



الجمهورية العربية السورية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

تحسين أداء نظام اتصالات التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية (WDM) باستخدام الكشف المتماسك والمعالجة الرقمية

رسالة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الإلكترونيات التطبيقية

إعداد

م. حسن الراعي

إشراف

أ.د.م. محمد الحسين

العام الدراسي

2024-2023



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

بطاقة شكر لأعضاء لجنة الحكم

أتقدم بأسمى آيات الشكر والامتنان والمحبة لأعضاء لجنة الحكم الموقرة لقبولهم قراءة خلاصة بحثي والحكم على اطروحة الدكتوراه التي أنجزتها، وهم:

عضواً	الدكتور نديم شاهين
عضوا	الدكتور هيثم رضوان
عضواً ومشرفاً	الدكتور محمد الحسين
عضواً	الدكتور نضال زيدان
عضوا	الدكتورة جمان ابو جيب

المُشكّلة بموجب قرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا رقم 3483/م.ب.د، المُتخذة بالجلسة رقم /19/ التي انعقدت بتاريخ 2024/05/27.

دمشق في

د. نديم شاهين د. هيثم رضوان د. محمد الحسين د. نضال زيدان د. جمان ابو جيب

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1. أن كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتني بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكنتبات أو مواقع إلكترونية وغيرها من وسائل النشر).
2. أنه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة تم اقتباسه من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية .

الاسم والتوقيع

كلمة شكر وتقدير

❖ أتوجه بخالص الشكر والتقدير إلى الأساتذة الكرام في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية و أخص بالذكر :

أستاذي الفاضل الدكتور المهندس محمد الحسين

لتفضله بالإشراف على هذا البحث ولما أفاض به علي من علمه الغزير وغمرني بأخلاقه العالية، حيث كان لملاحظاته القيمة وتوجيهاته السديدة الأثر الكبير في إعداد البحث وإنجازه .

❖ كل الشكر إلى من مد لي يد العون والمساعدة والنصيحة لإنجاز هذه الرسالة من الأساتذة المحترمين أساتذة و رئيس قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات في جامعة دمشق.

❖ تقديري الخالص إلى السادة الأساتذة الأفاضل رئيس و أعضاء لجنة الحكم لتفضلهم بقبول مناقشة وتحكيم هذه الرسالة مع اعتزازي الكبير بكل ما سيقدمونه من ملاحظات علمية قيمة ستسهم في تصويب البحث وإثرائه.

الإهداء

فهرس المحتويات

1.....	قرار الحكم مع توقيع اللجنة
2.....	تصريح خطي
3.....	كلمة شكر وتقدير
4.....	الإهداء
5.....	فهرس المحتويات
10.....	فهرس الأشكال
15.....	فهرس الجداول
16.....	قائمة المصطلحات والإختصارات
19.....	المستخلص باللغة العربية
20.....	المستخلص باللغة الإنكليزية Abstract
21.....	<u>الفصل الأول: الإطار العام للبحث</u>
22.....	1-1- مقدمة
23.....	2-1- بعض الدراسات السابقة
28.....	3-1- مشكلة البحث
29.....	4-1- هدف البحث
29.....	5-1- أهمية البحث
29.....	6-1- مسوغات البحث
30.....	7-1- محددات البحث
30.....	8-1- حدود البحث
30.....	9-1- منهج البحث وأدواته
31.....	10-1- بنية الأطروحة
32.....	<u>الفصل الثاني: الأساسيات النظرية للبحث</u>
33.....	1-2- بنية نظام الاتصالات الضوئي

- 33..... 1-1-2 المرسل الضوئي
- 36..... 2-1-2 الكاشف الضوئي
- 37..... 3-1-2 الليف الضوئي
- 39..... 4-1-2 المرشحات الضوئية
- 40..... 5-1-2 الموزعة الضوئية
- 41..... 2-2 التجميع في أنظمة الاتصالات الضوئية
- 41..... 1-2-2 التجميع بتقسيم الزمن TDM
- 42..... 2-2-2 التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية WDM
- 43..... 1-2-2-2 آلية عمل نظام اتصال يستخدم DWDM
- 44..... 2-2-2-2 تصميم نظام اتصال DWDM
- 47..... 3-2-2-2 فك التجميع في نظام DWDM
- 52..... 3-2 طرائق الكشف في أنظمة الاتصالات الضوئية
- 52..... 1-3-2 الكشف المباشر
- 52..... 2-3-2 الكشف المتماكب
- 54..... 1-2-3-2 المهتز المحلي
- 55..... 2-2-3-2 الكشف المتغاير Heterodyne
- 56..... 3-2-3-2 الكشف المتجانس Homodyne
- 57..... 4-2-3-2 كشف Intradyne
- 58..... 3-3-2 معالجة الإشارة الرقمية DSP
- 60..... 4-2 التحديات في أنظمة الاتصالات بالألياف الضوئية
- 60..... 1-4-2 تأثيرات التخماد
- 60..... 2-4-2 التأثيرات اللاخطية

60.....	1-2-4-2- التشتت اللوني
61.....	2-2-4-2- تشتت نمط الإستقطاب
62.....	3-2-4-2- التعديل الطوري الذاتي (SPM)
62.....	4-2-4-2- التعديل الطوري المتبادل (XPM)
63.....	5-2-4-2- مزج الأمواج الأربعة (FWM)
63.....	6-2-4-2- تبعثر بريلوين المحفز (SBS)
64.....	7-2-4-2- تبعثر رامان المحفز (SRS)
64.....	5-2- تقنيات تعويض التشتت واللاخطية في أنظمة الاتصالات الضوئية
64.....	1-5-2- الليف المعوض للتشتت DCF
66.....	2-5-2- تعويض التشتت باستخدام مشبك براغ
67.....	3-5-2- تقنية اقتران الطور الضوئي لتعويض التشتت
69.....	4-5-2- معوض التشتت الإلكتروني
70.....	1-4-5-2- معادل التغذية الراجعة للقرار (FFE-DFE)
72.....	2-4-5-2- مقدر تسلسل الاحتمالية القصوى (MLSE)
73.....	6-2- خلاصة
74.....	الفصل الثالث : تصميم وتنفيذ نظام DWDM DP-QPSK
75.....	1-3- محاكاة نظام DWDM CP-DQPSK
75.....	1-1-3- قسم الإرسال
77.....	2-1-3- الوصلة الضوئية
77.....	3-1-3- قسم الإستقبال
79.....	2-3- نتائج محاكاة نظام DWDM CP-DQPSK

79.....	3-2-1- شكل طيف الإشارة.....
80.....	3-2-2- نتائج المحاكاة بتغير مسافة الإرسال
83.....	3-3- تصميم النظام DWDM DP-QPSK
83.....	3-3-1- قسم الإرسال
86.....	3-3-2- الوصلة الضوئية.....
88.....	3-3-3- قسم الإستقبال
90.....	3-4- مناقشة النتائج لنظام DWDM DP-QPSK
90.....	3-4-1- أثر تغير طاقة الإرسال
92	3-4-2- أثر استخدام أنواع مختلفة من الترميز.....
93.....	3-4-3- أثر تقليل التباعد بين القنوات
99.....	3-5- خلاصة.....
100.....	الفصل الرابع : تصميم وتنفيذ نظام DWDM DP-16QAM.....
101.....	4-1- تصميم النظام
101.....	4-1-1- قسم الإرسال
105.....	4-1-2- الوصلة الضوئية
106	4-1-3- قسم الإستقبال.....
109.....	4-2- مناقشة النتائج
109.....	4-2-1- أثر تغير طاقة الإرسال
111.....	4-2-2- أثر استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال.....
112.....	4-2-3- أثر تقليل التباعد بين القنوات
119.....	4-3- خلاصة
120.....	الفصل الخامس : تصميم وتنفيذ نظام DWDM Hybrid (16QAM & QPSK).....

121.....	1-5- تصميم النظام
121.....	1-1-5- قسم الإرسال
124.....	2-1-5- الوصلة الضوئية
126.....	3-1-5- قسم الإستقبال
127.....	2-5- مناقشة النتائج
127.....	1-2-5- دراسة أثر تغير طاقة الإرسال
129.....	2-2-5- أثر تقليل التباعد بين القنوات
135.....	3-2-5- دراسة أثر استخدام أنواع مختلفة من الترميز
136.....	4-2-5- دراسة أثر استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية ضمن وحدة DSP
137.....	5-2-5- دراسة أثر تغير مسافة الإرسال
140.....	3-5- خلاصة
141.....	4-5- الخاتمة
141.....	1-4-5- مقارنة النتائج التي تم الوصول إليها مع الدراسات السابقة
143.....	2-4-5- خلاصة النتائج
144.....	الآفاق المستقبلية
145.....	الأبحاث المنشورة
146.....	المراجع
153.....	الملاحق

فهرس الأشكال

- الشكل (1-1) نتائج تقنية مشبك براغ (التعويض المسبق ، التعويض اللاحق).....24
- (2-1) نظام اتصالات يستخدم تقنية الألياف المعوضة للتشتت DCF24
- الشكل (3-1) نظام اتصالات يستخدم تقنية اقتران الطور الضوئي OPC25
- الشكل (4-1) نظام WDM Direct Detection يستخدم تقنية EDC26
- الشكل (5-1) نظام اتصالات WDM يستخدم صيغة التعديل PAM.....27
- الشكل(6-1) نظام CSRZ DWDM.....27
- الشكل (7-1) نظام DWDM CP-DQPSK.....28
- الشكل (1-2) المخطط الصندوقي العام لنظام الاتصالات.....33
- الشكل (2-2) المخطط الصندوقي لنظام الاتصالات الضوئية.....33
- الشكل (3-2) تعديل On Off Keying (OOK)35
- الشكل (4-2) التعديل المباشر.....35
- الشكل (5-2) معدل MZI.....36
- الشكل (6-2) مكونات الليف الضوئي.....37
- الشكل (7-2) بنية الليف SMF.....38
- الشكل (8-2) بنية الليف SI-MMF.....38
- الشكل (9-2) بنية الليف GI-MMF.....39
- الشكل (10-2) الموزعة الضوئية.....40
- الشكل (11-2) عملية التجميع بتقسيم الزمن.....41
- الشكل (12-2) تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية.....42

- الشكل (2-13) إزالة قناة من نظام DWDM باستخدام مشبك براغ..... 47
- الشكل (2-14) طريقة تشبيك براغ ضمن الليف..... 48
- الشكل (2-15) مرشحات الفجوة Fabry-Perot Filters..... 49
- الشكل (2-16) معدل MZI..... 50
- الشكل (2-17) آلية عمل AWG..... 51
- الشكل (2-18) تقنية الكشف المباشر..... 52
- الشكل (2-19) تقنية الكشف المتناسك في أنظمة الاتصالات الضوئية..... 54
- الشكل (2-20) مبدأ كشف heterodyne الأساسي..... 55
- الشكل (2-21) مبدأ كشف Homodyne الأساسي..... 56
- الشكل (2-22) مقارنة طيفية مع كشف heterodyne و homodyne..... 58
- الشكل (2-23) التكوين الوظيفي لوحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP 58
- الشكل (2-24) مخططات تعويض DCF اللاحق والمسبق والمختلط 65
- الشكل (2-25) تقنية تعويض التشتت باستخدام FBG..... 66
- الشكل (2-26) Inline-OPC..... 67
- الشكل (2-27) تقنية Mid-Link OPC..... 68
- الشكل (2-28) تعويض التشتت في النظام الضوئي باستخدام المعادل EDC..... 69
- الشكل (2-29) المخطط الصندوقي لمعادل FFE..... 70
- الشكل (2-30) معادل (FFE-DFE)..... 71
- الشكل (2-31) المخطط الصندوقي لمعادل MLSE..... 72
- الشكل (3-1) قسم الإرسال في نظام DWDM CP-DQPSK..... 76
- الشكل (3-2) وحدة إرسال DQPSK..... 76
- الشكل (3-3) الوصلة الضوئية لنظام DWDM CP-DQPSK..... 77

- الشكل (4-3) قسم الإستقبال في نظام DWDM CP-DQPSK 78
- الشكل (5-3) وحدة استقبال DQPSK 78
- الشكل (6-3) طيف الإشارة للقناة الأولى على خرج وحدة إرسال DQPSK 79
- الشكل (7-3) طيف الإشارة على خرج مجمع DWDM 80
- الشكل (8-3) قيم Q-Factor للقنوات المتعددة عند مسافة إرسال 50Km 81
- الشكل (9-3) قيم Q-Factor للقنوات المتعددة عند مسافة إرسال 150km 81
- الشكل (10-3) قيم Q-Factor للقنوات المتعددة عند مسافة إرسال 600km 82
- الشكل (11-3) قسم الإرسال في نظام DWDM DP-QPSK 83
- الشكل (12-3) وحدة إرسال DP-QPSK 85
- الشكل (13-3) طيف الإشارة على خرج وحدة إرسال DP-QPSK للقناة الأولى 86
- الشكل (14-3) الوصلة الضوئية لنظام DWDM DP-QPSK 87
- الشكل (15-3) قسم الإستقبال في نظام DWDM DP-QPSK 88
- الشكل (16-3) وحدة استقبال DP-QPSK 89
- الشكل (17-3) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR 90
- الشكل (18-3) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة المعامل Q-Factor 91
- الشكل (19-3) أثر تغير طاقة الإرسال على شكل (electrical constellation) 91
- الشكل (20-3) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER لأنواع الترميز المختلفة 92
- الشكل (21-3) تغير قيمة المعامل Q-Factor لأنواع الترميز المختلفة 93
- الشكل (22-3) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 25GHz 94
- الشكل (23-3) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 100GHz 95
- الشكل (24-3) قيم Q-Factor بتباعد 100GHz 95
- الشكل (25-3) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 50GHz 96

96.....	الشكل (26-3) قيم Q-Factor بتباعد 50GHz
97.....	الشكل (27-3) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 40GHz
97.....	الشكل (28-3) قيم Q-Factor بتباعد 40GHz
102.....	الشكل (1-4) قسم الإرسال في نظام DWDM DP-16QAM
104.....	الشكل (2-4) وحدة إرسال DP-16QAM
104.....	الشكل (3-4) طيف الإشارة على خرج وحدة إرسال DP-16QAM للقناة الأولى
106.....	الشكل (4-4) الوصلة الضوئية لنظام DWDM DP-16QAM
107.....	الشكل (5-4) قسم الاستقبال في نظام DWDM DP-16QAM
108.....	الشكل (6-4) وحدة استقبال DP-16QAM
109.....	الشكل (7-4) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR
110.....	الشكل (8-4) أثر تغير طاقة الإرسال على شكل (electrical constellation)
111.....	الشكل (9-4) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER عند تعويض التأثيرات اللاخطية
112.....	الشكل (10-4) تغير قيمة المعامل Q-Factor عند تعويض التأثيرات اللاخطية
113.....	الشكل (11-4) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 12.5GHz
114.....	الشكل (12-4) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 50GHz
115.....	الشكل (13-4) قيم Q-Factor بتباعد 50GHz
115.....	الشكل (14-4) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 25GHz
116.....	الشكل (15-4) قيم Q-Factor بتباعد 25GHz
116.....	الشكل (16-4) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 20GHz
117.....	الشكل (17-4) قيم Q-Factor بتباعد 20GHz
122.....	الشكل (1-5) قسم الإرسال في نظام DWDM DP-QPSK
123.....	الشكل (2-5) طيف الإشارة على خرج وحدة إرسال DP-QPSK للقناة رقم 9

- الشكل (3-5) طيف الإشارة على خرج وحدة إرسال DP-16QAM للقناة الأولى.....124
- الشكل (4-5) الوصلة الضوئية لنظام DWDM Hybrid.....125
- الشكل (5-5) قسم الإستقبال في نظام WDM Hybrid.....127
- الشكل (6-5) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR.....128
- الشكل (7-5) أثر تغير طاقة الإرسال على QPSK (electrical constellation).....128
- الشكل (8-5) أثر تغير طاقة الإرسال على 16QAM (electrical constellation).....129
- الشكل (9-5) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 25GHz.....131
- الشكل (10-5) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 100GHz.....131
- الشكل (11-5) قيم Q-Factor بتباعد 100GHz.....132
- الشكل (12-5) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 50GHz.....132
- الشكل (13-5) قيم Q-Factor بتباعد 50GHz.....133
- الشكل (14-5) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 40GHz.....133
- الشكل (15-5) قيم Q-Factor بتباعد 40GHz.....134
- الشكل (16-5) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER لأنواع الترميز المختلفة.....135
- الشكل (17-5) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER عند تعويض التأثيرات اللاخطية.....136
- الشكل (18-5) تغير قيمة OSNR عند تغير مسافة الإرسال.....137
- الشكل (19-5) تغير قيمة Q-Factor عند تغير مسافة الإرسال.....138

فهرس الجداول

الجدول (1-2) الفرق بين كشف Homodyne و Heterodyne.....	57
الجدول (1-3) محددات الليزر المستخدم DWDM QPSK	83
الجدول (2-3) بارامترات الليف الضوئي لنظام DWDM DP-QPSK.....	87
الجدول (3-3) مقارنة نتائج العمل المقدم خلال الفصل مع الدراسات السابقة.....	98
الجدول (1-4) محددات الليزر المستخدم DWDM 16QAM	102
الجدول (2-4) بارامترات الليف الضوئي لنظام DWDM DP-16QAM.....	105
الجدول (3-4) مقارنة النتائج مع الأعمال المقدمة في الفصل السابق.....	118
الجدول (1-5) محددات الليزر المستخدم DWDM Hybrid	122
الجدول (2-5) بارامترات الليف الضوئي لنظام DWDM Hybrid.....	125
الجدول (3-5) مقارنة النتائج مع الأعمال المقدمة في الفصول السابقة.....	139
الجدول (1-6) مقارنة النتائج مع الدراسات سابقة.....	141

قائمة المصطلحات والإختصارات

المصطلح الإنكليزي	الاختصار	المقابل العربي
Analogue	-	تماثلي
Arrayed Waveguide grating	AWG	مصفوفة تصنيف الأمواج
Attenuation	-	التخامد
Beam Combiner	-	مازج الحزم
Beam Splitter	-	مجزء حزمة
Bit Error Rate	BER	معدل خطأ البت
Carrier-Suppressed Return-to-Zero	CSRZ	تعديل العودة إلى الصفر بتقنية الناقل المحجوب
Code-division multiplexing	CDM	التجميع بتقسيم الرمز
Coherent Detection	CD	الكشف المتماسك
Cross Phase Modulation	CPM	التعديل الطوري المتبادل
Dense optical wavelength division multiplexing	DWDM	تعدد الإرسال بتقسيم طول الموجة الكثيف
Digital Signal Processing	DSP	معالجة الإشارة الرقمية
Dispersion	-	التشتت
Dispersion compensating fiber	DCF	الليف المعوض للتشتت
Direct Detection	DD	الكشف المباشر
Direct Modulation	-	التعديل المباشر
Dispersion-Shifted Fiber	DSF	الليف مزاح التشتت
Dispersion Chromatic	-	التشتت اللوني
Differential group delay	DGD	تأخير المجموعة التفاضلية

Erbium-doped fiber amplifier	EDFA	مضخم الألياف المشبعة بالإربيوم
Electronic dispersion compensation	EDC	تعويض التشتت الإلكتروني
External Modulation	-	التعديل الخارجي
Fabry-Perot Filters	-	مرشحات الفجوة
Feed forward equalizer with decision feedback equalizer	FFE-DFE	مسوي التغذية الأمامية مع مسوي التغذية العكسية للقرار
Forward Error Correction	FEC	تصحيح الخطأ الأمامي
Fiber Bragg grating	FBG	مشبك براغ
Four Wave Mixing	FWM	مزج الأمواج الأربعة
Light Emitting Diode	LED	الثنائيات الباعثة للضوء
Line Amplifier	-	مضخم الخط
Local Oscillator	-	المهتز المحلي
Mach Zehender Interferometer	MZI	معدل ماك زندر
Maximum Likelihood Sequence Estimator	MLSE	مقدر تسلسل الاحتمالية القصوى
Multi Mode Fiber	MMF	الليف متعدد الأنماط
optical circulator	-	دوار ضوئي
Optical Coupler	-	الموزعة الضوئية
Optical Detector	-	الكاشف الضوئي
Optical Filter	-	المرشحات الضوئية
Optical Modulator	-	المعدل الضوئي
Optical phase conjugation	OPC	اقتران الطور الضوئي

Optical Preamplifier	-	مضخم أولي
Optical Signal to Noise Ratio	OSNR	نسبة الإشارة الضوئية إلى الضجيج
Optical Source	-	المنبع الضوئي
Optical Transmitter	-	المرسل الضوئي
Polarization Beam Splitter	PBS	مجزء الإستقطاب
polarization mode dispersion	PMD	تششت نمط الاستقطاب
Power Amplifier	-	مضخم القدرة
Pulse-amplitude modulation	PAM	تعديل مطال النبضة
Q-Factor	Q	معامل الجودة
Quadrature Amplitude Modulation	QAM	التعديل المطالي التربيعي
Quadrature phase shift Keying	QPSK	النعدیل بإزاحة الطور المتعامد
Reference wavelength	-	الطول الموجي المرجعي
Symbol Error Rate	SER	معدل خطأ الرمز
Self-Phase Modulation	SPM	التعديل الطوري الذاتي
Single Mode Fiber	SMF	الليف وحيد النمط
spectral efficiency	-	الفعالية الطيفية
Stimulated Brillouin Scattering	SBS	تبعثر بريلوين المحفز
Stimulated Raman Scattering	SRS	تبعثر رامان المحفز
Time-division multiplexing	TDM	التجميع بتقسيم الزمن
Very High Frequencies	VHF	الترددات العالية جداً
wavelength division multiplexing	WDM	تعدد الإرسال بتقسيم طول الموجة

المستخلص

- خلفية البحث

قدم هذا البحث تصميماً لمجموعة من أنظمة الاتصالات المعتمدة على تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية التقليدي WDM، والكثيف DWDM، باستخدام الكشف المتناسك مع معالجة الإشارة الرقمية، حيث اتاحت هذه التقنيات تحملاً لضجيج طور الموجة الحاملة وتعويض أفضل للاخطية، وتم التصميم بالاعتماد على تقنيات تعديل متعددة المستويات، والتي تقدم فعالية طيفية عالية والتي تنعكس على سعة النظام

- هدف البحث

تحسين أداء أنظمة WDM/DWDM وتحسين الفعالية الطيفية فيها .

- المواد والطرائق

تمت المحاكاة عبر بيئة Optisystem17 وتم اختبار النتائج وتقييمها بناءً على الفعالية الطيفية و معدل النقل المحققين بالإضافة إلى المعاملات SER, OSNR, Q-Factor.

- النتائج العملية

تم تصميم نظام DWDM-DP-QPSK ذو 32 قناة وكل قناة بمعدل نقل 100Gb/s بمعدل نقل إجمالي (3.2Tb/s) و بتباعد بين القنوات قدره 50GHz، وتم الوصول إلى فعالية طيفية تقدر ب (2b/s/Hz) .

تم بعدها تصميم نظام DWDM-DP-16QAM ذو 32 قناة وكل قناة بمعدل نقل 100Gb/s بمعدل نقل إجمالي (3.2Tb/s) وبتباعد بين القنوات قدره 25GHz ، وتم الوصول إلى فعالية طيفية تقدر ب (4b/s/Hz).

وتم بالنهاية تصميم نظام DWDM هجين ذو 32 قناة (16QAM+QPSK) وكل قناة بمعدل نقل 100Gb/s وبمعدل نقل إجمالي (3.2Tb/s)، وتم الحصول على فعالية طيفية تقدر ب (2b/s/Hz) و بتباعد بين القنوات قدره 50GHz و Q-factor=20.

تم اختبار الأنظمة من أجل مسافة إرسال 160Km .

- الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث

قدمت الأنظمة التي تم تصميمها فعالية طيفية عالية تصل إلى أكثر من الضعف مقارنة بالدراسات السابقة كما قدمت مقاومة عالية لتأثيرات التشتت والتأثيرات اللاخطية.

- الكلمات المفتاحية

الفعالية الطيفية، معدلات إرسال، نظام اتصالات تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي الكثيف، تقنية التعديل المطالي التربيعي ثنائي الاستقطاب من الدرجة 16، تقنية التعديل بإزاحة الطور المتعامد ثنائي الاستقطاب.

Abstract

– Research Background

This research presented a design for a group of communications systems based on wavelength division multiplexing techniques (WDM and DWDM), using coherent detection with digital signal processing. These techniques provide high tolerance to carrier phase noise and lead to better compensation for nonlinearity. The design was based on Multi-level modulation techniques, which provide high spectral efficiency that directly reflects the system capacity.

– Research Objective

Improving the performance of WDM/DWDM systems and their spectral efficiency.

– Materials and Methods

The simulation was carried out via the Optisystem17 environment, and the results were tested and evaluated based on the achieved spectral efficiency and transmission rate, in addition to the parameters BER, OSNR, and Q-Factor.

– Practical Results

A DWDM-DP-QPSK system was designed with 32 channels, each channel at a rate of 100Gb/s, with a total rate of (3.2Tb/s) and a channel spacing of 50GHz, which gives a spectral efficiency estimated at (2b/s/Hz). The results were tested for Range 160km.

Then, a DWDM-16QAM system was designed with 32 channels, with a total rate of (3.2Tb/s) and a channel spacing of 25GHz, which gives a spectral efficiency = (4b/s/Hz).

In the end, a hybrid DWDM system with 32 channels (16QAM+QPSK) was designed with a total rate of (3.2Tb/s) and spectral efficiency = (2b/s/Hz) and Q-factor=20.

– Conclusions from the Researcher's Point of View

The designed systems provided high spectral efficiency of more than double compared to previous studies, and also provided high resistance to Dispersion and nonlinear effects.

– Keywords

Spectral efficiency, transmission rates, (DWDM) Dense Wavelength Division Multiplexing communication system, (DP-16QAM) 16th degree dual-polarized quadrature amplitude modulation technique, (DP-QPSK) dual-polarized Quadrature Phase Shift Keying.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

Research General Framework

1-1- مقدمة :

أصبحت الاتصالات الضوئية في العصر الحديث وسيلة النقل الأساسية والأكثر جاذبية للإتصالات الإقليمية و العالمية، فقد حققت شركات الاتصالات التجارية المعتمدة على الألياف الضوئية سرعات نقل تصل إلى عشرات ال Gb/s لكل طول موجي . في الثمانينيات ، كانت خطوط النقل الضوئية تحمل عادةً بضع مئات من ال Mb/s ، كما كان من الضروري وضع مكررات كل 40 كم تقريباً ذلك الوقت . حيث كانت تتأثر المسافة بين المكررات كثيراً بفقد الألياف الضوئية، كما كان معدل نقل البيانات محدوداً بسبب تشتت و لاختطية الألياف الضوئية [2].

تتمتع الألياف الضوئية بقدرة كبيرة على نقل المعلومات ، لكنها لم تحقق نجاحاً تجارياً واسع النطاق إلا بعد تطوير تقنيات التضخيم الضوئي ، حيث أنه في أواخر الثمانينيات وأوائل التسعينيات ، تم تطوير مضخم الألياف المشبعة بالإربيوم (EDFA erbium-doped fiber amplifier) ، حيث أنها تسمح بتحقيق نظام اتصال ضوئي WDM بعيد المدى نظراً لقدرته على التضخيم على المجال العريض ، وبالتالي توفرت أنظمة نقل بيانات فعالة من حيث التكلفة و زيادة سعة النظام [7] ،

تستخدم أيضاً الاتصالات اللاسلكية RF بشكل واسع في الاتصالات عموماً و الاتصالات الخليوية خصوصاً. لكل من الاتصالات اللاسلكية والاتصال الضوئي محدودياتها ومزاياها. إن العامل الأهم في المقارنة بين أنظمة الاتصالات هو عرض المجال الترددي والذي يحدد السعة الكلية للنظام. توفر الاتصالات اللاسلكية مجالاً ترددياً محدوداً مقارنةً بعرض المجال الترددي الضوئي. حيث أن الاتصال الضوئي يوفر عرض مجال ترددي يبلغ حوالي 10THz وهو أفضل بكثير من عرض المجال الترددي للاتصالات اللاسلكية ، وبالتالي يمكن أن تحمل الشبكة الضوئية معدل بيانات عالي جداً مقارنةً ب الاتصالات اللاسلكية RF [8] .

إن العامل الأساسي في تصميم أنظمة اتصالات بسعات عالية هو إدخال بيانات عدة مستخدمين في قناة اتصال واحدة، ويمكن تحقيق ذلك عبر عدة تقنيات مثل التجميع بتقسيم الزمن (time-division multiplexing TDM)، التجميع بتقسيم الرمز (code-division multiplexing CDM)، و التجميع بتقسيم طول الموجة (wavelength-division multiplexing WDM) ، إن الميزة الأساسية لأنظمة WDM أنه

لا يتطلب أن يعمل كل مستخدم نهائي عند معدل نقل عالي جداً، بل يجب عليه أن يعمل على معدل النقل الخاص بأحد أقنية نظام WDM، لذلك يعتبر نظام الاتصالات WDM أكثر تفضيلاً في تصميم أنظمة الاتصالات الضوئية بعيدة المدى.

كما أنه عند تقليل التباعد بين القنوات يمكن الحصول على أنظمة التجميع بتقسيم الطول الموجي الكثيف DWDM ذو الفعالية الترددية العالية والذي يتيح الإرسال بسعات عالية جداً لنفس عرض المجال الترددي .

إن تأثيرات تشتت الألياف واللاخطية عند معدل بيانات عالي مع تباعد ضيق للقنوات في نظام الألياف الضوئية WDM هي قضية رئيسية يجب معالجتها للتطور المستقبلي لأنظمة WDM الضوئية. لذلك ، تعتبر هذه التأثيرات تحدياً كبيراً لأنظمة الاتصالات الضوئية WDM وأنظمة DWDM، والذي سيتم تناوله في هذه الأطروحة.

1-2- بعض الدراسات السابقة :

إن أكبر التحديات في أنظمة الاتصالات الضوئية هو التشتت في الليف الضوئي والتأثيرات اللاخطية ، هناك تقنيات مختلفة لتعويض التشتت و اللاخطية في أنظمة الاتصالات الضوئية

سيتم بداية عرض مجموعة من الدراسات التي تناولت تقنيات التغلب على التحديات التي تواجه الإشارة.

سيتم بعدها عرض مجموعة من الدراسات التي تناولت أنظمة WDM و DWDM المستخدمة في هذا البحث.

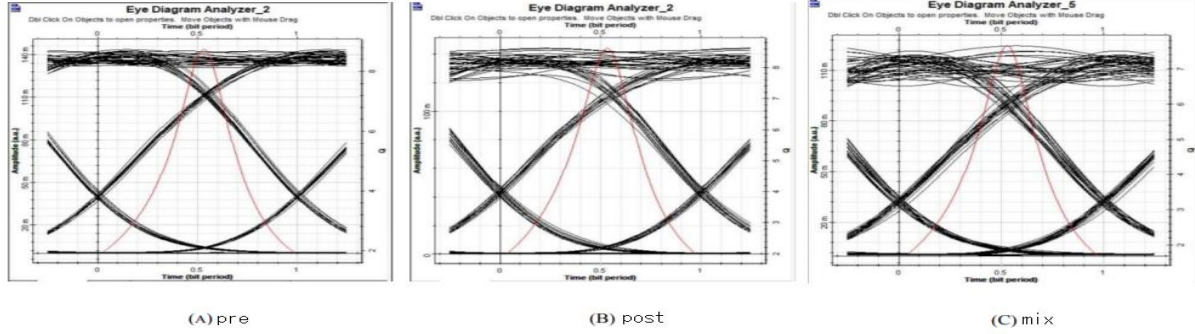
1-2-1 دراسات سابقة عن تقنيات التغلب على تشوهات الإشارة :

• **الدراسة الأولى :** استخدم بعض الباحثين [2] (2022) تقنية الكشف المتماسك مع تعويض التشتت

باستخدام شبكات براغ، حيث تعتمد هذه التقنية على استخدام أطوال مسار ضوئي متغيرة للأطوال الموجية المختلفة الموجودة في النبضات المشتتة لتعويض التشتت.

تم استخدام تقنية مشبك براغ بثلاث حالات (التعويض المسبق ، التعويض اللاحق، والتعويض المختلط)

من أجل مسافة 120km



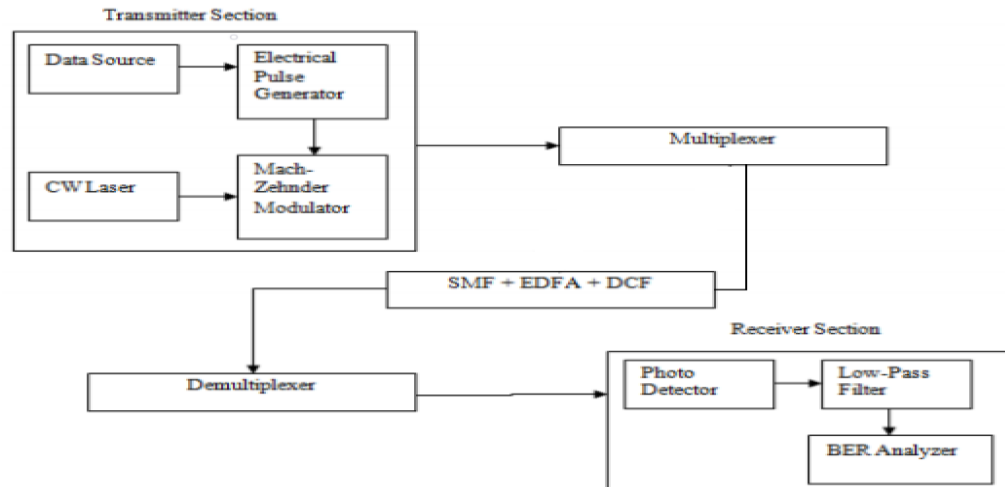
الشكل (1-1) نتائج تقنية مشبك براغ (التعويض المسبق ، التعويض اللاحق) [2]

النتائج العملية : تم الحصول على معامل الجودة Q-factor متدرج من 8.27-8.57 لـ 8 قنوات من أجل التعويض المسبق و 8.32-8.15 من أجل التعويض اللاحق و 7.5-7.65 من أجل التعويض المختلط.

كما تم الوصول إلى قيمة BER أقل من 10^{-12} من أجل مسافة 50Km .

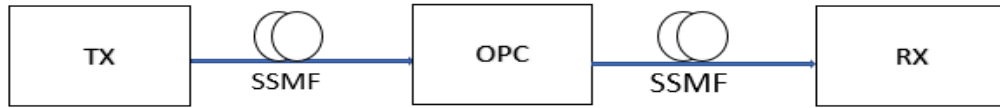
الإستنتاجات : على الرغم من أن نتائج هذه التقنية جيدة جداً لتعويض التشتت ، إلا أنها تتطلب مقربة 3dB coupler أو دوار ضوئي optical circulator. وبالتالي فإنه من الصعب تصميم بنية معقدة من مشبكات براغ لهذه التقنية. يعمل مشبك براغ FBG على نطاق ضيق من الأطوال الموجية للتعويض وهو غير مناسب لنظام الاتصال الضوئي ذو الأطوال الموجية المتعددة.

الدراسة الثانية : قام بعض الباحثين [3] (2022) باستخدام تقنية الألياف المعوضة للتشتت DCF والتي تعمل على تعويض التشتت الإيجابي للألياف أحادية النمط القياسية بواسطة معامل تشتت سلبي مرتفع .



الشكل (2-1) نظام اتصالات يستخدم تقنية الألياف المعوضة للتشتت DCF [3]

- النتائج العملية :** تم الوصول إلى قيمة Q-Factor تساوي 9.07 من أجل مسافة 160Km .
- الإستنتاجات :** إن التأثيرات غير الخطية تزداد بشكل كبير في النظام الضوئي عند طاقات النقل العالية للنقل بعيد المدى نظراً لصغر حجم قطر لب الليف، إضافة إلى لزوم وجود مطابقة كبيرة بين ربح مضخم EDFA و طول الليف، وبالتالي فإن هذه التقنية تفشل في تحسين أداء النظام الضوئي بعيد المدى.
- **الدراسة الثالثة :** تم استخدام تقنية اقتران الطور الضوئي OPC من قبل عدة باحثين [4] (2020) وهي أيضاً تقنية واعدة لتعويض التشتت واللاخطية لنظم الاتصالات الضوئية. حيث يقوم OPC بتعويض انزياح الطور اللاخطي الناتج عن الانتشار بالليف الضوئي.

