này thực hiện khuếch đại tín hiệu ngõ vào nhằm tạo tín hiệu có mức phù hợp với các khối phía sau.

**CWL** (Continuous Wave Laser): đây là bộ dao động quang sử dụng laser bán dẫn có độ rộng phổ hẹp phát ra ánh sáng liên tục có bước sóng  $\lambda_1$ .

**LC** (laser control): khối này nhằm ổn định bước sóng phát ra của bộ dao động quang.

**MOD** (Modulator): đây là khối điều chế quang, sử dụng kỹ thuật điều chế ngoài để tạo ra tín hiệu điều chế dạng ASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying), PSK (Phase Shift Keying) hay PolSK (Polarization Shift Keying).

**LLO** (Laser Local Oscillator): đây là bộ dao động nội tại bộ thu sử dụng laser bán dẫn tạo ra tín hiệu quang có bước sóng  $\lambda_2$ .

**DEC** (Detector): khối này thực hiện hai tính năng, đầu tiên sử dụng coupler FBT cộng tín hiệu thu được ( $\lambda_1$ ) và tín hiệu tại chỗ ( $\lambda_2$ ). Sau đó đưa tín hiệu tổng tới photodiode để thực hiện tách sóng trực tiếp theo qui luật bình phương. Để thực hiện đúng với nghĩa tách sóng Kết hợp thì coupler quang phải tổ hợp các tín hiệu quang có phân cực giống nhau.

Khi tần số của tín hiệu tới và tín hiệu từ bộ dao động nội giống nhau thì bộ thu hoạt động ở chế độ Homodyne, và tín hiệu điện tái tạo được là tín hiệu dải nền. Còn khi tần số của tín hiệu tới và tín hiệu từ bộ dao động nội lệch nhau thì bộ thu hoạt động ở chế độ Heterodyne, và phổ của tín hiệu điện ở ngõ ra của khối DEC là dạng trung tần IF (intermediate frequency). IF này là dạng tín hiệu khác có chứa tín hiệu thông tin mà chúng ta muốn truyền đi (tức tín hiệu dải nền), và tín hiệu thông tin này chúng ta có thể thu được bằng cách sử dụng kỹ thuật giải điều chế điện.

**LOC** (Local Oscillator control): khối này nhằm điều khiển pha và tần số của tín hiệu dao động nội ổn định.

**AMP** (Amplifier): khối này khuếch đại tín hiệu điện sau khi tách sóng quang.

**DEMOD** (Demodulator): khối này chỉ cần thiết khi bộ thu hoạt động ở chế độ heterodyne.

### 1.4.2 Máy thu tách sóng quang kết hợp

Trong tách sóng kết hợp, tín hiệu được điều chế phức tạp, thông tin không chỉ được điều chế biên độ như tách sóng trực tiếp mà còn được điều chế pha hoặc tần số, ta có thể biểu diễn như sau:

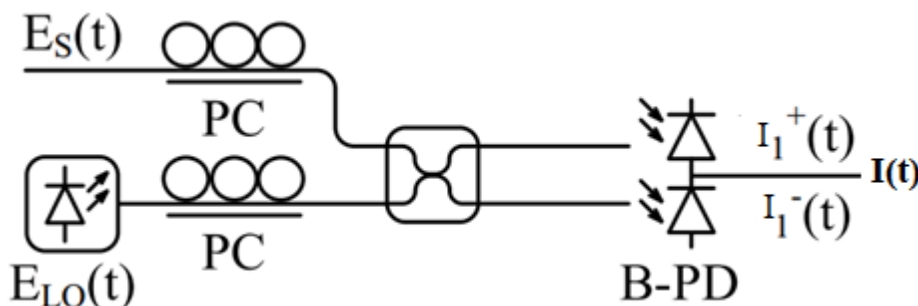
$$E_S(t) = A_S(t) \exp[i(\omega_S t + \phi_S)] \quad (1.1)$$

Với  $\omega_S$  và  $\phi_S$  là tần số sóng mang của tín hiệu và pha độc lập với thời gian,  $A_S(t)$  là thành phần biên độ của tín hiệu. Tín hiệu quang nhận được sau đó kết hợp với tín hiệu dao động nội tại máy thu có thể được trình bày như sau:

$$E_{LO}(t) = A_{LO}(t) \exp[i(\omega_{LO} t + \phi_{LO})] \quad (1.2)$$

Với  $A_{LO}(t)$ ,  $\omega_{LO}$ ,  $\phi_{LO}$  lần lượt là biên độ, tần số sóng mang và pha của LO.

Hình 1.9 mô tả cấu hình của máy thu kết hợp. Ý tưởng cơ bản của tách sóng kết hợp là trộn phần điện trường của tín hiệu quang được điều chế với tín hiệu quang được tạo ra bởi bộ dao động nội. Tín hiệu quang nhận được tại máy thu và tín hiệu quang được tạo ra bởi bộ dao động nội có dạng như trong biểu thức (1.1) và (1.2).



**Hình 1.9. Cấu hình của máy thu kết hợp**

Sơ đồ tách sóng cân bằng thường được sử dụng cho máy thu kết hợp để nén thành phần một chiều và tối ưu hóa dòng photodiode. Mục đích của việc sử dụng bộ ghép 3dB là dịch pha một trong hai tín hiệu, hoặc là tín hiệu thu được, hoặc là tín hiệu của bộ dao động nội. Khi hai tín hiệu đó có cùng phân cực, điện trường tại hai photodiode trên được biểu diễn như sau:

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_S + E_{LO}) \quad (1.3)$$

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_S - E_{LO}) \quad (1.4)$$

Khi đó ngõ ra của hai photodiode có dạng như sau:

$$I_1(t) = R \left[ \text{Re} \left\{ \frac{A_S(t) \exp(j\omega_S t) + A_{LO} \exp(j\omega_{LO} t)}{\sqrt{2}} \right\} \right]^{ms}$$

$$= \frac{R}{2} [P_S(t) + P_{LO} + 2\sqrt{P_S(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF} t + \theta_{signal}(t) - \theta_{LO}(t)\}] \quad (1.5)$$

$$I_2(t) = R \left[ \text{Re} \left\{ \frac{A_S(t) \exp(j\omega_S t) - A_{LO} \exp(j\omega_{LO} t)}{\sqrt{2}} \right\} \right]^{ms}$$

$$= \frac{R}{2} [P_S(t) + P_{LO} - 2\sqrt{P_S(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF} t + \theta_{signal}(t) - \theta_{LO}(t)\}] \quad (1.6)$$

Với “ms” có nghĩa là trung bình bình phương theo tần số quang, “Re” có nghĩa là lấy phần thực,  $\omega_{IF}$  là tần số trung tần (IF) với  $\omega_{IF} = \omega_S - \omega_{LO}$ ,  $\theta_{signal}$  và  $\theta_{LO}$  là pha của tín hiệu được truyền đi và pha của tín hiệu tạo ra bởi bộ dao động nội. R là hệ số chuyển đổi quang điện, được cho bởi công thức sau:

$$R = \frac{e\eta}{h\omega_S} \quad (1.7)$$

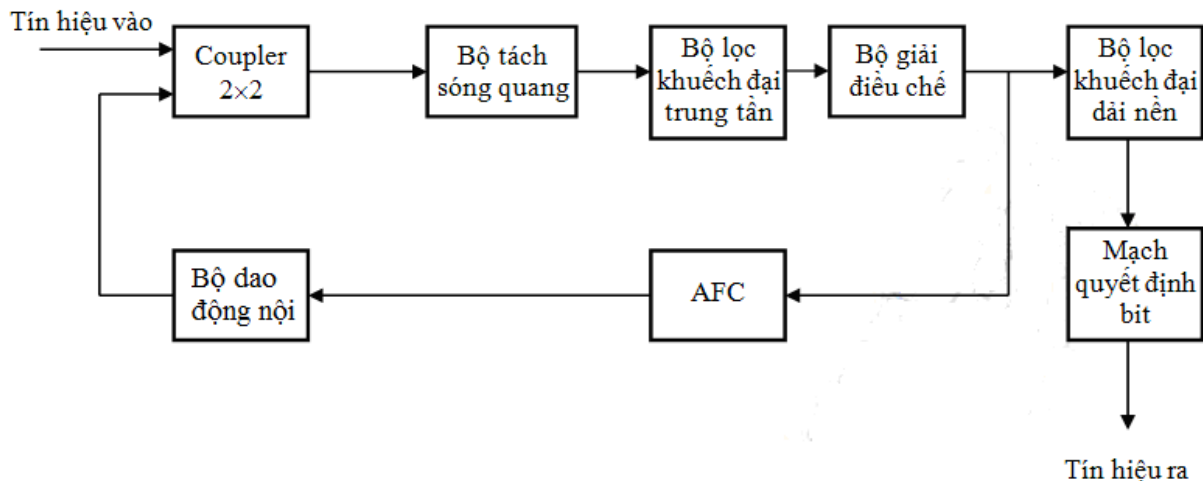
Với e là điện tích,  $\eta$  là hiệu suất lượng tử của photodiode. Ngõ ra của tách sóng cân bằng được biểu diễn như sau:

$$I(t) = I_1(t) - I_2(t) = 2R\sqrt{P_S(t)P_{LO}} \cos\{\omega_{IF}(t) + \theta_{signal}(t) - \theta_{LO}(t)\} \quad (1.8)$$

$P_{LO}$  luôn là hằng số và  $\theta_{LO}(t)$  chỉ bao gồm nhiễu pha.

### a) Máy thu Heterodyne

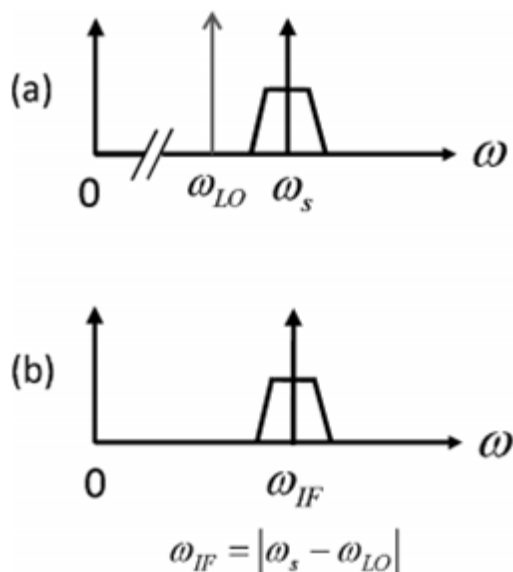
Sơ đồ khối tổng quát của bộ thu quang sử dụng tách sóng Heterodyne được minh họa trong hình 1.10:



**Hình 1.10.** Sơ đồ khối tổng quát máy thu Heterodyne

Tách sóng Heterodyne liên quan tới trường hợp  $|\omega_{IF}| \gg \omega_b/2$ , với  $\omega_b$  là băng thông điều chế của sóng mang quang được xác định bởi tốc độ ký tự. Trong trường

hợp này, biểu thức (1.8) chỉ ra trường điện của tín hiệu quang được hạ tần xuống dải IF và được biểu diễn như ở hình 1.11 .



**Hình 1.11. Phổ của a) tín hiệu quang b) tín hiệu được hạ tần IF**

Pha của tín hiệu được cho bởi  $\theta_{signal} = \theta_s(t) + \theta_{sn}(t)$ , với  $\theta_s$  là pha của tín hiệu điều chế,  $\theta_{sn}$  là pha nhiễu. Ngõ ra của máy thu được cho bởi

$$I(t) = 2R\sqrt{P_S(t)P_{LO}}\cos\{\omega_{IF}t + \theta_s(t) + \theta_n(t)\} \quad (1.9)$$

Từ biểu thức (2.12) biên độ phức trên  $\exp(j\omega_{IF}t)$  được biểu diễn như sau:

$$I_c(t) = 2R\sqrt{P_S(t)P_{LO}}\exp j\{\theta_s(t) + \theta_n(t)\} \quad (1.10)$$

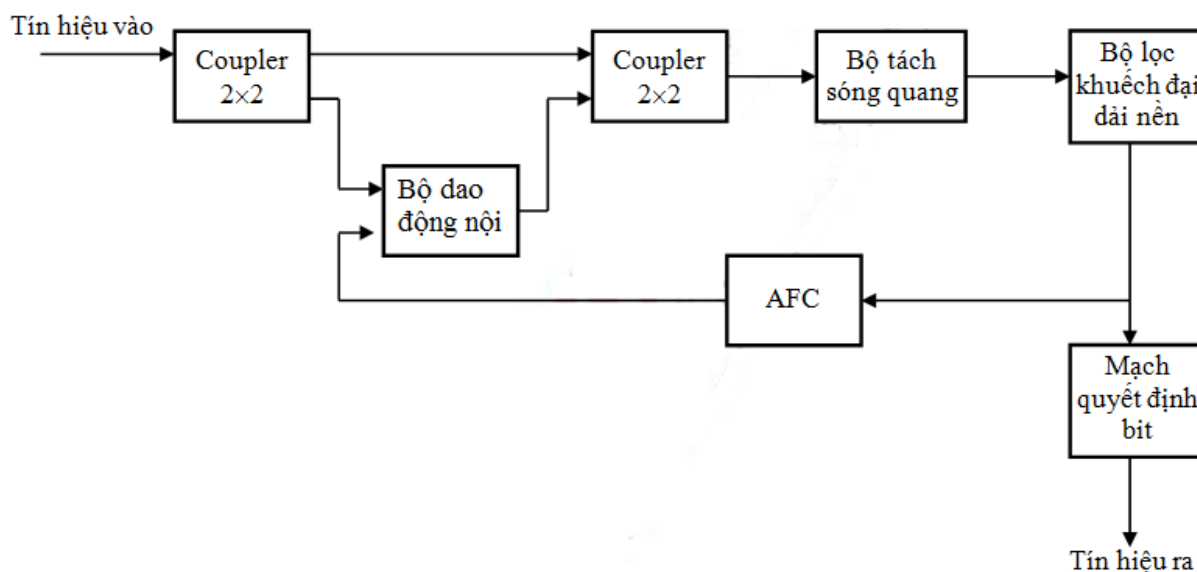
$\theta_n(t)$  là tổng nhiễu pha được xác định như công thức sau:

$$\theta_n(t) = \theta_{sn}(t) - \theta_{LO}(t) \quad (1.11)$$

### **b) Máy thu Homodyne**

Sơ đồ khối tổng quát của máy thu sử dụng công nghệ tách sóng Homodyne được minh họa trong hình 1-12:



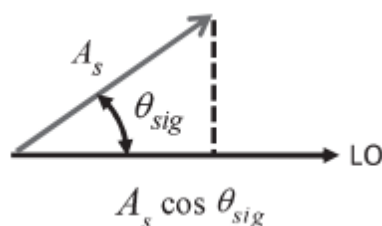


**Hình 1.12. Sơ đồ khối tổng quát máy thu Homodyne**

Tách sóng Homodyne liên quan tới trường hợp  $\omega_{IF} = 0$ . Dòng quang từ máy thu homodyne được biểu diễn như sau:

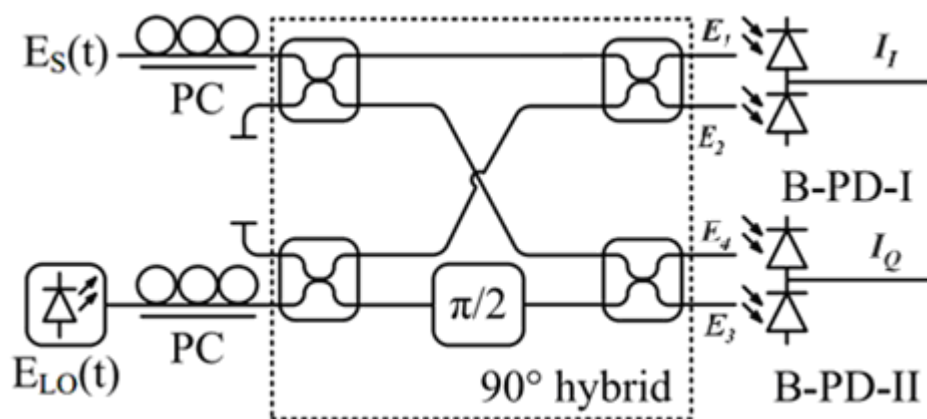
$$2R\sqrt{P_S(t)P_{LO}}\cos\{\theta_{signal}(t) - \theta_{LO}(t)\} \quad (1.12)$$

Biểu thức (1.12) chỉ ra máy thu homodyne đo độ lệch pha giữa tín hiệu nhận được và tín hiệu được tạo bởi bộ dao động nội như hình 1-13. Để giải mã tín hiệu LO cho đúng, pha của bộ dao động nội phải bám theo pha của tín hiệu để  $\theta_n(t) = 0$ , điều này được thực hiện nhờ vòng khóa pha quang (OPLL). Tuy nhiên trong thực tế, việc thực hiện vòng đó không đơn giản, làm tăng tính phức tạp về cấu hình của máy thu homodyne. Thêm vào đó, biểu thức 1.12 chỉ ra chỉ có thành phần cùng pha với tín hiệu dao động nội được tách sóng còn thành phần vuông pha thì không. Do vậy, máy thu homodyne không thể tách toàn bộ thông tin trên biên độ phức của tín hiệu.

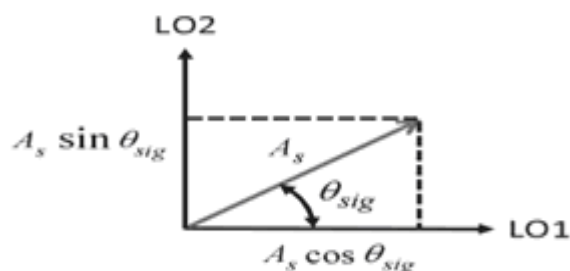


**Hình 1.13. Giảm độ pha của tín hiệu thu được và tín hiệu tạo ra bởi dao động nội**

Để tách sóng cả thành phần tín hiệu vuông pha và cùng pha với bộ dao động nội, tại máy thu homodyne, ta dịch pha bộ dao động nội  $90^\circ$  bằng cách sử dụng bộ ghép  $90^\circ$  như hình 1.14. Giảm độ pha của tín hiệu thu được và dao động nội LO trong trường hợp này được biểu diễn như hình 1.15.