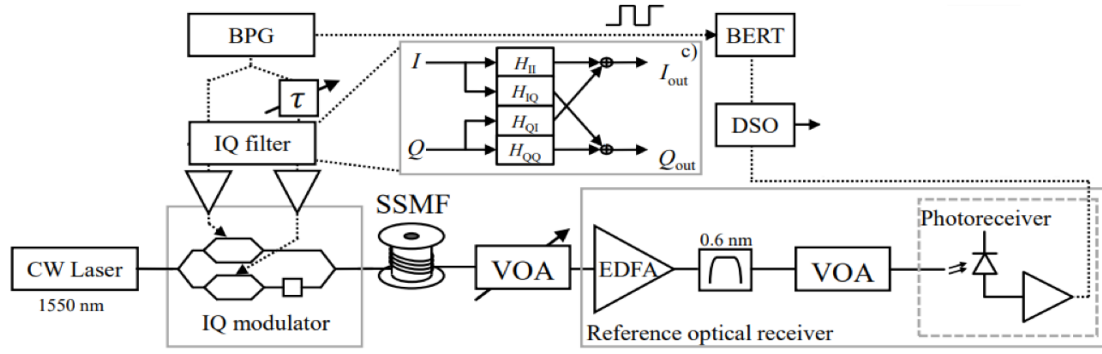


الشكل (3-1) نظام اتصالات يستخدم تقنية اقتران الطور الضوئي OPC [4]

- النتائج العملية :** تم الوصول إلى قيمة Q-factor تساوي 16.3 من أجل مسافة إرسال 150km.
- الإستنتاجات :** من أجل الإلغاء الدقيق لللاخطية ، يلزم وجود تناسق كبير حول مقارن الطور ، مما يؤثر على مرونة نظام الاتصال الضوئي ، بالإضافة إلى أن التعويض المثالي مع OPC يتطلب خصائص ليف متطابقة في جميع أنحاء نظام النقل الضوئي ويتطلب توزيع طاقة متماثل، وهو أمر غير ممكن تحقيقه عملياً .

1-2-1 دراسات سابقة لأنظمة WDM و DWDM :

- **الدراسة الرابعة :** قام مجموعة من الباحثين [1] (2019) بتصميم نظام اتصال ضوئي WDM مع تقنية الكشف المباشر Direct Detection وباستخدام معوض التشتت الإلكتروني EDC.

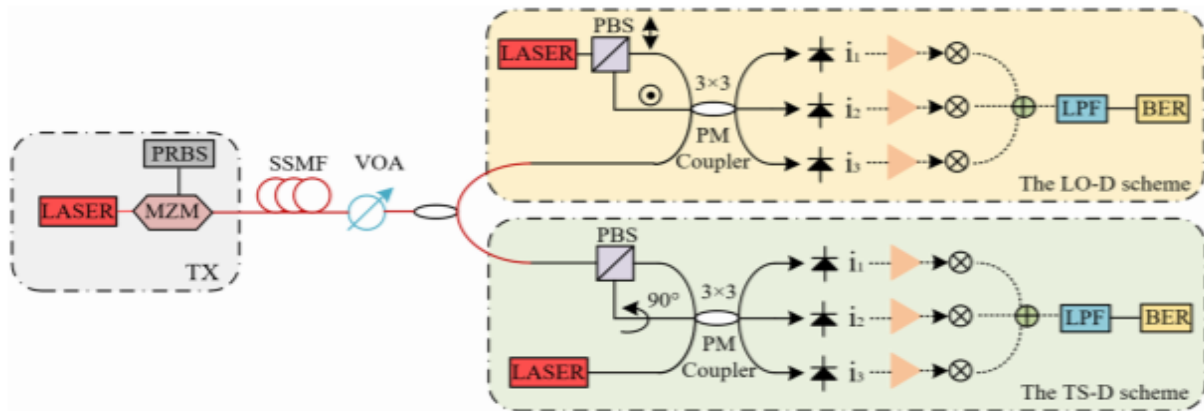


الشكل (4-1) نظام WDM Direct Detection يستخدم تقنية EDC [1]

النتائج العملية : تم الوصول إلى معدل BER من 8.4×10^{-7} إلى 2.57×10^{-3} من أجل مسافة إرسال تتراوح من 30km إلى 60km.

الاستنتاجات : وصل الباحثون إلى نتائج مرضية من أجل المسافات القصيرة والمتوسطة إلا أن النظام واجه مشكلة بالأداء من أجل المسافات البعيدة و معدلات النقل العالية بسبب استخدام تقنية الكشف المباشر كونها تعتمد على بعد واحد وهو تعديل الشدة للإشارة.

- **الدراسة الخامسة :** تم استخدام تقنية WDM مع الكشف المتماذك و معالجة الإشارة الرقمية في طرف الإستقبال من قبل بعض الباحثين [50] (2021)، حيث تم استخدام صيغة التعديل PAM من الدرجة الرابعة التي تقوم على مبدأ تعديل طول النبضات، حيث تم إرسال 8 حوامل فرعية كل حامل بمعدل 10GB/s بمسافة ترددية 20GHz .

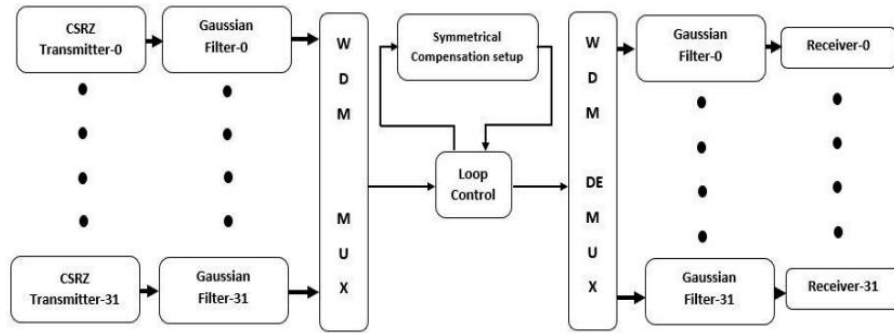


الشكل (5-1) نظام اتصالات WDM يستخدم صيغة التعديل PAM [50]

النتائج العملية : تم الحصول على قيمة معامل جودة Q-Factor حوالي 7 من أجل مسافة 41KM وكانت الفعالية الطيفية 0.5bit/s/Hz .

الإستنتاجات: بسبب استخدام صيغة تعديل PAM ببعد واحد (المطال) لم يتم الوصول إلى فعالية طيفية عالية.

- **الدراسة السادسة :** في عام 2023 تم تنفيذ نظام DWDM آخر باستخدام تقنية التعديل CSRZ، حيث تم إرسال 32 حامل فرعي كل حامل بمعدل 40Gb/s بمعدل إجمالي 1.2Tb/s [52]، حيث يوضح الشكل (1-6) التقنية المستخدمة في طرف الإرسال وقناة الاتصال وآلية فك التجميع في طرف الاستقبال.



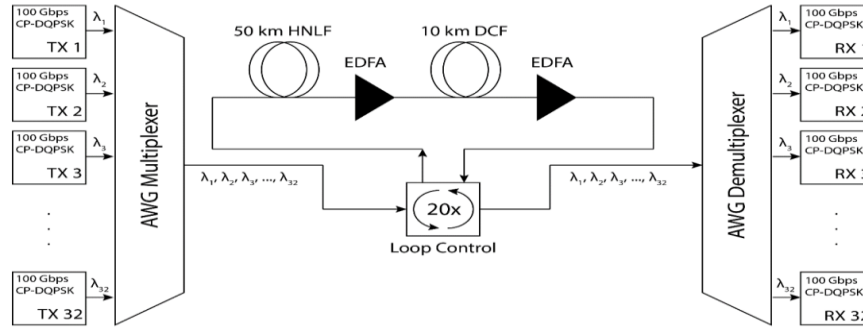
الشكل (1-6) نظام CSRZ DWDM [52]

النتائج العملية : تم الوصول إلى فعالية طيفية 1bit/s/Hz (بتباعد طيفي 40GHz)، وتم الوصول إلى قيمة Q-Factor حوالي 11 من أجل مسافة 60Km، وانخفضت إلى 6 من أجل مسافة 6000km.

الإستنتاجات : تم الوصول إلى نتائج مرضية بالنسبة لمعامل الجودة Q-Factor، كما تم تحسين الفعالية الطيفية مقارنة بالدراسات السابقة، إلا أنه يمكن زيادة الفعالية الطيفية بشكل أكبر عند استخدام صيغ تعديل متقدمة متعددة المستويات.

• الدراسة السابعة :

قام مجموعة من الباحثين باستخدام تقنية النعدل بإزاحة الطور المتعامد التفاضلي ذو الإستقطاب المتماثل CP-DQPSK في نظام DWDM [56] (2020)، حيث تتيح هذه التقنية فعالية طيفية جيدة وتقدم مقاومة عالية للتأثيرات اللاخطية، حيث تم تصميم نظام 32 قناة كل قناة 100Gb/s بمعدل إجمالي 3.2THz، حيث يوضح الشكل (1-7) التقنية المستخدمة في طرف الإرسال وقناة الاتصال وآلية فك التجميع في طرف الاستقبال.



الشكل (7-1) نظام DWDM CP-DQPSK

النتائج العملية: تم الوصول إلى فعالية طيفية 1 bit/s/Hz (بتباعد طيفي 100GHz)، وتم الحصول على قيمة BER تساوي ($3.58e-15$) (حوالي $Qfactor = 8$) من أجل المسافة 50km وعند الوصول إلى المسافة 600km ارتفعت قيمة BER إلى ($8.27e-9$) (حوالي $Qfactor = 5.5$) مما يعني تدهور أداء النظام .

الإستنتاجات : تم الوصول إلى نتائج مقبولة بالنسبة لمعامل الجودة Q-Factor من أجل المسافات القصيرة والمتوسطة، ولكن يمكن زيادة الفعالية الطيفية بشكل أكبر عند استخدام صيغ تعديل متقدمة.

3-1- مشكلة البحث :

تعتبر التأثيرات اللاخطية والتشتت اللوني الحاصل للإشارة الضوئية أثناء الانتشار بالليف الضوئي من أكبر التحديات في أنظمة الاتصالات الضوئية، ولا بد من استخدام تقنيات فعالة للتغلب عليها دون التأثير بشكل كبير على سعة الإرسال المحققة و تعقيد النظام .

كما أن عدم استغلال الطيف الترددي وضعف الفعالية الطيفية يسبب محدودية في سعة أنظمة الاتصالات العاملة، حيث أنه لا بد من استخدام تقنيات تجميع حديثة و تقنيات تعديل متعددة المستويات حديثة تتيح إمكانية استغلال الطيف الترددي بشكل أمثل، و تحقق فعالية طيفية أعلى .

4-1- هدف البحث:

يهدف البحث إلى تحسين أداء أنظمة الاتصالات الضوئية DWDM&WDM عن طريق تطبيق كشف متماسك واستخدام تقنية DSP (معالجة الإشارة الرقمية) وباستخدام صيغ التعديل متعددة المستويات لتقديم أنظمة ذات معدلات نقل عالية و بعيدة المدى وذات كفاءة طيفية عالية، وسيتم تقييم أداء الأنظمة بناءً على

الفعالية الطيفية وسعة الإرسال المحققين بالإضافة إلى المعاملات Q-factor و SER Symbol Error rate و OSNR .

سيتم أيضاً خلال هذا العمل تصميم نظام هجين يعتمد على صيغتي تعديل متعددة المستويات DP-16QAM, DP-QPSK, ودراسة أثرها على أداء النظام والتي تمكن من تحقيق جيل جديد ومرن من منصات النقل الضوئي عالية السرعة (تصل إلى مرتبة ال Tb/s) وبعيدة المدى (تصل إلى أكثر من 1000Km).

1-5- أهمية البحث :

يعتبر الكشف المتماسك مع معالجة الإشارة الرقمية (DSP) في طرف المستقبل حلاً واعداً لأنظمة الاتصالات الضوئية WDM&DWDM متعددة الحوامل . تقدم هذه التقنية تحمل عالياً لضجيج طور الموجة الحاملة وتؤدي إلى تعويض أفضل للاخطية ، يتم أيضاً تعويض التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب بواسطة DSP ، يتم أيضاً تحسين الكفاءة الطيفية باستخدام صيغ التعديل متعددة المستويات PDM 16-QAM, PDM QPSK .

1-6- مسوغات البحث :

قدمت الدراسات السابقة تقنيات جيدة لتعويض التشتت اللوني واللاخطية في أنظمة الاتصالات الضوئية إلا أنها كانت تعاني دائماً من عدم إمكانية الحفاظ على مستوى جيد من الأداء عند معدلات نقل عالية ومسافات طويلة وطاقات نقل عالية أو أنها تتطلب بنية معقدة و شروط من الصعب تحقيقها عملياً ، بالإضافة إلى عدم تقديم أنظمة تستغل الطيف الترددي بالشكل الأمثل لتحقيق ساعات إرسال أعلى، وفي هذا السياق يقدم الكشف المتماسك مع معالجة الإشارة الرقمية (DSP) تحملاً عالياً للتأثيرات اللاخطية، كما أنه يتيح استخدام صيغ التعديل متعددة المستويات متقدمة والتي تمكننا من زيادة الفعالية الطيفية وزيادة سعة الإرسال المحققة على نفس المجال الطيف الترددي المستخدم.

1-7- محددات البحث:

تمت الدراسة على أنظمة التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية WDM ، وأنظمة التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية الكثيف DWDM ، حيث تم تصميم هذه الأنظمة باستخدام تقنيات تعديل مختلفة ومقارنة أدائها، بالإضافة إلى دراسة أثر تغيير برامترات التصميم على هذه الأنظمة .

1-8- حدود البحث :

- الحد المكاني : جرى تنفيذ هذا البحث في مخابر قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات - جامعة دمشق.
- الحد التقني : جرى تنفيذ محاكاة الأنظمة عبر بيئة Optisystem17 على حاسب بمعالج Intel-i7 من الجيل الثامن.
- الحد الزمني : استغرق تنفيذ البحث مدة ثلاث سنوات .
- الحد العلمي : جرى اتباع المنهجية التجريبية والتحليلية في تحليل النتائج و مقارنة أداء الأنظمة .

1-9- منهج البحث وأدواته :

تم في هذا البحث اعتماد المناهج الاستنباطية للحصول على نماذج تصميمية لأنظمة الاتصالات الضوئية باستخدام تقنيات الكشف المتماسك و المعالجة الرقمية و استخدام أنظمة تعديل متعددة المستويات، بحيث تكون هذه النماذج جديدة وعالية الأداء، بالإضافة الى المناهج الاستقرائية التجريبية لتحديد أداء هذه النماذج والمقارنة فيما بينها والتأكد من صلاحيتها.

تمت المحاكاة عبر بيئة Optisystem17 على حاسب بالمواصفات التالية :

CPU : Core i7-8th (4 Cores 8 logical Processors)

Ram : 16GB

Disk Type : SSD

10-1- بنية الأطروحة:

تتكون الأطروحة من خمس فصول :

- ❖ يستعرض الفصل الأول (الإطار العام للبحث)، مقدمة عامة عن البحث ومشكلته و فرضياته ومسلماته والهدف منه، إضافة إلى أهمية البحث ومبرراته و حدوده ومناهجه وأدواته والداراسات المرجعية، كما تم توضيح أقسام هذه الأطروحة .
- ❖ يتناول الفصل الثاني (الأساسيات النظرية للبحث) دراسة نظرية لبنية أنظمة الاتصالات الضوئية وتقنيات التجميع المستخدمة في هذه الأنظمة، ومقارنة بين تقنيتي الكشف المباشر و الكشف المتماسك واستعراض لتقنية معالجة الإشارة الرقمية DSP، كما تمت دراسة التأثيرات الخطية واللاخطية التي تواجه الإشارة في أنظمة الاتصالات الضوئية، والتقنيات المستخدمة للتغلب عليها.
- ❖ يعرض الفصل الثالث التنفيذ العملي والنتائج لنظام اتصالات ضوئي يعتمد تقنية DWDM QPSK ، حيث تم تصميم نظام DWDM DP-QPSK وتم اختبار أثر تقليل التباعد بين القنوات وتغير طاقة الإرسال واستخدام ترميز مختلفة، وتم استعراض النتائج ، وتم بنهاية الفصل مقارنة النتائج التي تم الوصول لها مع الدراسات السابقة و استعراض التحسين المقدم على مستوى معامل الجودة Q-Factor و الفعالية الطيفية المحققة، والتي تؤثر بشكل مباشر على سعة الإرسال الكلية.
- ❖ يعرض الفصل الرابع التنفيذ العملي والنتائج لنظام اتصالات ضوئي يعتمد تقنية DWDM DP-16QAM ، حيث تم تصميم النظام و اختبار أثر تقليل التباعد بين القنوات وتغير طاقة الإرسال واستخدام تقنية تعويض التأثيرات اللاخطية في وحدة DSP، وتم استعراض النتائج ، كما تم بنهاية الفصل مقارنة النتائج التي تم الوصول لها مع الدراسات السابقة والأعمال المقدمة بالفصل الثالث، وتم استعراض التحسين المقدم على مستوى معامل الجودة Q-Factor و الفعالية الطيفية المحققة.
- ❖ يعرض الفصل الخامس التنفيذ العملي والنتائج لنظام اتصالات ضوئي DWDM Hybrid هجين، والذي يعتمد على تقنيتي التعديل (16QAM+QPSK)، حيث تم تصميم النظام واختبار أثر تقليل التباعد بين القنوات واستخدام ترميز مختلفة و استخدام تقنية تعويض التأثيرات اللاخطية في وحدة DSP ودراسة أثر تغير طاقة ومسافة الإرسال، وتم بنهاية الفصل مقارنة النتائج التي تم الوصول لها مع الدراسات السابقة والأعمال المقدمة في الفصول الثالث والرابع، وتم استعراض التحسين المقدم على مستوى معامل الجودة Q-Factor و الفعالية الطيفية ومسافة الإرسال المحققين مقارنة بالدراسات السابقة، بالإضافة إلى الخاتمة.

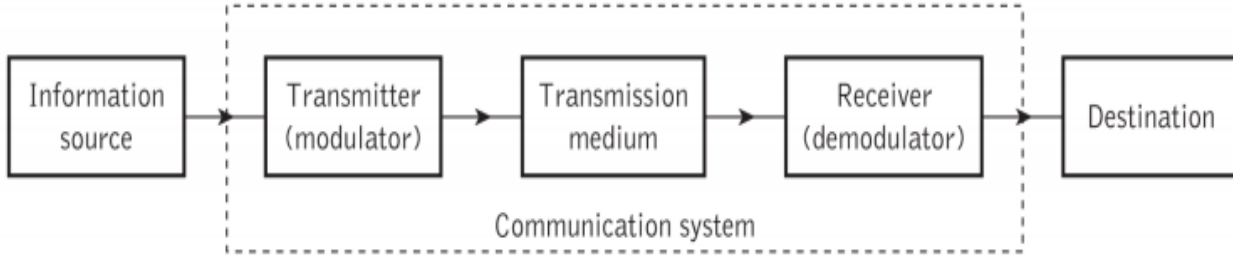
الفصل الثاني

الأساسيات النظرية للبحث

Theoretical Basics of Research

2-1- بنية نظام الاتصالات الضوئي :

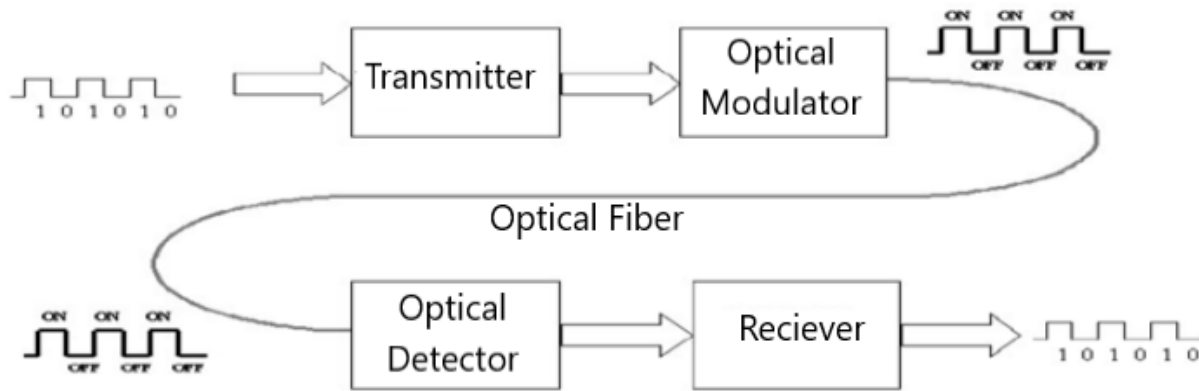
إن الهدف من أي نظام اتصالات هو إيصال المعلومات إلى طرف المستقبل عبر وسط الانتشار. يبين الشكل (2-1) البنية الأساسية العامة لنظام الاتصالات [15].



الشكل (2-1) المخطط الصندوقي العام لنظام الاتصالات [15]

يتكون نظام الاتصالات الضوئية بشكل رئيسي من دائرة إرسال ضوئي و دائرة استقبال بالإضافة إلى الليف الضوئي (وسط الانتشار) الشكل (2-2) .

يتم تحويل الإشارة الكهربائية المعبرة عن المعلومات إلى إشارة ضوئية معدلة في دائرة الإرسال ويتم حقنها في الليف الضوئي . يتم حمل الإشارة الضوئية عبر الليف الضوئي إلى المستقبل الضوئي والذي يتكون من كاشف ضوئي يعيد الإشارة الضوئية إلى إشارة كهربائية و يتم معالجتها لاستخراج المعطيات المرسله [14].



الشكل (2-2) المخطط الصندوقي لنظام الاتصالات الضوئية [14]

2-1-1- المرسل الضوئي Optical Transmitter:

يتكون المرسل الضوئي من جزئين أساسيين هما المنبع الضوئي والمعدل الضوئي .

2-1-1-1-2 - المنبع الضوئي Optical Source:

يقوم المنبع الضوئي بتحويل الإشارة الكهربائية الحاملة للمعلومات إلى إشارة ضوئية بتردد معين و استطاعة كافية و تنقسم المصادر الضوئية المستخدمة في أنظمة الاتصالات الضوئية إلى نوعين [13] :

- الثنائيات الباعثة للضوء (LED (Light Emitting Diode
- الليزر (Laser)

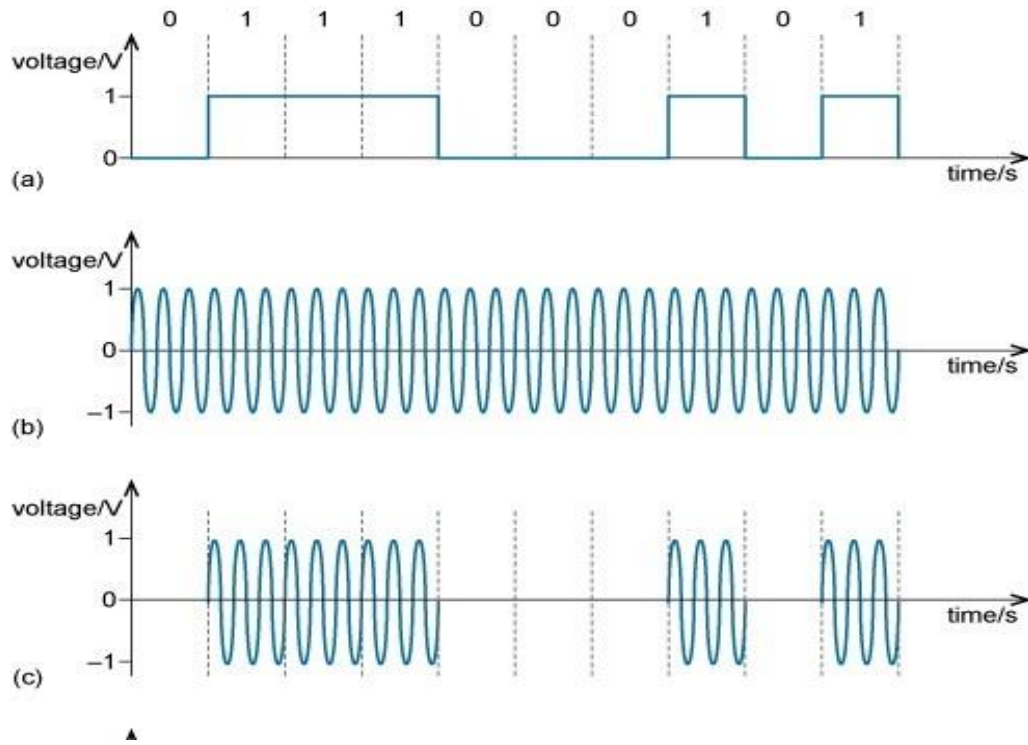
إن الحزمة الضوئية الناتجة عن الثنائيات المصدرة للضوء تتسع بشكل سريع مما يؤدي إلى ضياعات كبيرة عند دخولها ضمن الألياف الضوئية، كما أن عرض الطيف يكون كبير نسبياً .

بينما تتميز حزمة الليزر بأن طيفها ضيق كما أن انفراج الحزمة الليزرية صغير مع المسافة على عكس الثنائيات المصدرة للضوء .

2-1-1-2 - لمعدل الضوئي Optical Modulator:

إن وظيفة المعدل هو تغيير إحدى خواص الإشارة الضوئية (المطال، التردد، الطور) بما يتناسب مع المعطيات المراد إرسالها .

أبسط وأشهر أنواع التعديل هو تعديل On Off Keying (OOK)، والذي يجعل المنبع الضوئي في حالة عمل عند ورود البت 1 و يمنع مرور الضوء عند ورود البت 0، وبالتالي نحصل على نبضات ضوئية تعبر عن إشارة المعلومات كما يبين الشكل (2-3) .

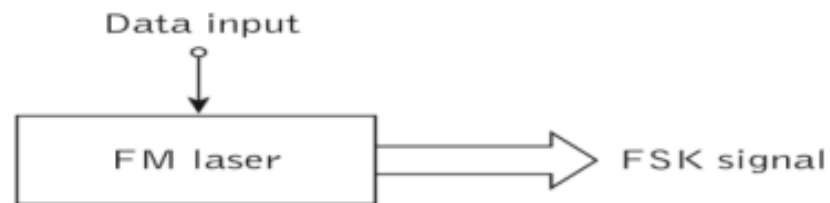


الشكل (3-2) تعديل (OOK) [16]

وهناك طريقتين للتعديل وهما :

• **التعديل المباشر Direct Modulation :**

يتم في هذا التعديل التحكم بالمنبع الضوئي بواسطة سلسلة المعطيات مباشرة .



الشكل (4-2) التعديل المباشر [16]

يستخدم هذا التعديل عادة مع الثنائيات المصدرة للضوء LED ، حيث أنه يؤدي إلى اتساع غير مرغوب فيه في طيف الإشارة عند استخدامه مع الليزر، لذلك يستخدم في أنظمة الاتصالات ذات السرعات المنخفضة نسبياً .

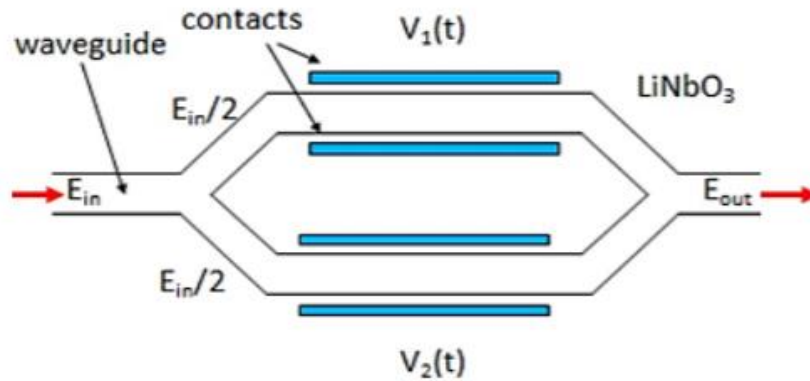
• التعديل الخارجي External Modulation [17] :

تنقسم المعدلات الخارجية حسب المادة المصنوعة منها إلى :

- معدل Lithium Niobite (LINBO3) .
- معدلات أنصاف النواقل

كلا النوعين يستخدم نموذجين، النموذج الأول يتألف من وصلة واحدة والتي تدعى بالوصلة المباشرة Directional Coupler، أما النموذج الثاني يتألف من وصلتين ويدعى Mach-Zehnder Interferometer (MZI) الشكل (5-2) .

في كلا النوعين يتشكل الأثر الكهرومغناطيسي المراد عند تطبيق جهد على منطقة الإتصال والذي يؤدي إلى تغيير قرنية انكسار المادة n ، وبالتالي نقل الطاقة من طرف إلى الطرف المقابل ولكن يستخدم MZI أكثر من معدل الوصلة المباشرة وذلك لأن معدل الإطفاء فيه أعلى (وهو نسبة الطاقة المرسله عند إرسال البت 1 إلى الطاقة المرسله عند إرسال البت 0) ، كما أن فرق الطور بين طرفي MZI يكون صفر عند عدم تطبيق جهد على الوصلة أي أن موجتي الدخل والخرج تتداخلان تداخلاً بناءً ، وعند تطبيق جهد معين على الوصلة يصبح فرق الطور بين الدخل والخرج π أي أن موجتي الدخل والخرج تتداخلان تداخلاً هداماً ولا تظهر إشارة في الخرج .



الشكل (5-2) معدل MZI [17]

2-1-2- الكاشف الضوئي Optical Detector :

إن الهدف الرئيسي للكاشف الضوئي هو تحويل الإشارة الضوئية المسلطة عليه إلى إشارة كهربائية تعبر عن المعلومات المرسله . ومن أهم المحددات التي يتم النظر إليها عند اختيار الكاشف الضوئي هي :

- نسبة تيار الخرج إلى استطاعة الضوء الداخل وتقاس بوحدة A/Watt .
- تيار التسريب في حال عدم التعرض للضوء
- سرعة تغير الخرج مع تغير الدخل والتي تعبر عن سرعة النقل العظمى
- علاقة استجابة الكاشف مع طول الموجة

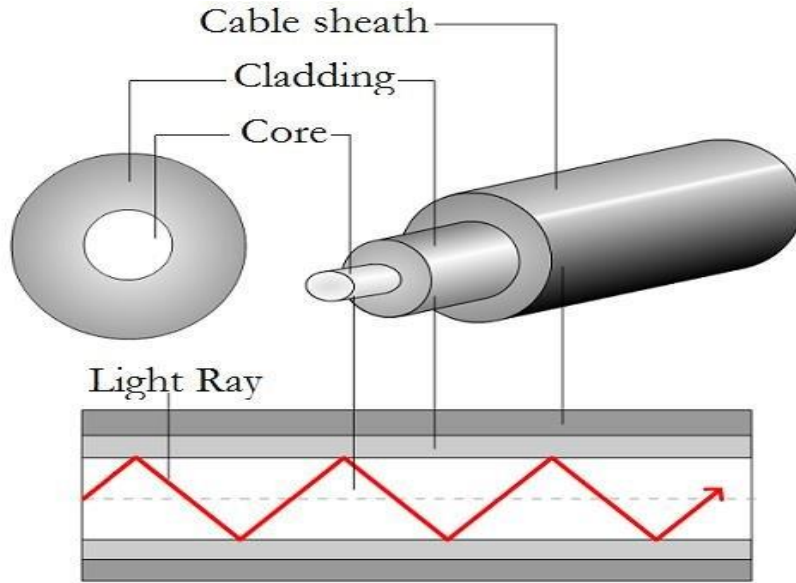
2-1-3- الليف الضوئي Optical Fiber [13] :

إن البنية الأساسية للليف الضوئي تتكون من طبقتين أساسيتين وهما :

النواة : وهي التي ينتشر فيها الضوء وتكون مصنوعة من الزجاج أو البلاستيك

الغلاف : وهو يحيط بالنواة ويكون مصنوعاً من الزجاج أو البلاستيك أيضاً لكن بمعامل انكسار أصغر من النواة وذلك من أجل ضمان عملية الانعكاس الداخلي الكلي لكي يصل الضوء إلى نهاية الليف .

كما يحيط بالطبقتين السابقتين عدة طبقات أخرى من أجل الحماية من الكسر والشد والحرارة والعوامل المحيطة كما يوضح الشكل (2-6)

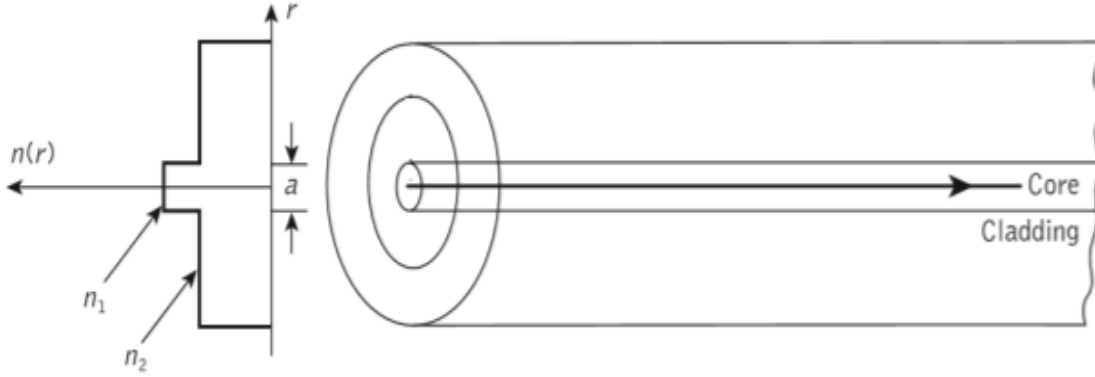


الشكل (2-6) مكونات الليف الضوئي [13]

تصنف الألياف الضوئية وفقاً لمعيارين وهما نمط الانتشار و طريقة تغير قرنية الانكسار بين القلب والغلاف في الليف الضوئي ، وبالتالي يمكن تصنيف الألياف الضوئية إلى ثلاثة أنواع :

2-1-3-1 - ألياف وحيدة النمط (SMF) :

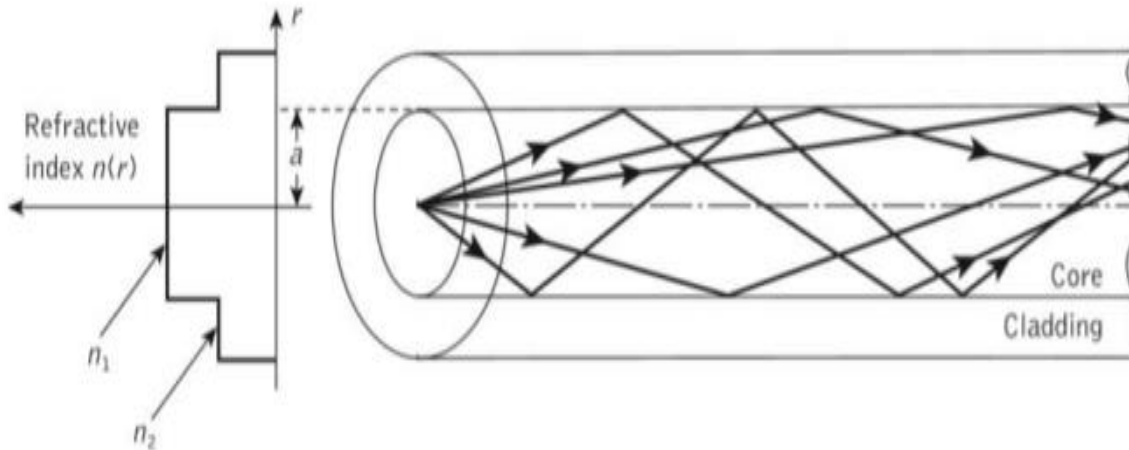
وتنتشر الإشارة الضوئية ضمن هذا الليف وفق مسار وحيد و تستخدم للمسافات الطويلة والسعات العالية ، ويصل نصف قطر القلب الى حوالي $9\mu\text{m}$ ويكون قطر الغلاف أضعاف قطر القلب .



الشكل (2-7) بنية الليف SMF [13]

2-3-1-2 - ألياف متعددة الأنماط بمعامل انكسار درجي Step Index Multi-Mode Fiber (MMF) :

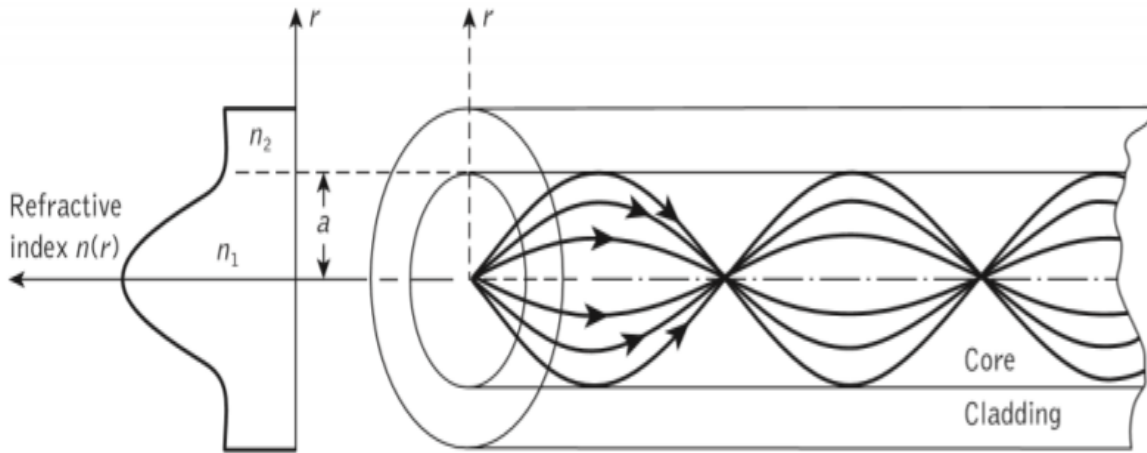
وتتميز هذه الألياف بكبر قطر القلب و كبر فتحة النفوذ العددية والتي تمكن من دخول كمية كبيرة من الضوء للليف الضوئي و تنتشر الإشارة الضوئية في هذا النوع وفق عدد من المسارات المختلفة . في هذا النوع يحدث تغير مفاجئ بقرنية الإنكسار عند السطح الفاصل بين القلب والغلاف . وتستخدم هذه الألياف لنقل المعلومات إلى مسافات قصيرة وبسعة محدودة .



الشكل (2-8) بنية الليف SI-MMF [13]

3-3-1-2 - ألياف متعددة الأنماط بمعامل انكسار متدرج Graded Index Multi-Mode Fiber (MMF)

يكون معامل الانكسار في هذه الألياف متدرجاً ، حيث تكون أعلى قيمة له في مركز الليف وتتناقص تدريجياً باتجاه الغلاف حيث تكون في الغلاف ثابتة .
 يكون أداء هذه الألياف أفضل من الألياف ذات معامل الانكسار الدرجي نظراً لقلة التخميد فيها .
 وتستخدم هذه الألياف من أجل نقل المعطيات لمسافات متوسطة وسعات من متوسطة إلى عالية.



الشكل (2-9) بنية الليف GI-MMF [13]

2-1-4 - المرشحات الضوئية (Optical Filter) [20]:

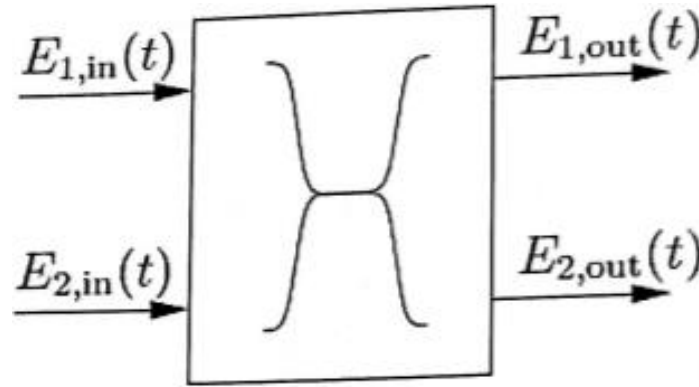
تستخدم المرشحات الضوئية في أنظمة الاتصالات الضوئية لعدة أسباب وهي :

1. ترشيح الضجيج
2. إكساب الأمواج العاملة نفس سوية الطاقة
3. من أجل عمليات التجميع وفك التجميع (Multiplexing and Demultiplexing)

تتم عمليات الترشيح الإلكترونية بعد عملية الكشف في المجال الضوئي بسبب محدودية عرض المجال للعناصر الإلكترونية مقارنة مع العناصر الضوئية [20] .

2-1-5 - الموزعة الضوئية A Fiber Optical Coupler [18]:

إن الهدف من الموزعة الضوئية هو تقسيم الإشارة الواردة إلى عدة اتجاهات أو جمعها في مسار واحد .
يتم تصميم الموزع الضوئي بأربع منافذ بحيث يعاد تقسيم الإشارة الواردة إلى منفذي الدخل على منفذي الخرج
وفق نسبة معينة .



الشكل (10-2) الموزعة الضوئية [18]

تعطى العلاقة بين الحقل الكهربائي على خرج الموزعة و الحقل على مدخلها على الشكل :

$$\begin{pmatrix} E_{1,out}(t) \\ E_{2,out}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\kappa} & j\sqrt{1-\kappa} \\ j\sqrt{1-\kappa} & \sqrt{\kappa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1,in}(t) \\ E_{2,in}(t) \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

حيث K : نسبة تقسيم الاستطاعة المطلوبة

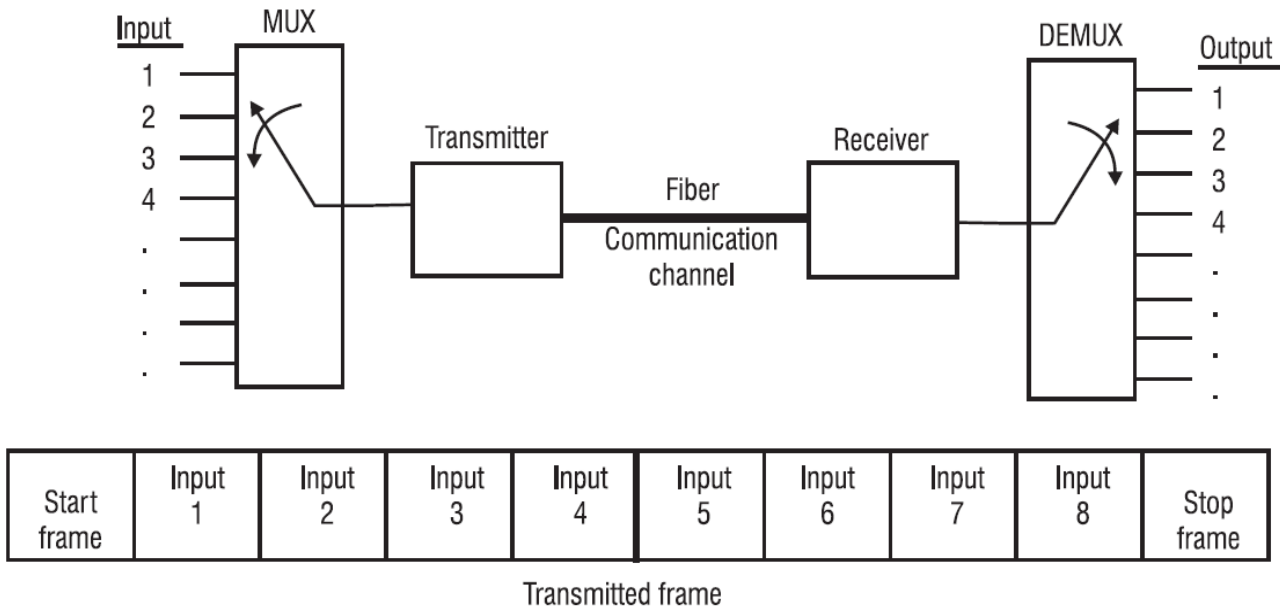
2-2- التجميع في أنظمة الاتصالات الضوئية :

إن العامل الأساسي في تصميم أنظمة اتصالات بسعات عالية هو إدخال بيانات عدة مستخدمين في قناة اتصال واحدة، ويمكن تحقيق ذلك عبر عدة تقنيات ومن أهم هذه التقنيات وأكثرها انتشاراً هما تقنيتي التجميع بتقسيم الزمن Time-Division Multiplexing TDM والتجميع بتقسيم الطول الموجي Wavelength-Division Multiplexing WDM .

2-2-1- التجميع بتقسيم الزمن TDM [19]:

تعتمد هذه التقنية على تقسيم ومشاركة الزمن المخصص لقناة الإتصال وذلك لإرسال معلومات مستخدم مع معلومات مستخدمين آخرين ، حيث يكون المجمع عبارة عن مبدل دوار يدور بسرعة كبيرة جداً بحيث يوصل كل مدخل معلومات إلى قناة الإتصال خلال فترة معينة من الزمن ، ويتم عكس العملية في طرف الإستقبال باستخدام مفكك التجميع .

تعرف الدورة الكاملة للمجمع بالإطار Frame، والذي تكون بدايته ونهايته محددة ببتات تزامن .
يوضح الشكل (2-11) عملية التجميع بتقسيم الزمن .



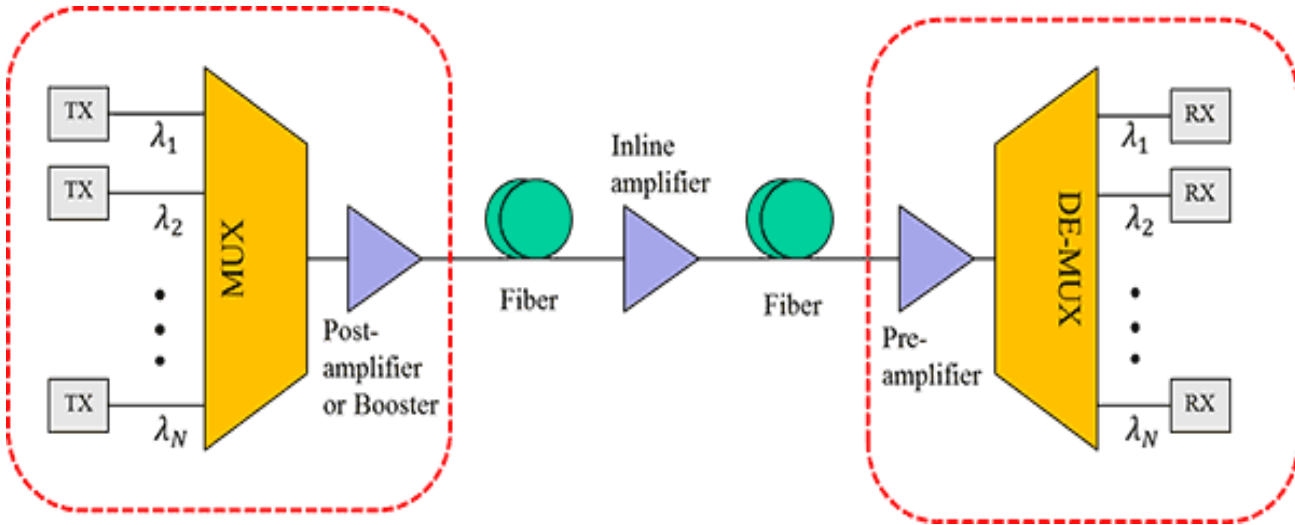
الشكل (2-11) عملية التجميع بتقسيم الزمن [19]

تحتسب كمية المعلومات المرسلّة باستخدام تقنية TDM عن طريق جداء معدل إرسال القناة الفرعية b/s بعدد القنوات الفرعية المستخدمة .

2-2-2- التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية WDM [19]:

تعتمد هذه التقنية على إرسال معلومات كل مستخدم باستخدام طول موجي مختلف ، وبالتالي إرسال أطوال موجية متعددة ضمن الليف الضوئي الواحد دون حصول تداخل .

إن الهدف من هذه التقنية هو زيادة سعة أنظمة الاتصالات الضوئية العاملة دون الحاجة لوضع ألياف جديدة بالخدمة، إن الميزة الأساسية لأنظمة WDM أنه لا يتطلب أن يعمل كل مستخدم نهائي عند معدل نقل عالي جداً، بل يجب عليه أن يعمل على معدل النقل الخاص بأحد أوعية نظام WDM، يوضح الشكل (2-12) تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية



الشكل (2-12) تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية [19]

يتم تجميع الأطوال الموجية ضمن الليف الضوئي باستخدام موزعات ضوئية يتم تصميمها بحيث ترتبط تواجها بأطوال الموجة المستخدمة .

عندما يكون التباعد الترددي بين الأطوال الموجية قليل تسمى بأنظمة التجميع بتقسيم الطول الموجي الكثيف . DWDM

تتطلب أنظمة WDM طاقة أقل بالمقارنة مع DWDM ، وتستخدم الليف وحيد النمط SMF أو الليف متعدد الأنماط MMF ، ويمكنها استخدام منابع ضوء عادية مثل LEDs ، ولكن بالمقابل فإن أنظمة WDM ذات

سعة أقل ، بينما أنظمة DWDM ذات سعة إرسال أكبر فيمكن إرسال عدد أكبر من الأطوال الموجية على نفس الليف، بالإضافة إلى أن سرعة النقل في أنظمة DWDM أكبر من أنظمة WDM . يتألف النظام بشكل أساسي من قسم الإرسال ثم المجمع الضوئي، الليف الضوئي، ثم مفكك التجميع الضوئي وأخيراً قسم الاستقبال، كما يحتاج النظام إلى مجموعة من المضخمات الضوئية التي تتوزع على طول مسافة الإرسال .

تصنف المضخمات حسب وظيفتها و موقعها ضمن خط النقل الى ثلاثة أنواع :

Power Amplifier : يوجد بعد المرسل ووظيفته زيادة طاقة الإرسال

Line Amplifier : يوجد في نقاط معينة على طول خط النقل ووظيفته تعويض الضياعات أثناء النقل

Optical Preamplicifier : يوجد عند طرف الإستقبال ووظيفته دعم حساسية المستقبل

2-2-2-1 - آلية عمل نظام اتصال يستخدم DWDM :

يتألف المرسل ضمن نظام DWDM من مجموعة من ليزرات ذات تعديل مباشر أو خارجي وذلك بحيث يكون لكل طول موجة معدل خاص بها، ثم يتم جمع الاشارات ذات الأطوال الموجية المختلفة بواسطة مجمع ضوئي، ويستخدم مضخم استطاعة ضوئي لزيادة طاقة الإرسال بعد مسافة معينة من المجمع ثم ترسل بعدها عبر الليف الضوئي. وكون الإشارة تتخامد أثناء النقل تستخدم المضخمات الضوئية عند مسافات (محسوبة وفق معدل التخامد لكل km) على طول خط النقل.

في كل مرحلة تضخيم نجد أن هناك حاجة لإضافة معوضات التشتت وذلك وفقا لمعدل الإرسال ونوع الليف الضوئي المستخدم. قبيل مرحلة الاستقبال تضخم الإشارة مجددا بواسطة مضخم أولي Preamplicifier ثم تأتي مرحلة فك التجميع الضوئي وفي هذه المرحلة تكشف كل موجة بواسطة كاشف ضوئي خاص بها وتزود الإشارة إلى المستقبل المطلوب [43,44] .

كما هو واضح من تصميم نظام DWDM فإنه يمنح قدرة عالية على نقل كمية كبيرة من المعلومات على نفس الليف الضوئي كما أنها من التقنيات الأكثر أمانا في مجال نقل المعلومات وتستخدم في نقل مقاطع الفيديو مع إمكانية كبيرة في التحكم بالمعالجة والتطبيق.

يكون التباعد بين القنوات في نظام الاتصال WDM العادي بحدود 4-10nm ، أما في DWDM فإن التباعد بين القنوات بحدود 1nm أو أقل، أي تكون كثافة الأمواج في DWDM أكبر. في النظام WDM تقسم المنطقة بين الموجتين 1540-1570nm إلى أربع قنوات وهي 1540nm, 1550nm, 1560nm, 1570nm ، بينما خصصت أنظمة DWDM لاستخدامات أوسع، حيث يقسم عرض المجال الضوئي إلى 32 قناة أو أكثر. في الوقت الراهن يستخدم الطول الموجي 1550nm في النوعان، فعنده يكون التخماد أصغرياً كما أن المضخمات الضوئية المستخدمة تعمل بشكل فعال جداً ومستقر عند الموجة 1550nm . تخضع هذه الخطوات التي تم ذكرها لمعايير التصميم، لكن باعتبار أن النظام الذي نقترحه هو نظام رقمي Digital System (مع أنه يمكن الإرسال بشكل تماثلي Analogue)، فإن كل بت مرسل يجب أن يصل إلى المستقبل المطلوب دون أي تشويه ويكون المقياس المعتمد غالباً لجودة الإشارة هو معدل خطأ البت BER Rate Error Bit أو معامل الجودة Q-Factor Quality Factor ، وتعتبر قيمة معدل الخطأ المقبولة واقعة في المجال $(10^{-10} - 10^{-8})$ أما قيمته المثالية فهي 10^{-12} وتعتمد على كمية الضجيج التي يضيفها كل عنصر في نظام DWDM [42] .

2-2-2-2- تصميم نظام اتصال DWDM

عند تصميم نظام إرسال يعمل بتقنية DWDM يجب أخذ الاعتبارات التالية بالحسبان [43.44] :

• تصميم المرسل :

إن المعاملات التي يجب الانتباه إليها أثناء تصميم المرسل هي طاقة خرج المرسل P_{out} ، وزمن الصعود والهبوط، ونسبة الإطفاء، التي تعبر عن نسبة الطاقة المرسلية عند إرسال البت ذو القيمة "1" إلى الطاقة المرسلية عند إرسال البت ذو القيمة "0" ، ونموذج التعديل، ودقة واستقرار طول الموجة، وكذلك ضجيج الشدة النسبي (Relatively Intensity Noise (RIN)).

تعتمد طاقة الإرسال P_{out} بشكل أساسي على نوع الليزر المستخدم، فإذا كان الليزر من النوع DFB (ليزر التغذية المرتدة الموزعة) فإن طاقة الخرج له بحدود 1 mW وحتى 10 mW أي من 0 dBm وحتى 10 dBm ، ويقوم مضخم الاستطاعة الضوئي بزيادة قيمة طاقة الإرسال حتى 50 mW أي 17 dBm ، ولكن عندما تصل الطاقة إلى الحدود العليا يجب الانتباه إلى الآثار اللاخطية الناجمة، وكذلك تؤخذ شروط الأمان

بعين الاعتبار. كما يجب أن تكون طاقة الإرسال في حالة وجود ضجيج يؤثر عليها أعلى من طاقة الإرسال في حالة عدم وجود ضجيج وتعتبر المضخمات من أهم العناصر المسببة للضجيج.

• تصميم المفكك والمجمع :

إن المبدأ الأساسي في عمل المجمع/المفكك هي اعتمادها على قطر قلب الليف الضوئي في الدخل والخرج، فعملياً ، يجب أن يكون قطر قلب ليف الخرج كبيراً وذلك لنضمن تسطح حزمة العبور Flat Band Pass، وانخفاض الضياعات أثناء عبور الموجة من الليف إلى DEMUX/MUX وبالعكس، كما يجب أن يكون كلاً من DEMUX/MUX حساساً لنمط استقطاب إشارة DWDM التي ترد إليه، ويبقى الأمر الأكثر أهمية هو في قدرة DEMUX على فصل القنوات دون حدوث تداخل بين الأمواج Crosstalk . فلهذه الاعتبارات جميعها اعتمدت معظم أنواع DEMUX/MUX في تسعينات القرن الماضي على الألياف ذات القلب متعدد النمط Multimode Fibers، ولكن لاحقاً تم استخدام مصفوفة من العدسات المايكروية التي صنعت من الألياف وحيدة النمط Single Mode Fibers التي تدمج معاً على شريحة سيليكونية واحدة. واستخدمت هذه العدسات في تصنيع MUX ذو 32 قناة، حيث أصبح الليف الذي له قطر لب $10\ \mu\text{m}$ يسلك سلوك ليف ذو قطر قلب $80\ \mu\text{m}$ ، وهذه الطريقة مكنت من الحصول على MUX ذو فراغ $1\ \text{nm}$ بينما يكون عرض حزمة القناة الواحدة $0.7\ \text{nm}$ عند العمل عند الطول الموجي $1.55\ \mu\text{m}$ ، وهنا لا بد من الإشارة إلى أنه ينطبق على MUX و DEMUX نفس شروط التصميم حيث يستخدم العنصر نفسه إما MUX أو DEMUX وذلك بحسب جهة انتشار الضوء.

• تصميم المستقبل

يحدد عامل الحساسية وعامل التحميل الزائد عمل المستقبل، فالحساسية هي معدل الطاقة المطلوبة للوصول إلى قيمة محددة للعامل BER بالنسبة لمعدل إرسال محدد وتقاس الحساسية عند قيمة $\text{BER}=10^{-12}$ باستخدام سلسلة بت عشوائية Pseudorandom تعطي من 1 إلى 2^{23} بت، أما عامل التحميل الزائد فهو طاقة الدخل العليا التي يستطيع المستقبل أن يعمل بكفاءة عندها دون أن يتأذى.

ويعتبر كل من PIN و APD (avalanche photodiode) من أهم أنواع المستقبلات المستخدمة ولكن APD أكثر حساسية من الأنواع الأخرى بالإضافة إلى أنها تستخدم مع الأنظمة ذات معدل الإرسال العالي.

• الليف الضوئي

يعتبر اختيار الليف المناسب مسألة هامة فمن الضروري الانتباه إلى عدة أمور مثل الضياعات والآثار اللاخطية وسهولة الفك والتركيب. ومن المعروف أن الألياف نوعين الأول هو الليف وحيد النمط SMF والثاني الليف متعدد الأنماط MMF وهناك نوعان آخران ينتجان عن النوعين السابقين وهما الليف مزاح التشتت DSF والليف معوض التشتت DCF وسنوضح مزايا ومساوي كل نوع.

يعد الليف (DSF) Dispersion-Shifted Fiber مثالاً عندما يستخدم في الأنظمة ذات القناة الواحدة ومع معدل الإرسال العالي 10Gbps ولمسافات بعيدة أيضاً ، ولكن من الصعب زيادة سعة الوصلة مع هذا النوع من الألياف فهو غير مناسب لأنظمة DWDM عموماً ، كما أن الليف DSF لا يعالج مشكلة التشتت اللوني بالمقابل يعتبر الليف SMF أفضل لأنه حساس للآثار اللاخطية وينسجم إلى حد كبير مع طرق إنقاصها، ويستخدم مع الأنظمة التي تستخدم عدة قنوات في نفس الوقت مثل أنظمة DWDM .

لكن مهما كان نوع الليف المستخدم فلا بد من حل مشكلة التشتت اللوني Chromatic Dispersion ، وهذا دفع الكثير من المصممين إلى ابتكار نوع جديد من الألياف والذي تمثل بالليف DCFs Dispersion Compensating Fibers حيث يكون عامل التشتت اللوني له ذو قيمة سالبة في مجال الموجة 1550 nm فكان الحل الأمثل لتلك المشكلة .

• حدود الطاقة :

يجب أن يأخذ بعين الاعتبار عند تصميم نظام اتصال ما العناصر التي تضعف طاقة الإشارة فكل عنصر يتصف بحدود للطاقة مختلفة عن بقية العناصر ، وبوجود كل هذه العناصر يجب أن تتمتع الإشارة بمستوى جيد من الطاقة عند الاستقبال وذلك للحصول على معدل BER مقبول وتستخدم لهذا الغرض إحدى الطريقتين التاليتين :

- زيادة طاقة الإرسال - بوحدة dBm - بحيث تكون طاقة الإشارة بعد اجتياز العنصر مساوية إلى قيمة الطاقة في حال عدم وجود هذا العنصر
- زيادة نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR

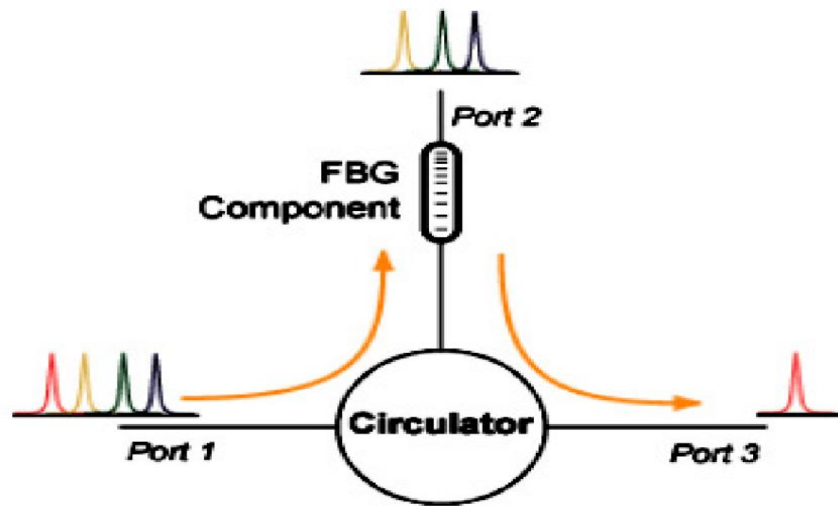
2-2-2-3- فك التجميع في نظام DWDM :

يقوم المجمع MUX في أنظمة الإرسال المتعدد بتجميع الإشارات القادمة، وبالمقابل يقوم المفك DEMUX بعمل معاكس تماماً، وفي أنظمة DWDM تستخدم شبكات الانعراج لتقوم بعمل المجمع أو المفك وتعتمد شبكة الانعراج في عملها على قوانين الضوء الهندسي (الانعكاس والانكسار) وعملها يجب أن يتميز بالدقة العالية لكي تصل كل موجة مرسلة إلى المستقبل بأقل تشويه ممكن، من أهم التقنيات المستخدمة في هذا المجال :

- مشبكات براغ Bragg FBG
- مرشحات الفجوة Fabry-Perot Filters
- معدل MZI
- مصفوفة تصنيف الأمواج AWG
- مشبكات براغ Bragg FBG :

تستخدم هذه التقنية لتصنيع مجمعات إضافة وإزالة القناة في أنظمة DWDM حيث يبين الشكل (2-13) ليف تشبيك براغ والذي يستخدم لإزالة قناة واحدة من مجموعة قنوات منتشرة ضمن الليف ، ولإتمام العملية يجب استخدام دوار ذو ثلاث منافذ .

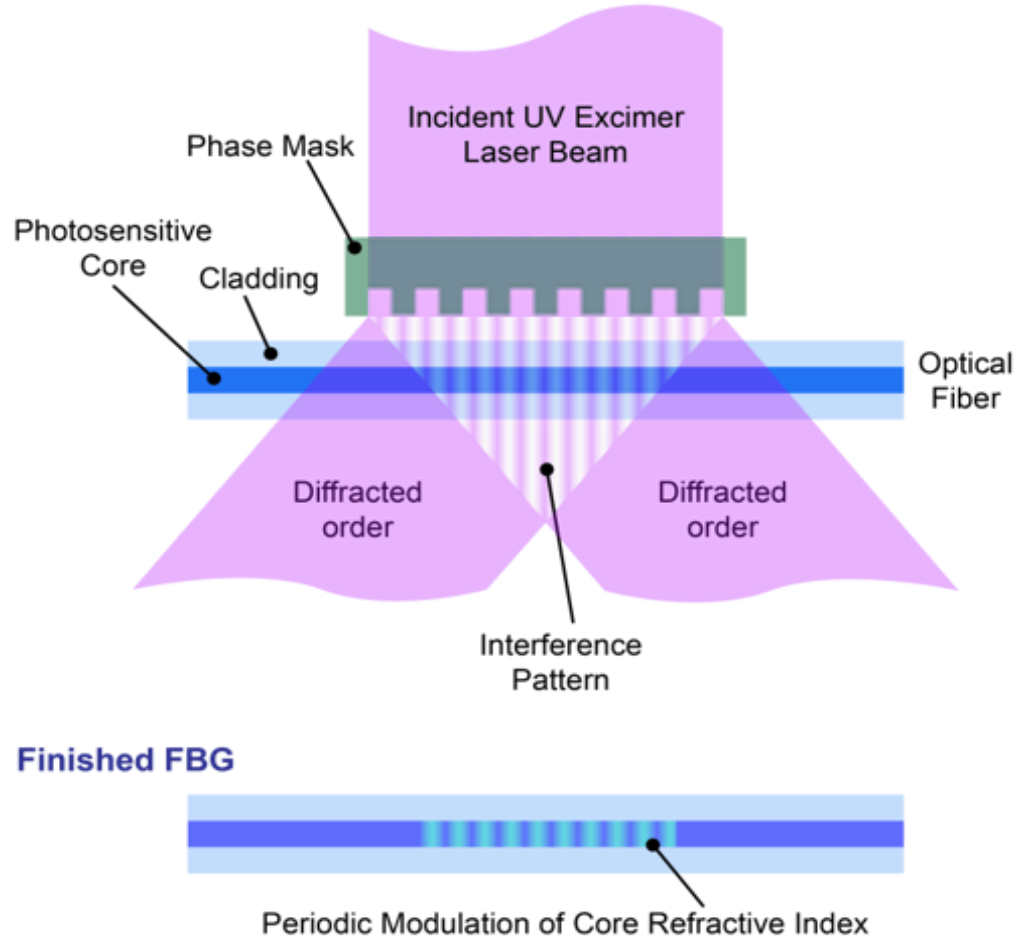
يقوم مبدأ الدوار على إرسال الضوء باتجاه واحد مع عقارب الساعة بالتالي تنتقل الموجة المنعكسة من المشبك من المنفذ 2 إلى المنفذ 3 ، بينما تعبر بقية الأمواج دون أي تأثير ، أما لإضافة طول موجة جديد إلى نظام DWDM فيمكن أن يتم من خلال الموزعة الضوئية [47] .



الشكل (2-13) إزالة قناة من نظام DWDM باستخدام مشبك براغ [47]

نحصل على ليف تشبيك براغ بتعديل معامل الانكسار بشكل دوري ضمن نواة ليف وحيد النمط ويتم ذلك باستخدام قناع Mask وتطبيق أشعة فوق بنفسجية (UV) كما هو مبين بالشكل (2-14) ، وبالنتيجة يتبعثر الضوء المنتشر عند كل تغير في معامل الانكسار.

Phase Mask FBG Writing Schematic



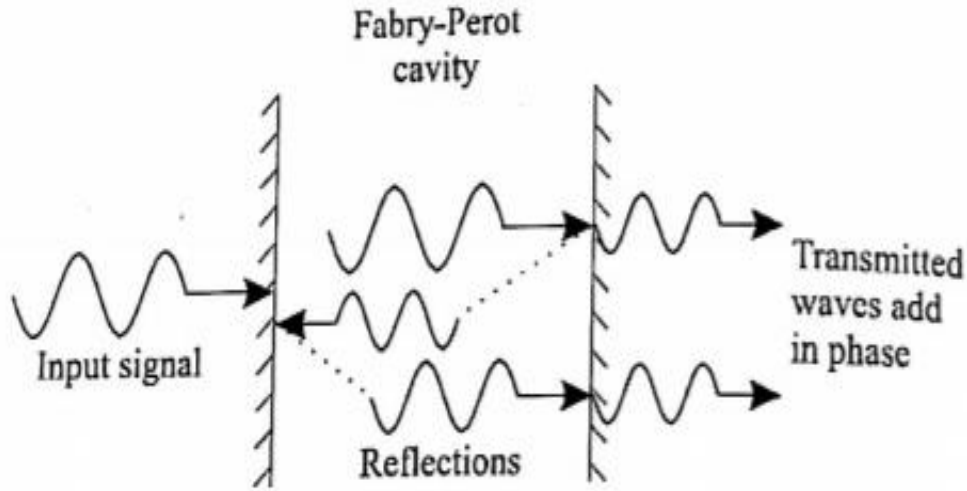
الشكل (2-14) طريقة تشبيك براغ ضمن الليف [47]

سوف تنعكس الموجة التي تحقق شرط براغ، وتحقق شرط توافق الطور ليتم انتشارها في الاتجاه المعاكس أما الأمواج الأخرى فسوف تعبر دون تأثير .

ويتطلب تحقيق شرط براغ المحافظة على الطاقة والعزم معاً ، حيث أن الحفاظ على الطاقة يتحقق بتساوي تردد الموجة المنعكسة مع الموجة الواردة .

• مرشحات الفجوة Fabry-Perot Filters :

يتم تشكيل هذه المرشحات من خلال فجوة Cavity محصورة بين مرآتين إحداها عاكسة كلياً والأخرى جزئياً توضعان بشكل موازي لبعضهما كما هو مبين بالشكل (2-15) كما تسمى بمرشحات التداخل حيث يتم تداخل عدة أشعة لتشكيل الموجة المختارة .



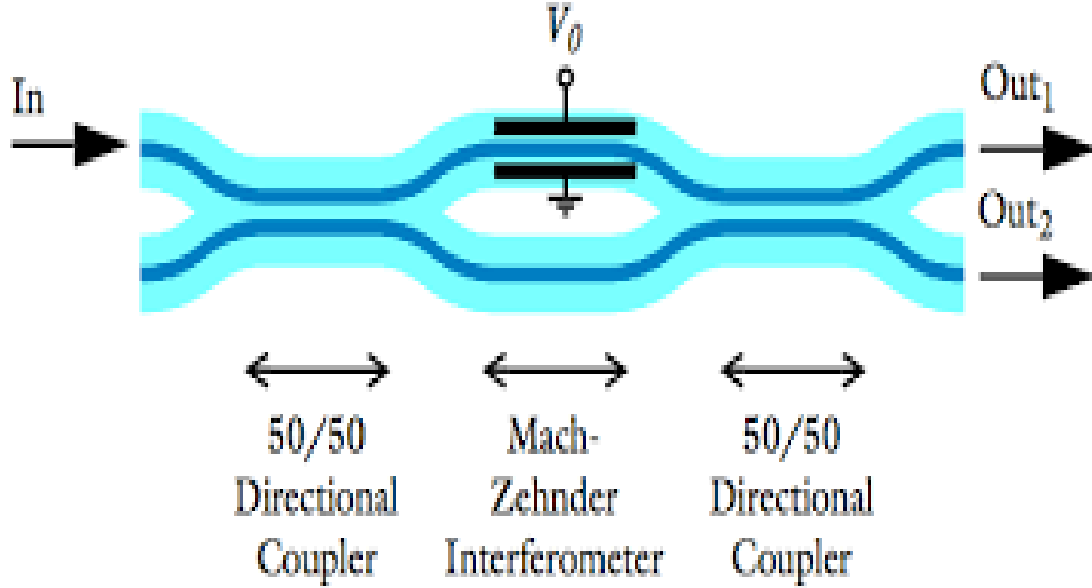
الشكل (2-15) مرشحات الفجوة Fabry-Perot Filters [47]

تدخل إشارة DWDM المرشح عبر السطح اليساري وبعد اجتيازها الفجوة ينعكس جزء من الأمواج بينما يتابع الجزء الآخر مسيره عبر السطح الأيمن، يعود قسم من الأمواج المنعكسة للعبور أيضاً وهي الأمواج التي يشكل عرض الفجوة لها عدد صحيح من طول الموجة، حيث تضاف هذه الأمواج مع بعضها وتكون متوافقة في الطور .

• معدل MZI :

لفهم آلية عمل AWG نشير إلى أن MZI Mach Zehender Introforometer الذي يستخدم كمعدل خارجي له استخدام آخر يتمثل بعمله كعنصر Demux/Mux حيث يقوم بكشف الحزم الضوئية الداخلة وتحويلها إلى أمواج منفصلة في الخرج النهائي وتتألف البنية الداخلية من وصلتين - تخامد الواحدة منها -

3dB ومرشدي أمواج يختلفان بالطول كما يبين الشكل (2-16) ويتم تشكيل MZI على شريحة سليكونية مدمجة أما الغلاف ومرشدي الأمواج فمن السيليكا SiO₂، ويستخدم MZI مع الأطوال الموجية -1.3 μm 1.55 μm .



الشكل (2-16) معدل MZI [46]

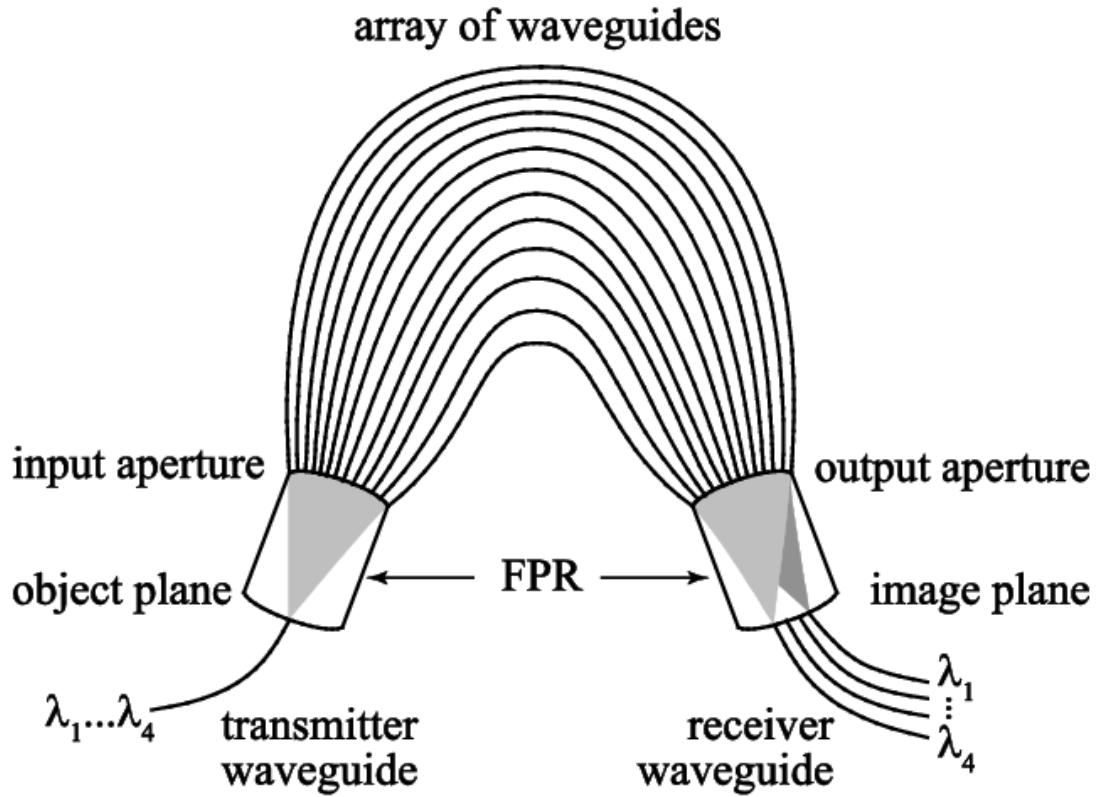
يعد MZI أقل استخداماً كعنصر Demux من غيره لأن حزمة التمرير له غير مسطحة بما يكفي بالإضافة إلى اتساع عرضها بالمقارنة مع أنواع أخرى من المرشحات وإذا أردنا الحصول على عرض حزمة ضيق نستخدم عدة مراحل من MZI ولكن هذه التشكيلة ذات ضياعات كبيرة. كما أن الوصلات لا تقوم بفصل حزم الضوء بالنسبة 50:50 تماماً .