**Hình 1.14. Sơ đồ tách sóng Homodyne vuông pha với PD cân bằng**



**Hình 1.15. Giải đồ pha của tín hiệu thu được và dao động nội trong trường hợp tách sóng Homodyne vuông pha với PD cân bằng**

Khi sử dụng bộ ghép  $90^\circ$ , chúng ta có thể thu được bốn tín hiệu  $E_1, E_2, E_3, E_4$  từ hai ngõ vào  $E_S$  và  $E_{LO}$  như sau:

$$E_1 = \frac{1}{2}(E_S + E_{LO}) \quad (1.13)$$

$$E_2 = \frac{1}{2}(E_S - E_{LO}) \quad (1.14)$$

$$E_3 = \frac{1}{2}(E_S + jE_{LO}) \quad (1.15)$$

$$E_4 = \frac{1}{2}(E_S - jE_{LO}) \quad (1.16)$$

Dòng quang ngõ ra từ các cặp PD cân bằng được cho bởi công thức sau:

$$I_I(t) = I_{I1}(t) - I_{I2}(t) = R\sqrt{P_S P_{LO}} \cos\{\theta_{signal}(t) - \theta_{LO}(t)\} \quad (1.17)$$

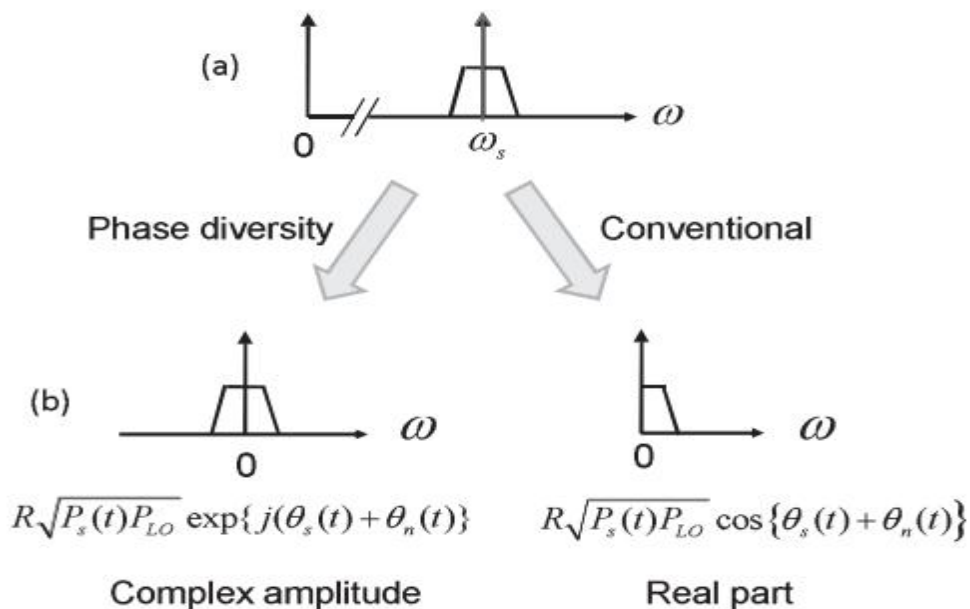
$$I_Q(t) = I_{Q1}(t) - I_{Q2}(t) = R\sqrt{P_S P_{LO}} \sin\{\theta_{signal}(t) - \theta_{LO}(t)\} \quad (1.18)$$

Từ biểu thức (1.17) và (1.18), chúng ta có thể khôi phục biên độ phức như sau:

$$I_c(t) = I_I(t) + jI_Q(t) = R\sqrt{P_S P_{LO}} \exp\{j(\theta_S(t) + \theta_n(t))\} \quad (1.19)$$

Biểu thức (1.19) chỉ ra trường điện của tín hiệu đến được hạ tần xuống dải băng gốc. Như hình 1.16, phổ của tín hiệu nằm trong dải băng gốc bao gồm cả thành phần tần số dương và âm, chứa cả thành phần cùng pha và vuông pha với nhau. Ngược lại,

trong tách sóng đơn sử dụng một cặp PD chỉ đo thành phần cùng pha với tín hiệu dao động nội, tín hiệu băng gốc chỉ tồn tại trong phần tần số dương. Nói tóm lại, tách sóng homodyne đơn sử dụng một PD cân bằng và homodyne vuông pha có thể giống nhau trong việc khôi phục tín hiệu phức quang như được thể hiện trong biểu thức (1.10) và (1.19). Tuy nhiên, máy thu homodyne vuông pha tái tạo ra tín hiệu nằm trong dải băng gốc thì tốt hơn loại tái tạo tín hiệu trong miền trung tần.

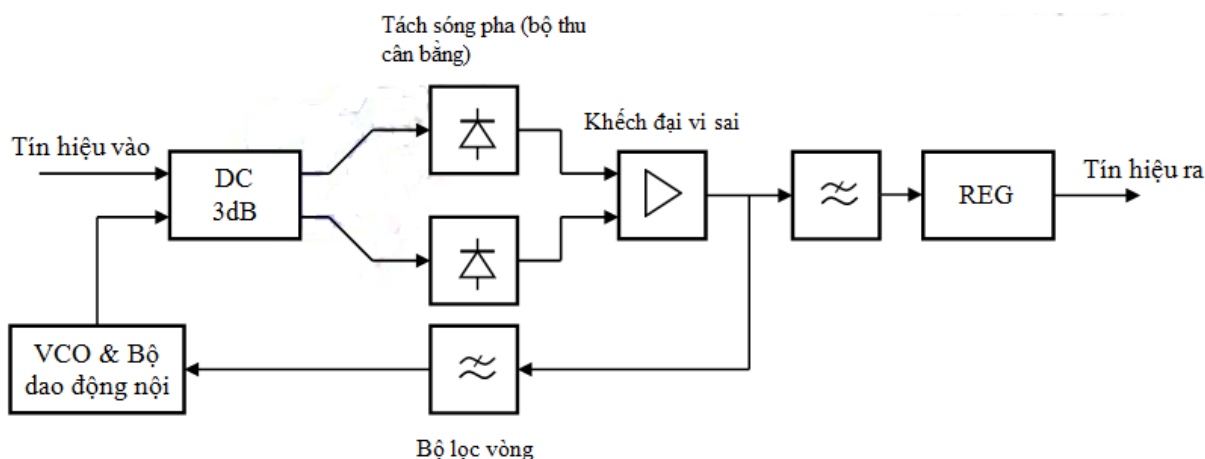


**Hình 1.16. Phổ của a) tín hiệu quang và b) tín hiệu băng gốc được tách sóng homodyne.**

Tách sóng theo kiểu sử dụng một cặp PD đơn thì chỉ tái tạo được phần thực của biên độ phức quang, trong khi đó, tách sóng theo kiểu vuông pha khôi phục được toàn bộ tín hiệu phức gồm cả phần tần số dương và âm

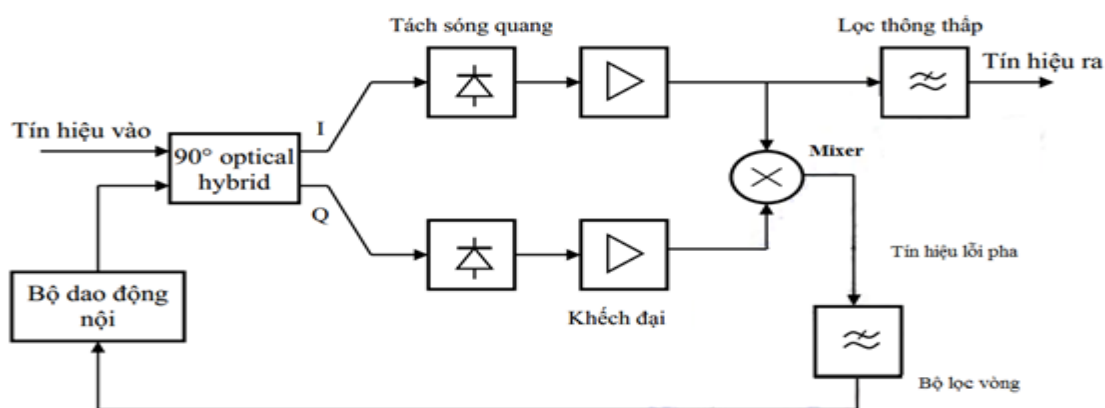
### 1.4.3 Vòng khóa pha trong máy thu kết hợp

Sơ đồ cơ bản của máy thu kết hợp sử dụng vòng khóa pha được thể hiện trong hình 1.17. Máy thu trong sơ đồ đó sử dụng kỹ thuật sóng mang dẫn đường (pilot carrier) sử dụng cho tách sóng quang homodyne PSK. Sóng mang này được tạo ra từ điều chế pha nhỏ hơn  $180^\circ$  sẽ được tổ hợp với tín hiệu nhận được ở coupler định hướng DC 3dB sau đó được tách sóng bằng bộ PD cân bằng. Tín hiệu ngõ ra của bộ khuếch đại vi sai sẽ làm chệch lệch pha được sử dụng để khóa pha bộ dao động nội dưới sự điều khiển bởi bộ VCO sau khi đi qua bộ lọc vòng. Việc sử dụng sóng mang với bất kỳ công suất nào cho quá trình khóa pha cũng làm giảm độ nhạy của máy thu. Hơn nữa, công suất của tín hiệu cần thiết để dò pha của sóng mang vào được xác định chính xác phụ thuộc vào nhiễu pha của laser nguồn và laser của bộ dao động nội được tổ hợp cũng như băng thông của PLL. Do đó, băng thông của vòng tối ưu sẽ cho lỗi pha nhỏ nhất và có thể làm tăng chất lượng của bộ thu quang homodyne.



**Hình 1.17. Bộ thu vòng khóa pha sóng mang dẫn đường**

Bộ thu Homodyne sử dụng vòng khóa pha Costas áp dụng cho tín hiệu PSK được minh họa trong hình 1.18. Tín hiệu nhận được và tín hiệu dao động nội được tổ hợp tại bộ Optical Hybrid sao cho hai tín hiệu này lệch pha nhau  $90^0$  ở hai ngõ ra bộ tách sóng quang.



**Hình 1.18. Bộ thu vòng khóa pha Costas**

Hai tín hiệu ở ngõ ra của hai bộ tách sóng quang sẽ được khuếch đại, rồi nhân với nhau ở bộ Mixer. Pha của sóng mang sau đó sẽ được xác định ở bộ lọc thông thấp. Hơn nữa, tín hiệu điều khiển cũng được lọc và được sử dụng để điều chỉnh tần số của bộ dao động nội theo cách giống như đã áp dụng cho vòng khóa pha quang sóng mang dẫn đường. Tuy nhiên, sử dụng PLL quang Costas có ưu điểm là tất cả các mạch tín hiệu bé trước khi trộn (mixer) có thể được ghép a.c và do đó không bị tiêu tốn công suất truyền như trong linh kiện sóng mang dẫn đường.

*Như vậy trong chương 1 đã cho chúng ta thấy được lý do tại sao sử dụng công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps trong mạng truyền dẫn hiện nay. Đồng thời cũng chỉ ra các tiêu chuẩn được áp dụng cho công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps, cũng như việc áp dụng của công nghệ tách sóng kết hợp trong mạng truyền tải bước sóng 100 Gbps.*

## CHƯƠNG 2 KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ VÀ SỬA LỖI TRONG TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 Gbps

Như đã nói chương 1, việc phát triển bước sóng 10/40 Gbps lên 100 Gbps đối diện với hạn chế ngặt về mặt vật lý (sợi quang), vì vậy mà đòi hỏi công nghệ 100Gbps phải có kỹ thuật điều chế và sửa lỗi tốt hơn. Trong chương này, chúng ta sẽ đi tìm hiểu:

- + Các kỹ điều chế được sử dụng trong truyền tải bước sóng 100 Gbps.
- + Kỹ thuật sửa lỗi được sử dụng trong truyền tải bước sóng 100 Gbps.

### 2.1 Kỹ thuật điều chế trong truyền tải bước sóng 100 Gbps

Có rất nhiều kỹ thuật điều chế trong thông tin quang đã và đang được sử dụng, nghiên cứu:

- ASK, FSK, PSK: các dạng điều chế cơ bản trong thông tin quang kết hợp.
  - BPSK: điều chế pha 2 trạng thái.
  - QPSK: điều chế pha vuông góc (4 trạng thái).
  - 8-PSK: điều chế pha 8 trạng thái.
  - DPSK (DBPSK): điều chế pha vi sai 2 trạng thái.
  - DQPSK: điều chế pha vi sai 4 trạng thái.
  - M-ADPSK: điều chế pha kết hợp công suất M trạng thái (M = 4, 8, 16...).
  - DP-QPSK: điều chế pha vuông góc phân cực kép (ghép phân cực).
  - M-QAM: điều chế biên độ vuông góc (hay cầu phương) M trạng thái (M = 8, 16, 32...).
  - DP-OFDM: Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao - ghép phân cực...
- Chúng ta sẽ đi so sánh các kỹ thuật điều chế khác nhau trong bước sóng 100 Gbps.

Đặc tính của các kỹ thuật điều chế bước sóng 100 Gbps:

Modulation format	OOK	OOK-VSB	DQPSK	RZ-DPSK-3ASK	DP-DQPSK	OP-FDM-RZ-DQPSK	DP-QPSK	DP-OFDM-QPSK
coh. / noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	coh.	coh.
Bits/symbol	1	1	2	2.5	2x2	2x2	2x2	2x2x2
Symbol Rate (Gbd)	112	112	56	44	28	28	28	14
Constellation								
DWDM Grid (GHz)	200	100	100	50	50	100	50	50
Spectral Efficiency (bits/s/Hz)	0.5	1	1	2	2	1	2	2

**Bảng 2.1. Đặc tính của các kỹ thuật điều chế bước sóng 100 Gbps [8]**

Độ dự trữ hệ thống với các kỹ thuật điều chế bước sóng 100 Gbps:

Modulation format	OOK	OOK-VSB	DQPSK	RZ-DPSK-3ASK	DP-DQPSK	OP-FDM-RZ-DQPSK	DP-QPSK	DP-OFDM-QPSK
coh. / noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	noncoh.	coh.	coh.
DWDM Grid (GHz)	200	100	100	50	50	100	50	50
Estimated Reach (km)	< 500	< 500	1000	<500	600	1500	1500	2000
Tolerances	⊖	⊖	⊕	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕
OSNR tolerance (dB) @ BER 4x10 <sup>-3</sup>	17.5	18.5	15.5	>20	15.5	15.5	< 15	< 15
CD tolerance (ps/nm) @ 2dB penalty	± 5	± 5	± 22	± 30	± 90	± 90	>>	>>
Max. DGD tolerance (ps) @ 2dB penalty	4	4	9	10	18	18	>>	>>
Compatibility with 10G and 40G	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖
Filtering with ROADMs	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖

**Bảng 2.2. Độ dự trữ hệ thống với các kỹ thuật điều chế bước sóng 100 Gbps [8]**

Ngày nay, việc nâng cấp hệ thống lên sử dụng công nghệ bước sóng 100 Gbps là tất yếu. Dựa vào những so sánh trong các bảng từ 2.1 và 2.2, chúng ta thấy rằng: điều chế DP-QPSK là dạng điều chế phù hợp nhất cho tốc độ 100 Gbps. DP-QPSK có tính miễn nhiễm cao đối với CD và PMD cũng như đối với hiệu ứng phi tuyến, có hiệu suất phổ cao và yêu cầu OSNR thấp. Trên thực tế có nhiều kỹ thuật điều chế khác phức tạp hơn có thể ứng dụng cho công nghệ 100 Gbps như DP-8PSK, M-QAM, Co-OFDM, những kỹ thuật này cho phép truyền tải ở cả những tốc độ bit cao hơn 100 Gbps (200 Gbps, 400 Gbps...). Tuy nhiên, kỹ thuật DP-QPSK đạt được một sự cân bằng tối ưu về độ phức tạp của kỹ thuật cũng như giá thành của sản phẩm cho ứng dụng 100 Gbps.

### 2.1.1 Phương pháp điều chế khóa dịch pha PSK (Phase Shift Keying)

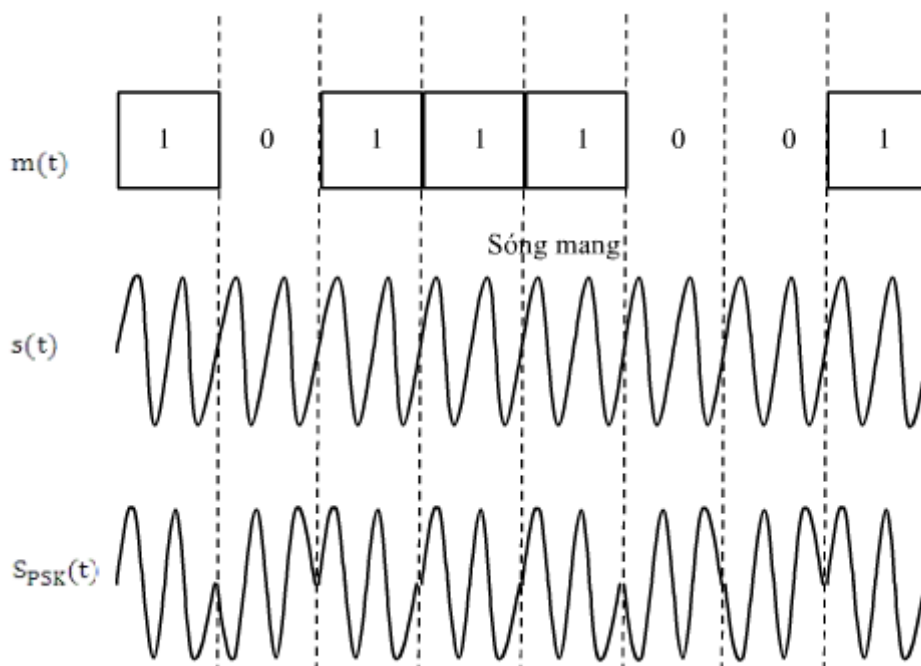
Luồng bit quang được tạo ra bằng việc điều chế pha trong khi giữ nguyên biên độ và tần số của sóng mang quang. Biểu thức toán học biểu diễn dạng điều chế PSK như sau:

$$e_s(t) = E_m \cos[w_s t + b(t)\pi] \quad (2.1)$$

Có hai loại PSK thường được dùng, loại thứ nhất dùng hai tín hiệu sóng mang đại diện cho bit “1” và bit “0”, hai sóng mang này khác pha nhau 180°. Vì tín hiệu này chỉ là nghịch đảo của tín hiệu kia nên loại này được gọi là phase-Kết hợp PSK (PSK pha phối hợp).

Loại thứ 2 gọi là PSK vi sai (differential PSK). Với loại này sự dịch chuyển pha xảy ra tại mỗi bit hay mỗi symbol, không cần quan tâm tới chuỗi bit “0” hay “1” đang được truyền. Giả sử với điều chế 2-PSK vi sai thì một sự dịch pha 90° tương ứng với

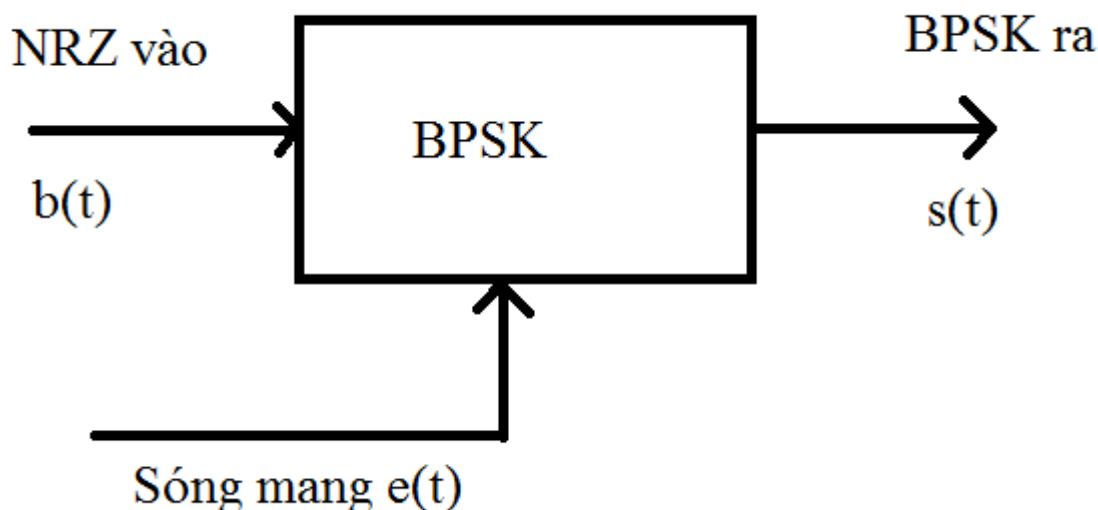
tín hiệu hiện hành chỉ định “0” là bit kế tiếp, trong khi sự dịch pha  $270^\circ$  chỉ bit “1” là kế tiếp.



Hình 2.1. Điều chế pha tín hiệu nhị phân 10111001

### 2.1.2 Điều chế pha hai trạng thái BPSK

Đây là dạng điều chế nhảy pha 2 mức, nghĩa là 2 trạng thái “0” và “1” được phân biệt bởi 2 giá trị pha của sóng mang.