• مصفوفة تصنيف الأمواج AWG :

تظهر أهمية AWG كبديل أفضل عن MZI حيث تعمل AWG بطريقة مشابهة ولكنها ذات ضياعات أقل بكثير وحزمة التمرير أضيق وأكثر تسطحاً .

تتألف مصفوفة تصنيف الأمواج من وصلتين إحداهما للدخل والأخرى للخروج ترتبطان معا بواسطة مصفوفة من مرشحات الأمواج حيث تكون جميع المكونات مدمجة على شريحة سليكونية واحدة، ويمكن أن يصل عدد القنوات إلى 128 قناة. يكون دخل كل وصلة وخرجها عبارة عن مصفوفة من مرشحات الأمواج

Waveguides Output/ Input أيضا ، فتعمل الوصلة الأولى عمل العدسة حيث تفصل الأشعة الواردة ثم توجهها إلى مرشحات الأمواج الواقعة في خرجها بينما تقوم مصفوفة مرشحات الأمواج هذه Waveguides Arrayed بعمل الموشور الذي ينثر الأشعة ولكن بفرق طور معين خاص بكل موجة ثم تقوم وصلة الخرج بتوجيه الأمواج المنفصلة الداخلة إليها وإخراجها عبر مصفوفة من مرشحات الأمواج أيضا ، أي يتم فصل الأمواج بسبب وجود فرق في الطور بينها [43.46].



الشكل (2-17) آلية عمل AWG [46]

2-3- طرائق الكشف في أنظمة الاتصالات الضوئية:

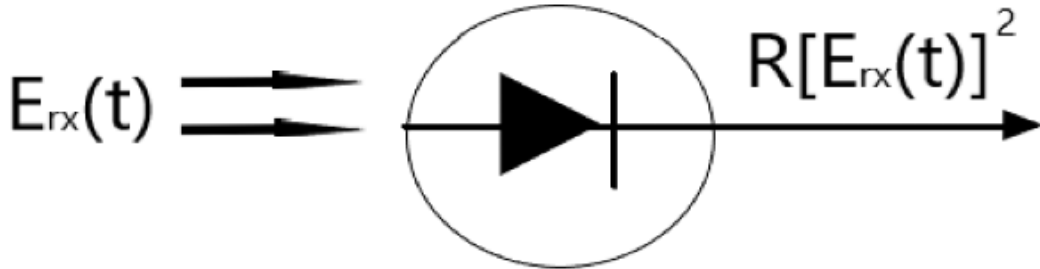
2-3-1- الكشف المباشر Direct Detection:

تكون المعلومات في الأنظمة التي تعتمد على تقنية الكشف المباشر متعلقة بشدة الإشارة المستقبلية كما هو موضح بالشكل (2-18)، وبالتالي فإنها تدعم فقط عمليات التعديل على المطال مثل تعديل On Off Keying (OOK) وذلك يعتبر محدودية في أنظمة الاتصالات هذه [28].

تعاني الأنظمة التي تعتمد على تقنية تعديل الشدة مع الكشف المباشر Intensity Modulation with Direct Detection (IM-DD) من المحدودية في معدلات النقل (10Gb/s) في أنظمة WDM بسبب الإيتماد على بعد واحد في التعديل وهو المطال .

يمكن استخدام تقنية الكشف المباشر DD مع الأنظمة ذات المسافات القصيرة والمتوسطة بسبب بساطتها و قلة الكلفة فيها .

حيث أن أنظمة IM-DD تواجه مشاكل في الأداء عند معدلات نقل عالية و مسافات طويلة . [24,25,30]



الشكل (2-18) تقنية الكشف المباشر [28]

2-3-2- الكشف المتماسك Coherent Detection [21]:

هو تقنية للكشف عن الإشارات في أنظمة الاتصالات (وتعني تماسك الضوء أي أن إشارتين لهما نفس التردد والطور في نفس الوقت) و يستخدم مذبذباً محلياً في جهاز الإستقبال ومع القدرة على القيام بالكشف المتماسك يمكن للمستقبل الضوئي أن يتتبع طور المرسل الضوئي ومن ثم اتساق الطور لاستخراج أي معلومات عن الطور والتردد التي تحملها إشارة المعلومات المرسله .

يمكن أن يحقق الكشف المتماسك حساسية أعلى من الكشف المباشر كما يمكنه زيادة كفاءة الطيف بشكل كبير كونه يستخدم الطور و المطال و الإستقطاب للحامل الضوئي وذلك لنقل المعلومات .

يستخدم الكشف المتماسك في أنظمة الاتصالات اللاسلكية، حيث أنه في الأنظمة اللاسلكية يتم ضبط مذبذب محلي للترددات الراديوية على (heterodyne) وهو تقنية معالجة إشارة تجمع بين إشارتين ذات تردد عالي F_1 و F_2 لإنتاج إشارة ذات تردد ميكروي (F_1-F_2) من خلال جهاز مزج الترددات الراديوية، بحيث يمكن استرداد معلومات السعة والطور الموجودة في حامل التردد اللاسلكي في معالج الإشارات الرقمية (DSP) .

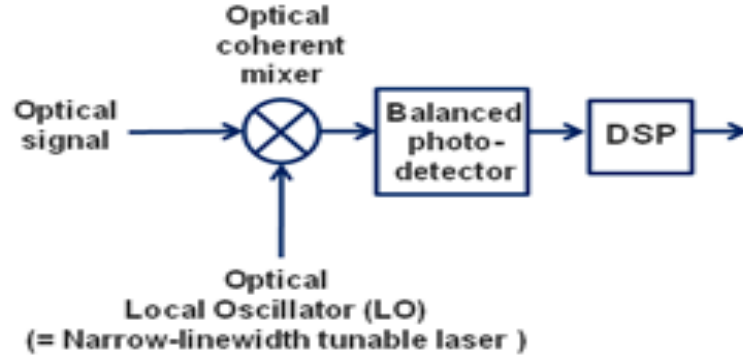
بالنسبة لأنظمة الاتصالات الضوئية المتماسكة فإن الليزر القابل للضبط ذو النطاق الضيق والذي يعمل بمثابة LO يتم ضبط تردده إلى (intradyn) مع تردد إشارة مستقبل من خلال مزج ضوئي متماسك، و بالتالي يستعيد كلاهما معلومات السعة والطور الموجودة في الناقل الضوئي ، وتعني كلمة "intradyn" أن فرق التردد بين المذبذب المحلي والحامل الضوئي المستقبل صغير و ضمن عرض مجال المستقبل، ولكن لا يجب أن يكون صفراً، وهذا يعني أن تردد وطور المهتز المحلي LO ليس من الضروري أن يتم التحكم فيهما بدقة قصوى، وبالتالي تجنب استخدام حلقة الطور المغلقة .

مزايا الكشف المتماسك :

تقدم تقنية الكشف المتماسك مزايا عديدة لأنظمة الاتصالات وهي:

- تحسن كبير في حساسية المتلقي.
- يمكن استخراج معلومات السعة والتردد والطور من الموجة الحاملة الضوئية، وبالتالي يمكن أن تحقق سعة قناة أعلى بكثير في نفس عرض المجال الترددي.
- يمكن لمعالج الإشارة الرقمية (DSP) أن يعوض تشتت وضع الاستقطاب والتشتت اللوني ويلغي الحاجة إلى معوضات التشتت الضوئي والمضخمات الضوئية المرتبطة بها، وهذا لا يوفر النفقات المالية الكبيرة فحسب بل يبسط أيضاً تصميم الشبكة الضوئية بشكل كبير .
- يمكن استخدام صيغ تعديل متقدمة مثل PDM QPSK و PDM 16-QAM مع أنظمة الاتصالات الضوئية WDM [25,31,34] .

الشكل (2-19) يوضح تقنية الكشف المتماسك في أنظمة الاتصالات الضوئية .



الشكل (19-2) تقنية الكشف المتماسك في أنظمة الاتصالات الضوئية [21]

2-3-2-1 - المهتز المحلي Local Oscillator:

كما هو موضح في الشكل 19-2، يتم إنشاء تردد متماسك محلياً في المستقبل باستخدام ليزر ضيق النطاق ، يسمى المذبذب المحلي (LO)، يتم دمج مع التردد الضوئي الوارد باستخدام مزج الحزمة ، وعادةً ما يكون مقرون ليفي عملياً. لإيضاح كيف يمكن لمثل هذا المزج أن يحسن أداء المستقبل ، تكتب الإشارة الضوئية باستخدام تدوين معقد مثل

$$E_s = A_s \exp[-i(\omega_0 t + \phi_s)], \quad (2.2)$$

حيث W_0 هو تردد الموجة الحاملة ، كما ان A_s هو السعة ، و ϕ_s هي الطور. يتم إعطاء المجال الضوئي المرتبط بالمذبذب المحلي بواسطة تعبير مشابه ،

$$E_{LO} = A_{LO} \exp[-i(\omega_{LO} t + \phi_{LO})], \quad (2.3)$$

حيث تمثل A_{LO} و W_{LO} و ϕ_{LO} سعة وتردد وطور المذبذب المحلي ، على التوالي. يتم استخدام الترميز القياسي لكل من E_s و E_{LO} بعد افتراض أن الحقلين مستقطبان بشكل متماثل. يعطى تابع القدرة الضوئية للكاشف الضوئي بواسطة $P = |E_s + E_{LO}|^2$ فيكون لدينا ،

$$P(t) = P_s + P_{LO} + 2\sqrt{P_s P_{LO}} \cos(\omega_{IF} t + \phi_s - \phi_{LO}), \quad (2.4)$$

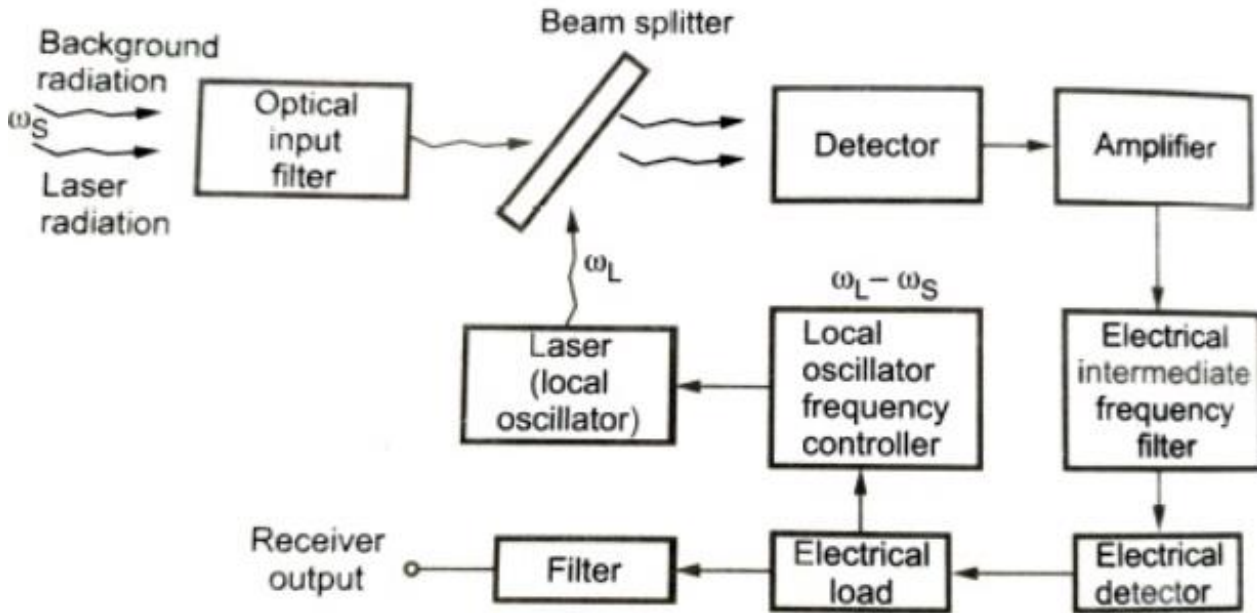
حيث :

$$P_s = A_s^2, \quad P_{LO} = A_{LO}^2, \quad \omega_{IF} = \omega_0 - \omega_{LO}.$$

عندما تكون ω_0 لا تساوي ω_{LO} ، تتم إزالة تشكيل الإشارة الضوئية على مرحلتين. يتم تحويل تردد الموجة الحاملة أولاً إلى تردد وسيط VIF (عادةً 0.1-5GHz). تتم معالجة إشارة التردد الراديوي الناتجة إلكترونياً لاستعادة تدفق البتات. ليس من الضروري دائماً استخدام تردد وسيط. في الواقع ، هناك طريقتان مختلفتان للكشف المتناسك ، اعتماداً على ما إذا كان ω_{IF} يساوي صفر. وهي معروفة بتقنيات كشف homodyne و heterodyne .

2-2-3-2 - الكشف المتغاير Heterodyne [48]:

في كشف Heterodyne ، يتم اختيار تردد المذبذب المحلي (ω_{LO} (LO) ليهتلف عن تردد الموجة الحاملة ω_0 بحيث يكون التردد المتوسط ω_{IF} في منطقة المايكرويف ($\omega_{IF} = 1\text{GHz}$). يوضح الشكل (20-2) مبدأ كشف heterodyne الأساسي .



الشكل (20-2) مبدأ كشف heterodyne الأساسي [48]

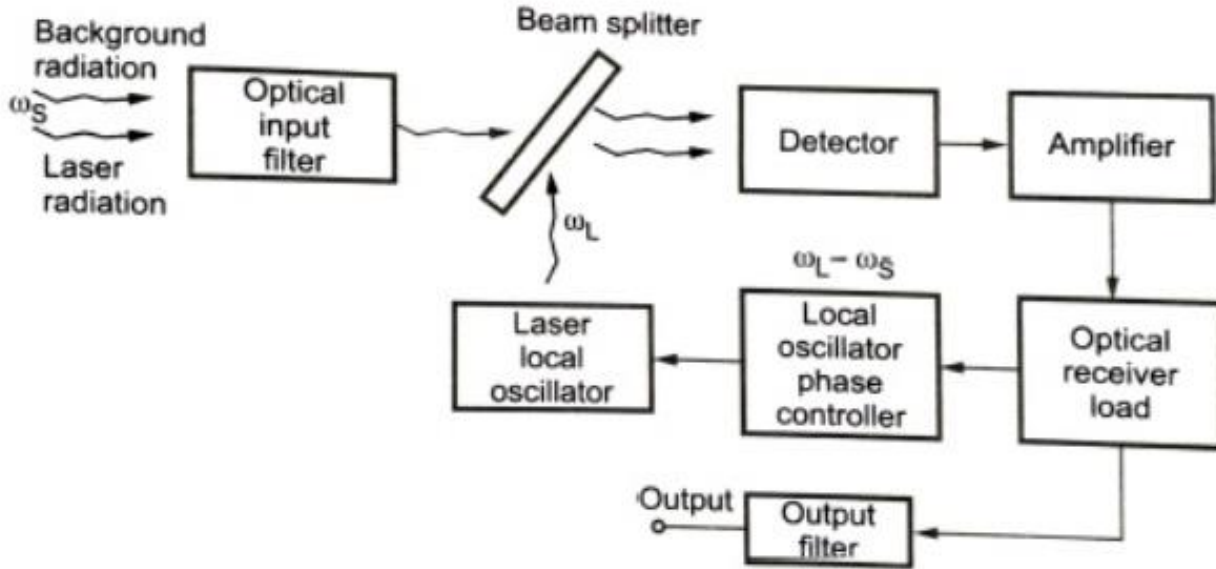
يمكن إرسال المعلومات من خلال تعديل السعة أو الطور أو التردد للموجة الحاملة الضوئية في كشف heterodyne.

يستخدم كشف heterodyne في بناء مقاييس سرعة دوبلر وأجهزة ضبط المدى بالليزر وكذلك في التحليل الطيفي .

2-3-2-3- الكشف المتجانس Homodyne [48] :

يطابق كشف Homodyne الضوئي طور الإشارة المرسله مع تلك الخاصة بطور إشارة المذبذب المحلي.

في تقنية كشف Homodyne ، يتم اختيار تردد ω_{LO} ليتطابق مع تردد الموجة الحاملة ω_0 بحيث تكون $\omega_{IF} = 0$ ، حيث يوضح الشكل (21-2) مبدأ كشف Homodyne الأساسي .



الشكل (21-2) مبدأ كشف Homodyne الأساسي [48]

من الناحية العملية ، من الصعب بناء مثل هذه المستقبلات ، لأن المهتز المحلي يجب أن تتمتع بنقاوة طيفية ممتازة بدون تقلبات في الاستطاعة. يتم خلط تردد الإشارات الضوئية الواردة مع المذبذب المحلي ، والذي يتم قفل تردده ومرحلته مع الموجات الحاملة للإشارة عبر PLL. ثم يتم تصفية الإشارة الكهربائية الناتجة. يتم بعد ذلك استعادة تسلسل النبضة إلى البيانات الأصلية بواسطة نظام فرعي للقرار.

يبين الجدول (1-2) الفرق الأساسي بين تقنيتي الكشف Homodyne و Heterodyne

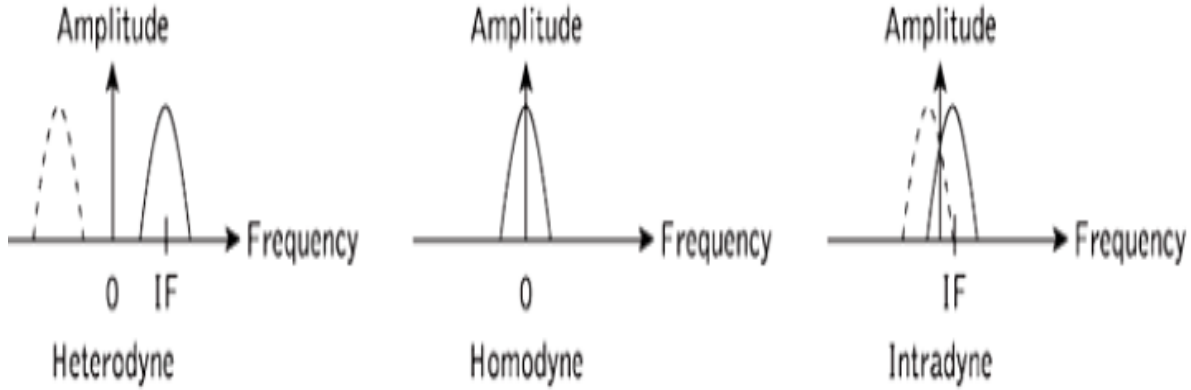
الجدول (1-2) الفرق بين كشف Homodyne و Heterodyne [الباحث]

كشف Homodyne	كشف Heterodyne
يكون الناقل وتردد المذبذب المحلي متساويين ، أي $\omega_{if} = 0$	تردد الإشارة وتردد المذبذب المحلي غير متساويين أي $\omega_{if} \neq 0$
حساسية أعلى	تتخفف الحساسية بمقدار 3 ديسيبل.
الدائرة معقدة.	أقل تعقيد
يتم الحصول على إشارة النطاق الأساسي (المعلومات) مباشرة.	مطلوب مفكك تعديل للحصول على إشارة النطاق الأساسي (المعلومات).

2-3-2-4 - كشف Intradyne [49]:

تعتبر تقنية Intradyne بديلة لتقنيتي heterodyne و homodyne الشائعتين .
في مستقبل Intradyne ، لا يتم تحويل الإشارة الواردة بدقة إلى النطاق الأساسي كما هو الحال في كشف homodyne ولكن يتم تحويلها إلى تردد أقل بكثير من معدل نقل البيانات.
ومن ثم يمكن إجراء الترشيح الإلكتروني باستخدام مرشح النطاق الأساسي الذي يكون أوسع قليلاً فقط من المرشح المستخدم في جهاز استقبال homodyne.
ومع ذلك ، فإن متطلبات التحكم التلقائي في التردد لليزر المذبذب المحلي مماثلة لتلك الخاصة بجهاز استقبال heterodyne.
لذلك يمكن تجنب استخدام حلقات الطور المغلقة PLL من خلال الكشف داخل المشبك نظراً لوجود تردد وسيط IF منخفض ولأن تردد IF ليس صفرًا كما هو الحال في مستقبلات homodyne.

يوضح الشكل (22-2) مقارنة طيفية لكشف Intradyne مع كاشفي heterodyne و homodyne .

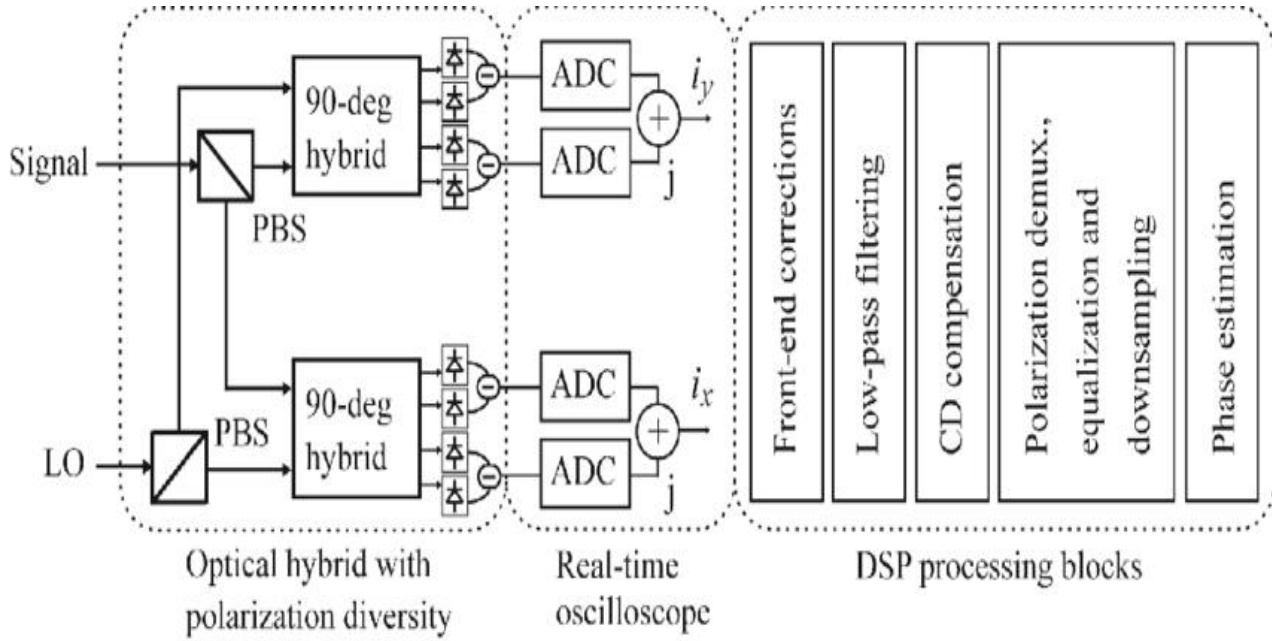


الشكل (22-2) مقارنة طيفية مع كشف heterodyne و homodyne [49]

يمكن ملاحظة أن طيف intradyne يتم تخفيضه لإنتاج تردد وسيط بالقرب من النطاق الأساسي بحيث يقدم ليزر المذبذب المحلي تقريباً نفس التردد الضوئي للإشارة الواردة.

2-3-3- معالجة الإشارة الرقمية DSP [50]:

في الإرسال الضوئي الرقمي المتماسك ، يقوم DSP بالتعديل وفك التعديل وتعويض تشوهات الموجة حيث يقوم بتعويض التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب. يوضح الشكل (23-2). التكوين الوظيفي لوحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP .



الشكل (2-23) التكوين الوظيفي لوحدة معالجة الإشارة الرقمية DSP [50]

يتم بداية في القسم الخاص بالإستقبال المتماسك فصل الإشارة المستقبلة إلى إشارتين باستقطابين مختلفين عبر مجزء استقطاب PBS ، يتم مزج هاتين الإشارتين مع إشارتين مولدتين بواسطة ليزر محلي (يعمل بمثابة Local Oscillator) ، يتم المزج بواسطة مازجي 90 degree Optical Hybrid ويكون كل مازج معنى بأحد الإستقطابات و على خرج كل مازج 4 إشارات كل إشارتين مختلفتين عن الإشارتين الأخرتين بفرق طور 90 درجة ، و تدخل كل إشارتين على كواشف PIN photodiode ، يتم بعدها جمعها بإشارة واحدة و إدخالها إلى محول تماثلي إلى رقمي ADC، فنحصل على أربع إشارات كل إشارتين باستقطاب مختلف وبين كل إشارة و أخرى فرق طور 90 درجة .

تدخل هذه الإشارات على معوض أولي لتشوهات الإشارة. يتبع ذلك ترشيح تمرير منخفض (مرشح Bessel من الدرجة الخامسة) لإزالة الضجيج ، يتم بعدها تعويض التشتت اللوني في مجال التردد ، بعد ذلك يتم إزالة تعدد الاستقطاب ، ثم تسوية الإشارة ، و من ثم الاختزال إلى عينة واحدة لكل رمز ، وأخيراً يتم تقدير الطور وتعويض تقلبات الطور .

2-4- التحديات في أنظمة الاتصالات بالألياف الضوئية :

2-4-1- تأثيرات التخماد [41]:

تعاني الأمواج الكهرومغناطيسية من الضياعات عندما تسافر على طول المسار الضوئي ، حيث أن شدة الضوء تتناقص عند عبورها ضمن الليف الضوئي .

يتم قياس الضياعات بوحدة dB/Km ويمكن تعويض الضياعات باستخدام المضخمات على مسافات منتظمة. يمكن استخدام المضخمات الإلكترونية إلا أنها تحتاج إلى التحويل من الإشارة الضوئية إلى الإشارة الكهربائية و بعد التضخيم تحتاج أيضاً إلى تحويل معاكس مما يؤدي إلى تكلفة إضافية في أنظمة الاتصالات الضوئية، لذلك يفضل استخدام المضخمات الضوئية في أنظمة الاتصالات الضوئية .

يتم استخدام مضخم Erbium Doped Fiber amplifier (EDFA) بشكل واسع على مسافات منتظمة على طول المسار الضوئي لتعويض الضياعات و رفع مستوى شدة الضوء في الليف .

تقدم الألياف الضوئية حداً أدنى من الضياعات بالقرب من الطول الموجي $1.55 \mu\text{m}$ ، بالإضافة إلى إمكانية استخدام عرض مجال كبير ($>10\text{THz}$) قرب هذا الطول الموجي .

2-4-2- التأثيرات اللاخطية :

تحدث التأثيرات اللاخطية في الاتصالات الضوئية نتيجة لتفاعل الضوء المنتشر مع الألياف الضوئية. تكون التأثيرات اللاخطية في الاتصال الضوئي ضعيفة عند الطاقة المنخفضة وتكون أقوى عندما تصل نبضة الضوء إلى قيمة عتبة معينة، والتي يمكن أن تحدث عند زيادة الطاقة، وتعتمد هذه التأثيرات أيضاً على مسافة الإرسال أيضاً وتزداد بزيادة المسافة.

2-4-2-1- التشتت اللوني :

التشتت هو اتساع النبضة الضوئية بسبب معامل الإنكسار المعتمد على الطول الموجي . حيث أنه عندما ينتشر الضوء عبر الليف الضوئي فإن تأثيرات التشتت تنتج تداخل الرمز الداخلي (ISI). يرجع التشتت اللوني بشكل أساسي إلى العرض الطيفي المحدود للمصدر الضوئي

يولد المصدر الضوئي مركبات غير مرغوب فيها جنبًا إلى جنب مع الطول الموجي المطلوب بسبب عرضه الطيفي المحدود

تنتقل مركبات الطول الموجي المختلفة بسرعات مختلفة بسبب معامل الانكسار المعتمد على الطول الموجي n عندما يقطع الضوء مسافة d في الألياف الضوئية ، ونظرًا لاختلاف سرعة مركبات الطول الموجي المختلفة ، تصبح النبض الضوئية واسعة وبعد مسافة ما تتداخل نبضتان متتاليتان مع بعضهما البعض، ويؤدي هذا التداخل إلى قراءة خاطئة في طرف المستقبل .

يتم استخدام تقنيات مختلفة لتعويض التشتت اللوني مثل الألياف المعوضة للتشتت (DCF) Dispersion Compensating Fiber ، والتعويض المسبق والتعويض اللاحق. يرجع التشتت إلى اختلاف السرعة لكل مكون من مكونات الطول الموجي الناتجة عن المصدر. في التعويض اللاحق ، يتم تأخير الطول الموجي عالي السرعة ليتوافق مع الطول الموجي منخفض السرعة في طرف المستقبل . أما في التعويض المسبق ، يتم تقليل العرض الطيفي للمصدر. حيث سمي بالتعويض المسبق لأنه يتم اتخاذ الإجراء قبل الإرسال.

يتم الحصول على الصيغة التحليلية لتقدير مدى اتساع النبضة في الألياف الضوئية بعد افتراضات معينة. حيث يتم مقارنة التنبؤ التحليلي مع الحساب الذي تم الحصول عليه رقميًا لعرض النبضة .

يعتبر التشتت اللوني من أكبر التحديات التي تؤثر على أداء نظام الاتصالات الضوئي .

يكون التشتت اللوني بالقرب من الطول الموجي 1300nm بحدوده الدنيا ، إلا أنه أي اختلاف طفيف على الطول الموجي يؤثر على مقدار التشتت اللوني في الألياف الضوئية .

2-2-4-2- تشتت نمط الاستقطاب :

قد تحدث عدة أمور على امتداد الألياف الضوئية مثل القطر غير الدائري أو الشوائب المضمنة أو بسبب الإجهاد البيئي الذي يعمل كعقبات أمام انتشار النبضات الضوئية في الألياف. تسبب هذه العوائق تباينًا في سرعات المجموعة للاستقطابات المختلفة للنبضات الضوئية. ينتج عن ذلك تشتت النبضة الضوئية ، والتي تُعرف باسم تشتت وضع الاستقطاب (PMD) polarization mode dispersion . يتم تعريف تأخير المجموعة التفاضلية (DGD) Differential group delay على أنه :

$$\Delta\tau = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (2.5)$$

يرتبط تأخير المجموعة التفاضلية (DGD) بالجذر التربيعي لطول الألياف الضوئية L

تقاس DPDM بوحدة ps/√km وتتراوح بين 0.1-1 ps/√km

يظهر هذا النوع من التشتت من أجل النظم التي تعمل وفق معدلات إرسال أعلى من 10Gbps ومن أجل الألياف التي تعمل على أطوال موجية قريبة من الطول الموجي الصفري ، وهو الطول الموجي الذي من أجله تنتشر النبضة بدون تشتت ضمن الليف .

2-4-3- Self-Phase Modulation (SPM) : التعديل الطوري الذاتي

تسبب شدة النبضة الضوئية تغيرات طورية تؤدي إلى تعديل الطور ، وهو ما يسمى التعديل الطوري الذاتي SPM. حيث ينتج تأثير كبير تغييراً في معامل الانكسار مع الشدة أثناء انتشار النبضة في الألياف الضوئية [26,32]. لذا ، فإن معامل الانكسار هو دالة لشدة الضوء I ومعطى بالعلاقة :

$$n(I) = n_1 + n_{n1} \cdot I \quad (2.6) \quad [26]$$

حيث ، n_1 و n_{n1} عبارة عن معامل الانكسار الخطي ومعامل الانكسار غير الخطي من الدرجة الثانية للوسط على التوالي .

يعطى الطور اللاخطي في SPM بواسطة العلاقة :

$$\phi_{NL} = \gamma P L_{eff} \quad (2.7) \quad [26]$$

2-4-4- Cross Phase Modulation (CPM) : التعديل الطوري المتبادل

يحدث التعديل الطوري المتبادل بسبب انتشار الإشارات الضوئية المتعددة في وقت واحد في الألياف الضوئية. حيث يحدث تعديل الطور غير الخطي في CPM بسبب النبضات الضوئية الأخرى المنتشرة. يؤدي CPM إلى ظاهرة cross talk وبالتالي يحد من عدد القنوات التي يتم إرسالها في نفس الوقت عبر شبكة WDM. يحول CPM تذبذب القدرة في قناة ذات طول موجي ما إلى طور في قناة أخرى ذات طول موجي آخر . تعطى المرحلة اللاخطية من خلال العلاقة [32] :

$$\phi_{NL} = 2\gamma P_{other} L_{eff} \quad (2.8) \quad [32]$$

حيث : P_{other} مقدار طاقة النبضة المسببة للتداخل ، L_{eff} الطول الفعال

يتم التقليل من أثر XPM عن طريق زيادة التباعد بين قنوات الإتصال .

2-4-2-5- مزج الأمواج الأربعة (FWM) Four Wave Mixing:

يؤدي انتقال المجال الضوئي المتعدد عبر الألياف إلى توليد مجالات ضوئية جديدة بسبب التفاعل الذي يسبب اختلاطاً بأربعة موجات. حيث أنه إذا كانت ثلاثة مجالات ضوئية تنتقل في الألياف ، فسيتم إعطاء التردد المتولد للحقل الجديد بواسطة العلاقة :

$$\omega_4 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3 \quad (2.9)$$

حيث $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ الترددات للإشارات الضوئية الفعلية

يعتمد FWM على تباعد القنوات وتشتت الألياف مما يؤدي إلى محدودية بعدد القنوات المرسل في نفس الوقت [40].

يؤثر تشتت اللوني للألياف والآثار غير الخطية على انتشار الموجات الضوئية عبر وسط الألياف ، مما يحد من أداء نظام الشبكات الضوئية ، يتم حل المشكلات المتعلقة بالتشتت اللوني باستخدام الألياف المزاحة بالتشتت (DSF) عند الطول الموجي 1550nm. إلا أن استخدام ألياف DSF يؤدي إلى زيادة تأثير خلط الموجات الأربعة (FWM) حيث أنه تكون تأثيرات FWM كبيرة في الأنظمة الضوئية WDM ذات الإرسال الطويل المصممة باستخدام DSF. يتم تقديم تقنية قائمة على تخصيص تردد القناة لتقليل آثار FWM. يمكن اعتبار الفصل غير المتكافئ بين القنوات تقنية مناسبة حيث لا يقع أي خلط بسبب FWM على قناة الإرسال المرغوبة. ولكن يتم تنفيذ هذه التقنية على حساب عرض المجال الترددي للنظام.

2-4-2-6- تبعثر بريلوين المحفز (SBS) Stimulated Brillouin Scattering [27]:

يحدث ضياع في طاقة الموجة الحاملة نتيجة تبعثر بريلوين ، و يكون الإنزياح الترددي لتبعثر بريلوين يساوي 11GHz ، يرتبط تأثير تبعثر brillouin المحفز ارتباطاً مباشراً بطاقة المرسل ويكون مستقلاً عن عدد القنوات المرسل. يؤثر SBS على أداء أنظمة الإرسال المتعدد غير الفعال التي تحمل قنوات قليلة مقارنة بالأنظمة التي تحمل العديد من القنوات .

يحد SBS من القدرة الضوئية لجانب المرسل والتي تنتشر في ألياف أحادية النمط للأنظمة الضوئية بعيدة المدى.

إن تأثير تبعثر بريليون المحفز في الألياف الضوئية يؤدي إلى تدهور أداء نظام الاتصالات الضوئية ذات ساعات النقل من مرتبة الـ Gb. حيث أن التقلب الشديد في الإشارة الضوئية بسبب SBS يقلل نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR ، وبالتالي تزيد نسبة معدل خطأ البت BER للنظام الضوئي [27] .

2-4-2-7- تبعثر رامان المحفز (SRS): Stimulated Raman Scattering

يتم استخدام SRS كمكبر إذا تم اختيار الطول الموجي للمصدر الضوئي بشكل مناسب. ينتج عن ربح Raman تداخل في نظام WDM والذي يمكن تقليله عن طريق تقليل طاقة القناة مما يحد أيضًا من عدد القنوات.

ونظرًا لأن التأثيرات غير الخطية مثل SPM و XPM تعتمد على معدل البيانات ، فإن هذه التأثيرات تصبح شديدة مع زيادة معدل البيانات .

يجب زيادة تباعد القنوات للتخلص من أثر FWM، إلا أنه في نظام WDM لزيادة عدد القنوات يجب تقليل تباعد القنوات، مما يزيد أثر FWM في تلك الأنظمة.

في شبكة البيانات الحديثة حيث نهدف إلى تحقيق معدل بيانات عالي يجب تقييم التأثيرات غير الخطية للتعويض أو لإيجاد الحل، حيث يمكننا التغلب على التأثيرات اللاخطية للاستفادة من عرض المجال الترددي الضوئي.

2-5- تقنيات تعويض التشتت واللاخطية في أنظمة الاتصالات الضوئية :

2-5-1- الليف المعوض للتشتت DCF Dispersion Compensating Fiber :

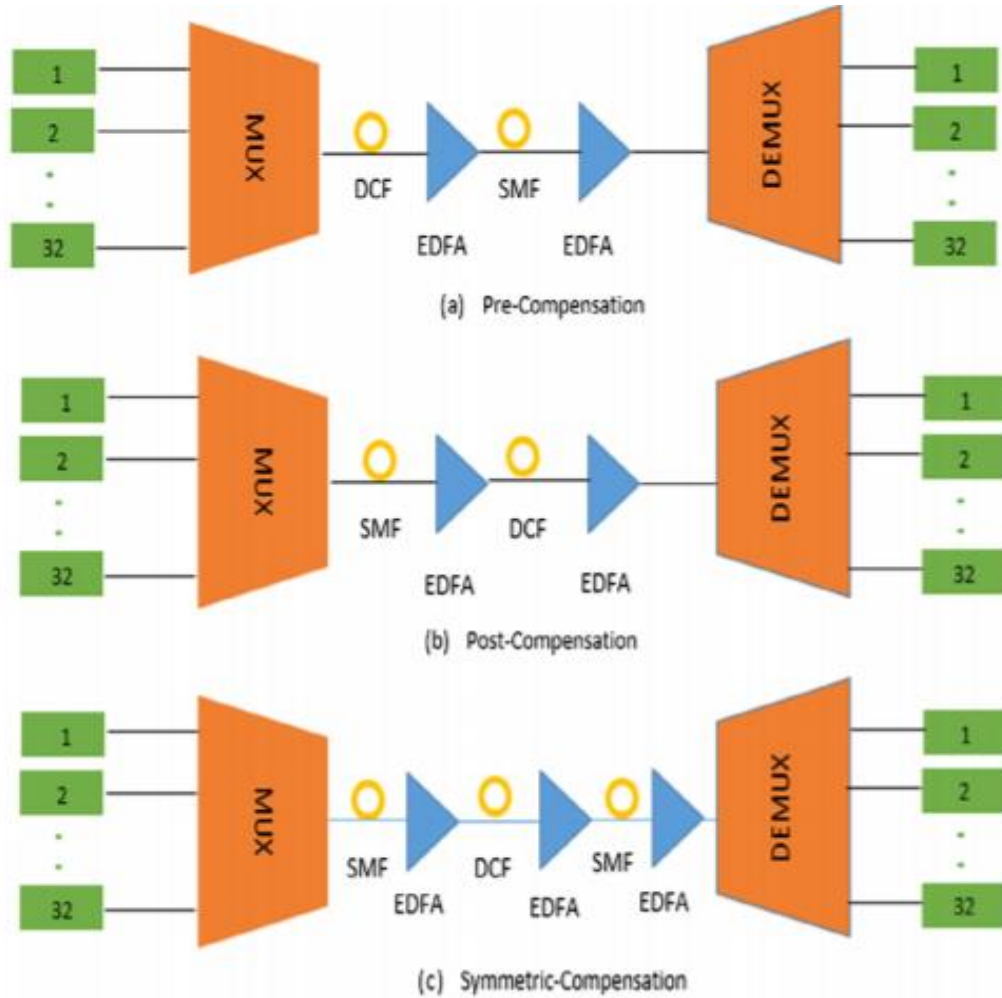
يعد التشتت أحد العوامل التي تؤدي إلى تدهور أداء النظام الضوئي WDM بعيد المدى . تمثل تقنية DCF في الألياف المعوضة للتشتت إحدى طرق تعويض التشتت لتحسين أداء النظام الضوئي. تمتلك هذه الألياف معامل تشتت سلبي حوالي -70 to -90 ps/nm.km لتعويض التشتت الإيجابي لألياف SMF القياسية . [33] حيث يتم استخدام تقنية DCF من أجل ألياف SMF .

$$D_{SMF} \times L_{SMF} = -D_{DCF} \times L_{DCF} \quad (2.10)$$

حيث D و L هما تشتت وطول كل مقطع من الليف الضوئي على التوالي .

استنادًا إلى موقع DCF في الوصلة الضوئية ، يتم استخدام طرق التعويض المسبق أو اللاحق أو المختلط لتعويض التشتت . [22]

في التعويض المسبق: يقع DCF قبل ليف ال SMF لتعويض التشتت الإيجابي ل SMF في نظام الاتصال الضوئي. يتم في التعويض اللاحق استخدام ألياف التشتت السالب DCF بعد SMF لتعويض تشتت الوصلة. في التعويض المختلط : يتم استخدام كل من التعويض المسبق والتعويض اللاحق في نفس الوصلة لتعويض التشتت . يوضح الشكل (2-24) مخططات تعويض DCF اللاحق والمسبق والمختلط .



الشكل (2-24) مخططات تعويض DCF اللاحق والمسبق والمختلط [37].

مزايا تقنية الليف المعوض للتشتت DCF:

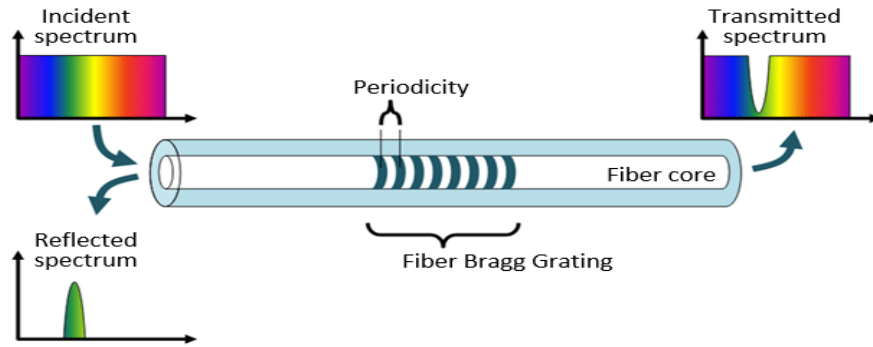
- تقنية لتعويض التشتت مضمنة وبسيطة
- يعتبر تعويض التشتت جيد لطول موجي مرجعي

مساوئ تقنية الليف المعوض للتشتت DCF:

- فقدان دخل أعلى
- أقل فعالية عند قدرة نقل عالية
- تعزز اللاخطية

2-5-2- تعويض التشتت باستخدام مشبك براغ Fiber Bragg grating :

يتم تعويض التشتت أيضًا بواسطة مشبك براغ Bragg. عندما تنتقل النبضة المشتتة على طول FBG ، تنعكس أطوال موجية مختلفة من مواضع مختلفة في المشبك. يختلف طول المسار باختلاف الأطوال الموجية مما يؤدي إلى تقليل تشتت نظام الاتصال الضوئي. يتم وضع FBG في خط مع الألياف الضوئية في الوصلة الضوئية. يوضح الشكل (2-25) تقنية تعويض التشتت باستخدام FBG.



الشكل (2-25) تقنية تعويض التشتت باستخدام FBG [47]

مزايا هذه التقنية (FBG):

- مدمجة
- غير فعالة (Passive)
- خطية

مساوئ هذه التقنية (FBG) :

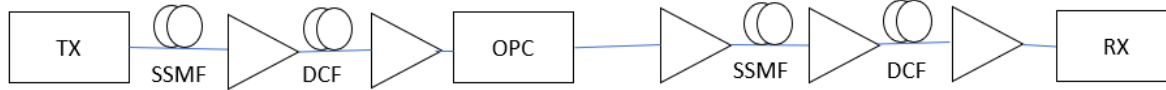
- من الصعب تصميم وتصنيع الهياكل الشبكية المعقدة
- نطاق ضيق من الطول الموجي الضوئي

2-5-3- تقنية اقتران الطور الضوئي لتعويض التشتت optical phase conjugation :

يتم تعويض التشتت اللوني وتأثيرات كير اللاخطية في آن واحد بواسطة تقنية اقتران الطور الضوئي. حيث تتم عملية الانعكاس الطيفي باستخدام اقتران الطور الضوئي وهي تقنية واعدة للتعويض ، يتم استخدام تقنية OPC بطريقتين مختلفتين في الوصلة الضوئية .

• اقتران الطور الضوئي المضمن Inline optical phase conjugation :

يتم تصميم وصلة OPC المضمن عن طريق إضافة وحدة OPC في وصلة الإرسال الضوئية. في مثل هذه الوصلة ، يتم تحقيق تعويض التشتت بواسطة وحدات DCF وتعويض التأثيرات غير الخطية بواسطة وحدة OPC.



الشكل (26-2) Inline-OPC [36]

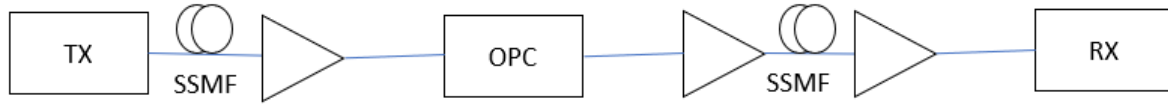
يتم وضع OPC في وصلة الإرسال الضوئية لإقتران الإشارة وبالتالي عكس التشوهات في الطور الناتجة عن الآثار غير الخطية. نتيجة لذلك ، يتم تعويض تشوهات الطور الحاصلة قبل الاقتران والتي حدثت بسبب تأثيرات Kerr عن طريق تشوهات الطور بعد الاقتران [36] .

• تقنية اقتران الطور الضوئي Mid-Link (Mid-link optical phase conjugation) :

يقع OPC في منتصف الوصلة الضوئية. يتم اقتران طور الإشارة في منتصف الوصلة من خلال OPC في نظام الاتصال الضوئي. أثناء انتقال الإشارة إلى الوصلة الوسطى ، يتم تشويهها بشدة بسبب التشتت اللوني والتأثيرات غير الخطية . يتم تعويض التشوه المتراكم في النصف الأول من خلال التشويه في النصف الثاني بعد OPC بسبب التأثيرات العكسية . يحدث التعويض الكامل للتأثيرات غير الخطية عندما تكون التأثيرات غير الخطية قبل وبعد OPC متطابقة .

إن استخدام تقنية Mid-Link OPC يمكن أن يعوض الضعف الناتج عن تأثير Kerr. يتسبب تأثير كير في حدوث تغيير في معامل الانكسار للألياف الضوئية استجابةً لمجال كهربائي. في أنظمة الإتصالات الضوئية ، يؤدي تأثير كير إلى حدوث تشوهات في الطور ويمكن أن يقلل بشكل كبير من أداء النظام. من خلال

تعويض تأثير Kerr ، يتم تمديد مسافة الإرسال الممكنة بشكل كبير وتقليل كمية مكررات OEO المطلوبة. إضافة إلى أنه يمكن استخدام OPC للتعويض عن التشتت اللوني. وبالتالي ، لا يلزم وجود وحدات DCF مضمنة . يظهر الشكل (27-2) تقنية Mid-Line OPC .



الشكل (27-2) تقنية Mid-Link OPC [36]

الحل الأكثر فعالية من حيث التكلفة هو استخدام Mid-Link OPC. في هذا التكوين ، يتم استخدام OPC لكل من تعويض التشتت اللوني وتعويض تأثير Kerr. ومن ثم لا يتم استخدام وحدات DCF مضمنة. بدلاً من ذلك [23,29]، يتراكم التشتت على طول خط النقل ويتم تعويضه عن طريق وضع Mid-Link OPC. يمكن التعبير عن معادلة شرودنجر غير الخطية لانتشار الإشارة في وسط غير خطي وذو فقد ومشتت كما يلي :

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma|A|^2A \quad (2.11)$$

حيث تشير z إلى مسافة الانتشار بالكيلومتر ، تشير A إلى السعة المعقدة للإشارة ، γ المعامل اللاخطي (تأثير كير) يقاس بـ $1/(W*km)$ ، α تدل على معامل التخميد بالنبيير لكل كيلومتر ، تشتت سرعة المجموعة (GVD) β_2 يقاس بـ ps^2/nm و منحدر التشتت β_3 يقاس بـ ps^3 / nm .

بعد OPC ، يعطى الإقتران المعقد للإشارة بالشكل :

$$\frac{\partial A^*}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A^* + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A^*}{\partial T^3} - i\gamma|A^*|^2A^* \quad (2.12)$$

مزايا هذه التقنية (OPC):

- تعويض التشتت والتأثيرات اللاخطية على حد سواء

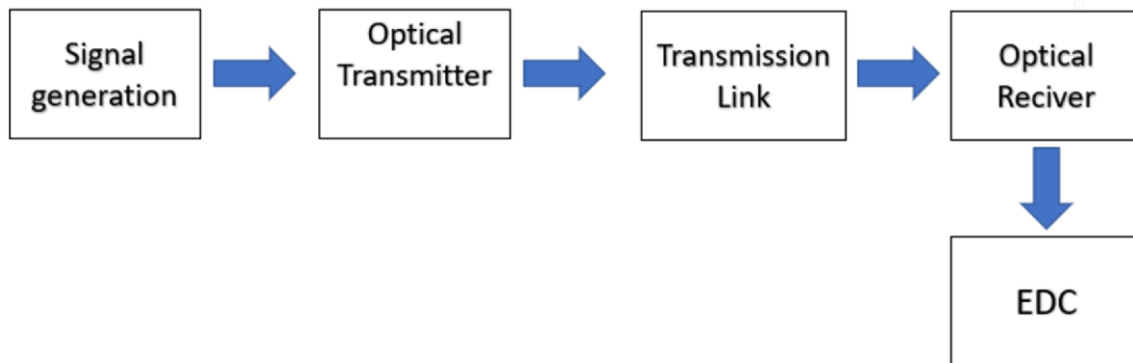
مساوئ هذه التقنية (OPC) :

- تتطلب خصائص ألياف متناظرة وتوزيع طاقة متماثل عبر الوصلة الضوئية
- أقل مرونة

2-5-4- معوض التشتت الإلكتروني :

يمكن أيضًا إجراء تعويض التشتت عند الطرف المستقبل لنظام الاتصال الضوئي من خلال المعادل الكهربائي. يعتبر تعويض التشتت الإلكتروني (EDC) تقنية جيدة لتعويض التشتت اللوني في أنظمة الاتصالات الضوئية. يمكن استخدامه للتخفيف من تأثير تشتت PMD

يوضح الشكل (2-28) تعويض التشتت في النظام الضوئي باستخدام المعادل EDC المستخدم في طرف المستقبل.



الشكل (2-28) تعويض التشتت في النظام الضوئي باستخدام المعادل EDC المستخدم في طرف المستقبل
[الباحث]

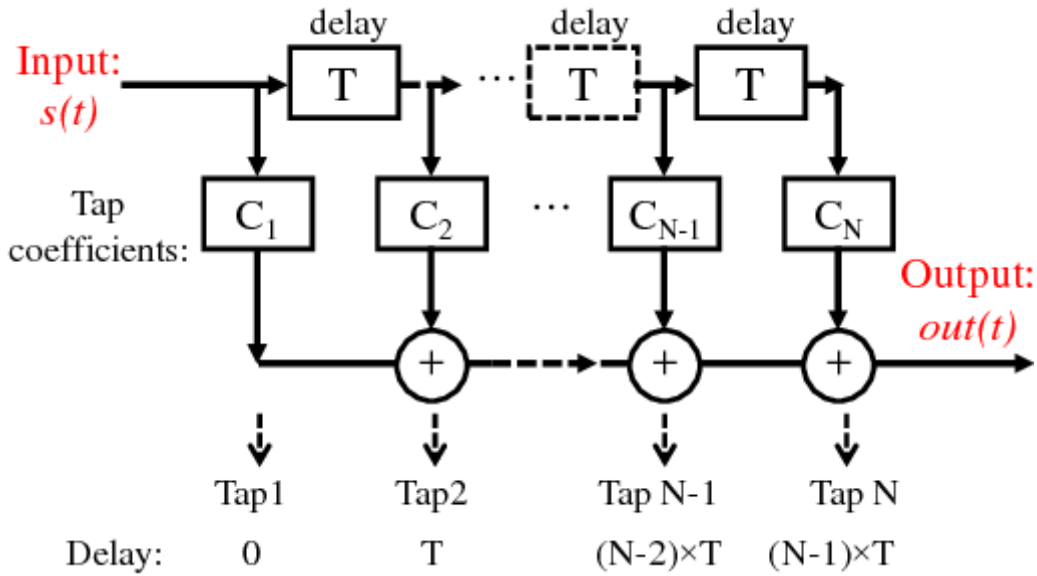
كما هو معروف يوجد تشويه خطي على المجال الضوئي. معادلات التغذية الراجعة للقرار (DFE) ومعادل التغذية الأمامي (FFE) هما بنيتان أساسيتان تستخدمان لتعويض هذا التشتت. تتمثل إحدى عيوب استخدام EDC في انخفاض سرعة الاتصال الضوئي وسرعة التغيير التماثلي إلى الرقمي .

2-5-4-1- معادل التغذية الراجعة للقرار ومعادل التغذية الأمامي (FFE-DFE) :

في معادل التغذية الأمامي ، يتم إنتاج المخرجات من خلال جمع القيم الحالية مع القيم السابقة المرجحة كما هو موضح في الشكل (2-29) . بعد أخذ عينات من خرج المعادل وفق معدل الرمز ، يتم تطبيقه على جهاز القرار ، إذا كانت التأخيرات وأرباح الخرج Tap ذات طبيعة تناظرية. يتم تخزين العينات في سجل الإزاحة للتنفيذ في المجال الرقمي. يُشار إلى خرج المعادل بالعلاقة (2.13) :

$$\hat{d}_k = \sum_{n=-N_1}^{N_2} C_n^* y_{k-n} \quad (2.13)$$

حيث C_n^* تمثل معاملات المرشح المعقدة أو أوزان ال Tap ، $\hat{d}_k$ هو خرج المعادل و y_k هي إشارة الدخل المستقبلية.

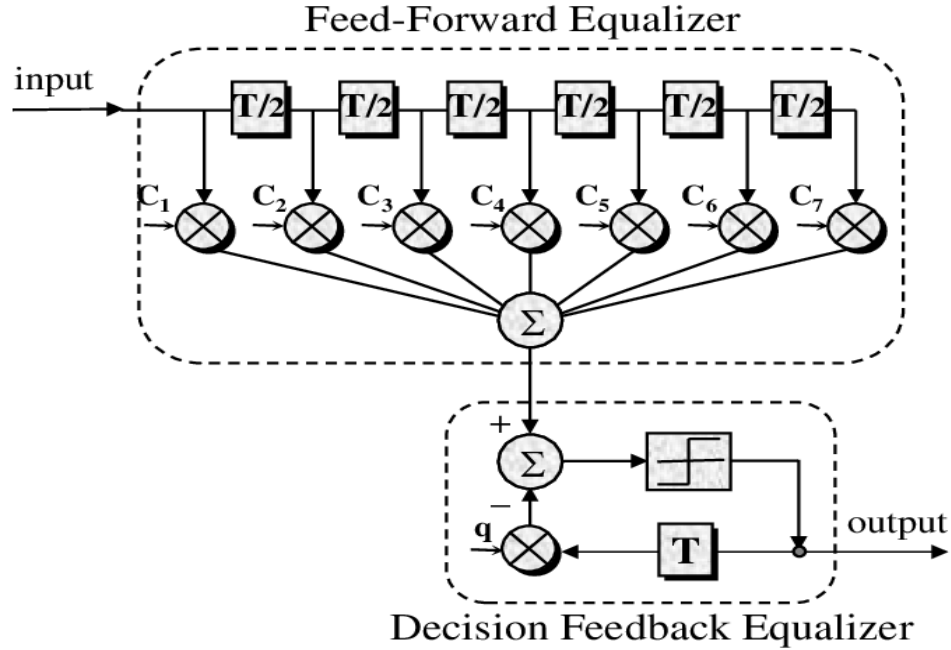


الشكل (2-29) المخطط الصندوقي لمعادل FFE [38]

يتم توقع التداخل بين الرموز (ISI) على الرموز المستقبلية بعد اكتشاف المعلومات. يتم طرحه من الرموز اللاحقة قبل الكشف. يتكون DFE من مرشح التغذية الأمامية (FFE) ومرشح التغذية الراجعة كما هو موضح في الشكل (2-30) . تقوم القرارات المتعلقة بخرج الكاشف حزمة الألياف FBF. يتم ضبط معاملات FBF على أساس الرموز المكتشفة سابقاً مما يؤدي إلى إلغاء ISI من الرموز المكتشفة حالياً. ناتج هذا المعادل قبل اتخاذ القرار هو :

$$\hat{d}_k = \sum_{n=-N_1}^{N_2} C_n^* y_{k-n} + \sum_{i=1}^{N_3} F_i d_{k-i} \quad (2.14)$$

حيث C_n^* تمثل معاملات المرشح المعقدة أو أوزان ال Tap، $\hat{d}_k$ هو خرج المعادل و y_k هي إشارة الدخل المستقبلية. F_i هو كسب ال tap للمرشح الراجع و d_i هو القرار السابق الذي تم اتخاذه بشأن الإشارة المكتشفة [35].



الشكل (30-2) معادل (FFE-DFE) [39]

مزايا هذه التقنية (FFE-DFE):

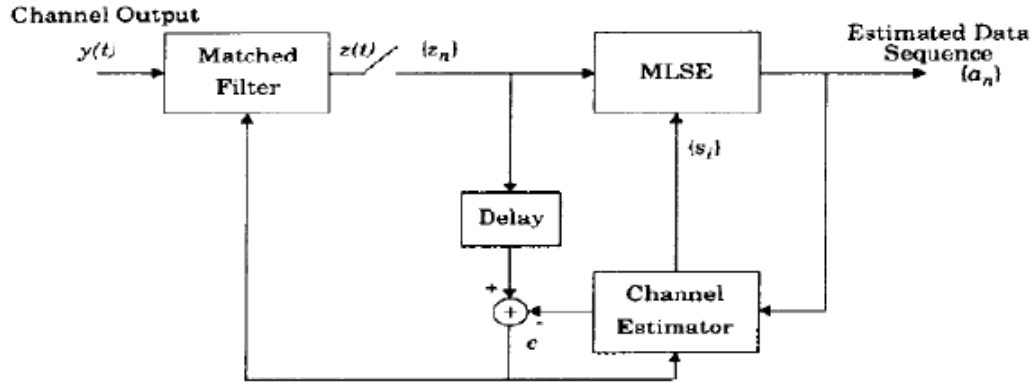
- يتم تعويض التشننت اللوني المتبقي بشكل فعال
- تعويض تشننت PMD
- بسيطة نسبياً وسهلة التنفيذ

مساوئ هذه التقنية (FFE-DFE):

- أداء النظام يكون محدود بالضجيج بسبب جزء FFE وبانتشار الخطأ بسبب جزء القرار
- لا يمكن التخفيف من عدم خطية الألياف

Maximum Likelihood Sequence -2-4-5-2 مقدر تسلسل الاحتمالية القصوى : Estimator (MLSE)

يتم تقليل احتمالية أخطاء التسلسل بواسطة MLSE كما هو موضح في الشكل (2-31) يتكون من خوارزمية Viterbi متبوعة بفلتر المطابقة. يحدد MLSE التسلسل الأكثر احتمالاً مما يؤدي إلى الحد الأدنى من الخطأ. يتم فحص تسلسل البيانات الممكنة بواسطة MLSE ويختار تسلسل البيانات ذات الاحتمال الأقصى كخرج.



الشكل (2-31) المخطط الصندوقي لمعادل MLSE [40]

يتم فحص تسلسل البيانات الممكنة بواسطة MLSE ويختار تسلسل البيانات مع أقصى احتمال كإخراج لتقليل BER .

مزايا هذه التقنية (MLSE):

- تحسن بشكل كبير من خريطة تسامح التشتت.
- تخفف جزئياً من تأثيرات الألياف اللاخطية

مساوئ هذه التقنية (MLSE):

- زيادة OSNR بسبب التشتت تقرر مدى التعقيد .
- لا يمكن تعويض التأثيرات اللاخطية بالكامل .

2-6- خلاصة :

تعتبر التقنيات سابقة الذكر ، تقنيات جيدة لتعويض التشتت اللوني و اللاخطية في أنظمة الإتصالات الضوئية إلا أنها كانت تعاني دائماً من عدم إمكانية الحفاظ على مستوى جيد من الأداء عند معدلات نقل عالية و مسافات طويلة وطاقة نقل عالية أو أنها تتطلب بنية معقدة و شروط غير ممكن تحقيقها عملياً .

وفي هذا السياق يعتبر الكشف المتماسك مع معالجة الإشارة الرقمية (DSP) في طرف المستقبل حلاً واعدًا في هذه الحالة لأنظمة الاتصالات الضوئية متعددة الحوامل DWDM/ WDM. تقدم هذه التقنية تحمل عاليًا لضجيج طور الموجة الحاملة وتؤدي إلى تعويض أفضل للاخطية ، يتم أيضًا تعويض التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب بواسطة DSP ، يتم أيضًا تحسين الكفاءة الطيفية باستخدام صيغ التعديل متعددة المستويات PDM QPSK, PDM 16-QAM .

وبالتالي فإن تطبيق تقنية الكشف متماسك مع استخدام DSP، والتي تتيح إمكانية استخدام صيغ التعديل متعددة المستويات، يمكن أن يؤدي إلى تحسين أداء أنظمة الاتصالات الضوئية WDM و DWDM، وتقديم أنظمة ذات معدلات نقل عالية و بعيدة المدى وذات كفاءة طيفية عالية، وسيتم تقييم أداء الأنظمة بناءً على معدل النقل و الفعالية الطيفية المحققين، بالإضافة إلى المعاملات Q-factor و bit error rate (BER) .

الفصل الثالث

تصميم وتنفيذ نظام اتصالات ضوئي DWDM باستخدام تقنية التعديل DP-QPSK

Design and implementation of a DWDM DP-QPSK system

سيتم في هذا الفصل بداية محاكاة واختبار النتائج لأحد الدراسات السابقة [56] من أجل اختبار أداة المحاكاة و التأكد من تطابق أو تقارب النتائج العملية مع النتائج المقدمة بالدراسة ، حيث تم اختيار الدراسة التي تستخدم تقنية التعديل بإزاحة الطور المتعامد التفاضلي ذو الاستقطاب المتماثل CP-DQPSK في نظام DWDM كونها أكثر الدراسات قرباً للبحث الذي يتم العمل عليه .

سيتم بعدها تصميم وتنفيذ نظام اتصالات ضوئي باستخدام التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية الكثيف باستخدام التعديل بإزاحة الطور الرباعي DWDM QPSK، والذي يتيح فعالية طيفية عالية وإمكانية الإرسال بمعدلات نقل عالية ، وسيتم تطبيق الكشف المتماثل مع معالجة الإشارة الرقمية على النظام المذكور، حيث تتيح هذه التقنيات تحملاً عالياً لضجيج طور الموجة الحاملة وتؤدي إلى تعويض أفضل للملاحظة ، بالإضافة إلى تعويض التشوهات اللونية وتشوهات نمط الاستقطاب . وستتم المحاكاة في بيئة Optisystem 17 و سيتم اختبار النتائج و تقييمها بناءً على الفعالية الطيفية وسعة الإرسال المحققين بالإضافة إلى المعاملات Q-factor و SER Symbol Error rate و OSNR .

ملاحظة : تعطى العلاقة بين قيم Q-factor و BER بالشكل :

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (3.1) \text{ [Optisystem]}$$

سيتم بداية كما ذكر محاكاة نظام DWDM CP-DQPSK ذو 32 قناة وكل قناة بمعدل 100Gb/s بمعدل إجمالي (3.2 Tb/s) وبتباعد ترددي بين القنوات 100GHz والذي يعطي فعالية 1b/s/Hz، و سيتم اختبار النتائج من أجل مدى 50-600Km وفق ما تم خلال الدراسة المرجعية.

سيتم بعدها تصميم نظام DWDM DP-QPSK ذو 32 قناة وكل قناة بمعدل 100Gb/s بمعدل إجمالي (3.2 Tb/s) ، و سيتم اختبار النتائج من أجل مدى 160Km .

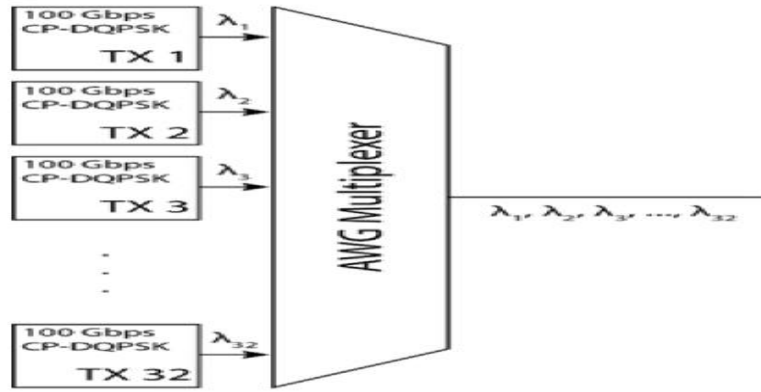
ملاحظة :

إن الأطوال الموجية التي يتم العمل عندها تقع ضمن النطاق C (1530-1560nm)

3-1- محاكاة نظام DWDM CP-DQPSK (الدراسة السابقة) [56]:

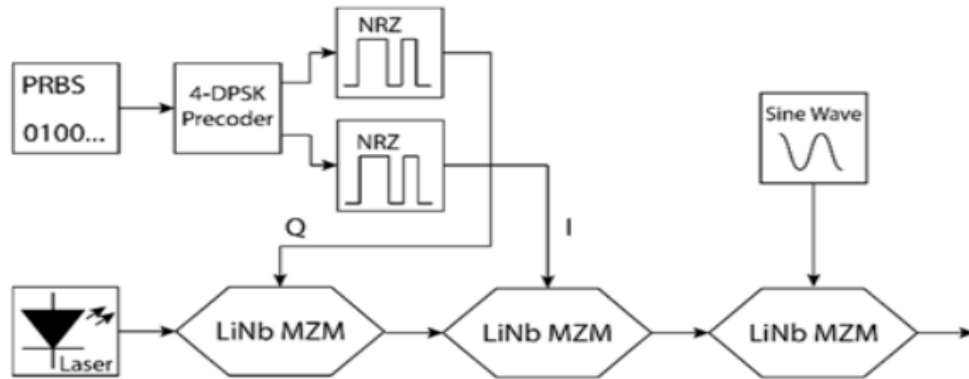
3-1-1- قسم الإرسال :

يتكون قسم الإرسال من 32 قناة (موزعة على المجال الترددي من 193.1THz وحتى 196.2THz) كما هو موضح بالشكل (3-1)، يتم استخدام وحدة إرسال DQPSK لأجل كل قناة يتم تجميع القنوات باستخدام مجمع DWDM قبل إرسالها عبر القناة الضوئية.



الشكل (3-1) قسم الإرسال في نظام DWDM CP-DQPSK [56]

وتتكون وحدة إرسال DQPSK بشكل أساسي من ثلاث معدلات ماك زندر والتي يتم تغذيتها بليزر Laser Diode، ويتم التحكم بتلك المعدلات باستخدام مولد تتابع شبه عشوائي PRBS يغذي مرمز DPSK مسبق ، والذي يغذي مرمزي NRZ كما هو موضح بالشكل (3-2) .

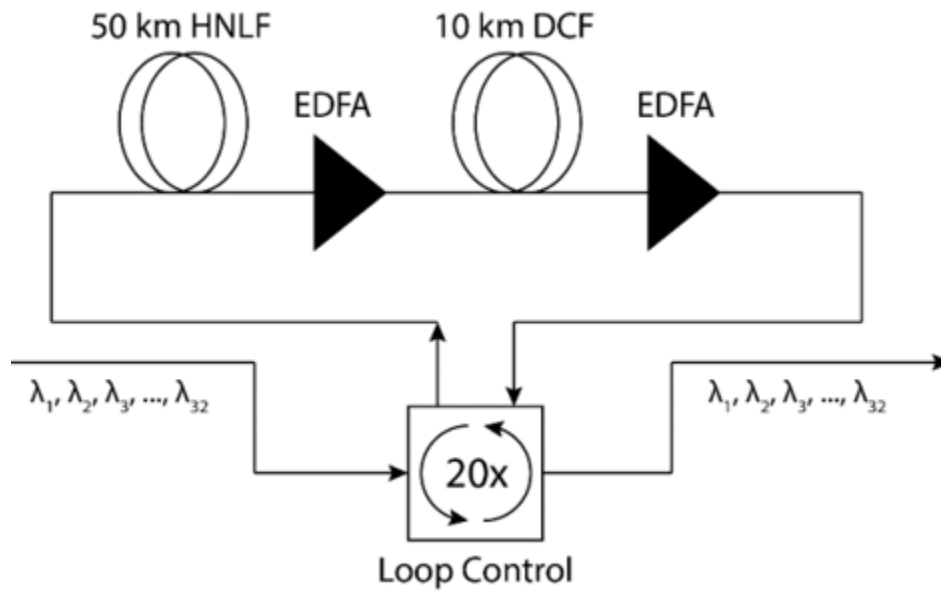


الشكل (3-2) وحدة إرسال DQPSK [56]

ملاحظة: مخطط الدارة موجود بالملحق A .

3-1-2- الوصلة الضوئية :

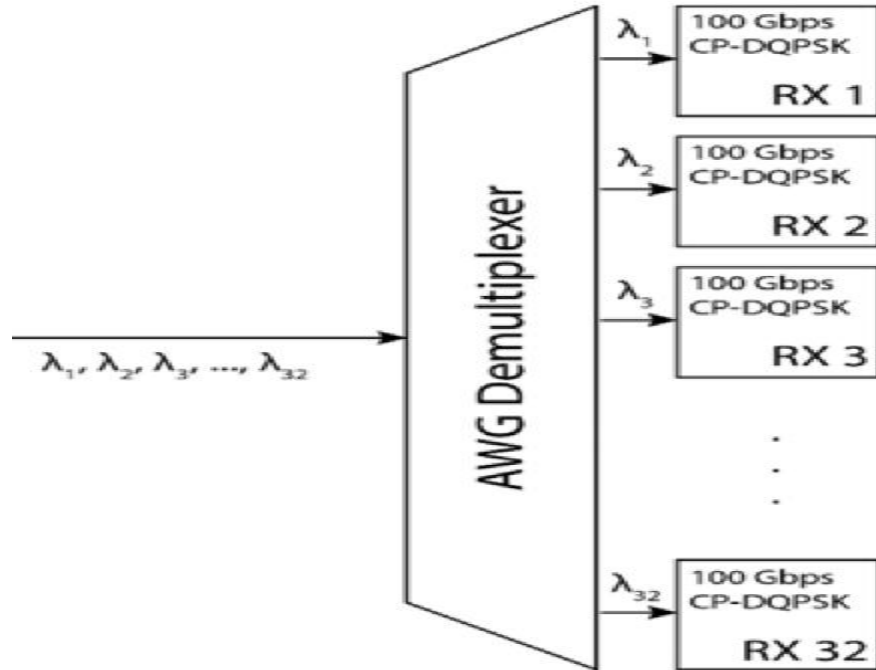
تنتشر الإشارة ذات الـ 32 حامل فرعي عبر الليف الضوئي من النوع (HNLF) على مسافة 50Km ، بالإضافة إلى وصلة بطول 10Km من الليف المعوض للتشتت DCF ، حيث تم تمثيل الوصلة الضوئية كما يوضح الشكل (3-3) من وصلتي HNLF و DCF مع مضخمين ضوئيين نوع (EDFA) لتعويض الفقد بالألياف ، ويتم تكرار الوصلة بواسطة حلقة تحكم (Loop Control).