Hình 2.2. Sơ đồ nguyên lý điều chế BPSK

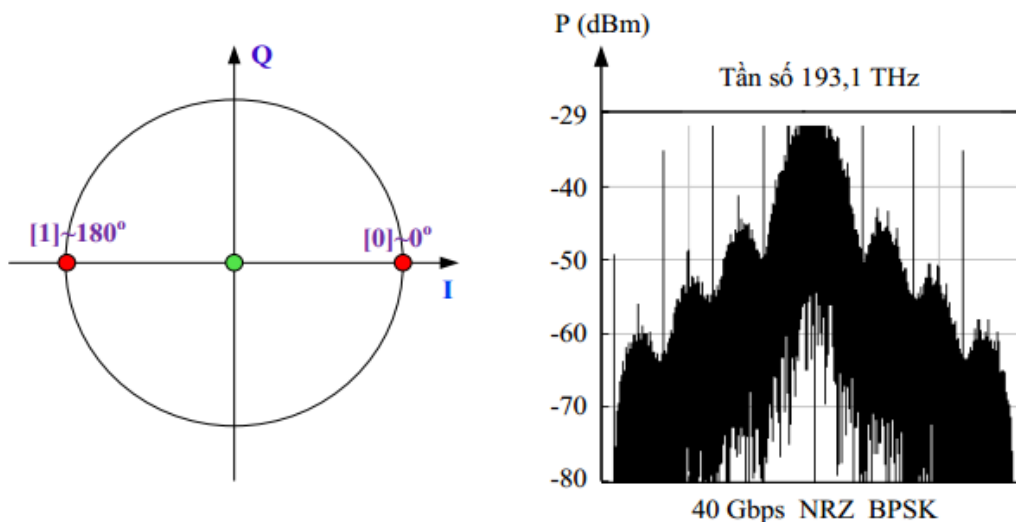
Với:



$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{bit1} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{bit0} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{bit1} \\ -A \cos(2\pi f_c t) & \text{bit0} \end{cases} \quad (2.2)$$

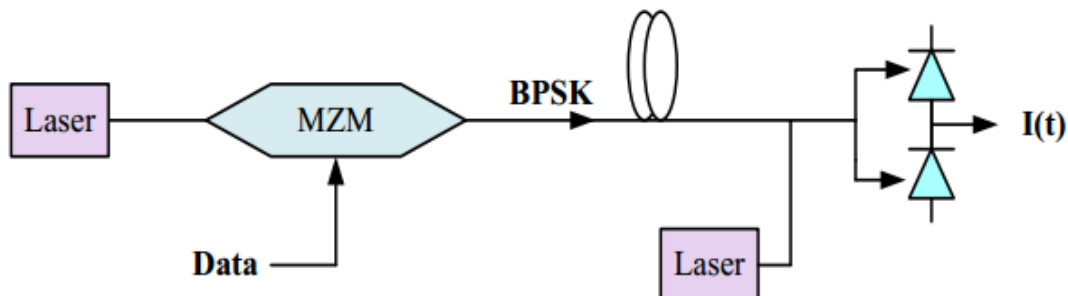
Hai pha cách nhau  $180^\circ$  ( $\pi$  rad), hình dưới đây biểu diễn giản đồ trạng thái và dạng phổ của tín hiệu BPSK:



**Hình 2.3. Giản đồ và dạng phổ tín hiệu BPSK**

Đặc điểm của điều chế BPSK:

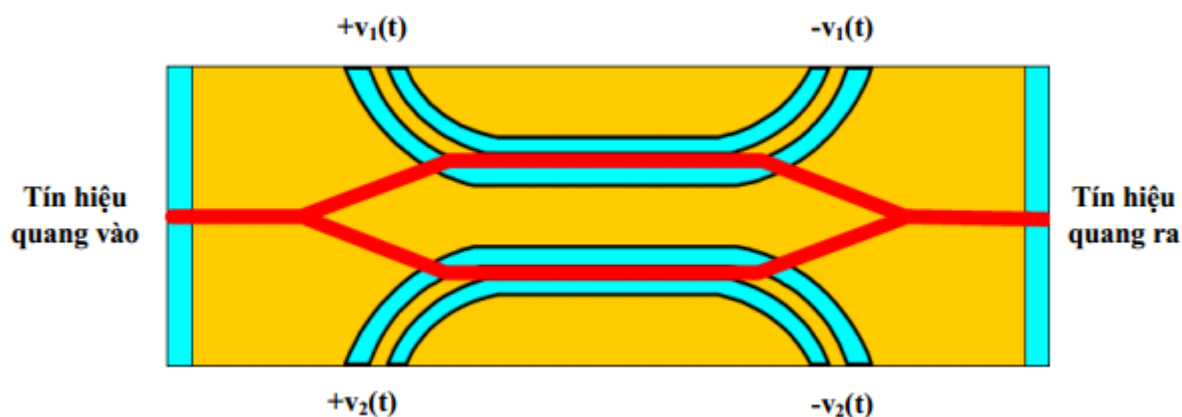
- + Độ rộng phổ tương đương với bit rate (tốc độ bit) hoặc symbol rate.
- + Chịu được các bộ lọc quang băng thông hẹp tốt hơn điều chế OOK.
- + Miễn nhiễm với PMD tương đối tốt.
- + Miễn nhiễm với CD và phi tuyến kém hơn so với điều chế OOK.



**Hình 2.4. Điều chế và giải điều chế BPSK**



Hình 2.4 minh họa sơ đồ khối đơn giản của điều chế và giải điều chế BPSK, trong đó MZM (Mach-Zehnder Modulator) là một bộ điều chế dùng để điều chế pha của sóng mang.



**Hình 2.5. Bộ điều chế giao thoa March-Zehnder hai cực**

Bộ điều chế hai cực cả hai tín hiệu quang được điều chế bởi  $v_1(t)$  và  $v_2(t)$ .

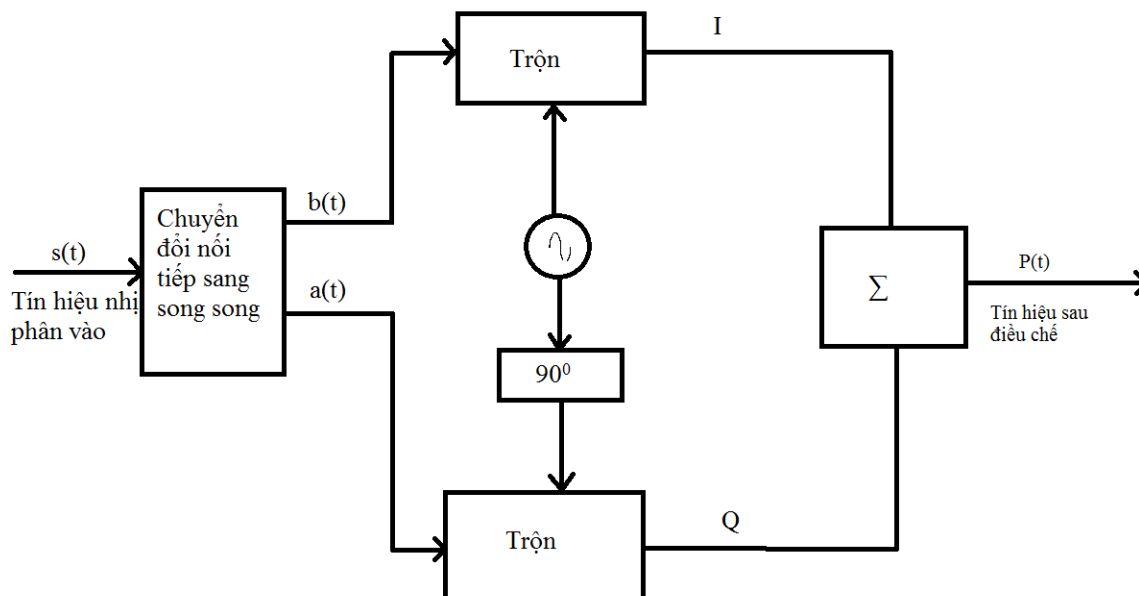
Nếu điện áp điều chế  $v_1(t) = v_2(t) = v(t)$  thì:

$$e(t)_{output} = \frac{e(t)_{input}}{2} \left[ \exp(j\pi \frac{v(t)}{V_\pi}) + \exp(j\pi \frac{v(t)}{V_\pi}) \right] = e(t)_{input} \exp[j\pi \frac{v(t)}{V_\pi}] \quad (2.3)$$

Và lúc này sóng mang tín hiệu đã được điều chế pha. Tùy theo sự thay đổi giá trị của  $v(t)$  mà pha của sóng mang cũng thay đổi theo. Trong trường hợp BPSK thì pha của sóng mang là 0 hoặc là  $\pi$ . Bộ tách sóng là một cặp photodiode cân bằng, được gọi là balanced-photodiode (BPD).

### 2.1.3 Điều chế pha bốn trạng thái QPSK

Đây là dạng điều chế nhảy pha 4 mức, nghĩa là 4 trạng thái “00”, “01”, “11”, “10” được phân biệt bởi 4 giá trị pha của sóng mang. Lúc này pha cách nhau  $90^\circ$ .

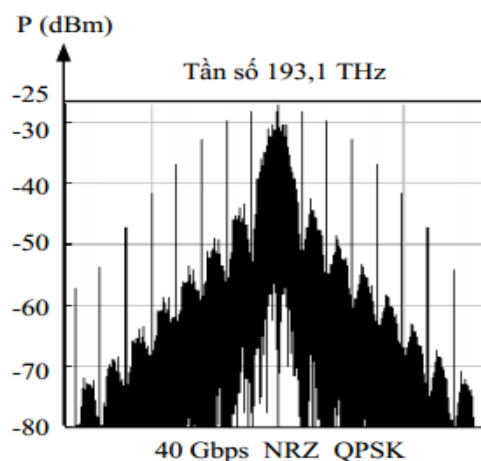
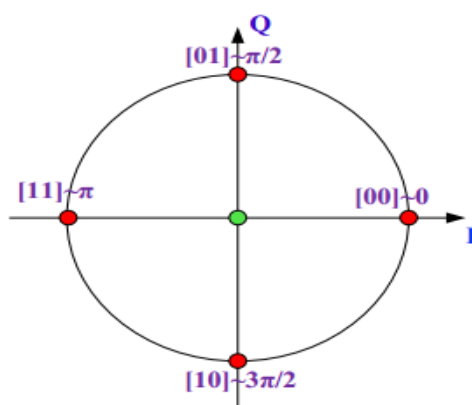


**Hình 2.6. Sơ đồ nguyên lý điều chế QPSK**

Tín hiệu được đưa vào bộ biến đổi nối tiếp thành song song, đầu ra được 2 luồng số liệu có tốc độ bit giảm đi một nửa, đồng thời biến đổi tín hiệu đơn cực thành tín hiệu  $\pm 1$ . Hai sóng mang tới hai bộ trộn làm lệch pha nhau 90 độ . tổng hợp tín hiệu đầu ra 2 bộ trộn ta được tín hiệu QPSK.

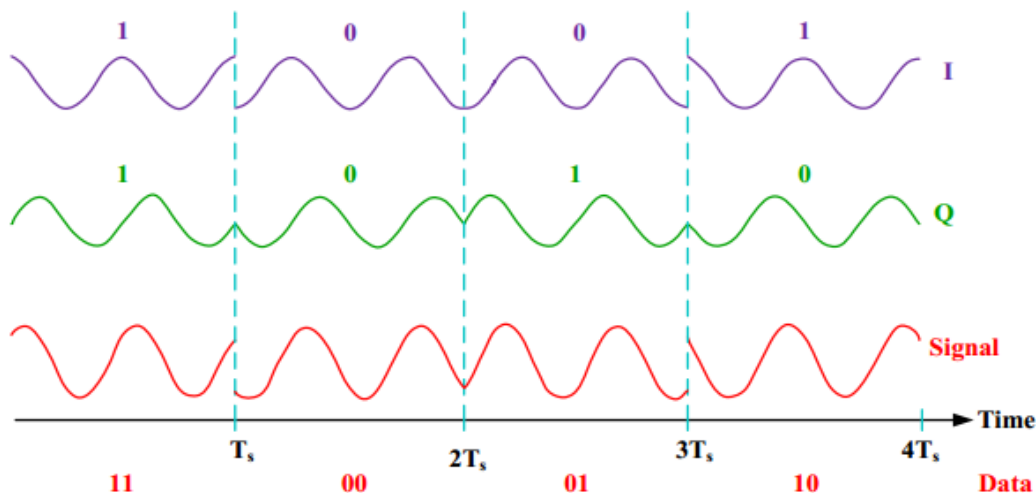
Mỗi trạng thái song mang mang thông tin 2 bit:

$$S(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) & 11 \\ A \cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}) & 01 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{3\pi}{4}) & 00 \\ A \cos(2\pi f_c t - \frac{\pi}{4}) & 10 \end{cases} \quad (2.4)$$

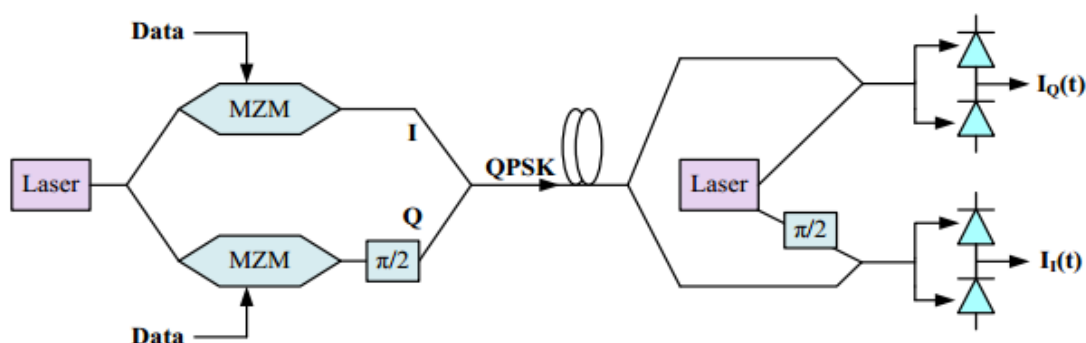


**Hình 2.7. Biểu đồ và dạng phổ của tín hiệu QPSK**

Đối với điều chế BPSK thì một ký tự quang mang 1 bit thông tin, còn điều chế QPSK thì một ký tự quang mang 2 bit thông tin. Một cách đơn giản, có thể coi tín hiệu QPSK là tổng của 2 thành phần tín hiệu BPSK: I (In-phase: đồng pha) và Q (Quadrature: vuông pha).



**Hình 2.8. Mã hóa hai bit dữ liệu vào ký tự quang**



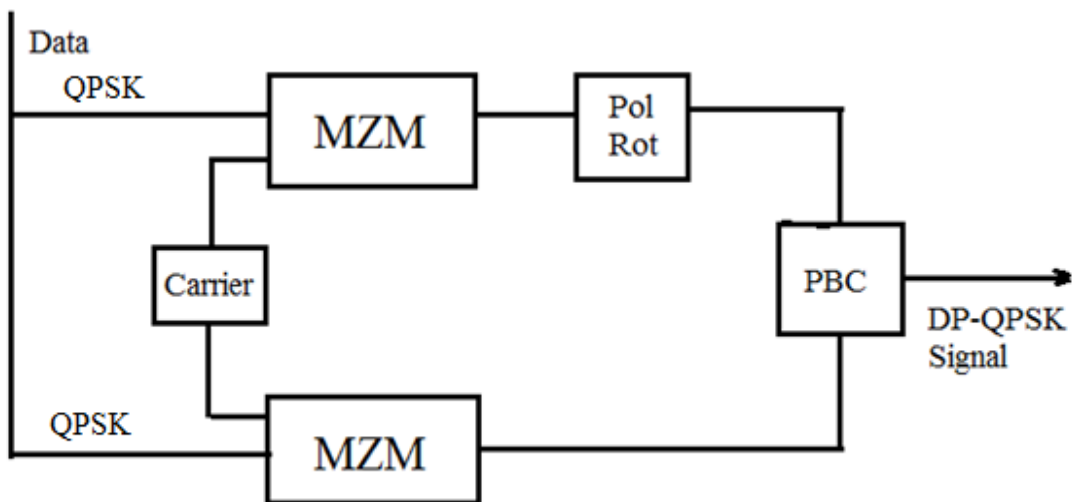
**Hình 2.9. Điều chế và giải điều chế QPSK**

Đặc điểm của điều chế QPSK:

- + Do mã hóa 2 bit trên 1 ký tự nên độ rộng phổ bằng  $1/2$  bit rate, bằng  $1/2$  độ rộng phổ của OOK hoặc BPSK có cùng bit rate, dẫn đến lợi gấp đôi về băng tần.
- + Chịu được các bộ lọc quang băng thông hẹp.
- + Miễn nhiễm đối với CD, PMD và phi tuyến: tương tự như BPSK.

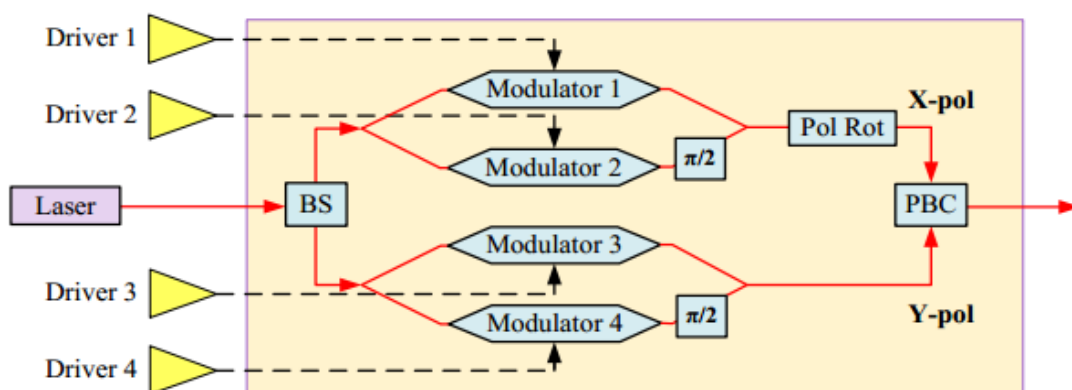
#### 2.1.4 Điều chế pha kết hợp ghép phân cực DP-QPSK

Trong trường hợp điều chế DP -QPSK thì hai tín hiệu QPSK được truyền trên hai phân cực X và Y của sóng mang, chúng đi qua bộ kết hợp tia phân cực (PBC) và được truyền trên sợi quang. Đến đầu thu, bộ tách tia phân cực (PBS) sẽ chia thành hai luồng tín hiệu riêng rẽ và xử lý một cách độc lập với nhau.

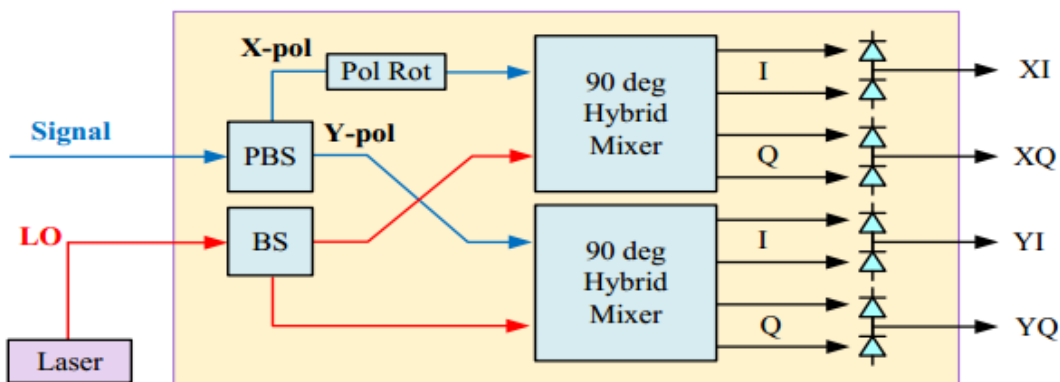


**Hình 2.10. Sơ đồ nguyên lý điều chế pha DP-QPSK**

Như vậy kỹ thuật điều chế này đã làm tăng gấp đôi hiệu suất phổ so với điều chế QPSK, nghĩa là tăng gấp đôi tốc độ bit trong khi sử dụng cùng một băng tần. Kỹ thuật điều chế DP-QPSK mã hóa bốn bit trên một ký tự quang (gấp đôi so với QPSK).