الشكل (3-3) الوصلة الضوئية لنظام DWDM CP-DQPSK [56]

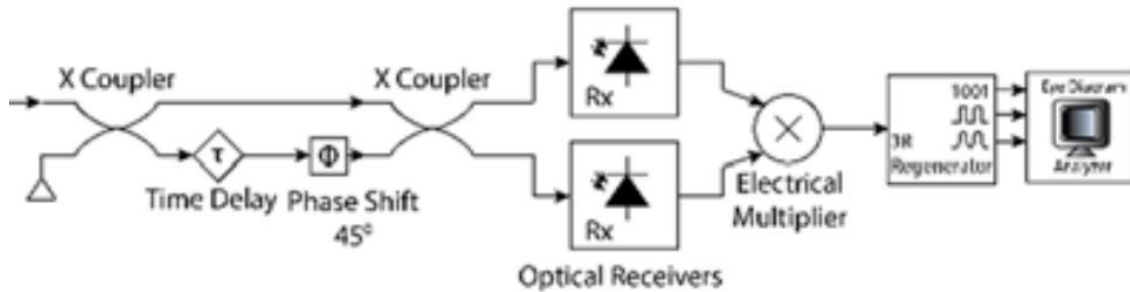
3-1-3- قسم الإستقبال :

يتكون قسم الإستقبال كما يوضح الشكل (3-4) من مفكك تجميع DWDM والذي يخرج 32 إشارة خاصة بالقنوات المرسل ، تدخل بعدها كل إشارة إلى وحدة استقبال DQPSK والتي تقوم بتحويل الإشارة الضوئية إلى إشارة كهربائية ومعالجتها واستخلاص المعلومات منها .



الشكل (3-4) قسم الإستقبال في نظام DWDM CP-DQPSK [56]

تتكون وحدة استقبال DQPSK بشكل رئيسي من كاشفين ضوئيين مدخل أحدهما يكون مزاح بالطور بمقدار 45 درجة بواسطة وحدة إزاحة الطور، يتم بعدها جمع مخرجي الكاشفين بإشارة واحدة تعبر عن إشارة المعلومات (يتم تحليلها عبر وحدة 3R Regenerator ليتم دراسة الإشارة عبر BER Analyzer) كما يوضح الشكل (3-5).



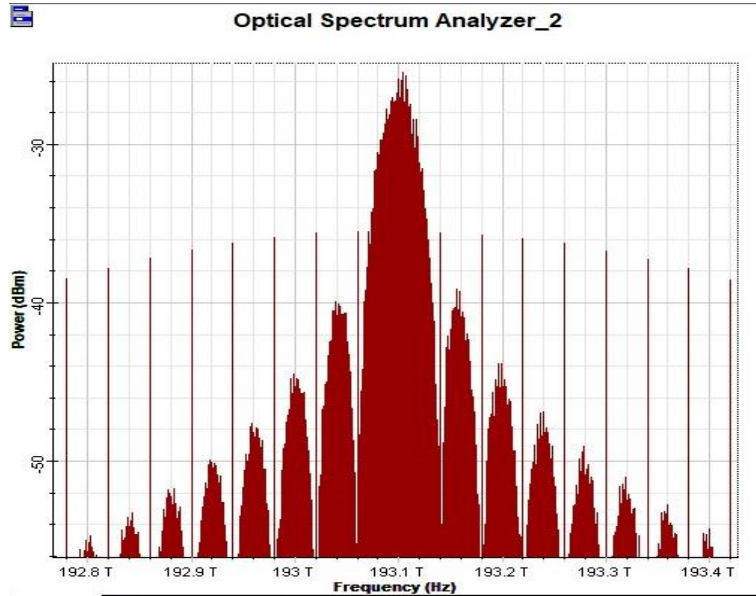
الشكل (3-5) وحدة استقبال DQPSK [56]

3-2- نتائج محاكاة نظام DWDM CP-DQPSK (الدراسة السابقة) [56]:

تمت محاكاة النظام على بيئة 17 Optisystem للحصول على النتائج ومقارنتها مع النتائج الواردة بالدراسة، حيث تم محاكاة نظام DWDM CP-DQPSK ذو 32 قناة بمعدل إرسال كلي (3.2Tb/s)، وبتباعد ترددي بين القنوات 100GHz والذي يعطي فعالية طيفية تساوي 1b/s/Hz ، وتم الإختبار لمسافة إرسال 50- 600Km .

3-2-1- شكل طيف الإشارة :

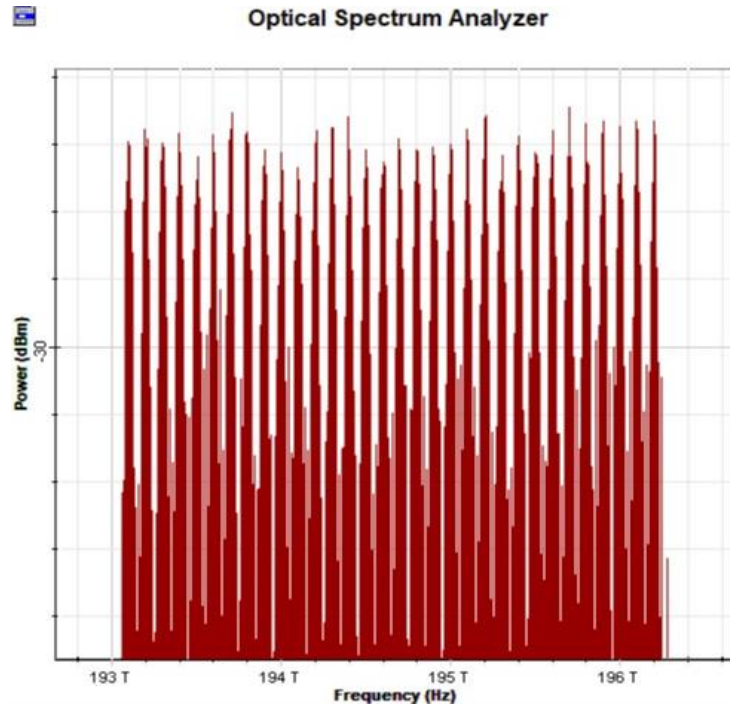
يكون شكل الطيف بعد وحدة إرسال DQPSK للقناة الأولى كما في الشكل (3-6) .



الشكل (3-6) طيف الإشارة للقناة الأولى على خرج وحدة إرسال DQPSK [الباحث]

نلاحظ أن مركز طيف الإشارة يكون عند القيمة 193.1THz وهي قيمة التردد المقابل للطول الموجي المرسل بهذه القناة، كما نلاحظ ظهور التوافقيات الجانبية، وهي ناتجة عن عملية التعديل (تحميل إشارة المعلومات على إشارة الحامل الضوئي) .

ويكون شكل الطيف بعد مجمع DWDM لـ 32 قناة كما في الشكل (3-7) .



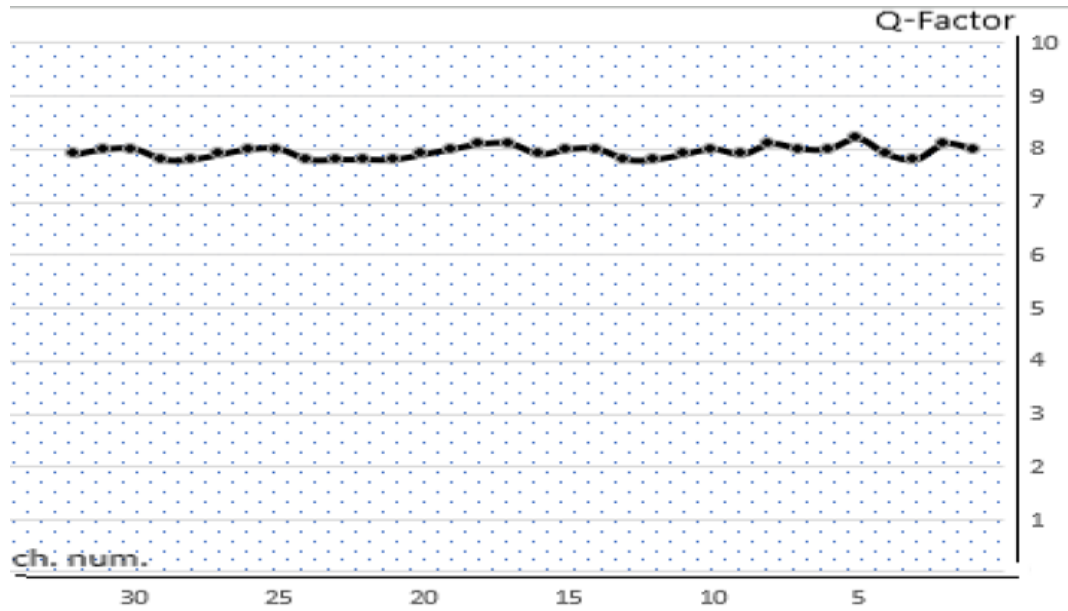
الشكل (7-3) طيف الإشارة على خرج مجمع DWDM [الباحث]

نلاحظ أن طيف الإشارة لـ 32 قناة يمتد من 193.1THz وحتى 196.2THz، وهي الترددات المقابلة للأطوال الموجية التي تم إرسالها، وبتباعد 100GHz بين كل قناتين متجاورتين .

3-2-2- نتائج المحاكاة بتغير مسافة الإرسال :

تم زيادة مسافة الإرسال تدريجياً من 50km وحتى 1000km (Loop x1 to x20)

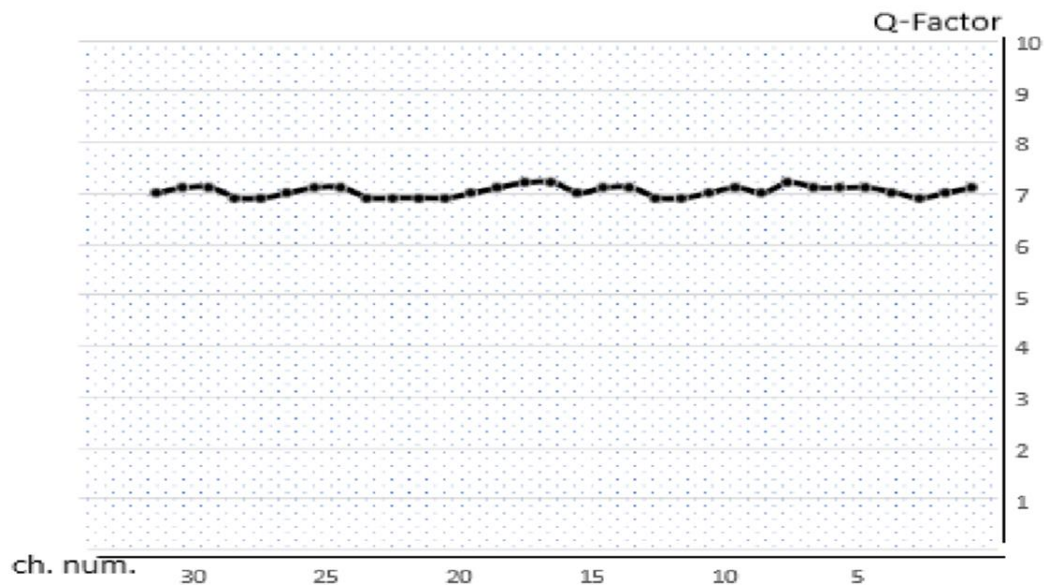
في البداية عند مسافة إرسال 50Km (loop x1) تم الحصول على قيم Q-Factor الموضحة بالشكل (8-3) للقنوات المتعددة .



الشكل (8-3) قيم Q-Factor للقنوات المتعددة عند مسافة إرسال 50km

تم الحصول على قيم Q-factor تساوي تقريبا 8 ، والذي يعادل قيمة BER تساوي 10^{-15} وهي قيمة قريبة جدا للقيم التي تم الحصول عليها بالدراسة السابقة ($BER = 3.58e-15$) .

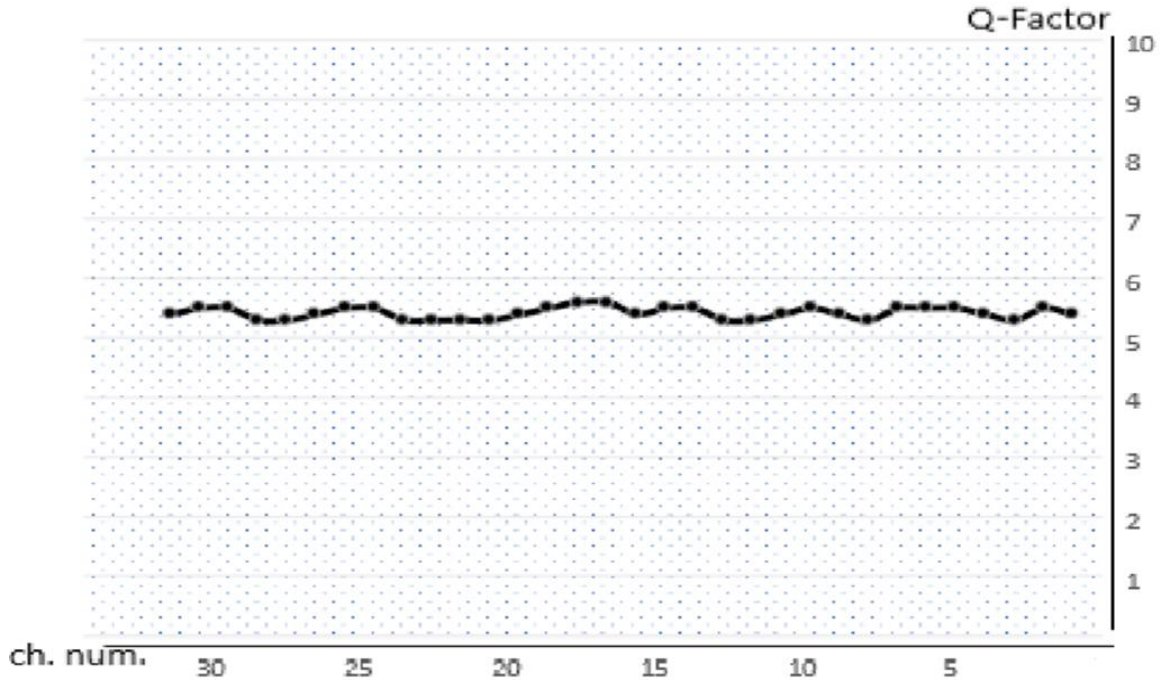
تم بعدها زيادة مسافة الإرسال إلى 150km (loop x3) (من أجل المقارنة مع العمل المقدم) وتم الحصول على النتائج الموضحة بالشكل (9-3) .



الشكل (9-3) قيم Q-Factor للقنوات المتعددة عند مسافة إرسال 150km

تم الحصول على قيم Q-factor تساوي تقريبا 7 ، والذي يعادل قيمة BER تساوي 10^{-12} .

تم بعدها زيادة مسافة الإرسال إلى 600km (loop x12) وتم الحصول على النتائج الموضحة بالشكل (3-10) .



الشكل (3-10) قيم Q-Factor للقنوات المتعددة عند مسافة إرسال 600km

تم الحصول على قيم Q-factor تساوي تقريبا 5.4 ، والتي تعادل قيمة BER تساوي 10^{-8} وهي قيمة تعتبر قريبة جدا للقيم التي تم الحصول عليها بالدراسة السابقة ($BER = 8.27e-9$) وتم إيقاف عملية المحاكاة عند مسافة الإرسال هذه بسبب تدهور أداء النظام .

3-3- تصميم نظام DP-QPSK DWDM:

3-3-1- قسم الإرسال :

يتكون قسم الإرسال من 32 قناة كما هو موضح بالشكل (3-11) ، حيث يتم استخدام ليزر Laser Diod لأجل كل قناة ، حيث يغذي هذا الليزر وحدة إرسال DP-QPSK والتي يتم التحكم بها باستخدام مولد تتابع PSK .

- إن قيمة الطور ϕ_i ترتبط برقم التسلسل المحتمل لمولد التتابع M بالعلاقة :

$$\phi_i = \left(\frac{2\pi}{M}(i-1) + \phi \right), i = 1, 2, \dots, M \quad (3.2) [20]$$

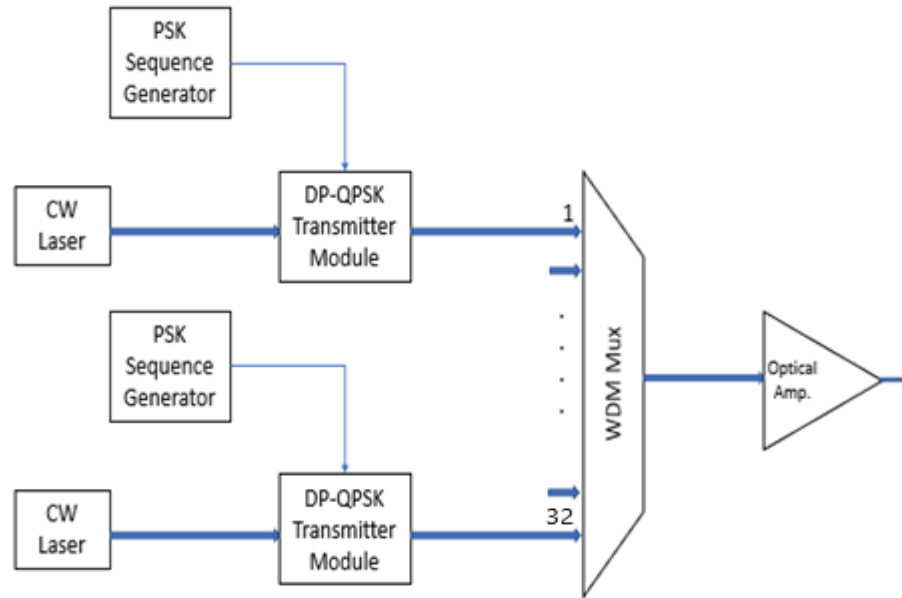
حيث أن : $M = 2^h$

حيث أن h عدد البتات (الخانات) بالرمز (في حالتنا $h = 2$ كون مولد التتابع هذا مسؤول عن أحد الإستقطابات) و ϕ هي مقدار انزياح الطور .

الجدول (1-3) محددات الليزر المستخدم لنظام DWDM QPSK [الباحث]

Frequency	193-194.55 THz
Power	-5dBm = 0.3mw to +5dBm = 3mw
Line-width	0.1MHz
Initial phase	0 deg
Wavelength Spacing	50GHz

بعد تجميع القنوات باستخدام مجمع WDM يتم تضخيم الإشارة قبل إرسالها بواسطة مضخم ضوئي.



الشكل (3-11) قسم الإرسال في نظام DWDM DP-QPSK [الباحث]

تتكون وحدة إرسال DP-QPSK كما يوضح الشكل (3-12) من أربع معدلات ماك زندر يتم تغذيتها بواسطة ليزر محلي و مجزء الحزم (Beam-Splitter) و يتم التحكم بهم بواسطة مولد تتابع PSK.

كل زوج من معدلي ماك زندر يعالج أحد الإستقطابات و كل معدل من الزوج يكون مزاح عن الآخر بفرق طور 90 درجة ، ويتم في النهاية مزج الإستقطابين بواسطة مازج الحزم (Beam Combiner) من أجل الإرسال بقناة واحدة ضمن مجمع WDM .

- يتم التحكم بطاقة الخرج على مخرج معدل ماك زندر بواسطة جهدي التحكم المطبقين على طرفي المعدل حيث يعبر عن كثافة الخرج بالعلاقة (3.3) :

$$E_O(t) = \frac{E_{in}(t)}{10^{(IL/20)}} \cdot [\gamma \cdot e^{(j\pi v_2(t)/V_{\pi RF} + j\pi v_{bias2}/V_{\pi DC})} + (1 - \gamma) \cdot e^{(j\pi v_1(t)/V_{\pi RF} + j\pi v_{bias1}/V_{\pi DC})}] \quad (3.3) [45]$$

حيث :

$E_{in}(t)$ هي إشارة الدخل

IL هو فقد الدخل

v_1 v_2 جهدي التحكم على طرفي معدل ماك زندر والتي يتم إعطائها من مولد تتابع PSK

$v_{bias1}(t)$ $v_{bias2}(t)$ جهود الإنحياز

$V_{\pi RF}$ جهد تبديل التعديل

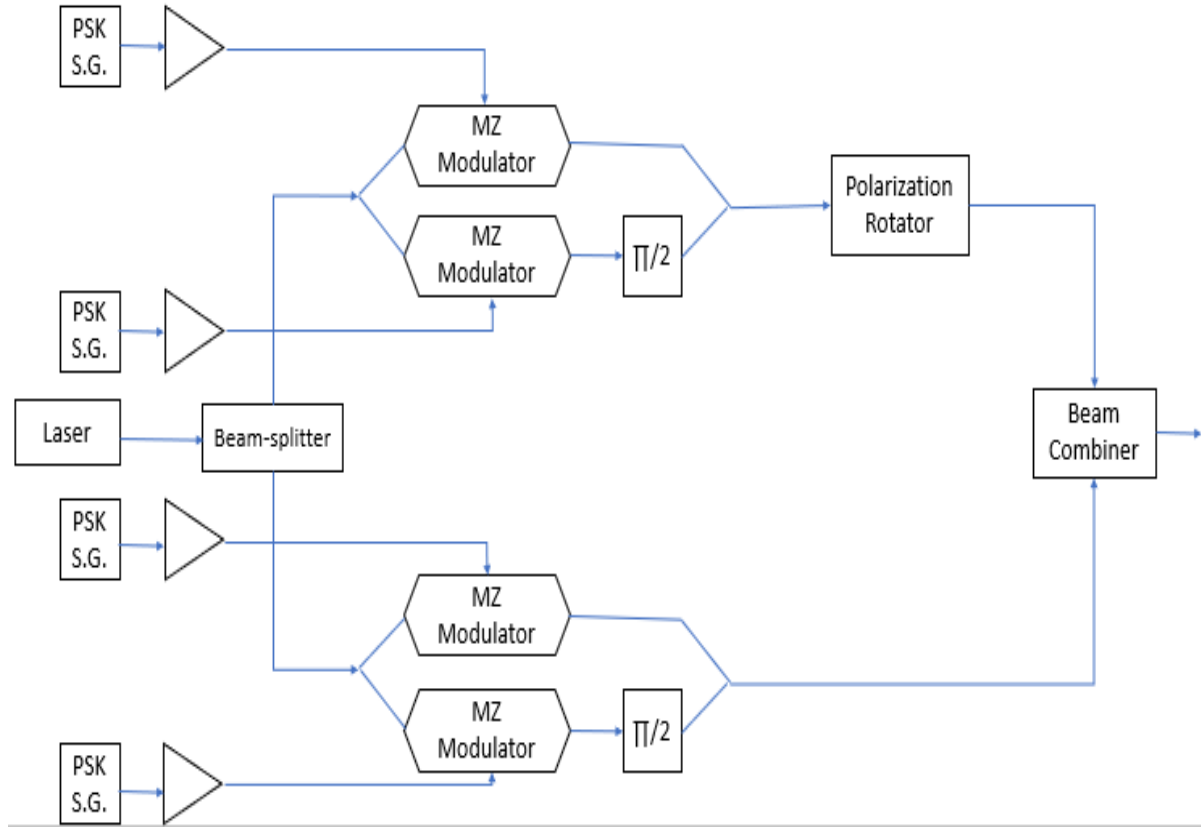
$V_{\pi DC}$ جهد تبديل الإنحياز

γ هي نسبة فصل الطاقة لفرعي المعدل

- تعطى علاقة خرج عنصر إزاحة الإشارة مع الدخل بالعلاقة :

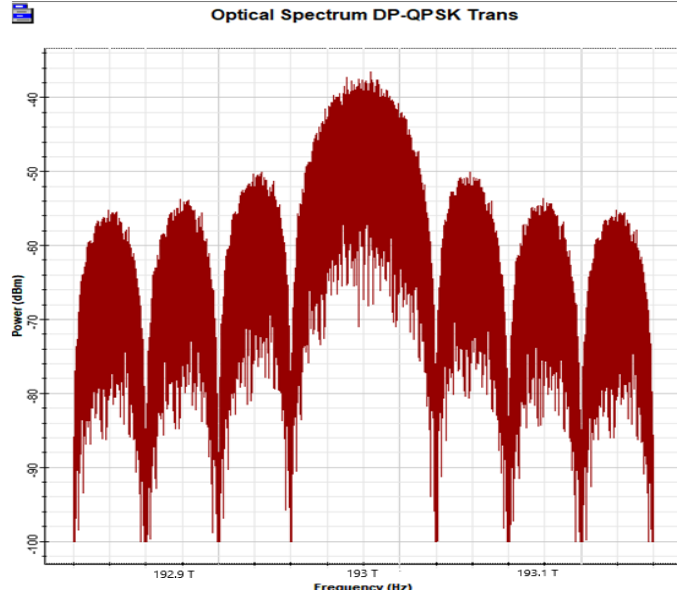
$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \exp(j\Delta\Phi) \quad (3.4) \text{ (opisystem17)}$$

حيث $\Delta\Phi$ هي قيمة إزاحة الطور (بجالتنا $\pi/2$)



الشكل (12-3) وحدة إرسال DP-QPSK [الباحث]

يكون شكل الطيف بعد وحدة إرسال DP-QPSK للقناة الأولى كما في الشكل (13-3) .



الشكل (3-13) طيف الإشارة على خرج وحدة إرسال DP-QPSK للقناة الأولى [الباحث]

نلاحظ أن مركز طيف الإشارة يكون عند القيمة 193THz وهي قيمة التردد المقابل للطول الموجي المرسل بهذه القناة، ونلاحظ وجود التوافقيات الجانبية، والتي تنتج عن عملية التعديل (تحميل إشارة المعلومات على إشارة الحامل).

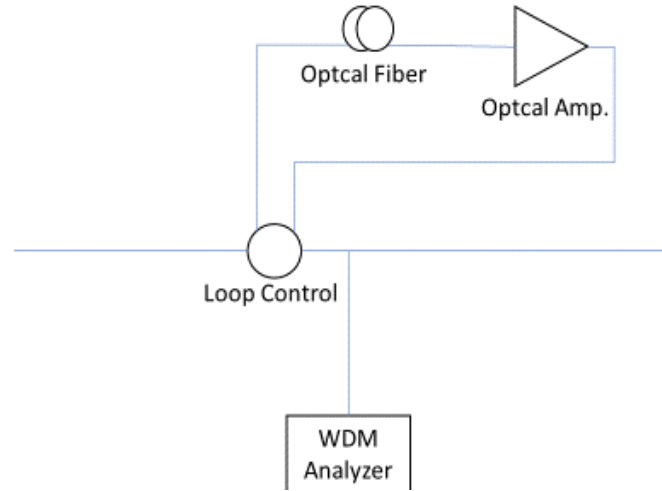
3-3-2- الوصلة الضوئية :

تنتشر الإشارة ذات الـ 32 حامل فرعي عبر الليف الضوئي من النوع (SMF) على مسافة 160Km كونه يعطي فعالية طيفية أعلى لمسافة إرسال أكبر مقارنة بالليف ذو النوع (MMF) ، حيث تم تمثيل الوصلة الضوئية كما يوضح الشكل (3-14) من وصلة بطول 80Km مع مضخم ضوئي نوع (EDFA) (مضخم الألياف المشبعة بالإربيوم) والذي يعمل بفعالية عالية مع أنظمة DWDM و عند الحزمة C (التي نعمل عندها) و حيث أنه يقوم بالتعويض بشكل متساوي لكافة القنوات ، ويتم تكرار الوصلة مرتين بواسطة حلقة تحكم (Loop Control) .

تم اختيار بارامترات الليف الضوئي وفق الجدول (3-2) .

الجدول (2-3) بارامترات الليف الضوئي لنظام DWDM DP-QPSK [الباحث]

Parameter	Value
Reference wavelength	1550 nm
Length	160Km
Attenuation	0.2 dB/km
Dispersion	16.75 ps/nm/km
Dispersion slope	0.075 ps/nm ² /km
PMD co-efficient	0.05 ps/sqrt(km)



الشكل (3-14) الوصلة الضوئية لنظام DWDM DP-QPSK [الباحث]

3-3-3- قسم الإستقبال :

يتكون قسم الإستقبال كما يوضح الشكل (3-15) من مفكك تجميع WDM والذي يخرج 32 إشارة خاصة بالقنوات المرسله ، تدخل بعدها كل إشارة إلى مرشح غاوص ليتم ترشيحها، تدخل بعدها على وحدة استقبال DP-QPSK والتي تقوم بفصل الإشارة الواردة إلى أربع إشارات كل إشارتين باستقطاب مختلف وبين كل إشارة و أخرى فرق طور 90 درجة ، تدخل هذه الإشارات بعدها إلى وحدة المعالجة الرقمية DSP التي تقوم بمعالجة الإشارة و تعويض التأثيرات اللاخطية ، تأتي بعدها مرحلة أخذ القرار بواسطة وحدة أخذ القرار

Decision Maker ، و من ثم يتم تفكيك الترميز بواسطة مفكك ترميز تتابع PSK Sequence Decoder ، يتم بعدها جمع الإشارات بواسطة محول P/S وبالتالي نحصل على إشارة المعلومات المرسله.

- يعطى عامل تحويل مرشح غاوص بالعلاقة :

$$H(f) = \alpha e^{-\ln(\sqrt{2})\left(\frac{f-f_c}{B/2}\right)^{2N}} \quad (3.5) \text{ (Optisystem 17)}$$

حيث: α هي فقد الدخل ، f هو التردد ، B هو عرض الحزمة

f_c هو التردد المركزي للمرشح (في حالتنا يكون التردد المركزي للقناة المستقبلة، مثلاً 193THz للقناة الأولى)

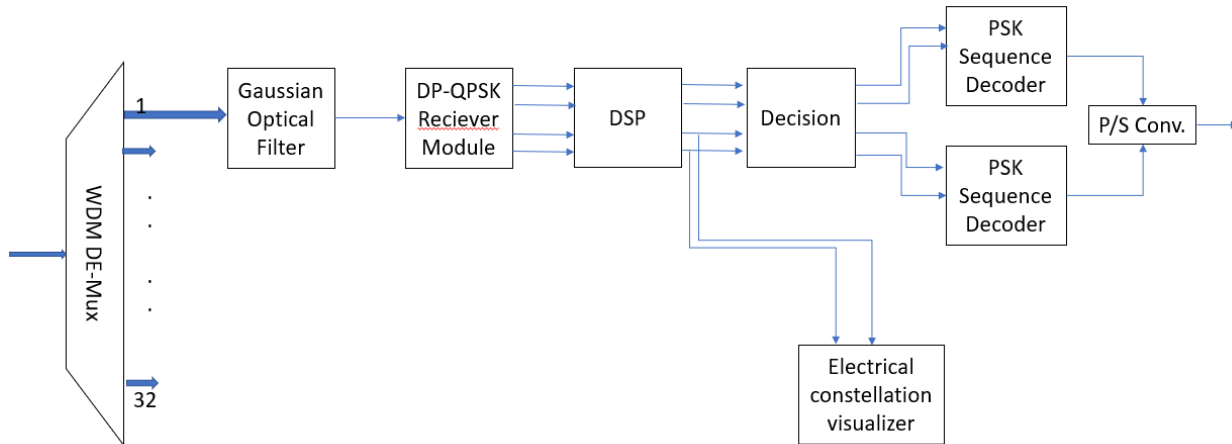
- إن قيمة الطور ϕ_i ترتبط برقم التسلسل المحتمل لمولد التابع M بالعلاقة :

$$\phi_i = \left(\frac{2\pi}{M}(i-1) + \phi \right), i = 1, 2, \dots, M \quad (3.6) [20]$$

حيث أن : $M = 2^h$

حيث أن h عدد البتات بالرمز (في حالتنا $h = 2$ كون مولد التابع هذا مسؤول عن أحد الإستقطابات) و ϕ هي مقدار انزياح الطور .

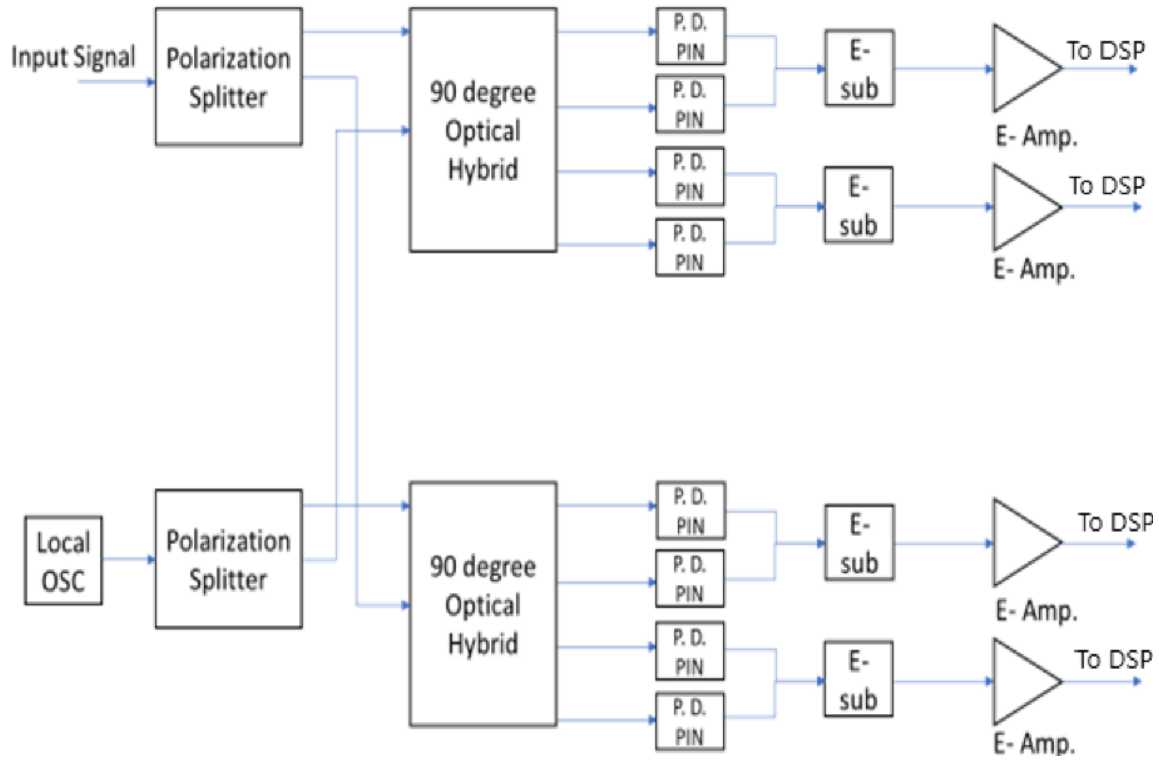
WDM DP-QPSK Receiver



الشكل (3-15) قسم الإستقبال في نظام DWDM DP-QPSK [الباحث]

تتكون وحدة استقبال DP-QPSK كما يوضح الشكل (3-16) من مجزء استقطاب Polarization Splitter يقوم بفصل الإشارة المستقبلة إلى إشارتين باستقطابين مختلفين ، يتم مزج هذه الإشارتين مع إشارتين مولدتين بواسطة ليزر محلي Laser Diod (يعمل بمثابة Local Oscillator) ، يتم المزج بواسطة مازجي 90 degree Optical Hybrid ويكون كل مازج معنى بأحد الإستقطابات و على خرج كل مازج 4 إشارات كل إشارتين مختلفتين عن الإشارتين الأخرتين بفرق طور 90 درجة ، و تدخل كل إشارتين على كواشف PIN photodiode ، يتم بعدها جمعها بإشارة واحدة و إدخالها إلى مضخم إلكتروني .

نحصل في خرج وحدة استقبال DP-QPSK على أربع إشارات كل إشارتين باستقطاب مختلف وبين كل إشارة و أخرى فرق طور 90 درجة .



الشكل (3-16) وحدة استقبال DP-QPSK [الباحث]

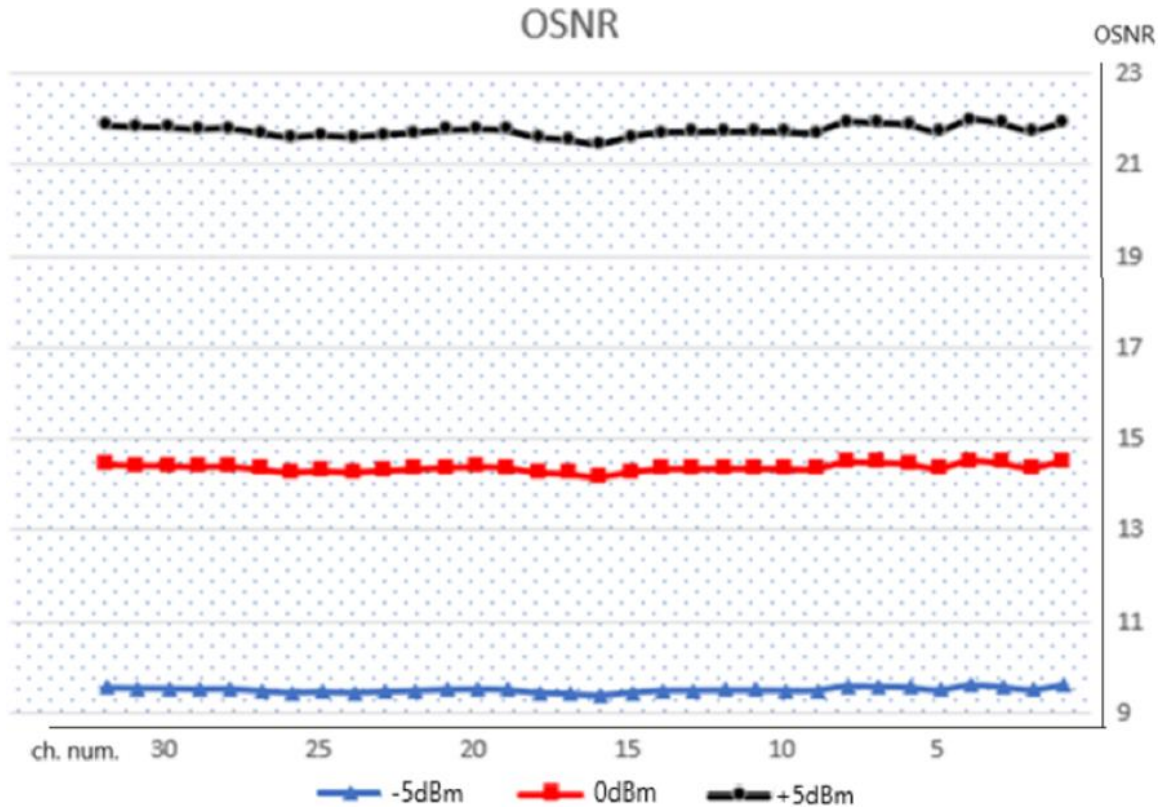
3-4- مناقشة النتائج لنظام DWDM DP-QPSK :

تمت محاكاة النظام على بيئة 17 Optisystem للحصول على النتائج وتحليلها، حيث تم تصميم نظام WDM DP-QPSK ذو 32 قناة بمعدل إرسال كلي (3.2Tb/s) ومسافة إرسال 160KM.

3-4-1- أثر تغير طاقة الإرسال :

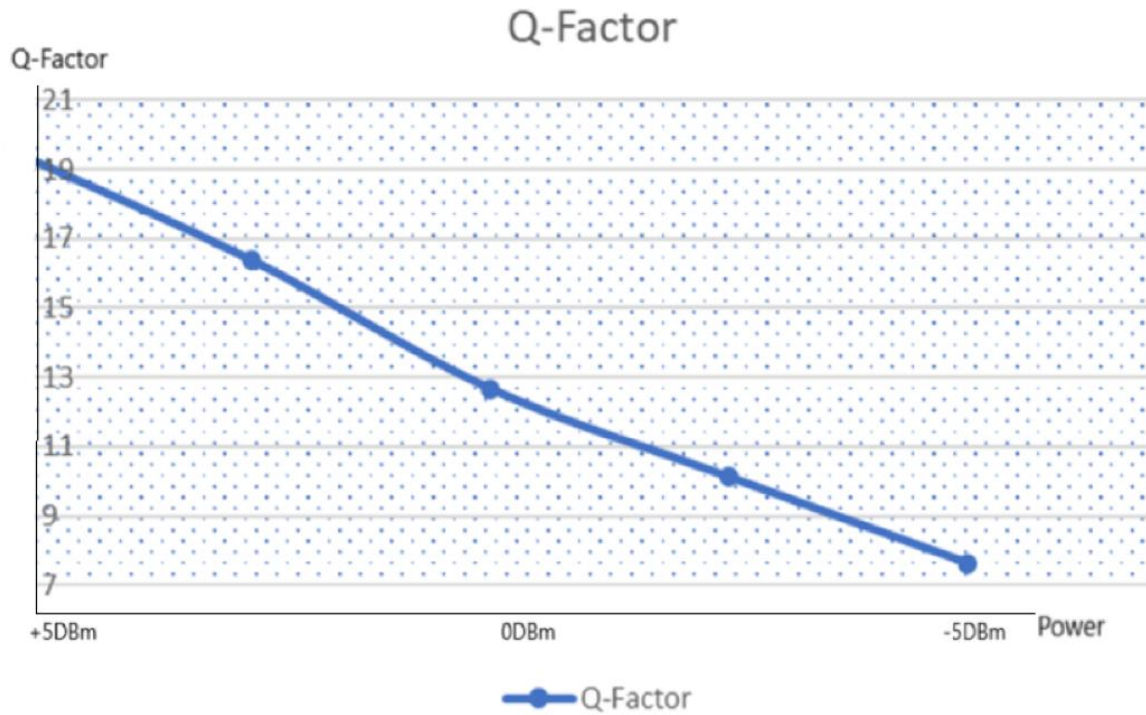
كما ذكر سابقاً، تعتبر طاقة الإرسال من المحددات الهامة التي تؤثر على أداء النظام، لذلك تم دراسة أثر تغير طاقة الإرسال على الإشارة، حيث تم أخذ قيمة OSNR و قيمة المعامل Q-Factor وشكل كوكبة الإشارة بعين الاعتبار، ومقارنة النتائج للقنوات المتعددة من أجل عدة قيم لطاقة الإرسال.

يوضح الشكل (3-17) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR للقنوات المتعددة.



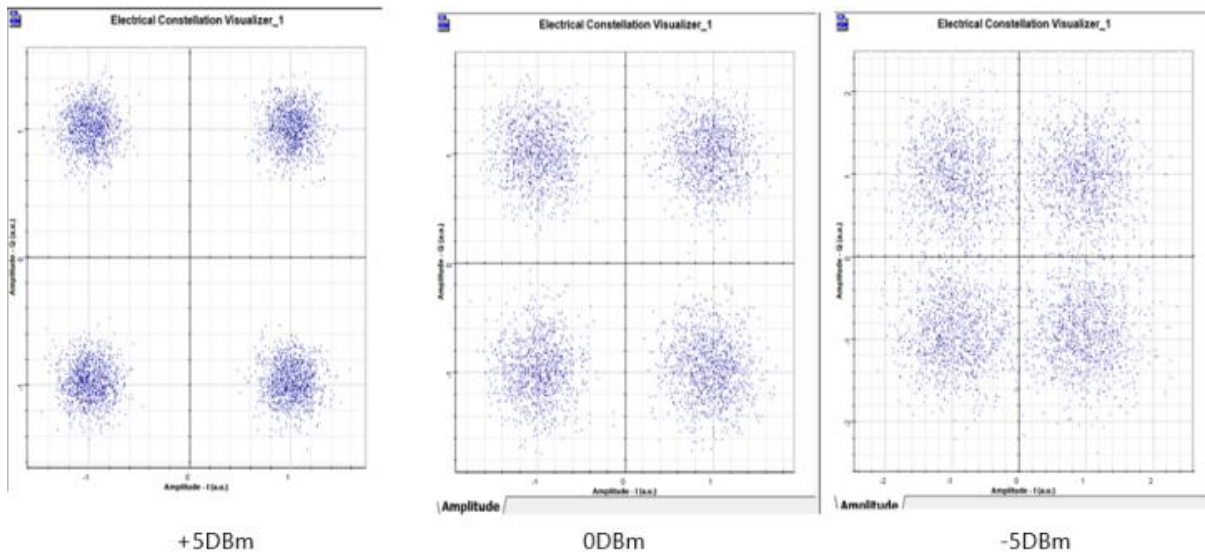
الشكل (3-17) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR [الباحث]

يوضح الشكل (3-18) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة المعامل Q-Factor .



الشكل (3-18) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة المعامل Q-Factor [الباحث]

كما يوضح الشكل (3-19) تغير شكل كوكبة إشارة الإستقبال (electrical constellation) الخاصة بنظام QPSK على خرج وحدة المعالجة الرقمية DSP مع زيادة طاقة الإرسال .



الشكل (3-19) أثر تغير طاقة الإرسال على شكل (electrical constellation) [الباحث]

نلاحظ من الشكل (3-17) التأثير الواضح لزيادة طاقة الإرسال على الإشارة حيث زادت قيمة OSNR بمقدار حوالي 12 ديسبل عند الإرسال بطاقة +5dBm (ما يعادل 3.16mw) مقارنة بالإرسال بطاقة -5dBm (ما يعادل 0.316mw).

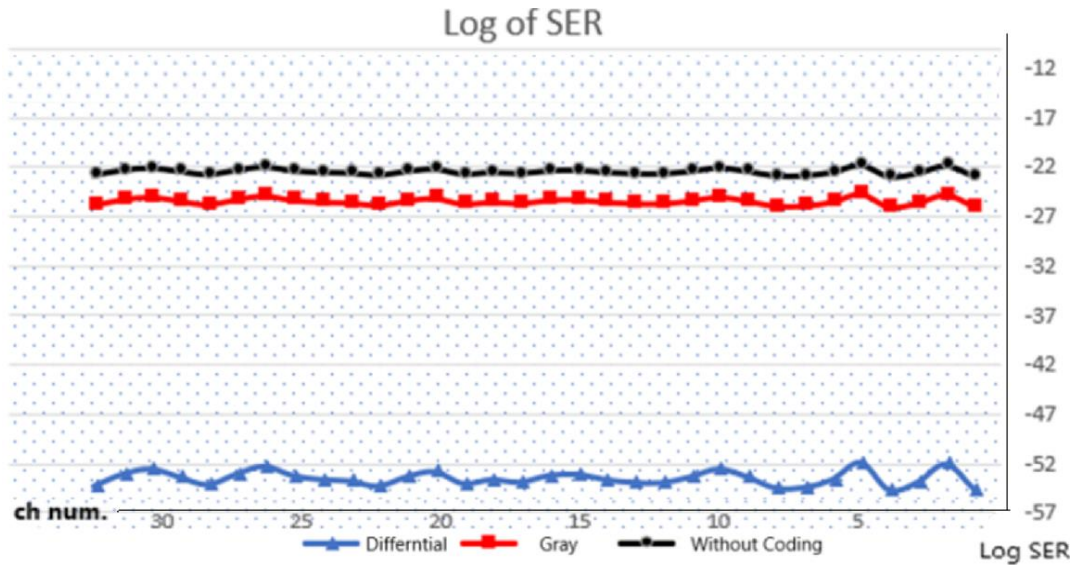
و نلاحظ من الشكل (3-18) أيضاً التأثير الواضح لزيادة طاقة الإرسال على قيمة المعامل Q-Factor ، حيث زادت بمقدار حوالي 12.5 ديسبل عند الإرسال بطاقة +5dBm (ما يعادل 3.16mw) مقارنة بالإرسال بطاقة -5dBm ، مما يعني معدل خطأ أقل عند طرف الإستقبال .

كما نلاحظ من الشكل (3-19) أنه عند طاقة إرسال +5dBm يكون استخلاص المعلومات من الإشارة أسهل.

3-4-2- أثر استخدام أنواع مختلفة من الترميز :

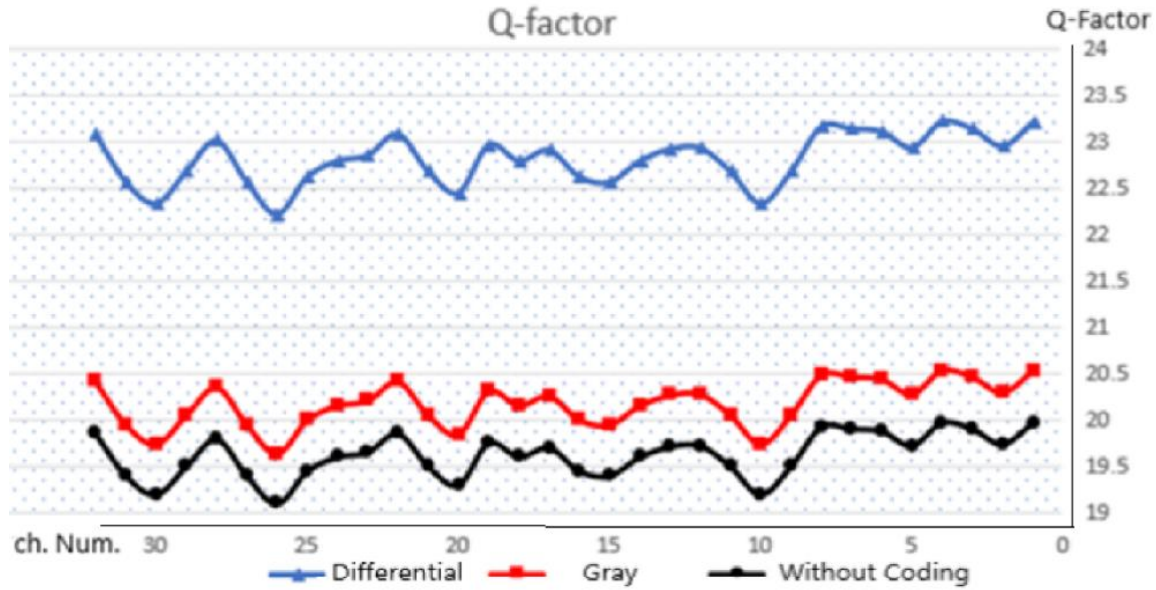
بهدف الحصول على أفضل أداء تم دراسة تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER باستخدام أنواع مختلفة من الترميز (ترميز غراي - الترميز التفاضلي - بدون ترميز) ، لمعرفة عند أي من هذه الترميز يعطي النظام المدروس أفضل أداء .

يوضح الشكل (3-20) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER لأنواع الترميز المختلفة .



الشكل (3-20) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER لأنواع الترميز المختلفة [الباحث]

يوضح الشكل (3-21) تغير قيمة المعامل Q-Factor عند استخدام أنواع الترميز المختلفة (التفاضلي - غراي - بدون ترميز) .



الشكل (21-3) تغير قيمة المعامل Q-Factor لأنواع الترميز المختلفة [الباحث]

نلاحظ من الشكل (22-3) أن الترميز التفاضلي (Differential Coding) يعطي أفضل أداء، حيث أن معدل خطأ الرمز SER انخفض بمقدار أكثر من 100 بالمئة مقارنة بترميز جراي أو حالة الإرسال بدون ترميز .

كما نلاحظ من الشكل (21-3) أن قيمة المعامل Q-Factor زادت بمقدار 3dB تقريباً عند استخدام الترميز التفاضلي مقارنة بترميز جراي أو حالة الإرسال بدون ترميز ، مما يعني أن الترميز التفاضلي هو الأفضل، إلا أن الترميز التفاضلي قد يخفض قليلاً من الفعالية الطيفية كونه يتطلب بت إضافي لكل رمز .

3-4-3- أثر تقليل التباعد بين القنوات :

بهدف الحصول على أعلى فعالية طيفية دون أن تؤثر على أداء النظام، تم دراسة أثر تقليل التباعد بين القنوات.

حيث أن نظام QPSK يقدم فعالية طيفية نظرية تصل إلى $(2b/s/Hz)$ ، وبالتالي فإن نظام DP-QPSK يقدم فعالية طيفية نظرية تصل إلى $(4b/s/Hz)$ كونه يعتمد على استقطابين حيث أن عدد البتات بالرمز يكون 4Bits/Symbol .

وبالتالي يجب أن يكون تباعد القناة أكبر من قيمة معينة وهي معدل الرمز.

Channel Spacing > Symbol Rate

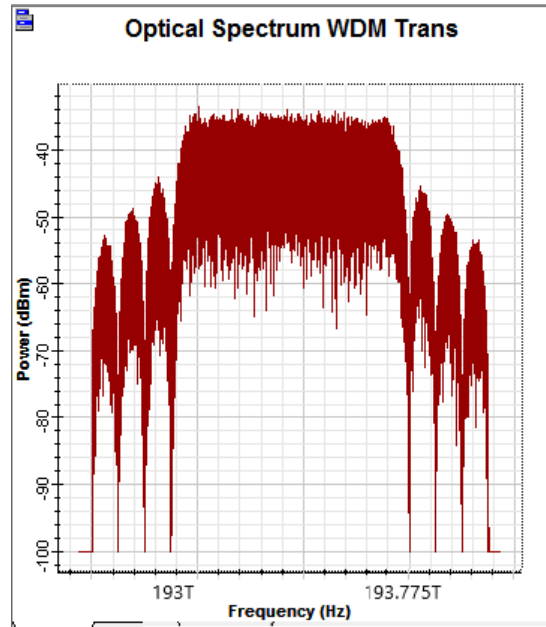
$$\text{Channel Spacing} > \frac{\text{BitRate}}{\text{Bits/Symbol}}$$

وبالتالي في الحالة التي يتم دراستها يكون

$$\text{Channel Spacing} > 25\text{GHz}$$

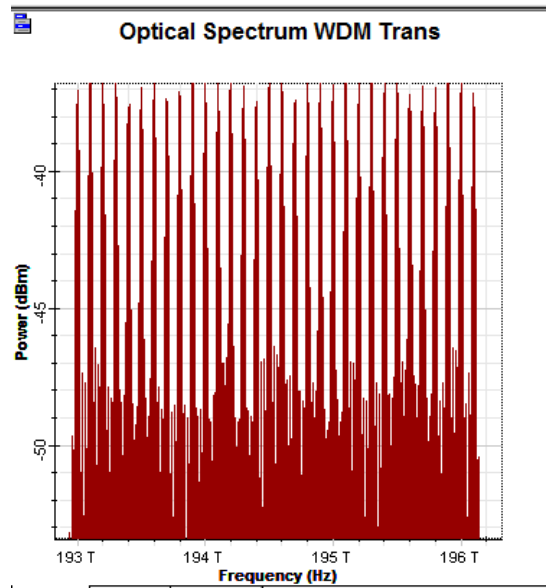
إلا أنه عملياً يتم الأخذ بعين الاعتبار الانحناء Roll-off لشكل الطيف الترددي مع إضافة هوامش جانبية لتجنب التداخل .

- من أجل تباعد طيفي 25GHz (للحصول على فعالية طيفية حوالي 4b/s/Hz وهي القيمة النظرية)، نلاحظ كما يبين الشكل (22-3) التداخل الحاصل بين القنوات بسبب عدم أخذ الهوامش المذكورة سابقاً بعين الاعتبار :



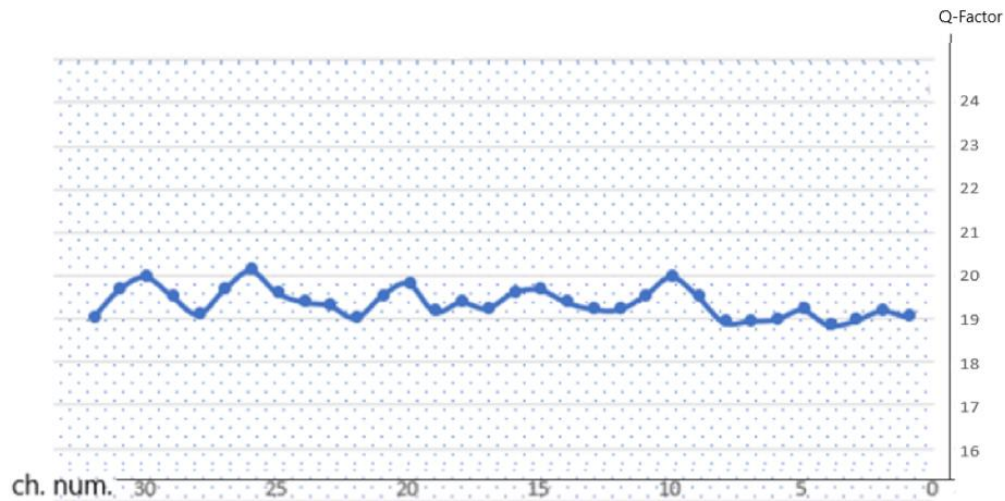
الشكل (22-3) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 25GHz [الباحث]

- من أجل ملاحظة عند أي تباعد بين القنوات تبدأ عملية التداخل (للحصول على أفضل فعالية طيفية) تم بداية الدراسة عند تباعد 100GHz والتي تعطي فعالية طيفية مساوية ل 1b/s/Hz وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (23-3)



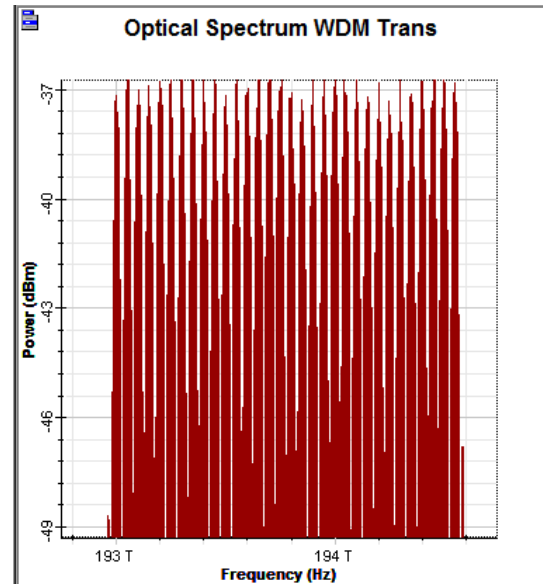
الشكل (23-3) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 100GHz [الباحث]

حيث يمتد طيف الإشارة من 193THz إلى 196.1THz ، ونلاحظ عدم وجود تداخل بين القنوات، حيث كانت قيمة Q-Factor للقنوات المتعددة مرتفعة (حوالي 19.5 وسطياً) كما هو موضح بالشكل (24-3) (عند الإرسال بطاقة 5dBm)، مما يعني معدل خطأ أقل و أداء أفضل للنظام المدروس .



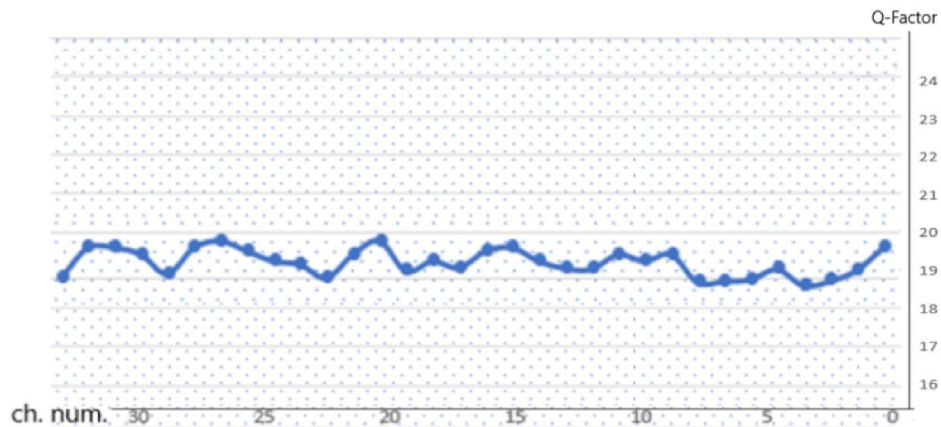
الشكل (24-3) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 100GHz [الباحث]

تم إنقاص التباعد إلى 50GHz والذي يعطي فعالية طيفية مساوية لـ 2b/s/Hz ، وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (25-3) .



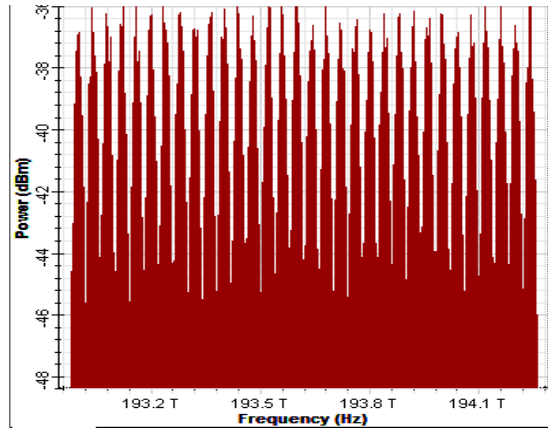
الشكل (25-3) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 50GHz [الباحث]

إن طيف الإشارة لـ 32 قناة يمتد من 193THz وحتى 194.55THz وبتباعد 50GHz بين كل قناتين متجاورتين، ونلاحظ عدم وجود تداخل بين القنوات المتجاورة، حيث بقيت قيمة Q-Factor للقنوات المتعددة مرتفعة (حوالي 19.4) كما هو موضح بالشكل (26-3) ، ونلاحظ أنها متقاربة مع الحالة السابقة (عند تباعد 100GHz) ، أي أنه تم الحصول على ضعف الفعالية الطيفية دون التأثير على أداء النظام.



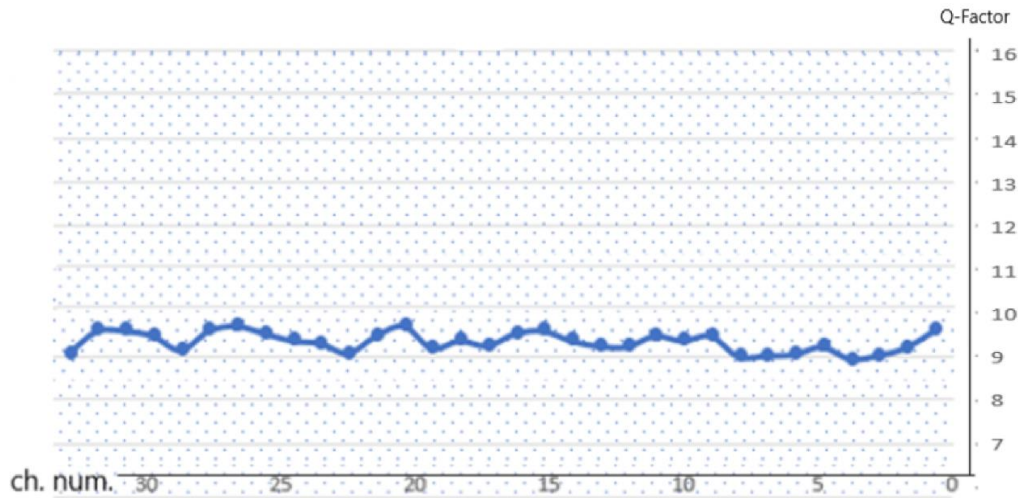
الشكل (26-3) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 50GHz [الباحث]

تم إنقاص التباعد إلى 40GHz والذي يعطي فعالية طيفية مساوية لـ 2.5b/s/Hz ، وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (27-3)



الشكل (27-3) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 40GHz [الباحث]

إن طيف الإشارة لـ 32 قناة يمتد من 193THz وحتى 194.24THz وبتباعد 40GHz بين كل قناتين متجاورتين، ونلاحظ وجود تداخل بين القنوات المتجاورة (عند طاقة إشارة -45dBm) ، وهذا التداخل أدى لانخفاض قيمة Q-Factor ، حيث كانت قيمة Q-Factor للقنوات المتعددة (حوالي 9.5) كما هو موضح بالشكل (30-3) ، حيث أن قيمة Q-Factor انخفضت للنصف تقريباً ، وبالتالي فإن زيادة الفعالية الطيفية لهذا الحد من أجل النظام المدروس ستؤدي إلى انخفاض أداء النظام .



الشكل (28-3) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 40GHz [الباحث]

بالنتيجة فإن النظام المدروس يقدم فعالية طيفية تصل لـ 2b/s/Hz وبتباعد قنوات 50GHz دون أن يؤثر ذلك على أداء النظام .

• مقارنة العمل المقدم مع الدراسة السابقة:

يوضح الجدول (3-3) مقارنة الأداء مع الدراسة السابقة ، حيث تمت المقارنة بناءً على المعامل Q-Factor ، السعة الكلية ، مسافة الإرسال المختبرة والفعالية الطيفية .

الجدول (3-3) مقارنة نتائج العمل المقدم خلال الفصل مع الدراسة السابقة [الباحث]

الدراسة (الباحث)	التقنية المستخدمة	سعة الإرسال الكلية (عدد الأقنية * معدل النقل لكل قناة)	الفعالية الطيفية (b/s/Hz)	Q- Factor	مسافة الإرسال (KM)
(Tomas 2020)	DWDM CP-DQPSK	32*100Gb/s 3.2Tb/s	1	7	150
العمل المقدم 1 DWDM DP-QPSK	DP-QPSK CD & DSP	32*100Gb/s 3.2Tb/s	2	19.46	160

كما هو موضح بالجدول قدم نظام DWDM المعتمد على تقنية CP-DQPSK فعالية طيفية تصل إلى 1b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، وتم الحصول على قيمة Q-factor مساوية ل 7 من أجل مسافة إرسال 150Km .

قدم العمل الذي تمت دراسته خلال هذا الفصل والذي يستخدم نظام DWDM و المعتمد على تقنية DP-QPSK فعالية طيفية أعلى مقارنة بالدراسات السابقة، والتي وصلت ل 2b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، كما تم الوصول إلى معامل Q-Factor مرتفع مساوي ل 19.46 (والذي يعني أداء أفضل للنظام) من أجل مسافة إرسال 160Km .

إن النظام DWDM DP-QPSK قدم فعالية طيفية أعلى بمقدار أكبر من الضعف مقارنة بالدراسات السابقة والذي مكننا من الحصول على سعة إرسال أعلى باستخدام نفس عرض المجال الترددي.

3-5- خلاصة :

تم في هذا الفصل دراسة لنظام DWDM DP-QPSK (التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية الكثيف باستخدام التعديل بإزاحة الطور الرباعي) . حيث تم الإرسال عبر 32 حامل فرعي سعة كل حامل 100Gb/s وبمعدل إجمالي (3.2Tb/s) و بتباعد بين القنوات قدره 50GHz والذي يعطي فعالية طيفية مقدارها (2b/s/Hz) .

حيث أظهرت نتائج المحاكاة أنه عند انقاص طاقة الإرسال عن الحد +5dBm تقل قيمة كل من OSNR و المعامل Q-Factor . كما أن النظام أعطى أفضل أداء عند استخدام الترميز التفاضلي مقارنة بترميز غراي أو حالة الإرسال بدون ترميز ، حيث كانت قيمة معدل خطأ الرمز SER أخفض عند استخدام الترميز التفاضلي و كذلك كانت قيمة Q-Factor أعلى عند استخدام ذلك الترميز .

كما أظهرت نتائج المحاكاة أن نظام DWDM DP-QPSK يقدم فعالية طيفية تصل ل 2b/s/Hz وبتباعد قنوات 50GHz دون أن يؤثر ذلك على أداء النظام، حيث أنه عند تباعد قناة 40GHz بدأ حصول تداخل بين القنوات المتجاورة مما أثر سلباً على أداء النظام المدروس.

وبالمقارنة مع الدراسات المرجعية السابقة تبين أن نظام DWDM DP-QPSK قدم فعالية طيفية وسعة إرسال أعلى بكثير مقارنة بالدراسات السابقة كما قدم أداء أفضل بالنسبة لقيمة المعامل Q-factor الذي يحدد جودة النظام .

الفصل الرابع

تصميم وتنفيذ نظام اتصالات ضوئي DWDM باستخدام تقنية التعديل DP-16QAM

Design and implementation of a DWDM DP-16QAM system

يقدم هذا الفصل تصميم وتنفيذ نظام التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية الكثيف باستخدام التعديل المطالي المتعامد من الدرجة 16 (DWMD 16QAM) والذي يتيح فعالية طيفية عالية وإمكانية الإرسال بمعدلات نقل عالية ، مع تطبيق الكشف المتماسك مع معالجة الإشارة الرقمية حيث تتيح هذه التقنيات تحمل عاليًا لضجيج طور الموجة الحاملة وتؤدي إلى تعويض أفضل للاخطية ، بالإضافة إلى تعويض التشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب . وستتم المحاكاة في بيئة 17 Optisystem و سيتم اختبار النتائج و تقييمها بناءً على المعاملات Q-factor , OSNR و SER.

سيتم تصميم نظام DWDM DP-16QAM ذو 32 قناة ومعدل نقل المعطيات بكل قناة 100Gb/s ومعدل معطيات إجمالي (3.2 Tb/s) و سيتم اختبار النتائج من أجل مدى 160Km .

4-1- تصميم النظام :

4-1-1- قسم الإرسال :

كما هو موضح بالشكل (4-1) يتكون قسم الإرسال من 32 قناة ، يتم استخدام ليزر Laser Diod لأجل كل قناة و يغذي وحدة إرسال DP-16QAM والتي يتم التحكم بها باستخدام مولد تتابع QAM .

- إن قيمة الطور Φ_i ترتبط برقم تسلسل مولد التتابع M بالعلاقة :

$$\Phi_i = \left(\frac{2\pi}{M}(i - 1) + \Phi \right), i = 1, 2, \dots, M \quad (4.1) [20]$$

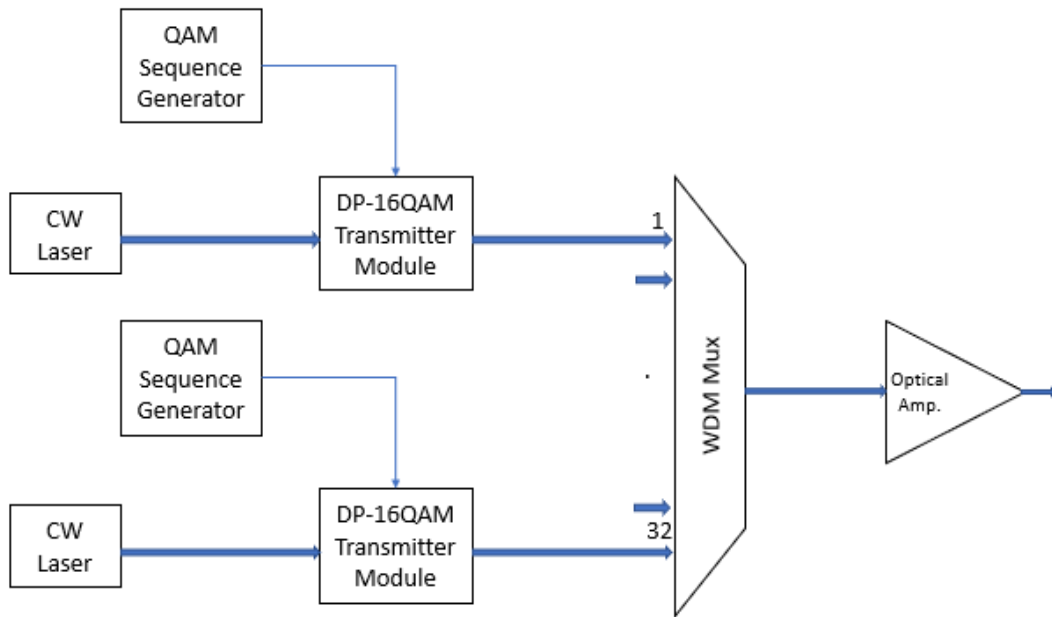
حيث أن : $M = 2^h$

حيث أن h هي عدد البتات بالرمز (في حالتنا $h = 4$ كون مولد التتابع هذا مسؤول عن أحد الإستقطابات فقط) و Φ هي مقدار انزياح الطور .

الجدول (4-1) محددات الليزر المستخدم لنظام WDM 16QAM [الباحث]

Frequency	193–193.775 THz
Power	–5dBm = 0.3mw to +5dBm = 3mw
Line-width	0.1MHz
Initial phase	0 deg
Wavelength Spacing	25GHz

بعد تجميع القنوات باستخدام مجمع WDM يتم تضخيم الإشارة قبل إرسالها بواسطة مضخم ضوئي.



الشكل (1-4) قسم الإرسال في نظام DWDM DP-16QAM [الباحث]

تتكون وحدة إرسال DP-16QAM كما يوضح الشكل (2-4) من أربع معدلات ماك زندر يتم تغذيتها بواسطة ليزر محلي و مجزء حزمة (Beam-Splitter) و يتم التحكم بهم بواسطة مولد تتابع QAM.

كل زوج من معدلي ماك زندر يعالج أحد الإستقطابات و كل معدل من الزوج يكون مزاحاً عن الآخر بفرق طور 90 درجة ، ويتم في النهاية مزج الإستقطابين بواسطة مازج الحزم (Beam Combiner) من أجل الإرسال بقناة واحدة ضمن مجمع WDM .