**Hình 2.11. Sơ đồ khối máy phát DP-QPSK**



**Hình 2.12. Sơ đồ khối máy thu DP-QPSK**

Hình 2.11 và 2.12 minh họa sơ đồ khối của một máy phát và máy thu DP-QPSK theo chuẩn của OIF, trong đó:

- Driver 1 đến Driver 4: các bộ điều khiển điện áp phân cực đặt lên các bộ điều chế
- Modulator 1 đến Modulator 4 theo chuỗi bit dữ liệu đầu vào.
- BS: Beam Splitter: bộ chia, dùng để chia tín hiệu từ nguồn phát Laser.
- Modulator: bộ điều chế ngoài, dùng để điều chế pha của tín hiệu, có thể sử dụng bộ điều chế Mach-Zehnder. Tín hiệu sau Modulator 1 và Modulator 2 là hai tín hiệu BPSK được dịch pha nhau  $\pi/2$  (I và Q), cộng lại ta được tín hiệu QPSK. Tương tự đối với tín hiệu sau Modulator 3 và Modulator 4.
- X-pol và Y-pol: phân cực X và phân cực Y (trực giao với nhau).
- Pol Rot: Polarization Rotator: bộ xoay phân cực, tạo ra tín hiệu phân cực X trực giao với tín hiệu phân cực Y. Hai tín hiệu QPSK sau các bộ điều chế Modulator là hai tín hiệu có cùng trạng thái phân cực (X hoặc Y), bộ xoay phân cực sẽ xoay 1 trong 2 tín hiệu đến trạng thái phân cực mới vuông góc với trạng thái phân cực của tín hiệu còn lại.
- PBC: Polarization Beam Combiner: bộ kết hợp tia phân cực, ghép 2 tín hiệu phân cực trực giao QPSK để tạo thành tín hiệu DP-QPSK và truyền đi trên sợi quang.
- LO: Local Oscillator: bộ dao động nội tại máy thu.
- PBS: Polarization Beam Splitter: bộ tách tia phân cực, chia tín hiệu DP-QPSK thành hai tín hiệu QPSK ở hai trạng thái phân cực trực giao (vuông góc).
- 90 deg Hybrid Mixer: bộ trộn lai ghép quang 90 độ, có nhiệm vụ tổ hợp tín hiệu sau bộ PBS với tín hiệu từ bộ dao động nội để tạo ra bốn tín hiệu BPSK.

Tín hiệu điện sau photodiode sẽ được chuyển đến bộ biến đổi tín hiệu tương tự số (Analog-to-Digital Converter-ADC) và bộ xử lý tín hiệu số DSP để xử lý tiếp trước khi được phục hồi dưới dạng chuỗi bit.



Tín hiệu BPSK In-phase (I).



Tín hiệu BPSK Quadrature (Q), đã được dịch pha  $\pi/2$ .



Tín hiệu QPSK ở trạng thái phân cực Y.



Tín hiệu QPSK ở trạng thái phân cực X (sau khi được quay phân cực).

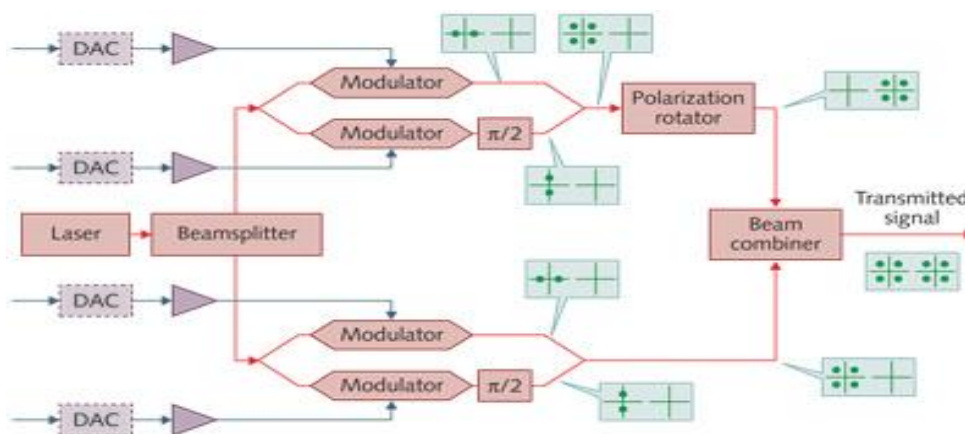


Tín hiệu DP-QPSK, là tổng của hai tín hiệu QPSK ở hai trạng thái phân cực Y và X (trực giao với nhau).

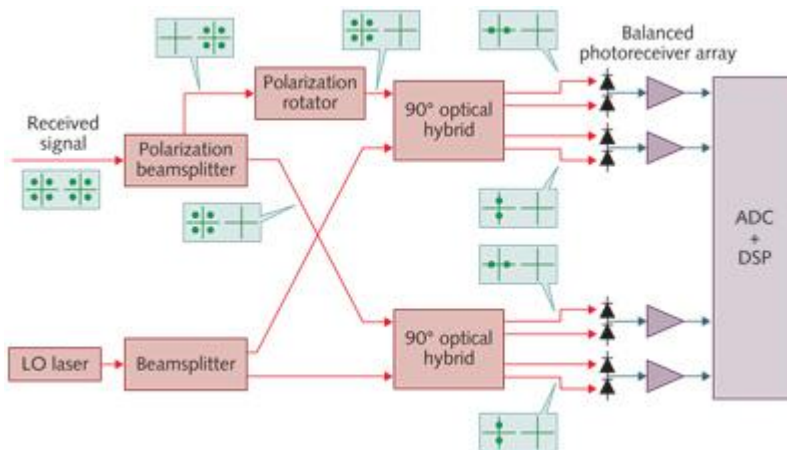
DAC: Digital-to-Analog Converter: bộ biến đổi tín hiệu số – tương tự.

ADC: Analog-to-Digital Converter: bộ biến đổi tín hiệu tương tự – số.

DSP: Digital Signal Processor: bộ xử lý tín hiệu số.



Hình 2.13. Thay đổi pha và trạng thái phân cực của tín hiệu trong máy phát [14]



Hình 2.14. Thay đổi pha và phân cực của tín hiệu trong máy thu [14]

Tham số	Đơn vị	Min	Typical	Max	Ghi chú
Băng thông E/O (3dB)	GHz	23			Tần số tham chiếu tại 1,5 hoặc 2 GHz
Trở kháng RF	Ohm		50		
Tần số hoạt động - Băng C - Băng L	THz	191,35 186,0		196,2 191,5	Lưới 50 GHz (ITU-T G.694.1)
Công suất quang vào	dBm			18	Công suất tối đa
Suy hao xen	dB		Ffs	14	Cho mỗi phân cực
Suy hao phản xạ điện - $f \leq 25$ GHz - $25 < f \leq 32$ GHz	dB	10 8			
Suy hao phản xạ quang	dB	30			Input & output
Polarization ER	dB	20			

**Bảng 2.3. Một số tham số của máy phát 100 Gbps DP-QPSK**

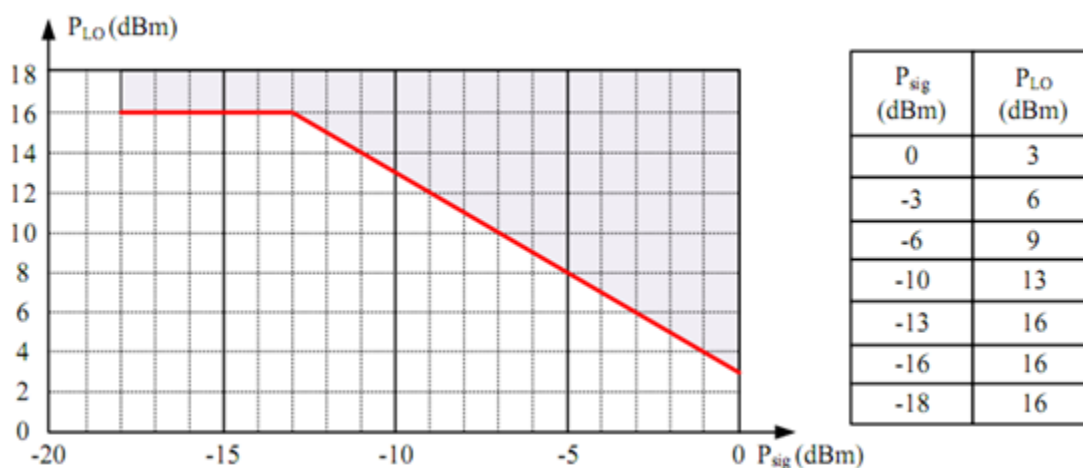
Tham số	Đơn vị	Min	Typical	Max	Ghi chú
Công suất tín hiệu hoạt động	dBm	-18		0	Công suất quang trung bình
Công suất	dBm				

LO					
Sai pha	$\pm$ độ			5	Giữa XI và XQ, YI và YQ
Băng thông tín hiệu nhỏ (3dB)	dB		22		
Méo hài tổng cộng	%			5	

**Bảng 2.4. Một số tham số của máy thu 100 Gbps DP-QPSK**

Chú thích:

- E/O: Electro-Optical: điện-quang.
- RF: Radio Frequency: tần số vô tuyến.
- Polarization ER: Polarization Extinction Ratio: hệ số phân biệt phân cực.
- Méo hài tổng cộng: giả định  $P_{sig} = -10$  dBm,  $P_{LO} = 13$  dBm, suy hao vượt bằng 2dB, đáp ứng của photodiode bằng 0.8 A/W.



**Hình 2.15. Khuyến nghị công suất LO tối đa cho phép**

**Giả định:** đáp ứng của photodiode là 0,8 A/W, mã hóa NRZ, suy hao vượt là 2 dB. Trong hội nghị và triển lãm về thông tin quang châu Âu lần thứ 34, diễn ra tại thành phố Brussels của nước Bỉ, Hiroshi Yamazaki cùng các đồng nghiệp đã công bố một công nghệ liên quan đến điều chế ghép phân cực DP-QPSK tại tốc độ 100 Gb/s. Hai bộ điều chế QPSK và một mạch ghép phân cực (PDM) được tích hợp bằng cách sử dụng một kỹ thuật lắp ráp lai ghép giữa PLCs (Planar Lightwave Circuits) Silica và



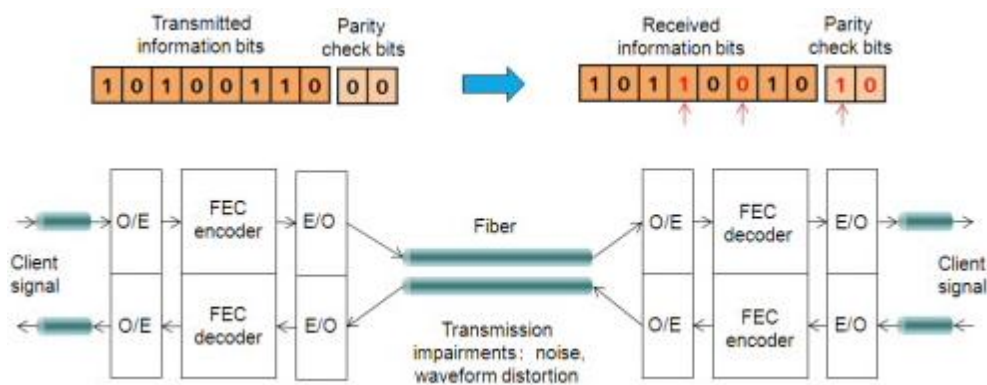
một mảng các bộ điều chế pha LiNbO<sub>3</sub>, có băng thông lớn và suy hao xen thấp. Mạch PDM được thực hiện trong một PLC, bao gồm một bộ kết hợp tia phân cực (PBC) ống dẫn sóng, trong đó việc kiểm soát pha tương đối giữa các mode phân cực trục giao được thực hiện bằng cách điều khiển chiều rộng của lõi ống dẫn sóng. PBC hoạt động trong một phạm vi quang phổ rộng với suy hao khoảng 0,3 dB. Có hai bộ điều chế QPSK, mỗi bộ chứa hai bộ điều chế Mach-Zehnder (bao gồm hai PLC coupler hình chữ Y và hai bộ điều chế pha LiNbO<sub>3</sub>) hoạt động giống nhau, băng thông (3 dB) khoảng 27 GHz. Các bộ điều chế DP-QPSK hoạt động với mức suy hao xen thấp không thay đổi 4,8 dB và nhiễu xuyên âm giữa các kênh khoảng -25 dB, đây là công nghệ tích hợp điều chế DP-QPSK đầu tiên trên thế giới.

## 2.2 Kỹ thuật sửa lỗi (FEC – Forward Error Correction)

Một trong những hạn chế cơ bản trong thiết kế mạng truyền tải quang là OSNR. Mạng DWDM phải hoạt động trên giới hạn OSNR để đảm bảo hoạt động không có lỗi. Giới hạn OSNR là một trong những thông số quan trọng quyết định khoảng cách một bước sóng có thể đi được trước khi cần tái tạo. Tùy thuộc vào việc một hệ thống ROADM được thiết kế cho mạng Metro, Backbone,... bước sóng 10 Gbps có thể được vận chuyển 800-2000 km trước khi cần tái tạo bắt buộc.

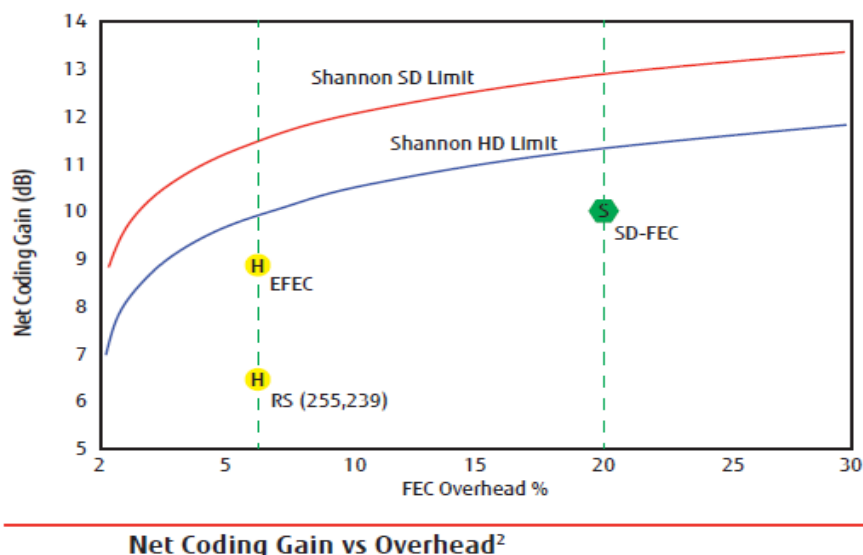
Tại tốc độ dữ liệu cao hơn 10 Gbps, các phương thức điều chế tiên tiến được sử dụng để giảm thiểu các tác động của suy giảm quang, chẳng hạn như CD, PMD, cũng như để đảm bảo tín hiệu quang phù hợp trong grid 50 GHz được sử dụng trong hệ thống DWDM hiện đại. Nhược điểm của hệ thống tốc độ cao và các phương thức điều chế tiên tiến, đó là yêu cầu OSNR bước sóng 100 Gbps. Với bước sóng 100 Gbps, OSNR yêu cầu tối thiểu cao hơn 10 dB so với bước sóng 10 Gbps. Nếu không có phương thức sửa lỗi thì hệ thống bước sóng 100 Gbps sẽ bị giới hạn trong khoảng cách rất ngắn. May mắn thay, các kỹ thuật sửa lỗi FEC tinh vi đã thực hiện trên các tín hiệu 10G, 40G và 100G để làm tăng hiệu suất và khoảng cách.

FEC là phương thức mã hóa các tín hiệu ban đầu, với thông tin mã đầu phát hiện và sửa lỗi được chèn vào (ví dụ các byte chẵn lẻ), vì vậy tại đầu thu có thể phát hiện và sửa lỗi xảy ra trên đường truyền. FEC làm giảm BER và tăng khoảng cách truyền tín hiệu quang mà không cần tái tạo.



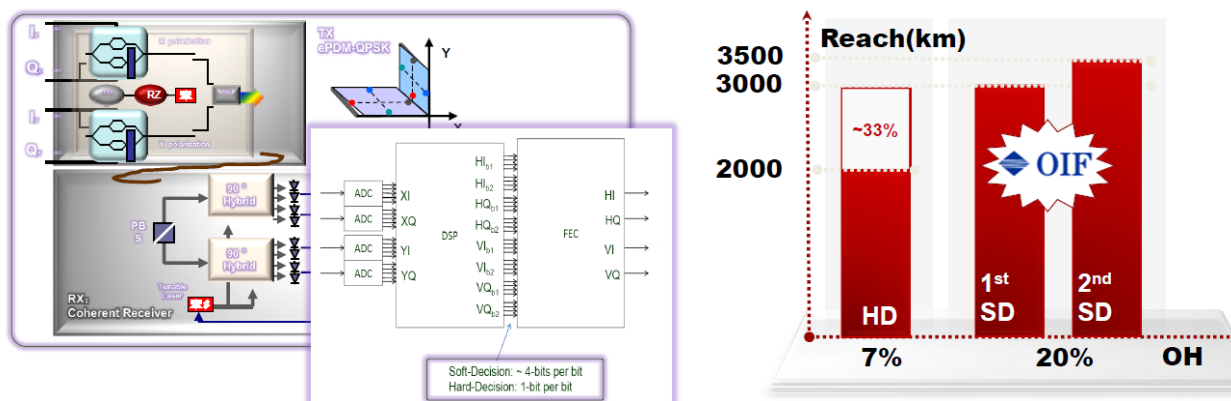
**Hình 2.16. Thuật toán sửa lỗi FEC**

Có một số thuật toán FEC khác nhau, trong khi thế hệ đầu tiên FEC Reed-Solomon và thế hệ thứ hai EFEC được sử dụng cho bước sóng 10 Gbps, 40 Gbps, thì thậm chí thuật toán FEC thế hệ thứ ba là cần thiết cho bước sóng 100 Gbps để đạt được hiệu suất tối ưu. Thế hệ FEC thứ ba dựa trên thuật toán mã hóa và giải mã mạnh hơn, mã hóa lặp đi lặp lại và được gọi là SD-FEC (Soft-decision FEC).



**Hình 2.17. So sánh SD-FEC và HD-FEC (Coding Gain, Overhead) [10]**

Trong khi các khối giải mã HD-FEC (Hard-decision FEC) thực hiện giải mã trên cơ sở tín hiệu đến, và cung cấp một bit thông tin (1 hoặc 0) để giải mã FEC. Tín hiệu thu được so sánh với một ngưỡng, trên ngưỡng thì là “1” và dưới ngưỡng là “0”. SD-FEC sử dụng các bit bổ sung được thêm vào, để cung cấp khả năng nhận diện tín hiệu đến tốt hơn. Nói cách khác, bộ giải mã không chỉ xác định xem tín hiệu đến là một “1” hoặc một “0” dựa trên ngưỡng, mà còn cung cấp một yếu tố “tín cậy” để quyết định. Các bit “tín cậy” hoặc “xác suất” được sử dụng trong giải mã SD-FEC, với sức mạnh cao hơn, làm tăng độ lợi 1-2 dB. Trên thực tế, 3-bit “tự tin” có thể cải thiện được hiệu suất. Mặc dù 1-2 dB không như mong đợi, tuy nhiên nó có thể tăng khoảng cách truyền tải lên 20-40% và đó là điều rất có ý nghĩa ở bước sóng 100 Gbps.



**Hình 2.18. Kỹ thuật sửa lỗi SD-FEC**

Như vậy, chương 2 đã cho chúng ta thấy được rằng công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps cần có một kỹ thuật điều chế và sửa lỗi tốt hơn. Đó chính là kỹ thuật điều chế DP-QPSK và kỹ thuật sửa lỗi SD-FEC. Việc áp dụng các kỹ thuật này giúp tăng khoảng cách đường truyền, tăng hiệu suất phổ, giảm sự ảnh hưởng của tán sắc...

### **CHƯƠNG 3 ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA KHOẢNG CÁCH ĐƯỜNG TRUYỀN LÊN CÔNG NGHỆ TRUYỀN TẢI BƯỚC SÓNG 100 GBPS**

*Trong chương 3 này, tôi sẽ mô phỏng hệ thống truyền dẫn quang sử dụng bước sóng 10 Gbps và 100Gbps với các khoảng cách truyền dẫn khác nhau, nhằm xem xét sự ảnh hưởng của đường truyền lên từng công nghệ, nhất là với công nghệ bước sóng 100Gbps. Đồng thời xây dựng giải pháp để giải quyết bài toán truyền bước sóng 100 Gbps ở khoảng cách lớn.*

#### ***Cơ sở lý thuyết:***

Như đã phân tích ở chương 2, một trong những hạn chế cơ bản trong thiết kế mạng truyền tải quang là OSNR. Mạng DWDM phải hoạt động trên giới hạn OSNR để đảm bảo hoạt động không có lỗi. Giới hạn OSNR là một trong những thông số quan trọng quyết định khoảng cách một bước sóng có thể đi được trước khi cần tái tạo. Tùy thuộc vào việc một hệ thống ROADM được thiết kế cho mạng Metro, Backbone,... bước sóng 10 Gbps có thể được vận chuyển 800-2000 km trước khi cần tái tạo bắt buộc. Nhược điểm của hệ thống tốc độ cao và các phương thức điều chế tiên tiến, đó là yêu cầu OSNR bước sóng 100 Gbps. Với bước sóng 100 Gbps, OSNR yêu cầu tối thiểu cao hơn 10 dB so với bước sóng 10 Gbps. Nếu không có phương thức sửa lỗi thì hệ thống bước sóng 100 Gbps sẽ bị giới hạn trong khoảng cách rất ngắn. Chính vì vậy cần có các bộ xử lý số tốc độ cao, tích hợp sửa lỗi SD-FEC nhằm làm tăng khoảng cách đường truyền.

#### **3.1 Tổng quan về phần mềm Optisystem 14**

Cùng với sự phát triển của các công nghệ mới, các hệ thống thông tin quang ngày càng phức tạp. Để phân tích, thiết kế các hệ thống này bắt buộc phải sử dụng các công cụ mô phỏng. OptiSystem là phần mềm mô phỏng hệ thống thông tin quang của hãng Optiwave. Phần mềm này có khả năng thiết kế, đo kiểm tra và thực hiện tối ưu hóa rất nhiều loại tuyến thông tin quang, dựa trên khả năng mô hình hóa các hệ thống thông tin quang trong thực tế. Bên cạnh đó, phần mềm này cũng có thể dễ dàng mở rộng do người sử dụng có thể đưa thêm các phần tử tự định nghĩa vào hoặc xây dựng các phần tử mới từ các phần tử đã có.

Phần mềm có giao diện thân thiện, khả năng hiển thị trực quan. OptiSystem có thể giảm thiểu các yêu cầu thời gian và giảm chi phí liên quan đến thiết kế của các hệ thống quang học, liên kết, và các thành phần. Phần mềm OptiSystem là một sáng tạo, phát triển nhanh chóng, công cụ thiết kế hữu hiệu cho phép người dùng lập kế hoạch, kiểm tra, và mô phỏng gần như tất cả các loại liên kết quang học trong lớp truyền dẫn của một quang phổ rộng của các mạng quang học từ mạng LAN, SAN, MAN tới mạng ultra-long-haul. Nó cung cấp lớp truyền dẫn, thiết kế và quy hoạch hệ thống thông tin quang từ các thành phần tới mức hệ thống. Hội nhập của nó với các sản phẩm Optiwave khác và các công cụ thiết kế của ngành công nghiệp điện tử hàng đầu phần

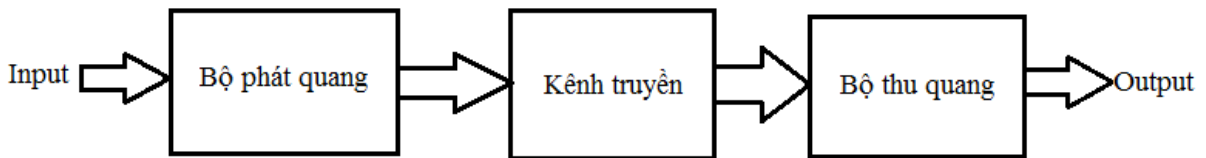
mềm thiết kế tự động góp phần vào OptiSystem đẩy nhanh tiến độ sản phẩm ra thị trường và rút ngắn thời gian hoàn vốn.

**Lợi ích của phần mềm Optisystem 14:**

- + Cung cấp cái nhìn toàn cầu vào hiệu năng hệ thống
- + Đánh giá sự nhạy cảm tham số giúp đỡ việc thiết kế chi tiết kỹ thuật
- + Trực quan trình bày các tùy chọn thiết kế và dự án khách hàng tiềm năng
- + Cung cấp truy cập đơn giản để tập hợp rộng rãi các hệ thống đặc tính dữ liệu
- + Cung cấp các tham số tự động quét và tối ưu hóa.

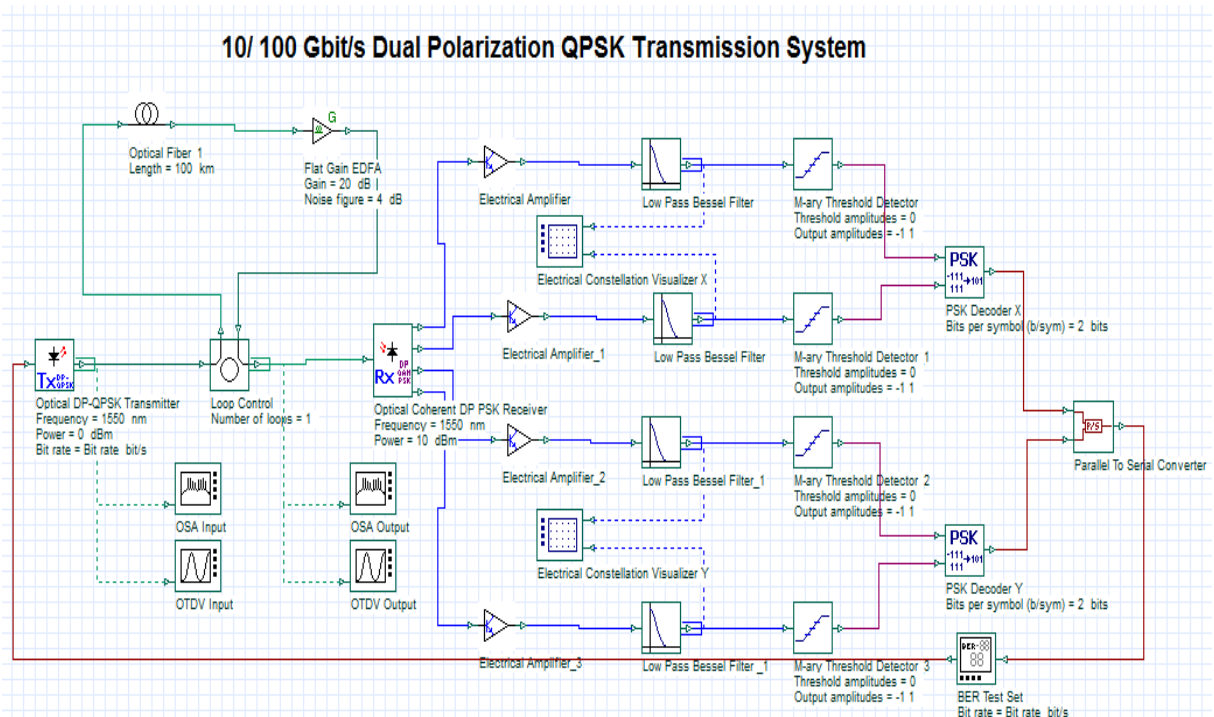
**3.2 Mô phỏng và đánh giá hệ thống 10/ 100 Gbps DP-QPSK không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP**

Sơ đồ tổng quát của hệ thống thông tin quang:



**Hình 3.1. Sơ đồ tổng quát của hệ thống thông tin quang**

Từ sơ đồ tổng quát, chúng ta sẽ đi xây dựng hệ thống truyền dẫn quang 10/100 Gbps DP-QPSK như sau:



**Hình 3.2. Sơ đồ hệ thống 10/100 Gbps DP-QPSK**

Trong sơ đồ ta có:

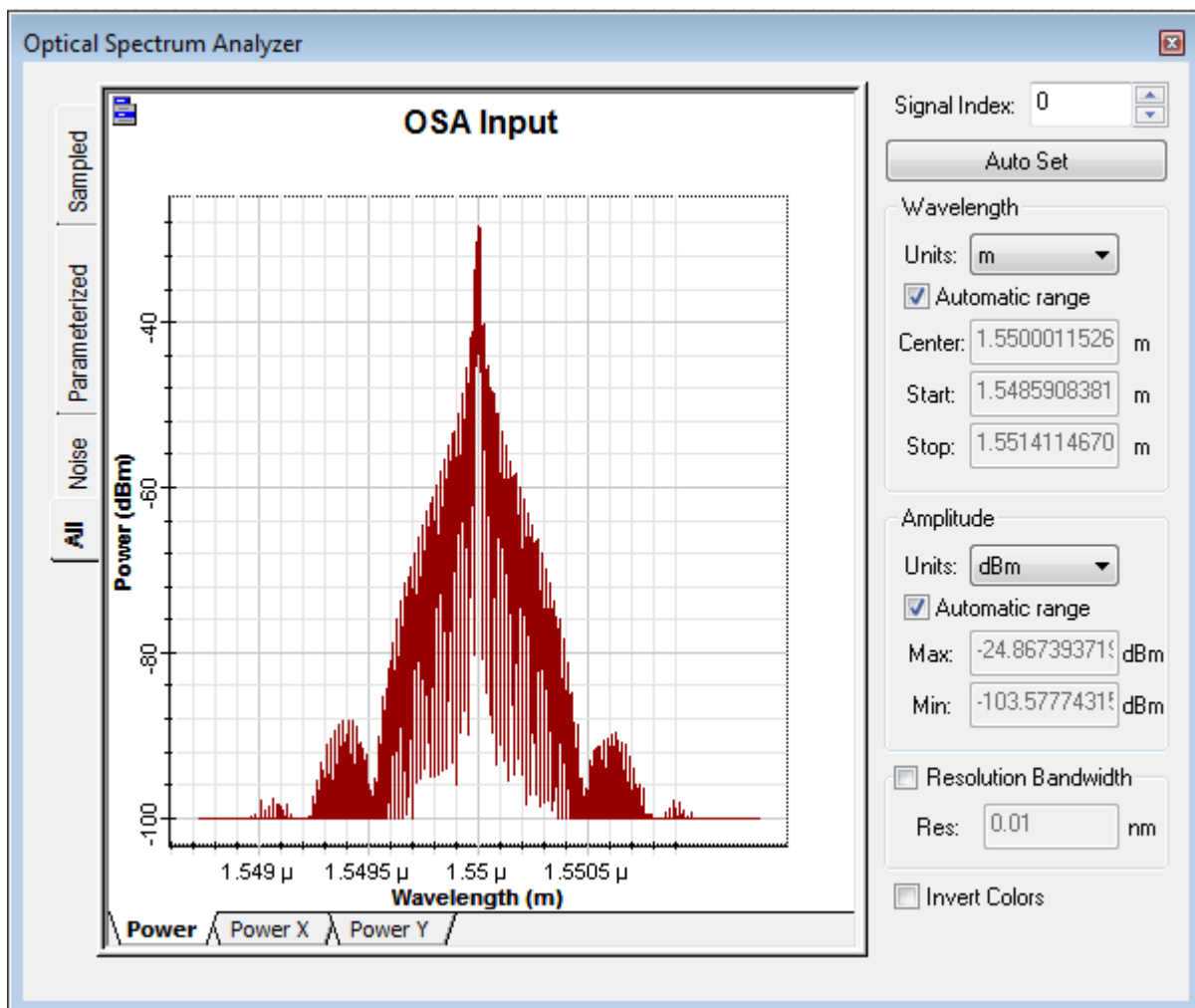
- **Máy phát DP-QPSK:** Tần số: 1550 nm, công suất: 0 dBm.
- **Máy thu DP-QPSK:** Tần số: 1550 nm, công suất: 10 dBm, photodetector: PIN với  $R = 1 \text{ A/W}$ .
- **Sợi quang :** hệ số suy hao: 0,2 dB/km, hệ số tán sắc 16,75 ps/(nm.km), độ dốc tán sắc: 0,075 ps/nm<sup>2</sup>/km. (cùng với Loop Control có thể thay đổi được).
- **Khuếch đại quang phẳng EDFA:** Gain = 20 dB, nhiễu là 4 dB.
- **Bộ khuếch đại điện:** Gain = 20 dB.
- **Máy kiểm tra BER: BER Test Set**
- **Ngoài ra:** có 2 máy phân tích phổ quang (OSA Input và OSA Output), 2 máy quan sát tín hiệu quang trên miền thời gian (OTDV Input và OTDV Output), 2 máy quan sát chòm sao tín hiệu điện trên hai phân cực X và Y (Electrical Constellation Visualizer X và Electrical Constellation Visualizer Y) và một số thành phần khác.

Chúng ta sẽ thay đổi bước sóng trên máy phát DP-QPSK với các bước sóng 10 Gbps, 100 Gbps, thay đổi chiều dài cáp quang và loop control với các thông số khác nhau. Từ đó thấy được ảnh hưởng của đường truyền lên các công nghệ truyền dẫn bước sóng có tốc độ khác nhau.

### 3.2.1 Hệ thống 10 Gbps DP-QPSK

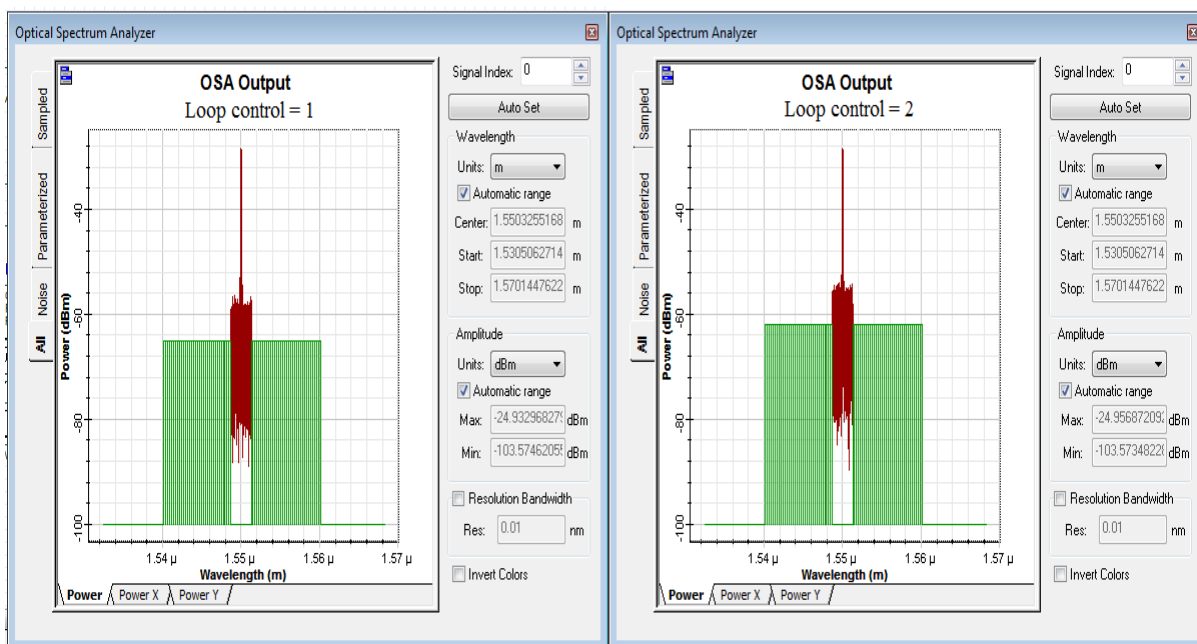
Đặt bước sóng phát ở máy phát DP-QPSK là 10 Gbps, với khoảng cách sợi quang là 100 Km, loop control lần lượt đặt là 1 và 2. Ta có các kết quả mô phỏng như sau:

Phổ của tín hiệu 10 Gbps sau máy phát:



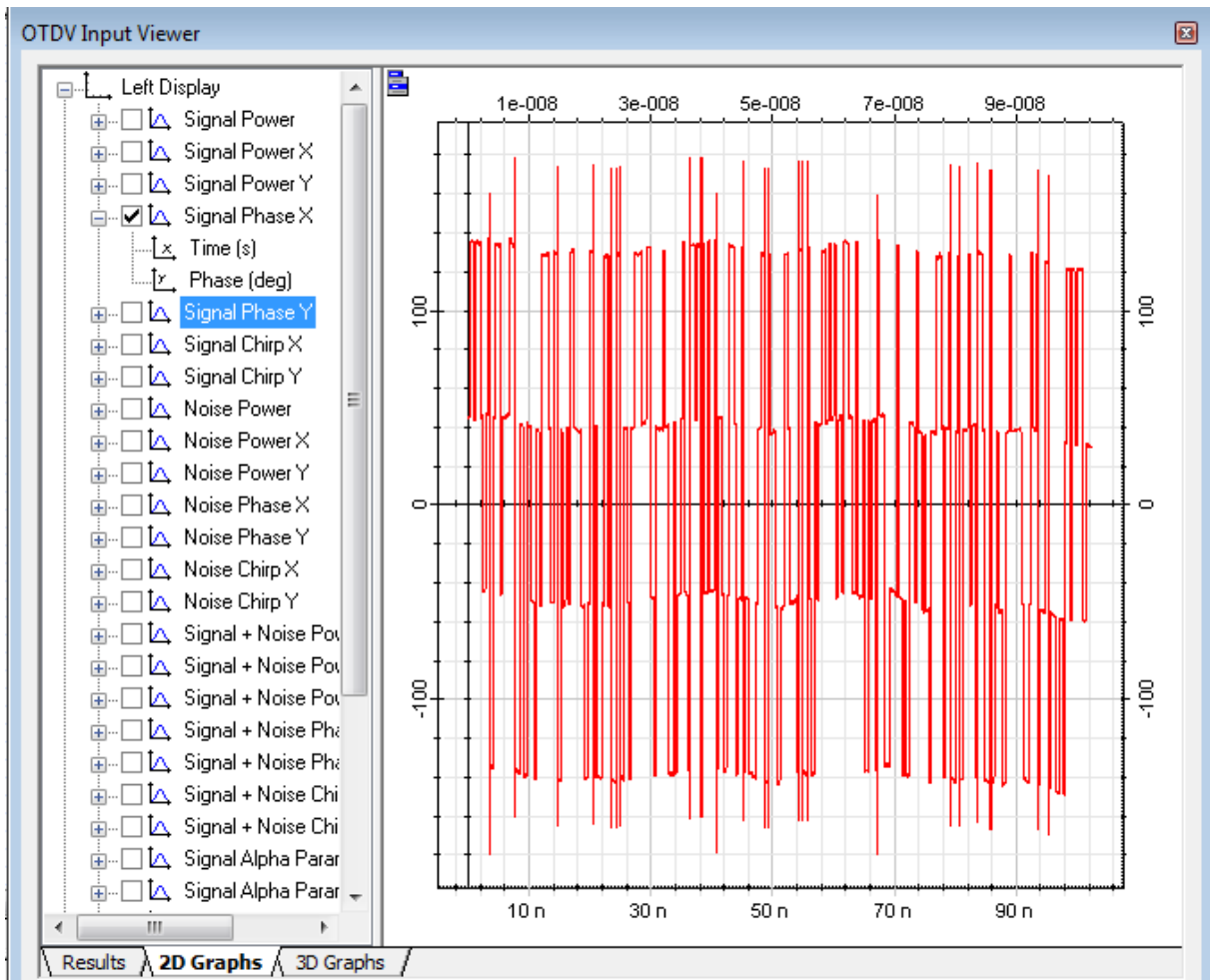
Hình 3.3. Phổ của tín hiệu 10 Gbps sau máy phát

Phổ của tín hiệu sau máy thu:



Hình 3.4. Phổ của tín hiệu sau máy thu 10 Gbps với khoảng cách khác nhau

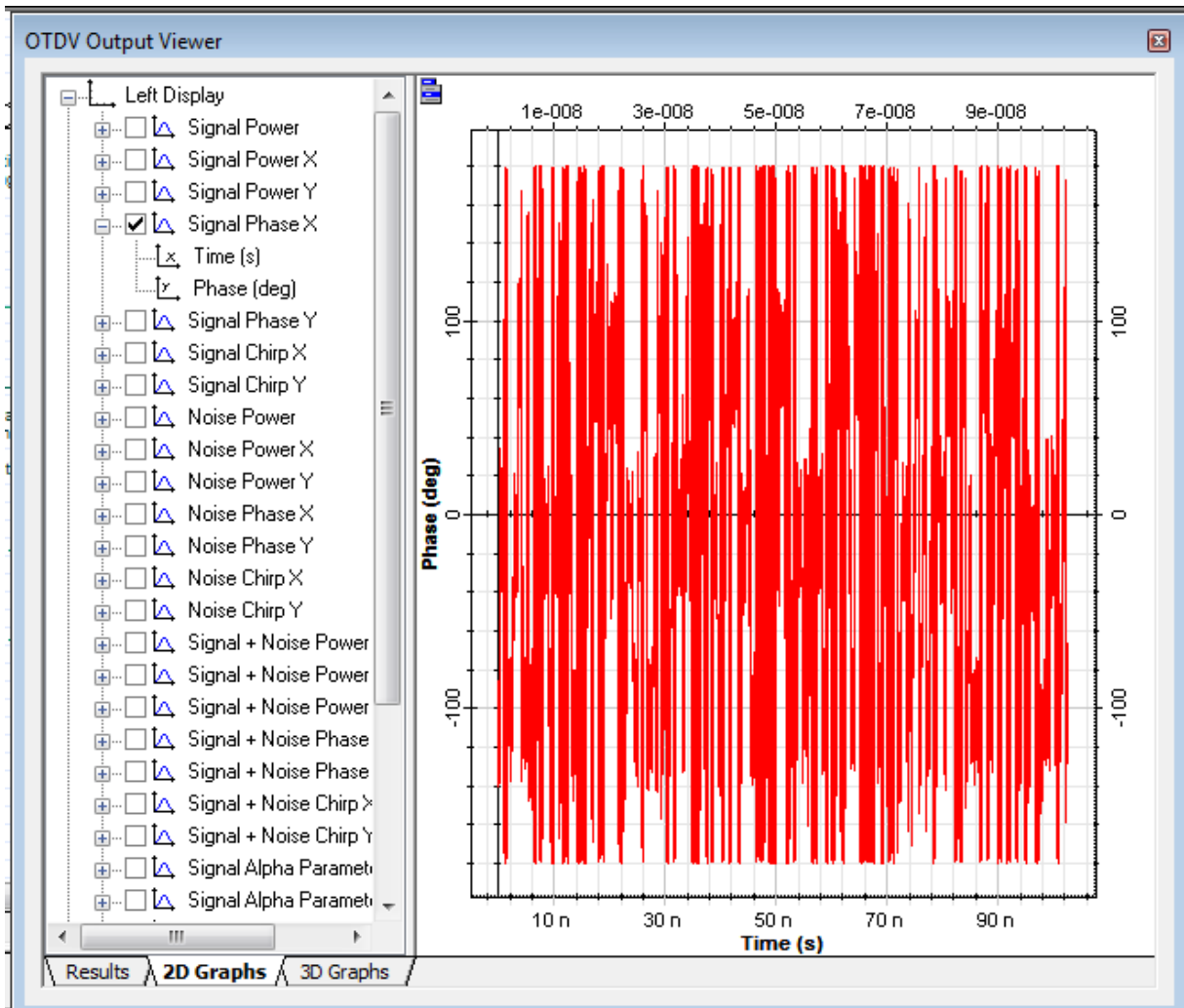
### Tín hiệu trên miền thời gian tại máy phát (Phân cực X)



**Hình 3.5. Tín hiệu trên miền thời gian tại máy phát 10 Gbps (phân cực X)**

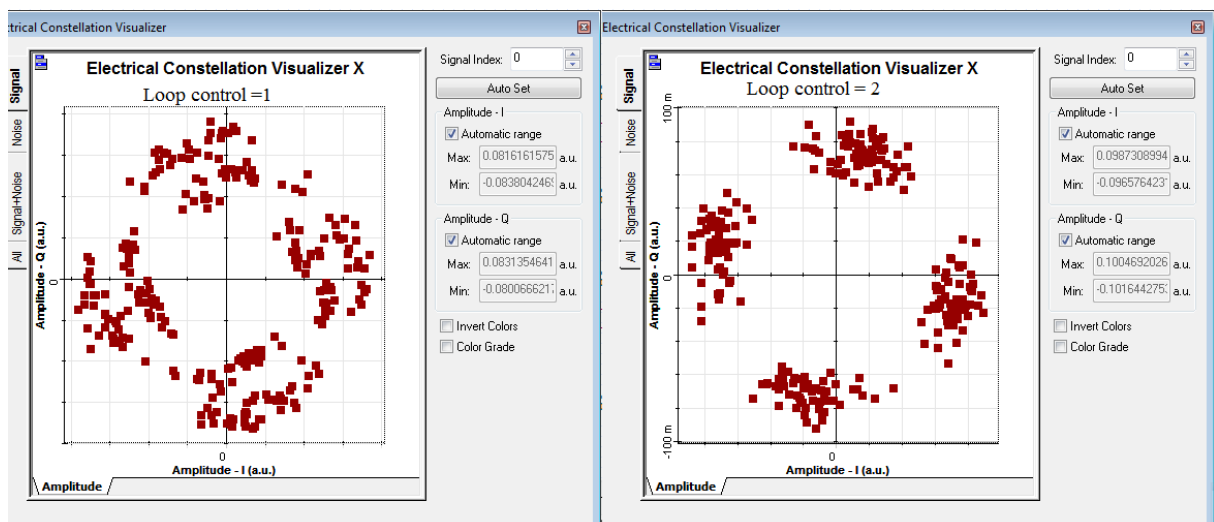
Tín hiệu trên miền thời gian tại máy thu 10 Gbps (phân cực X):





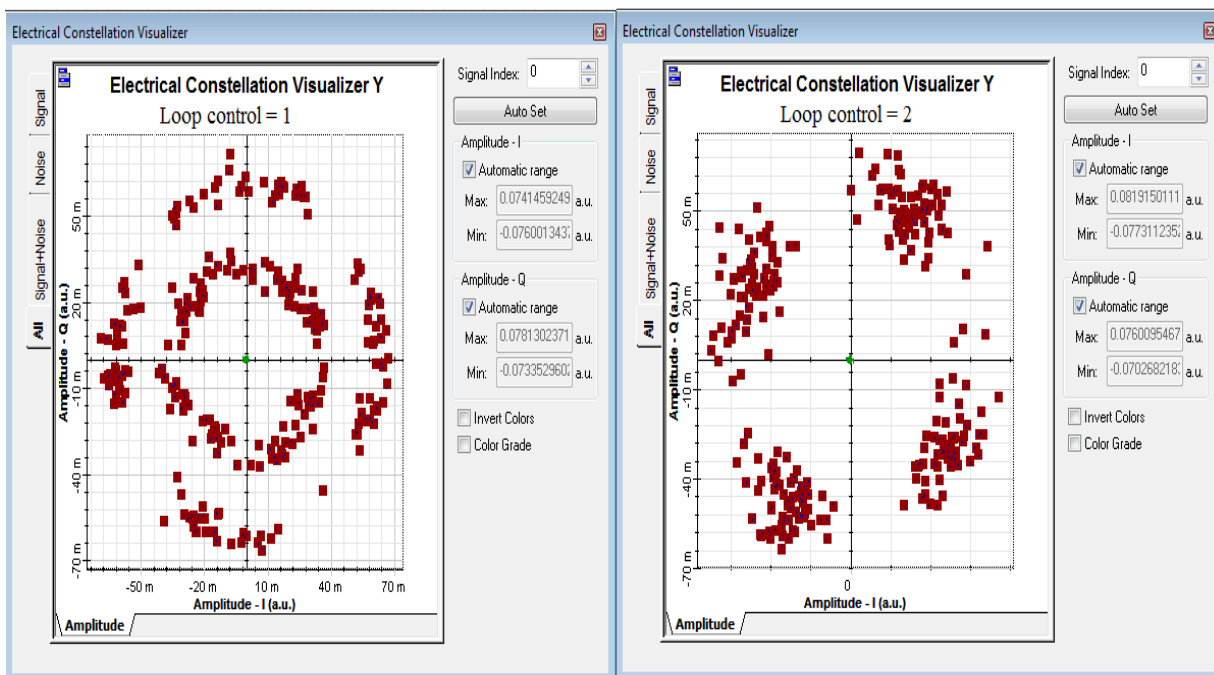
**Hình 3.6. Tín hiệu trên miền thời gian tại máy thu 10 Gbps (phân cực X)**

Biểu đồ chòm sao tín hiệu điện 10 Gbps trên phân cực X với các khoảng cách khác nhau:



**Hình 3.7. Biểu đồ chòm sao tín hiệu 10 Gbps điện trên phân cực X với các khoảng cách khác nhau.**

Biểu đồ chòm sao tín hiệu điện 10 Gbps trên phân cực Y với các khoảng cách khác nhau:



**Hình 3.8. Biểu đồ chòm sao tín hiệu 10 Gbps điện trên phân cực Y với các khoảng cách khác nhau**

Ta thấy khi hệ thống hoạt động với tốc độ bit 10 Gb/s và thay đổi khoảng cách (loop control) thì biểu đồ chòm sao tín hiệu như trên hình bên trái, lúc này hệ thống hoạt động tốt (các ký tự quang “00”, “01”, “11”, “10” nằm trên 4 đỉnh của hình vuông và cách xa tâm, nên xác suất lựa chọn đúng ký tự quang cao, nghĩa là tỉ lệ lỗi bit thấp).

Kết quả trên máy kiểm tra BER:

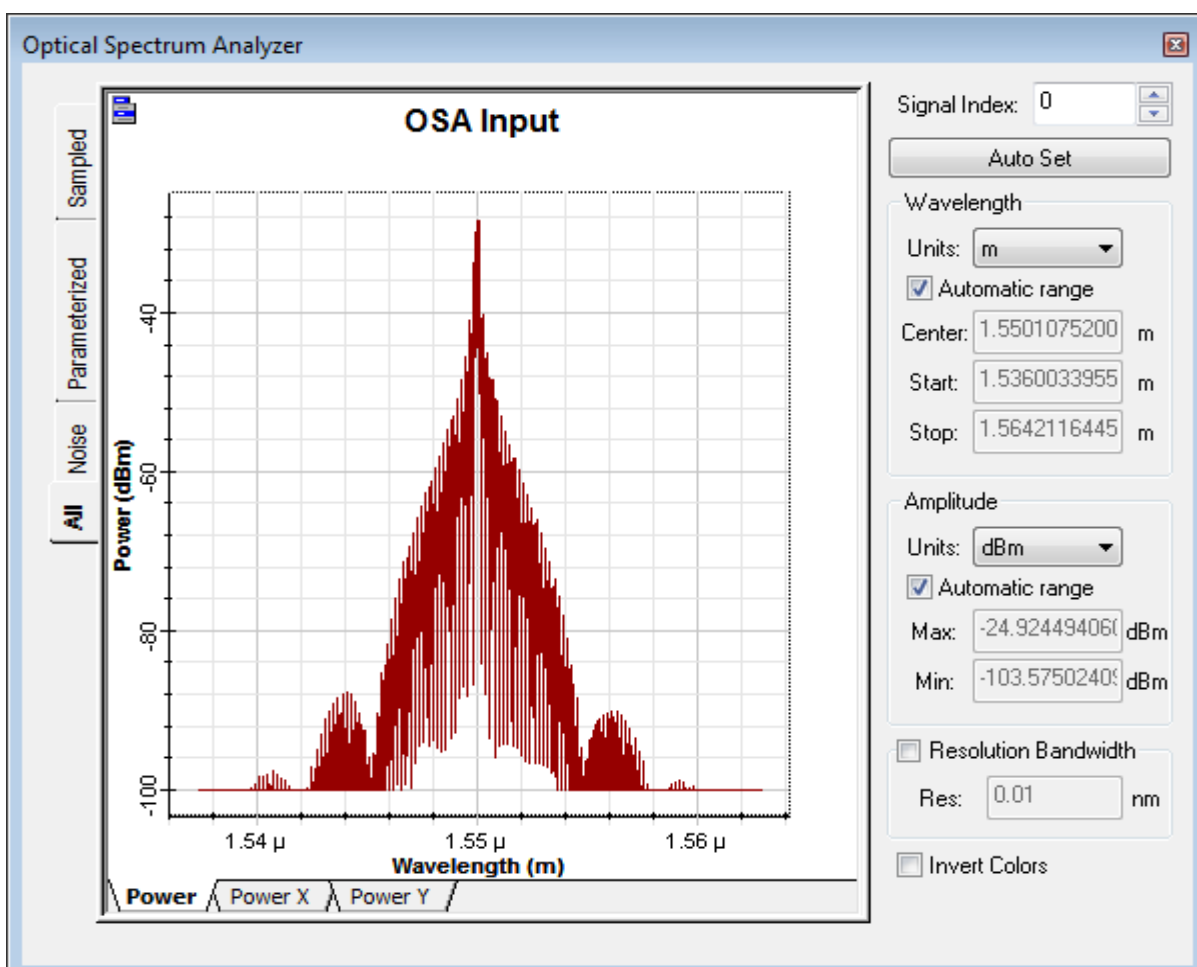
Name	Value
Bit Errors	0
BER	0
log of BER	-1000
BER: X Polarization	0
log of BER: X Polarization	-1000
BER: Y Polarization	0
log of BER: Y Polarization	-1000
Bit Errors: X Polarization	0
Bit Errors: Y Polarization	0
Sequence length per iteration	1024
Sequence length for BER per iteration	1024

**Hình 3.9. BER trên hệ thống 10 Gbps DP-QPSK**

### 3.2.2 Hệ thống 100 Gbps DP-QPSK

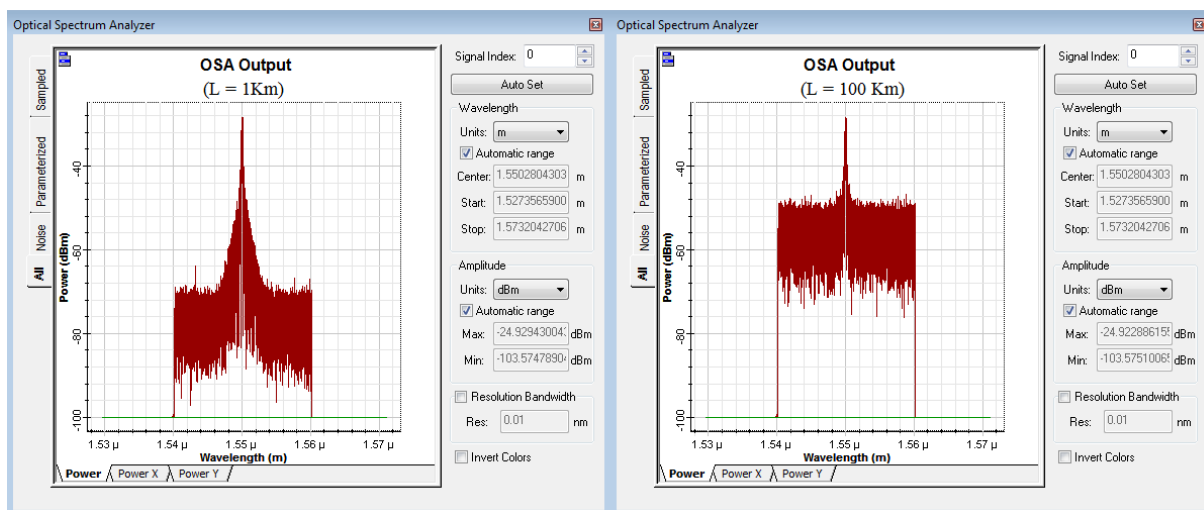
Đặt bước sóng phát ở máy phát DP-QPSK là 100 Gbps, với khoảng cách sợi quang lần lượt là 5 Km và 100 Km, loop control là 1, gain của EDFA thay đổi theo khoảng cách cáp quang. Ta có các kết quả mô phỏng như sau:

Phổ của tín hiệu 100 Gbps sau máy phát:



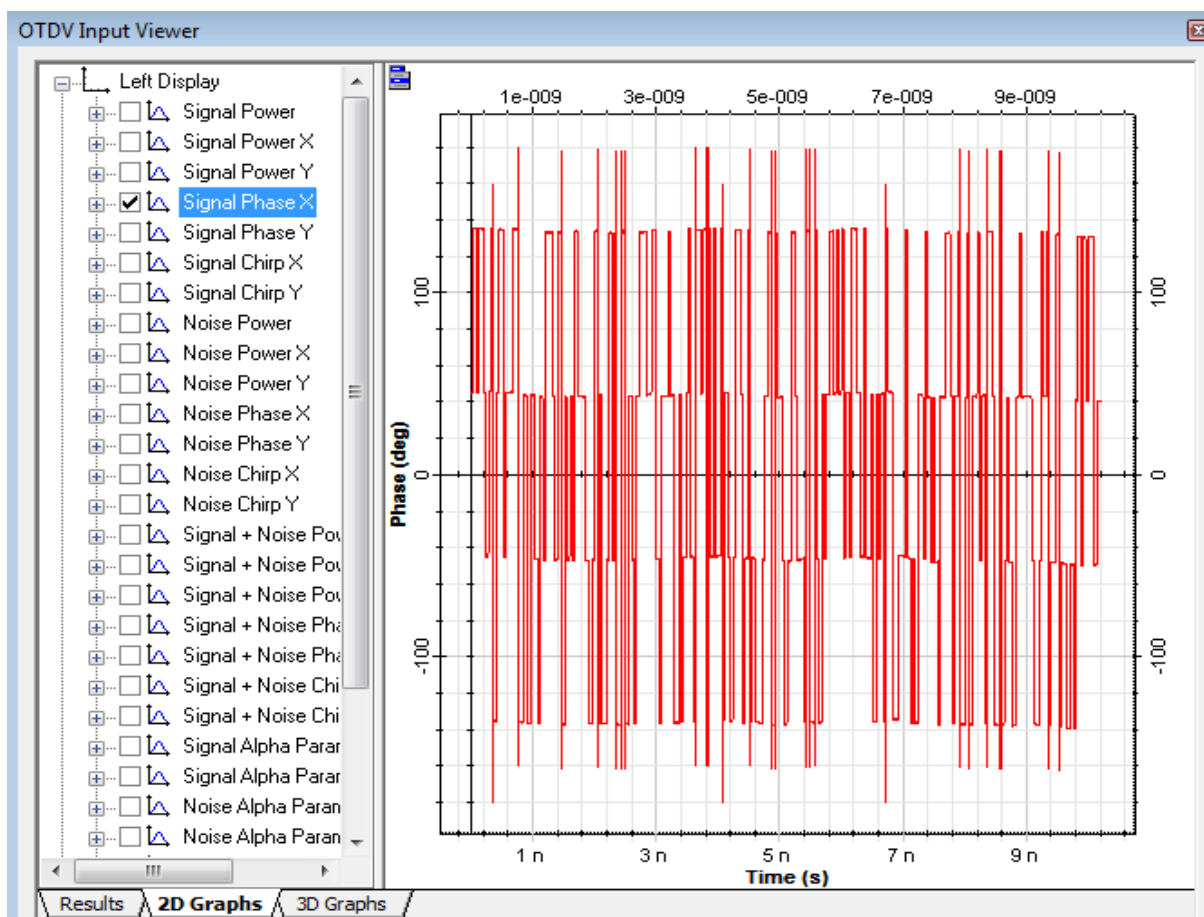
**Hình 3.10. Phổ của tín hiệu 100 Gbps sau máy phát trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP**

Phổ của tín hiệu sau máy thu:



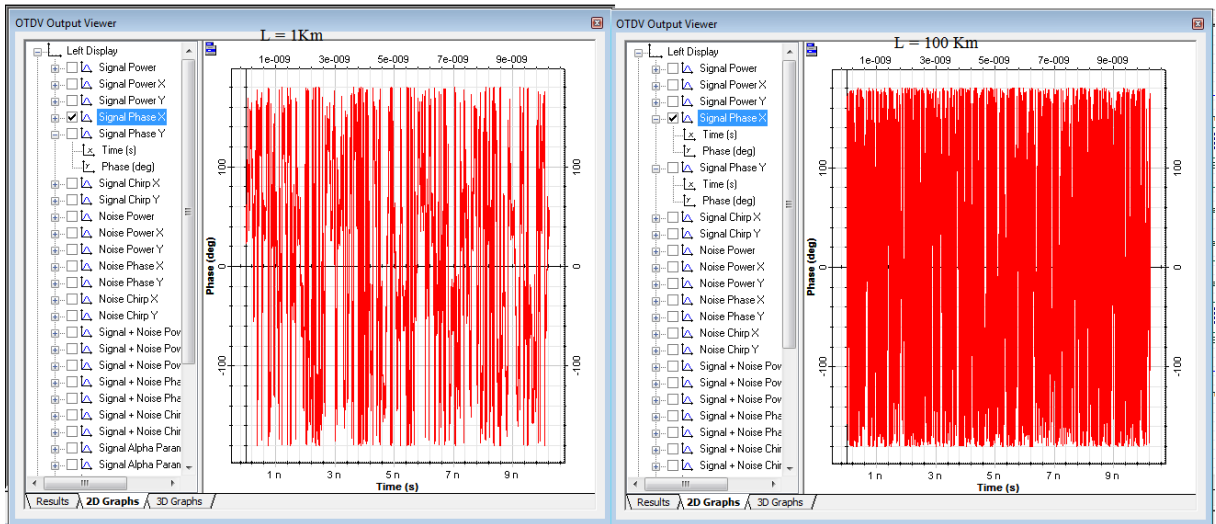
**Hình 3.11. Phổ của tín hiệu sau máy thu 100 Gbps trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP với khoảng cách khác nhau**

Tín hiệu trên miền thời gian tại máy phát (Phân cực X):



**Hình 3.12. Tín hiệu trên miền thời gian tại máy phát 100 Gbps trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP (phân cực X)**

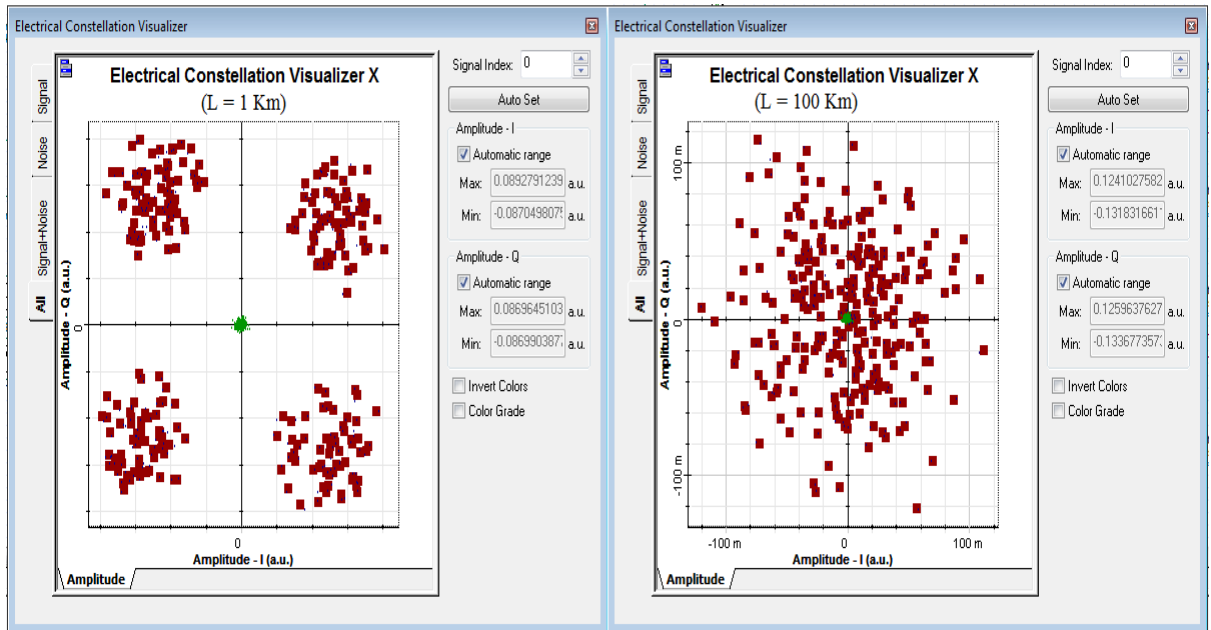
Tín hiệu trên miền thời gian tại máy thu 100 Gbps (phân cực X):



**Hình 3.13. Tín hiệu trên miền thời gian tại máy thu 100 Gbps trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP (phân cực X)**

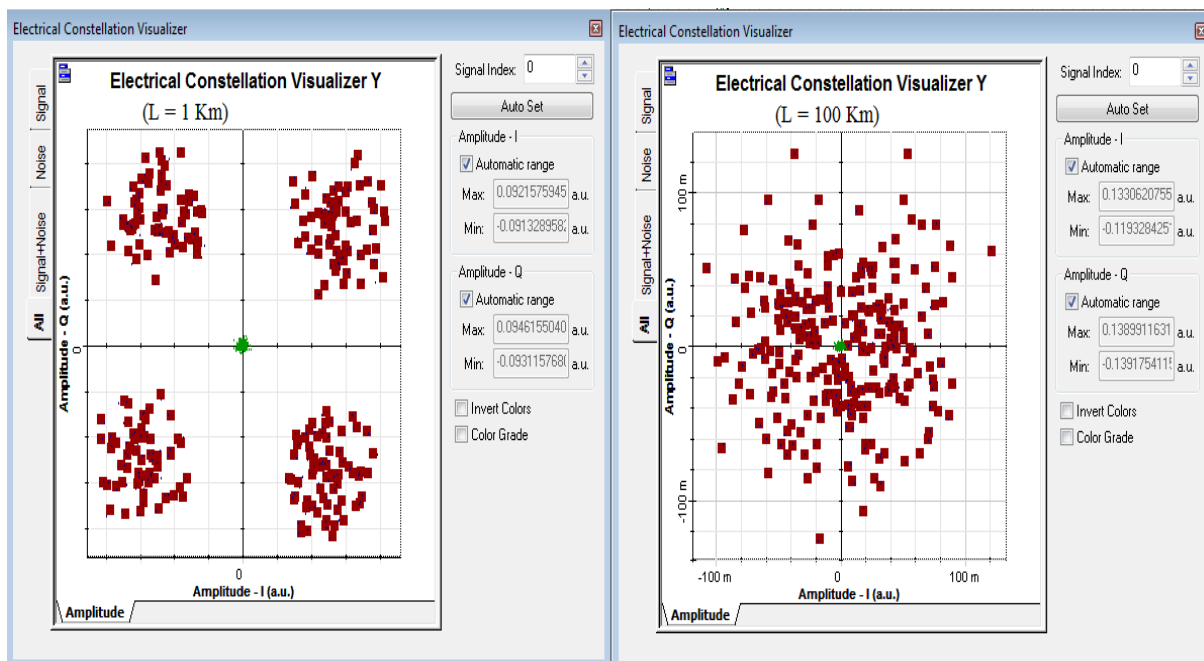
Ta có thể thấy với khoảng cách lớn, tín hiệu bị méo nghiêm trọng so với tín hiệu tại máy phát.

Biểu đồ chòm sao tín hiệu điện 100 Gbps trên phân cực X với các khoảng cách khác nhau:



**Hình 3.14. Biểu đồ chòm sao tín hiệu 100 Gbps điện (phân cực X) trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP với các khoảng cách khác nhau.**

Biểu đồ chòm sao tín hiệu điện 10 Gbps trên phân cực Y với các khoảng cách khác nhau:



**Hình 3.15. Biểu đồ chòm sao tín hiệu 100 Gbps điện (phân cực Y) trên hệ thống không có bộ xử lý số tốc độ cao DSP với các khoảng cách khác nhau**

Từ biểu đồ chòm sao ta có thể quan sát thấy với khoảng cách lớn, các tín hiệu nằm gần tâm và không nằm trong góc phân tư tương ứng với các chiều biên độ của nó, nghĩa là xác suất lựa chọn tín hiệu quang thấp và tỉ lệ lỗi bit là rất lớn. Điều đó, dẫn đến hệ thống không thể hoạt động được nếu như không sử dụng bộ xử lý tín hiệu số tốc độ cao.

Kết quả đo BER ở 100 Km:

Name	Value
Bit Errors	64
BER	0.5
log of BER	-0.3010299956639812
BER: X Polarization	0.484375
log of BER: X Polarization	-0.3148182801496145
BER: Y Polarization	0.515625
log of BER: Y Polarization	-0.2876660341059997
Bit Errors: X Polarization	31
Bit Errors: Y Polarization	33
Sequence length per iteration	1024
Sequence length for BER per iteration	1024

**Hình 3.16. BER trên hệ thống 100 Gbps DP-QPSK không có bộ xử lý số tốc độ cao**

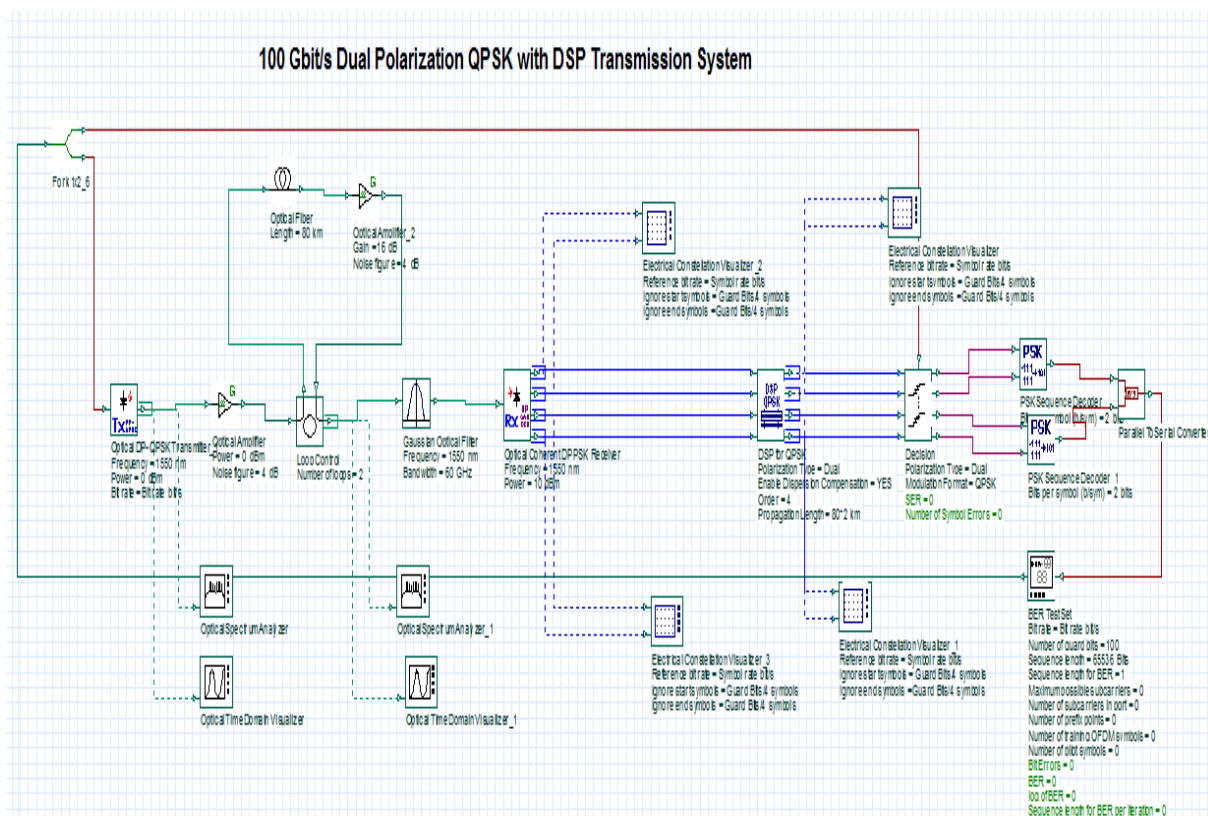
### 3.3 Mô phỏng hệ thống 100 Gbps DP-QPSK với bộ xử lý tín hiệu số tốc độ cao DSP

*Bộ xử lý số tốc độ cao DSP*

Trong các hệ thống quang kết hợp tốc độ cao, với kỹ thuật điều chế phức tạp thì bộ xử lý tín hiệu số DSP có rất quan trọng. DSP có các chức năng sau:

- + Bù tán sắc CD.
- + Khôi phục đồng bộ.
- + Giải ghép phân cực.
- + Khôi phục pha và tần số.
- + Cân bằng tín hiệu.
- + Đo BER.
- + Tích hợp FEC.

**Xây dựng hệ thống 100 Gbps DP-QPSK với bộ xử lý tín hiệu số tốc độ cao DSP như sơ đồ sau:**



**Hình 3.17. Hệ thống 100 Gbps DP-QPSK với DSP**

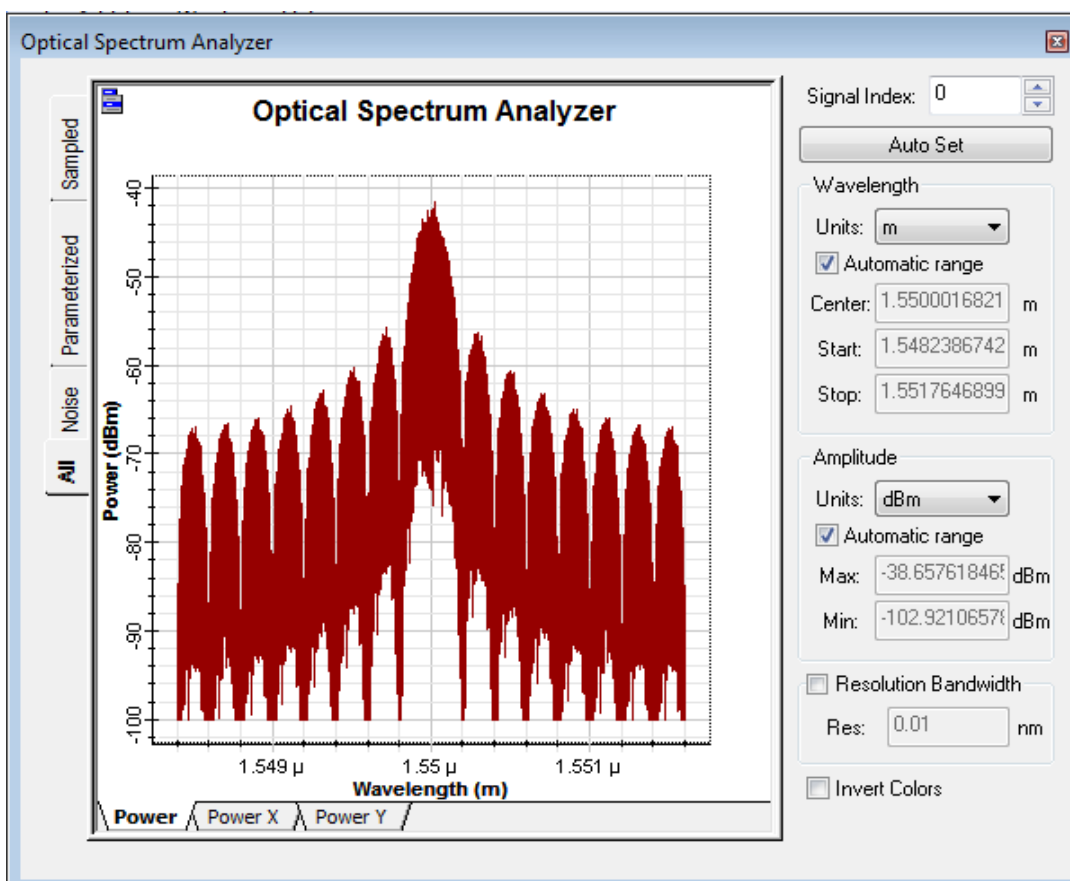
Trong sơ đồ ta có:

- **Máy phát DP-QPSK:** Tần số: 1550 nm, công suất: 0 dBm, bước sóng 100 Gbps.
- **Máy thu DP-QPSK:** Tần số: 1550 nm, công suất: 10 dBm, photodetector: PIN với  $R = 1$  A/W, bước sóng 100 Gbps.

- **Sợi quang** : chiều dài 80 Km, hệ số suy hao: 0,2 dB/km, hệ số tán sắc 16,75 ps/(nm.km), độ dốc tán sắc: 0,075 ps/nm<sup>2</sup>/km, Loop Control = 2.
- **Khuếch đại quang**: 2 bộ khuếch đại quang với gain là 20 dB và 16 dB, nhiễu là 4 dB.
- **Bộ xử lý số tốc độ cao DSP QPSK**
- **Bộ kiểm tra BER**
- **Ngoài ra**: có 2 máy phân tích phổ quang (OSA Input và OSA Output), 2 máy quan sát tín hiệu quang trên miền thời gian (OTDV Input và OTDV Output), 2 máy quan sát chòm sao tín hiệu điện trên hai phân cực X và Y (Electrical Constellation Visualizer X và Electrical Constellation Visualizer Y) và một số thành phần khác.

*Kết quả mô phỏng như sau:*

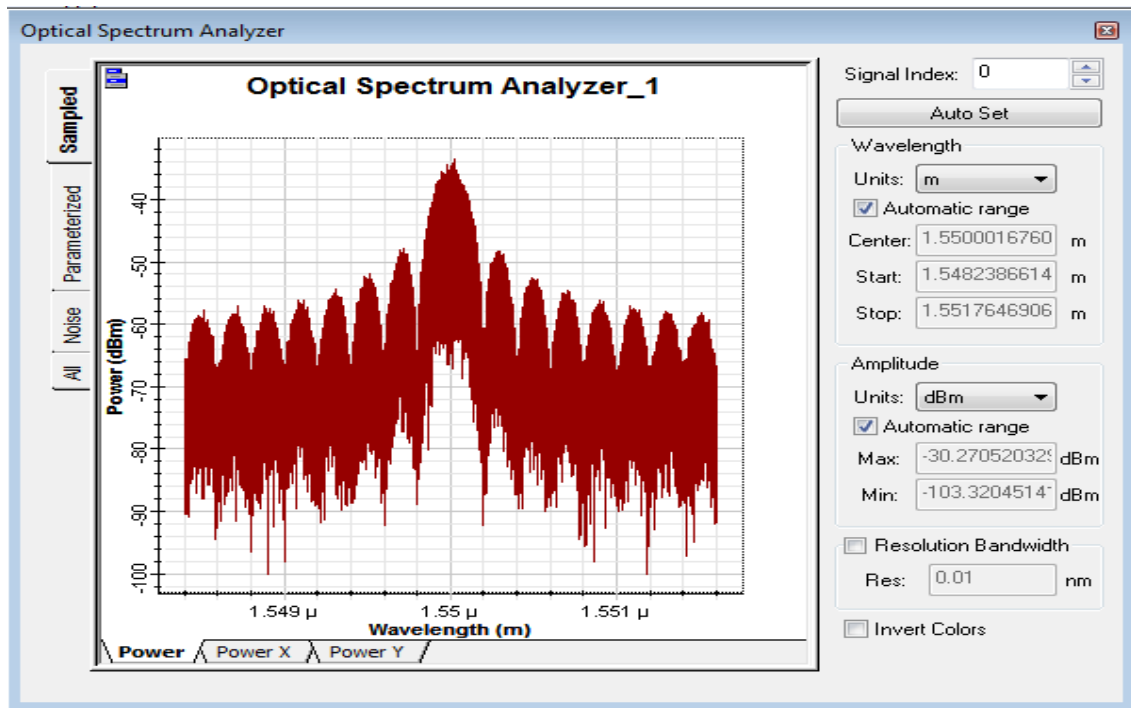
Phổ của tín hiệu sau máy phát:



**Hình 3.18. Phổ của tín hiệu 100 Gbps sau máy phát của hệ thống có bộ xử lý số tốc độ cao DSP**

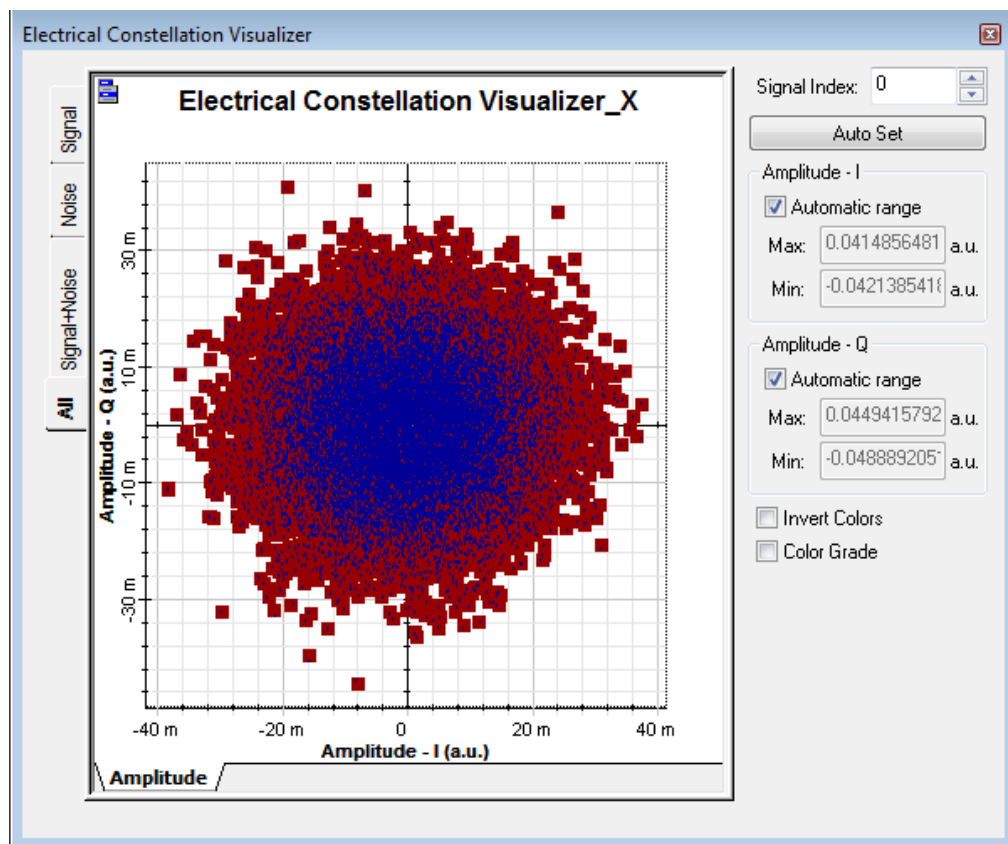
Phổ của tín hiệu 100 Gbps tại máy thu:





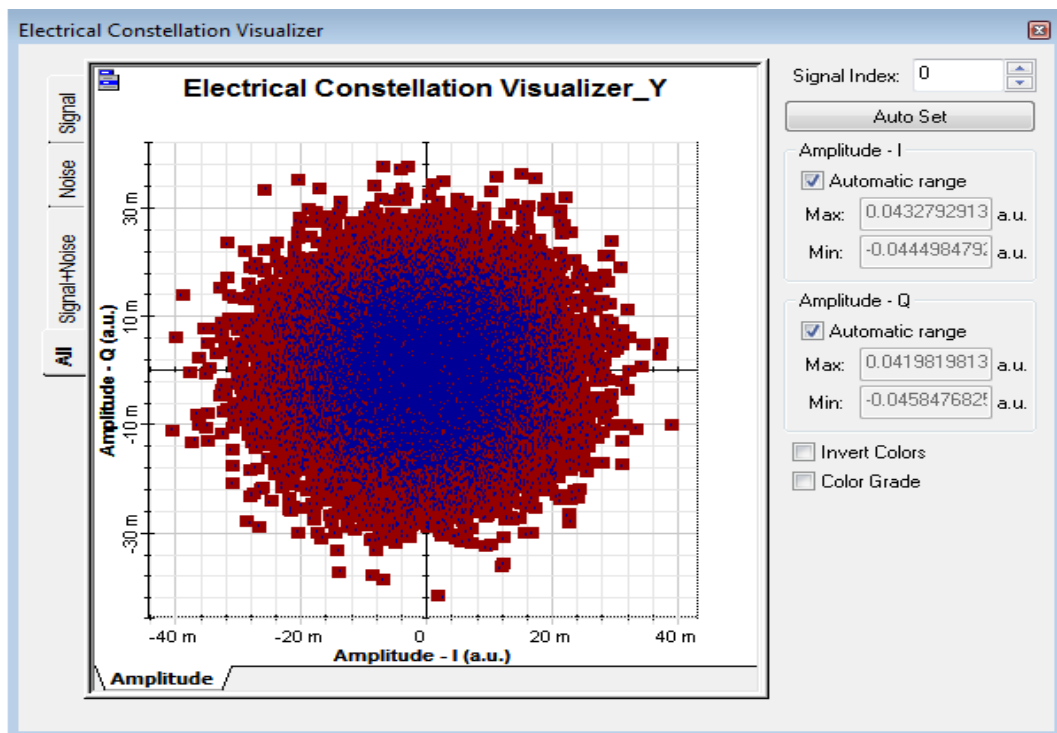
Hình 3.19. Phổ của tín hiệu 100 Gbps trên máy thu hệ thống có bộ xử lý số tốc độ cao DSP

Biểu đồ chòm sao trên phân cực X trước khi xử lý số:



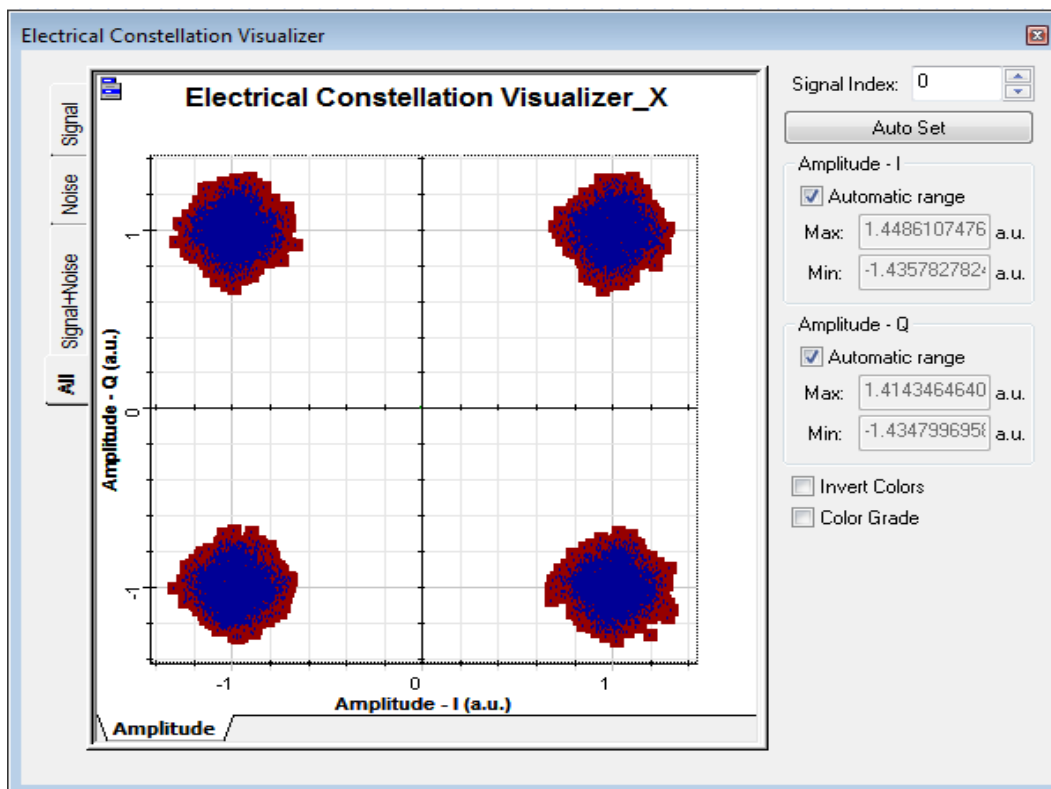
Hình 3.20. Biểu đồ chòm sao (phân cực X) trên hệ thống 100 Gbps trước khi xử lý số

Biểu đồ chòm sao trên phân cực Y trước khi xử lý số:



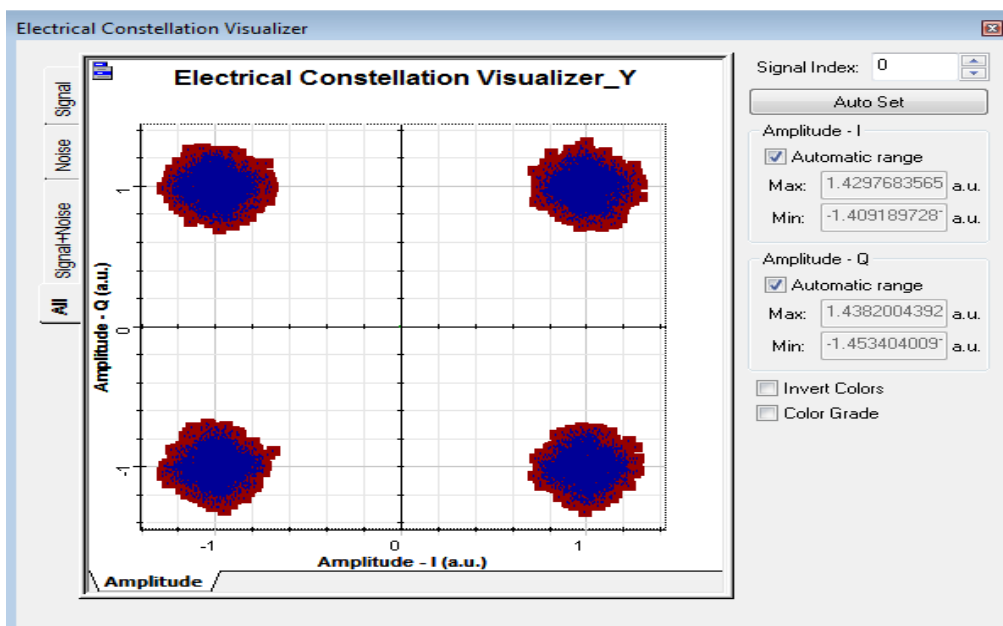
Hình 3.21. Biểu đồ chòm sao (phân cực Y) trên hệ thống 100 Gbps trước khi xử lý số

Biểu đồ chòm sao trên phân cực X sau khi xử lý số:



Hình 3.22. Biểu đồ chòm sao (phân cực X) sau khi xử lý số trên hệ thống 100 Gbps với bộ xử lý số tốc độ cao

Biểu đồ chòm sao phân cực Y sau khi xử lý số:



**Hình 3.23. Biểu đồ chòm sao (phân cực Y) sau khi xử lý số trên hệ thống 100 Gbps với bộ xử lý số tốc độ cao**

Từ biểu đồ chòm sao, chúng ta quan sát thấy sau khi qua bộ xử lý số tốc độ cao DSP, các tín hiệu nằm xa tâm và nằm trong góc phần tư tương ứng với các chiều biên độ của nó. Khi đó hệ thống hoạt động tốt, xác suất lựa chọn bit tín hiệu cao và tỷ lệ lỗi bit thấp.

Kết quả đo BER với chiều dài 160 Km (Loop Control =2):

The figure shows a software window titled "BER Test Set Viewer" containing a table of test results. The table has two columns: "Name" and "Value".

Name	Value
Bit Errors	0
BER	0
log of BER	-1000
BER: X Polarization	0
log of BER: X Polarization	-1000
BER: Y Polarization	0
log of BER: Y Polarization	-1000
Bit Errors: X Polarization	0
Bit Errors: Y Polarization	0
Sequence length per iteration	0.065536e+006
Sequence length for BER per iteration	0.065336000000000001e+006

**Hình 3.24. Kết quả đo BER trên hệ thống 100 Gbps với bộ xử lý tốc độ cao DSP**

### 3.4 Kết luận

Mô phỏng đã cho chúng ta thấy là công nghệ 100 Gbps bị hạn chế bởi khoảng cách là rất lớn. Với bước sóng 100 Gbps, OSNR yêu cầu tối thiểu cao hơn 10 dB so với bước sóng 10 Gbps. Chính vì vậy cần có bộ xử lý số tốc độ cao DSP, cũng như là phương thức sửa lỗi tiên tiến nhằm tăng khoảng cách truyền dẫn bước sóng 100 Gbps.

## KẾT LUẬN

Công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps ra đời và được đưa vào ứng dụng là chuyện tất yếu nhằm đáp ứng nhu cầu băng rộng ngày càng tăng cao. Công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps không những giải quyết được bài toán về nhu cầu băng thông, hiệu suất sử dụng tần số mà còn giải quyết được bài toán về suy giảm chất lượng truyền dẫn, cũng như làm giảm giá thành dịch vụ.

Việc phát triển từ công nghệ 10/40 Gbps lên công nghệ 100 Gbps chịu sự ảnh hưởng lớn của đường truyền. Vì vậy công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps yêu cầu phải có một công nghệ tách sóng, điều chế, sửa lỗi và xử lý số tốt hơn. Chúng ta đã nghiên cứu và biết được rằng công nghệ 100 Gbps sử dụng kỹ thuật tách sóng Coherent, điều chế QP-QPSK, sửa lỗi SD-FEC.

Qua mô phỏng cho thấy, công nghệ truyền tải 100 Gbps chịu sự tác động rất lớn của khoảng cách đường truyền, do yêu cầu OSNR cao hơn 10 dB so với công nghệ 10 Gbps và 4 dB so với công nghệ 40 Gbps. Chính vì vậy bắt buộc phải có sử dụng bộ xử lý số tốc độ cao DSP, với kỹ thuật sửa lỗi SD-FEC để tăng khoảng cách đường truyền.

Những nghiên cứu trong luận văn sẽ là cơ sở để cho các nghiên cứu tiếp theo về các bộ xử lý số tốc độ cao DSP nhằm giải quyết bài toán hạn chế về khoảng cách đường truyền của công nghệ truyền tải bước sóng 100 Gbps.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng Việt

- [1]. Lê Quốc Cường, ThS. Đỗ Văn Việt Em, ThS. Phạm Quốc Hợp, ThS. Nguyễn Huỳnh Minh Tâm (2009): Kỹ thuật thông tin quang – Tập 1 và 2.
- [2]. Trần Đại Dũng (2011): 100 Gbit/s – Tầm cao mới của truyền dẫn đường trực.
- [3]. Trần Đại Dũng (2012): Mạng truyền tải quang OTN.
- [4]. TS. Trần Đại Dũng (2010): Điều chế quang trong các hệ thống truyền dẫn đường dài.
- [5]. <http://xahoithongtin.com.vn/>: Mạng đường trực 100G

### Tiếng Anh

- [6]. Andrew M. Odlyzko (2003), Internet traffic growth: Sources and implications.
- [7]. Alcatel Lucent: Understanding OTN, Optical Transport Network (G.709)
- [8]. Ciena (2010): Solving the 100 Gb/s transmission challenge.
- [9]. Eugen Lach, Wilfried Idler (2011): Modulation formats for 100G and beyond.
- [10]. Fujitsu (2012), Soft-Decision FEC Benefits for 100G
- [11]. Fujitsu (2011): The Path to 100G.
- [12]. <http://www.huawei.com/>: Soft-Decision FEC: Key to High-Performance 100G Transmission.
- [13]. <http://www.dtc.umn.edu/mints/>: Minnesota Internet Traffic Studies (MINTS).
- [14]. <http://www.laserfocusworld.com/>: Multilevel-modulation-formats-push-capacities-beyond-100-gbit-s.html
- [15]. IEEE (2009), IEEE P802.3ba: Architecture Overview.
- [16]. Infinera (2016): Coherent WDM Technologies.
- [17]. Infinera (2012) : Super-Channels: DWDM Transmission at 100Gb/s and Beyond
- [18]. ITU-T (2012), G6941, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid

- [19]. Nakazawa (2010): High Spectral Density Optical Communication Technologies.
- [20]. OIF: 100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document.
- [21]. Paul R Morkel, Sorin Tibuleac (2009): 40Gbit/s & 100Gbit/s Implementation Tradeoffs.
- [22]. Santiago Pacheco Munoz (2013): OSNR sensitivity analysis on a 100 Gb/s PM-QPSK system.
- [23]. Xu\_Zhang (2012), Digital Signal Processing for Optical Coherent Communication Systems.
- [24]. Yongpeng ZHAO (2008): 100G: Opportunities and challenges, and enabling technologies.