- يتم التحكم بطاقة الخرج على مخرج معدل ماك زندر بواسطة جهدي التحكم المطبقين على طرفي المعدل حيث يعبر عن كثافة الخرج بالعلاقة :

$$E_O(t) = \frac{E_{in}(t)}{10^{(IL/20)}} \cdot [\gamma \cdot e^{(j\pi v_2(t)/V_{\pi RF} + j\pi v_{bias2}/V_{\pi DC})} + (1 - \gamma) \cdot e^{(j\pi v_1(t)/V_{\pi RF} + j\pi v_{bias1}/V_{\pi DC})}]$$

[45] (4.2)

حيث :

$E_{in}(t)$ هي إشارة الدخل

IL هو فقد الدخل

$V_1 V_2$ جهدي التحكم على طرفي معدل ماك زندر والتي يتم إعطائها من مولد تتابع QAM

$v_{bias1}(t) v_{bias2}(t)$ جهود الإنحياز

$V_{\pi RF}$ جهد تبديل التعديل

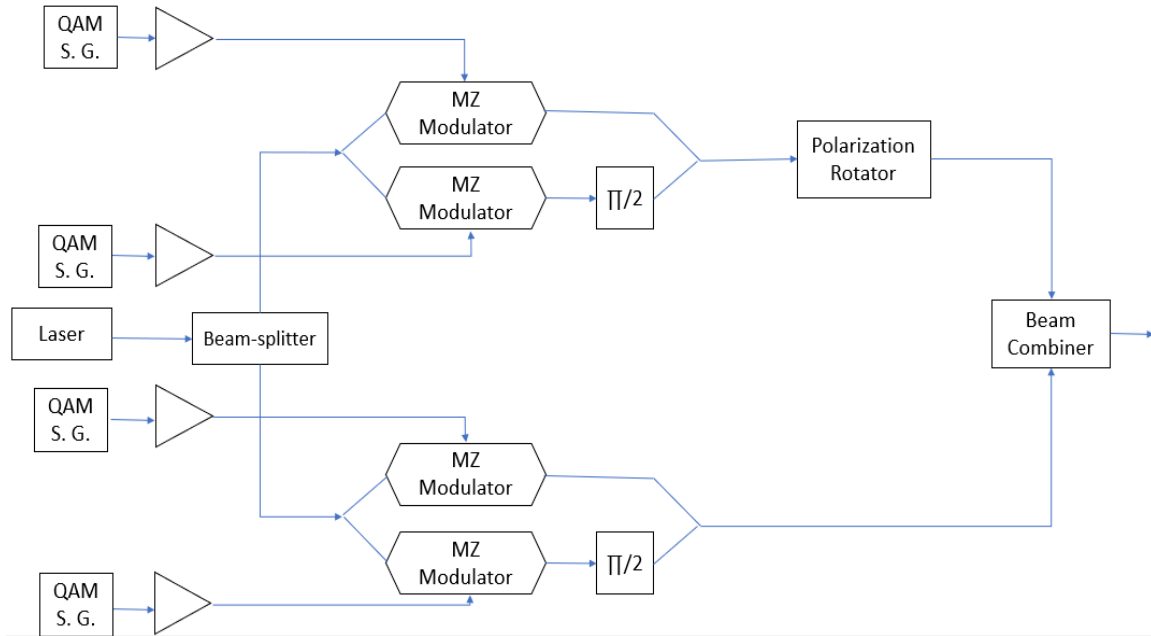
$V_{\pi DC}$ جهد تبديل الإنحياز

γ هي نسبة فصل الطاقة لفرعي المعدل

- تعطى علاقة خرج عنصر إزاحة الإشارة مع الدخل بالعلاقة :

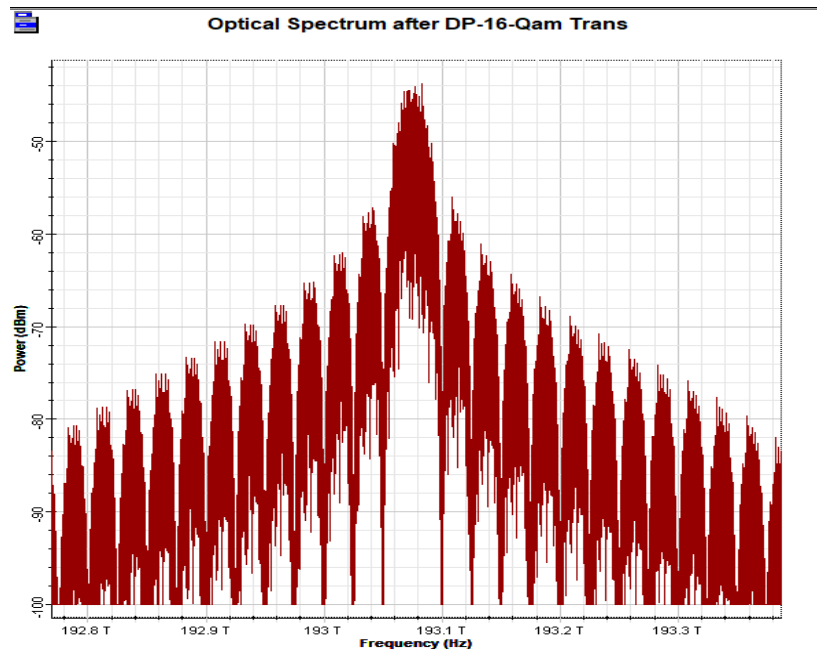
$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \exp(j\Delta\Phi) \quad (\text{opisystem17}) \quad (4.3)$$

حيث $\Delta\Phi$ هي قيمة إزاحة الطور (بجالتا $\pi/2$)



الشكل (2-4) وحدة إرسال DP-16QAM [الباحث]

ويكون شكل الطيف بعد وحدة إرسال DP-16QAM للقناة الأولى كما في الشكل (3-4) .



الشكل (3-4) طيف الإشارة على خرج وحدة إرسال DP-16QAM للقناة الأولى [الباحث]

و نلاحظ من الشكل أن مركز طيف الإشارة يكون عند القيمة 193.075THz مع وجود توافقيات جانبية والتي تنتج عن عملية التعديل (تحميل إشارة المعلومات على إشارة الحامل) .

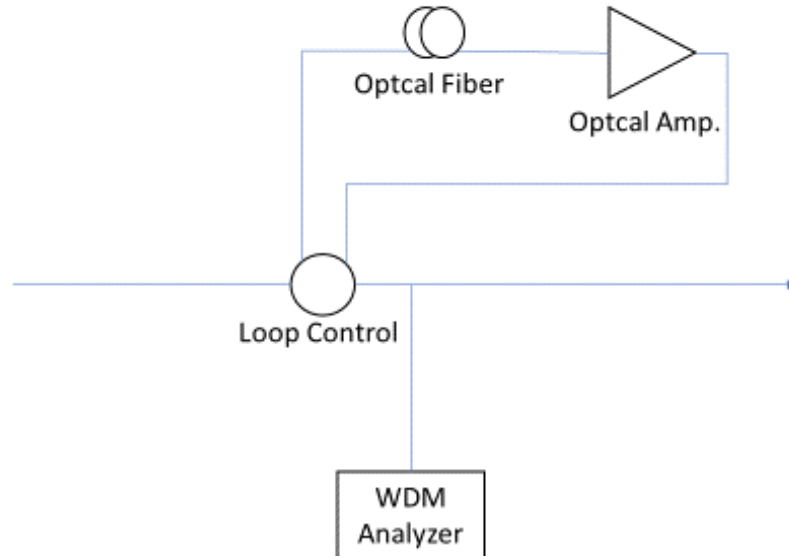
4-1-2- الوصلة الضوئية لنظام DWDM DP-16QAM :

تنتشر الإشارة الضوئية المرسله عبر الليف الضوئي من النوع (SMF) على مسافة 160Km، تم استخدام الليف من النوع SMF كونه يعطي فعالية طيفية أعلى لمسافة إرسال أكبر مقارنة بالليف ذو النوع (MMF)، حيث تم تمثيل الوصلة الضوئية كما يوضح الشكل (4-4) من وصلة بطول 80Km مع مضخم ضوئي نوع (EDFA) (مضخم الألياف المشبعة بالإربيوم) والذي يعمل بفعالية عالية مع أنظمة DWDM و عند الحزمة C (التي نعمل عندها) و حيث أنه يقوم بالتعويض بشكل متساوي لكافة القنوات ، ويتم تكرار الوصلة مرتين بواسطة حلقة تحكم (Loop Control) .

تم اختيار بارامترات الليف الضوئي وفق الجدول (2-4) .

الجدول (2-4) بارامترات الليف الضوئي لنظام DWDM DP-16QAM [الباحث]

Parameter	Value
Reference wavelength	1550 nm
Length	160Km
Attenuation	0.2 dB/km
Dispersion	16.75 ps/nm/km
Dispersion slope	0.075 ps/nm ² /km
PMD co-efficient	0.05 ps/sqrt(km)



الشكل (4-4) الوصلة الضوئية لنظام DWDM DP-16QAM [الباحث]

4-3-1 = قسم الإستقبال في نظام DWDM DP-16QAM :

كما هو موضح بالشكل (4-5) يتكون قسم الإستقبال من مفكك تجميع WDM والذي يخرج 32 إشارة خاصة بالقنوات المرسلّة ، تدخل بعدها كل إشارة إلى مرشح غاوص ليتم ترشيحها، تدخل بعدها على وحدة استقبال DP-16QAM والتي تقوم بفصل الإشارة الواردة إلى أربع إشارات كل إشارتين باستقطاب مختلف وبين كل إشارة و أخرى فرق طور 90 درجة ، تدخل هذه الإشارات بعدها إلى وحدة المعالجة الرقمية DSP التي تقوم بمعالجة الإشارة و تعويض التأثيرات اللاخطية ، تأتي بعدها مرحلة أخذ القرار بواسطة Decision Maker ، و من ثم يتم تفكيك الترميز بواسطة مفكك تتابع QAM ، يتم بعدها جمع الإشارات بواسطة محول P/S وبالتالي نحصل على إشارة المعلومات المرسلّة .

- يعطى عامل تحويل مرشح غاوص بالعلاقة :

$$H(f) = \alpha e^{-\ln(\sqrt{2})\left(\frac{f-f_c}{B/2}\right)^{2N}} \quad (4.4) \text{ (opisystem17)}$$

حيث: α هي فقد الدخل ، f هو التردد ، B هو عرض الحزمة

f_c هو التردد المركزي للمرشح (في حالتنا يكون التردد المركزي للقناة المستقبلة، مثلاً 193THz للقناة الأولى)

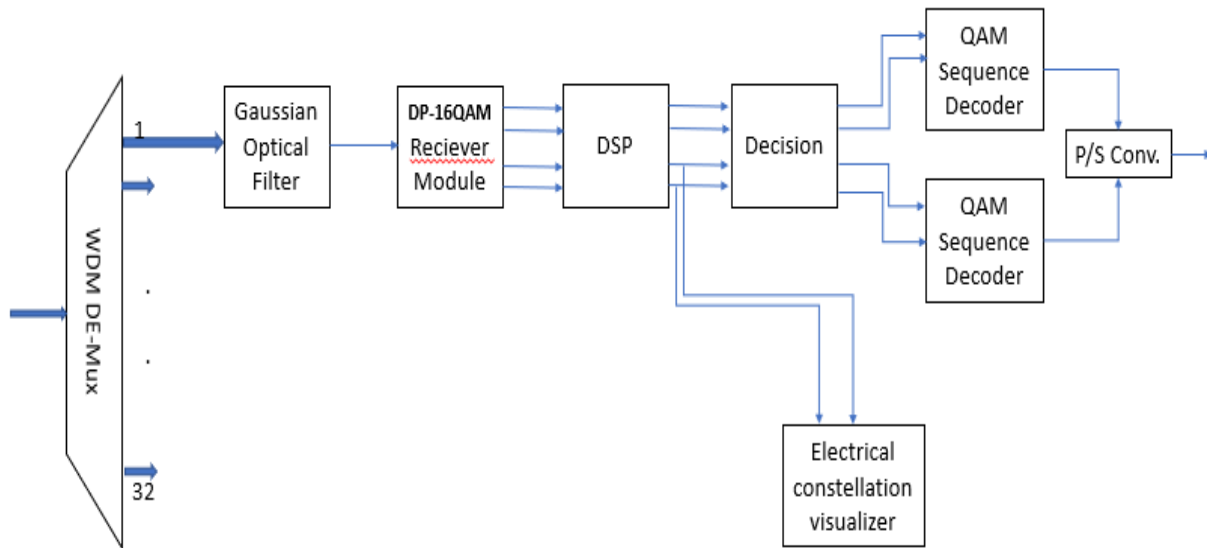
- إن قيمة الطور Φ_i ترتبط برقم التسلسل المحتمل لمولد التتابع M بالعلاقة :

$$\phi_i = \left(\frac{2\pi}{M}(i-1) + \phi \right), i = 1, 2, \dots, M \quad (4.5) [20]$$

حيث أن :

$$M = 2^h$$

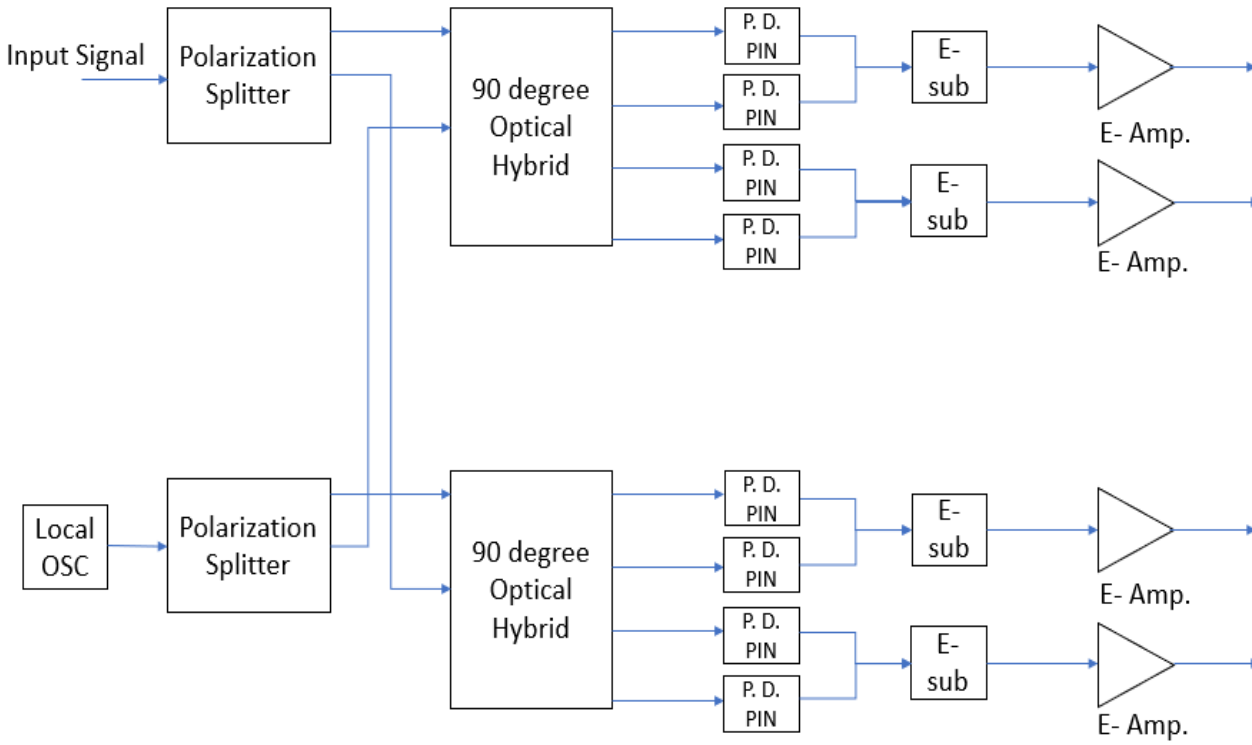
حيث أن h هي عدد البتات بالرمز (في حالتنا $h = 4$ كون مولد التتابع هذا مسؤول عن أحد الإسطقات) و ϕ هي مقدار انزياح الطور .



الشكل (5-4) قسم الإستقبال في نظام DWDM DP-16QAM [الباحث]

تتكون وحدة استقبال DP-16QAM كما يوضح الشكل (4-6) من مجزء استقطاب Polarization Splitter يقوم بفصل الإشارة المستقبلة إلى إشارتين باستقطابين مختلفين ، يتم مزج هذه الإشارتين مع إشارتين مولدتين بواسطة ليزر محلي Laser Diod (يعمل بمثابة Local Oscillator) ، يتم المزج بواسطة مازجي 90 degree Optical Hybrid ويكون كل مازج معنى بأحد الإستقطابات و على خرج كل مازج 4 إشارات كل إشارتين مختلفتين عن الإشارتين الأخرتين بفرق طور 90 درجة ، و تدخل كل إشارتين على كواشف PIN photodiode ، يتم بعدها جمعها بإشارة واحدة و إدخالها إلى مضخم إلكتروني .

نحصل في خرج وحدة استقبال DP-16QAM على أربع إشارات كل إشارتين باستقطاب مختلف وبين كل إشارة و أخرى فرق طور 90 درجة .



الشكل (4-6) وحدة استقبال DP-16QAM [الباحث]

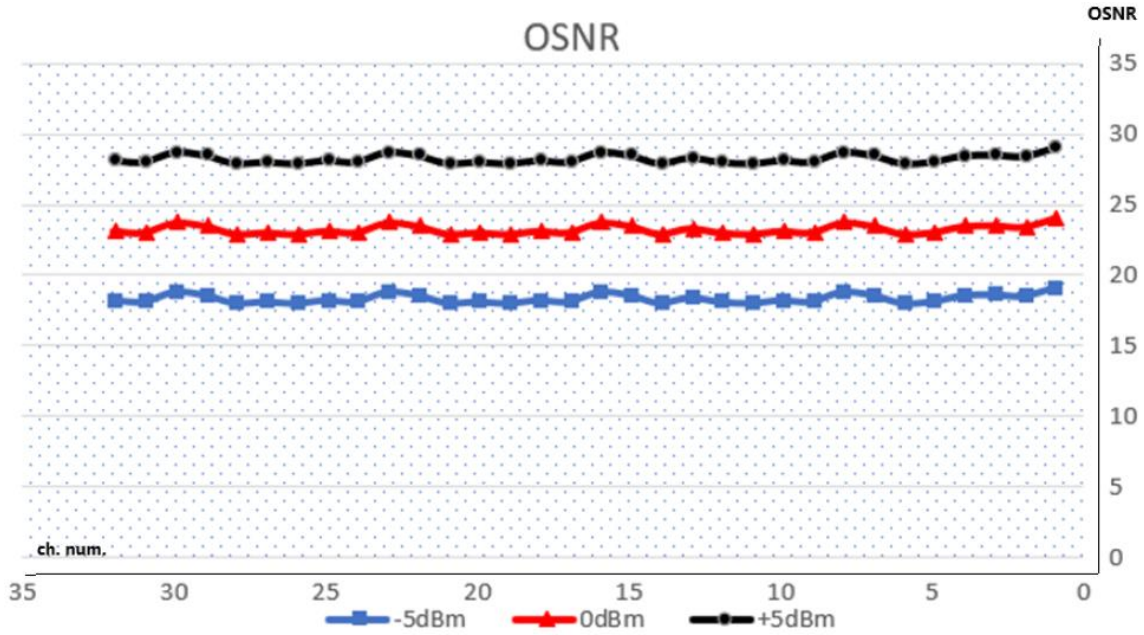
2-4- مناقشة النتائج :

تمت محاكاة النظام على بيئة 17 Optisystem للحصول على النتائج وتحليلها، حيث تم تصميم نظام DWDM DP-16QAM ذو 32 قناة بمعدل إرسال كلي (3.2Tb/s) ومسافة إرسال 160KM.

4-2-1- أثر تغير طاقة الإرسال :

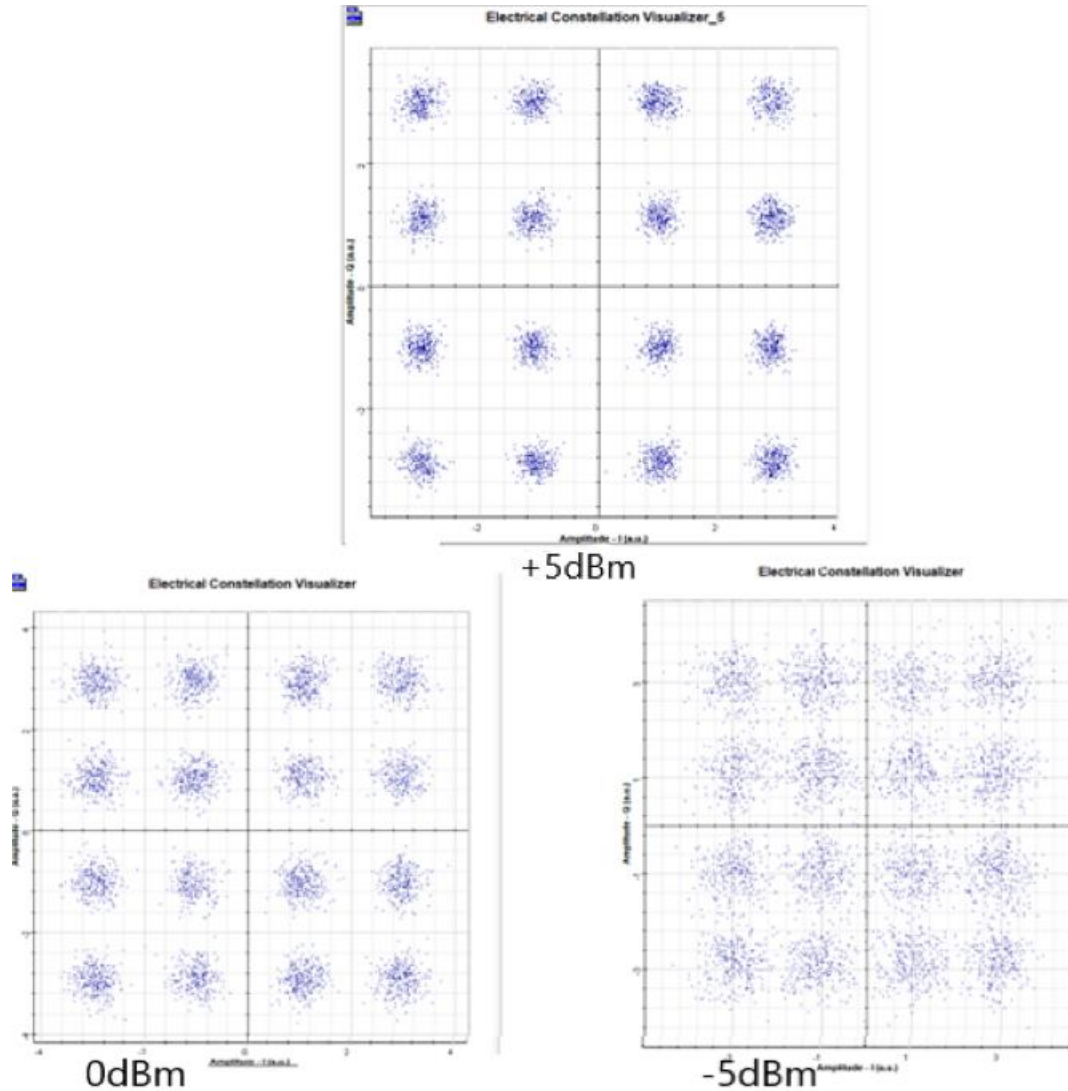
تعتبر طاقة الإرسال من المحددات الهامة التي تؤثر على أداء النظام، لذلك تمت دراسة أثر تغير طاقة الإرسال على الإشارة، حيث تم أخذ قيمة OSNR و قيمة المعامل Q-Factor وشكل كوكبة الإشارة بعين الاعتبار، ومقارنة النتائج للقنوات المتعددة من أجل عدة قيم لطاقة الإرسال.

يوضح الشكل (4-7) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR للقنوات المتعددة.



الشكل (4-7) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR [الباحث]

كما يوضح الشكل (4-8) تغير شكل كوكبة إشارة الإستقبال (electrical constellation) الخاصة بنظام 16QAM على خرج وحدة المعالجة الرقمية DSP مع زيادة طاقة الإرسال .



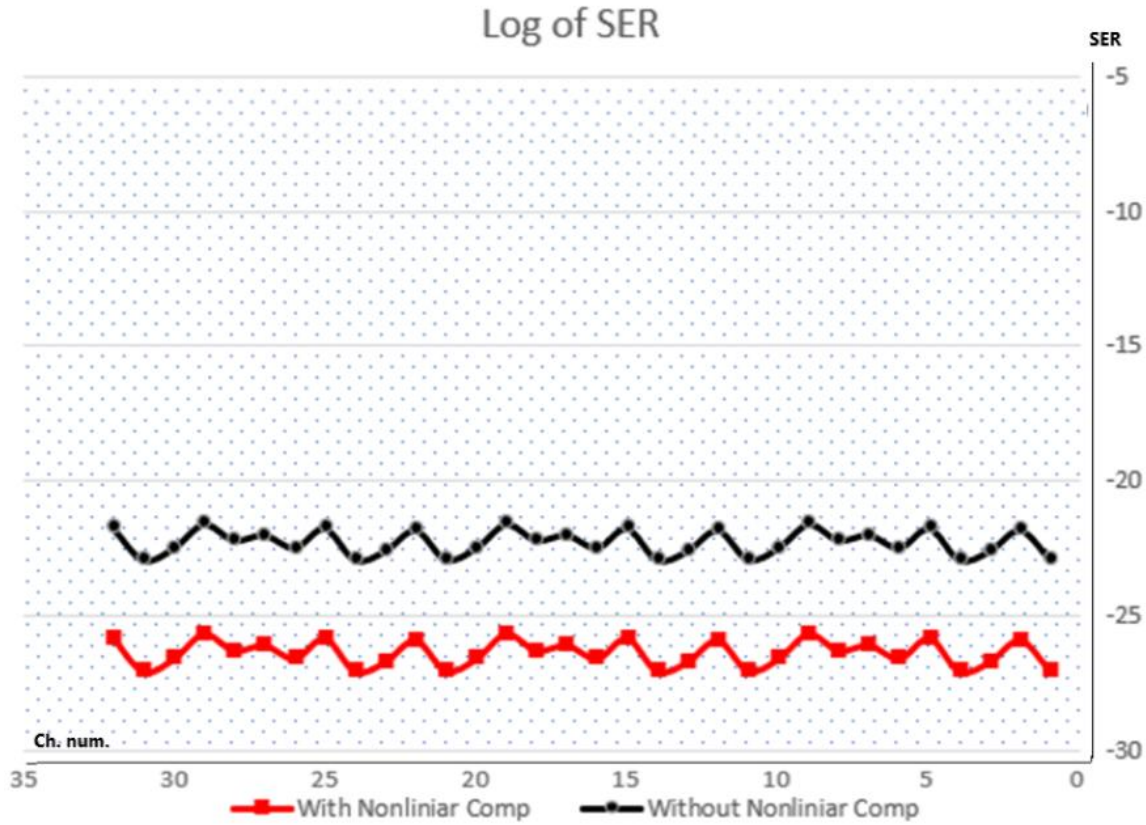
الشكل (4-8) أثر تغير طاقة الإرسال على شكل (electrical constellation) [الباحث]

نلاحظ من الشكل (4-7) التأثير الواضح لزيادة طاقة الإرسال على الإشارة حيث زادت قيمة OSNR بمقدار حوالي 10 ديسبل عند الإرسال بطاقة +5dBm (ما يعادل 3.16mw) مقارنة بالإرسال بطاقة -5dBm . كما نلاحظ من الشكل (4-8) أنه عند طاقة إرسال +5dBm يكون استخلاص المعلومات من الإشارة أسهل.

4-2-2- أثر استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال:

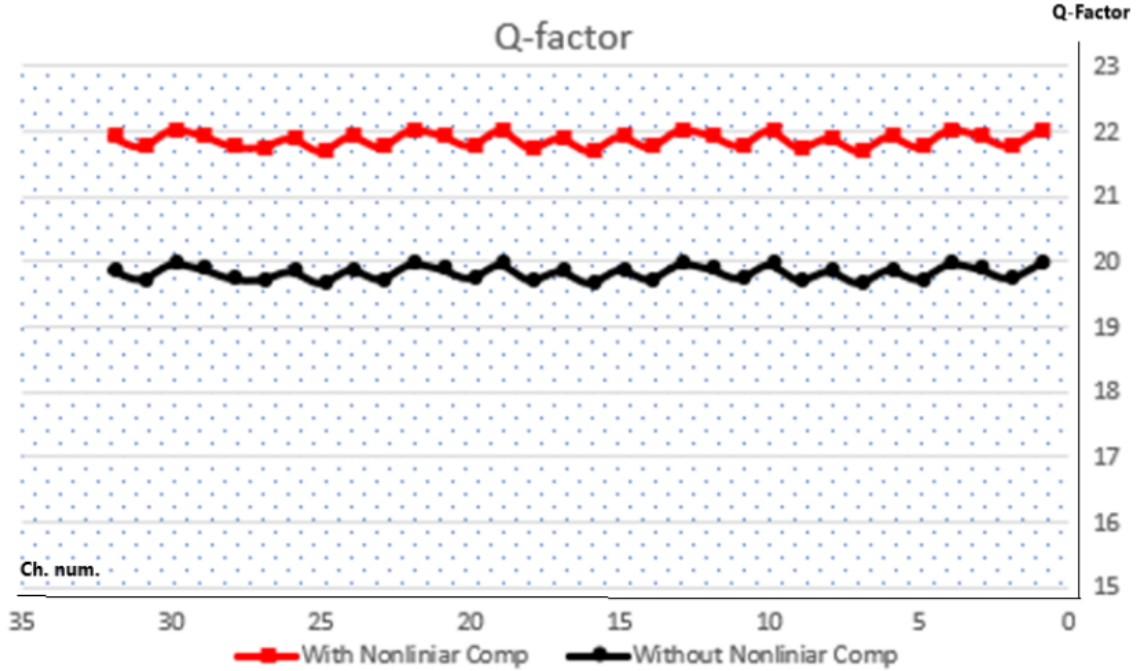
بهدف الحصول على أفضل أداء تم دراسة أثر استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال على تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER .

يوضح الشكل (4-9) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER عند استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال باستخدام وحدة DSP .



الشكل (4-9) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER عند تعويض التأثيرات اللاخطية [الباحث]

يوضح الشكل (4-10) تغير قيمة المعامل Q-Factor عند استخدام تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال .



الشكل (10-4) تغير قيمة المعامل Q-Factor عند تعويض التأثيرات اللاخطية [الباحث]

نلاحظ من الشكل (9-4) أنه عند استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال انخفضت قيمة معدل خطأ الرمز بحوالي 20% مقارنة بحالة عدم استخدام تلك الخاصية .

كما نلاحظ من الشكل (10-4) أن قيمة المعامل Q-Factor زادت بمقدار 2dB تقريباً مما يعطي أداء أفضل عند استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال مقارنة بحالة الإستقبال بدون تعويض .

4-2-3- أثر تقليل التباعد بين القنوات :

بهدف الحصول على أعلى فعالية طيفية دون أن تؤثر على أداء النظام، تم دراسة أثر تقليل التباعد بين القنوات.

حيث أن نظام 16QAM يقدم فعالية طيفية نظرية تصل إلى $(4b/s/Hz)$ ، وبالتالي فإن نظام DP-16QAM يقدم فعالية طيفية نظرية تصل إلى $(8b/s/Hz)$ كونه يعتمد على استقطابين حيث أن عدد البتات بالرمز يكون 8Bits/Symbol .

وبالتالي يجب أن يكون تباعد القناة أكبر من قيمة معينة وهي معدل الرمز.

Channel Spacing > Symbol Rate

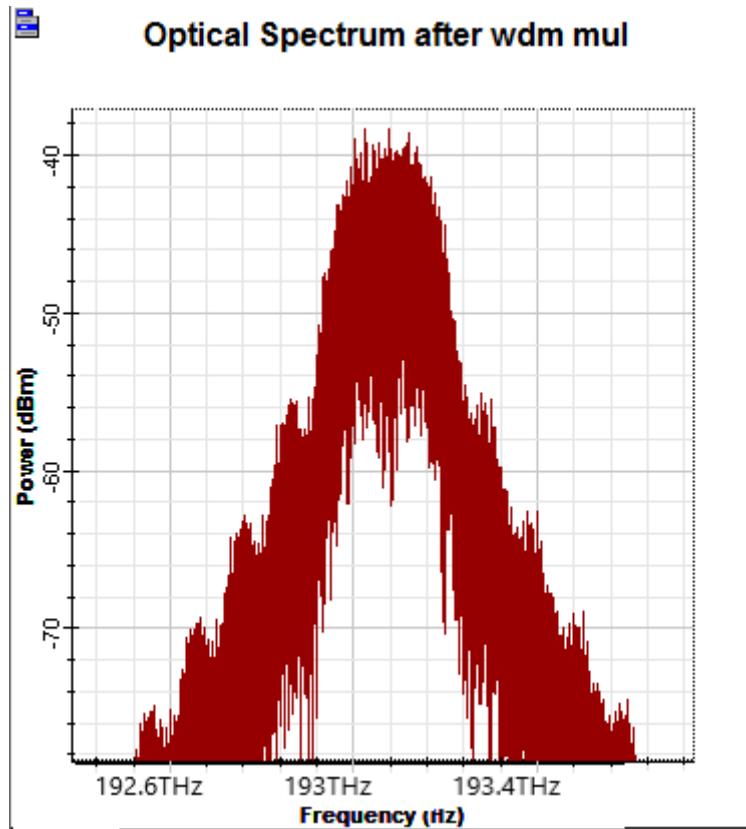
$$\text{Channel Spacing} > \frac{\text{BitRate}}{\text{Bits/Symbol}}$$

وبالتالي في الحالة التي يتم دراستها يكون

Channel Spacing > 12.5GHz

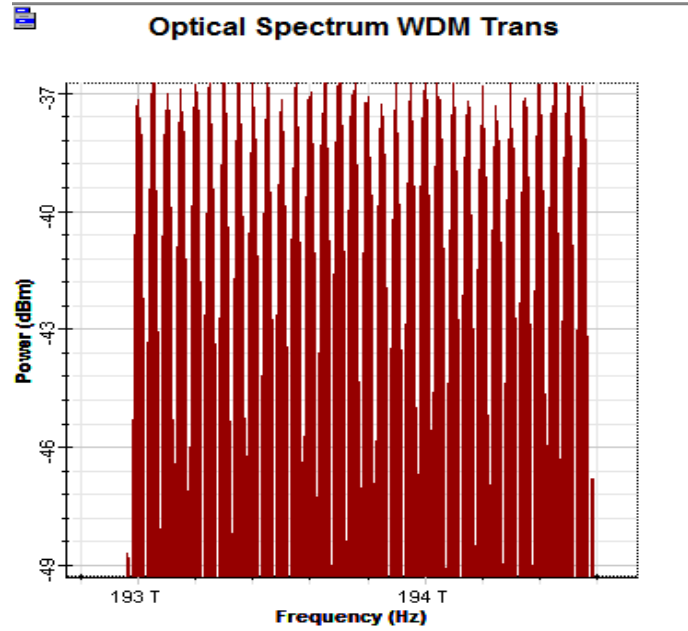
إلا أنه عمليا يتم الأخذ بعين الاعتبار الانحناء Roll-off لشكل الطيف الترددي مع إضافة هوامش جانبية لتجنب التداخل .

- من أجل تباعد طيفي 12.5GHz (للحصول على فعالية طيفية حوالي 8b/s/Hz وهي القيمة النظرية)، نلاحظ كما يبين الشكل (11-4) التداخل الحاصل بين القنوات بسبب عدم أخذ الهوامش المذكورة سابقاً بعين الاعتبار :



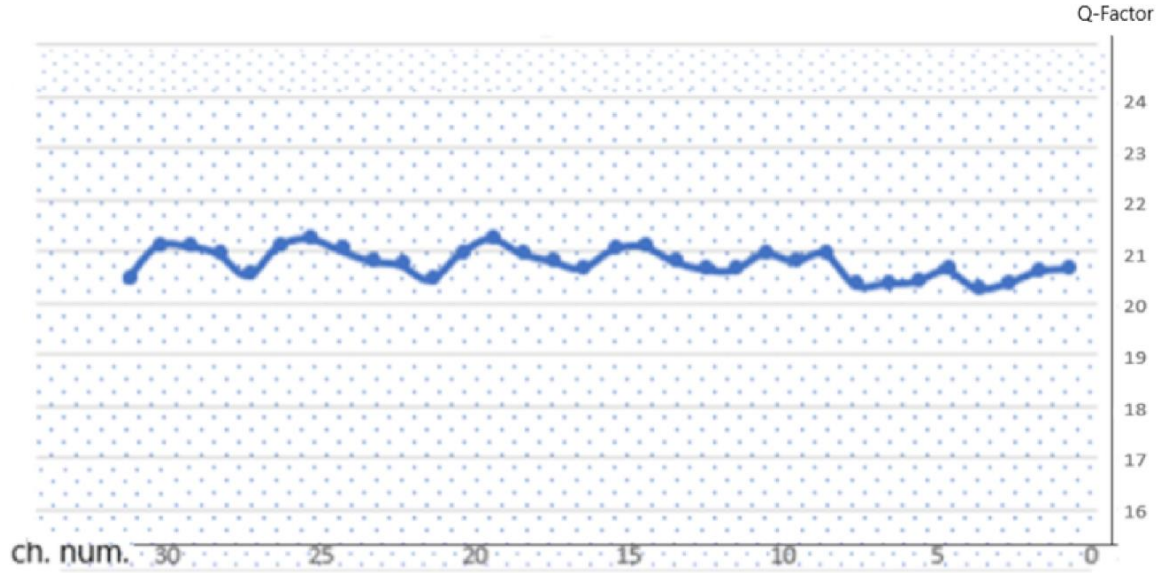
الشكل (11-4) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 12.5GHz [الباحث]

- من أجل ملاحظة عند أي تباعد بين القنوات تبدأ عملية التداخل (للحصول على أفضل فعالية طيفية) تم بداية الدراسة عند تباعد 50GHz والتي تعطي فعالية طيفية مساوية ل 2b/s/Hz وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (12-4)



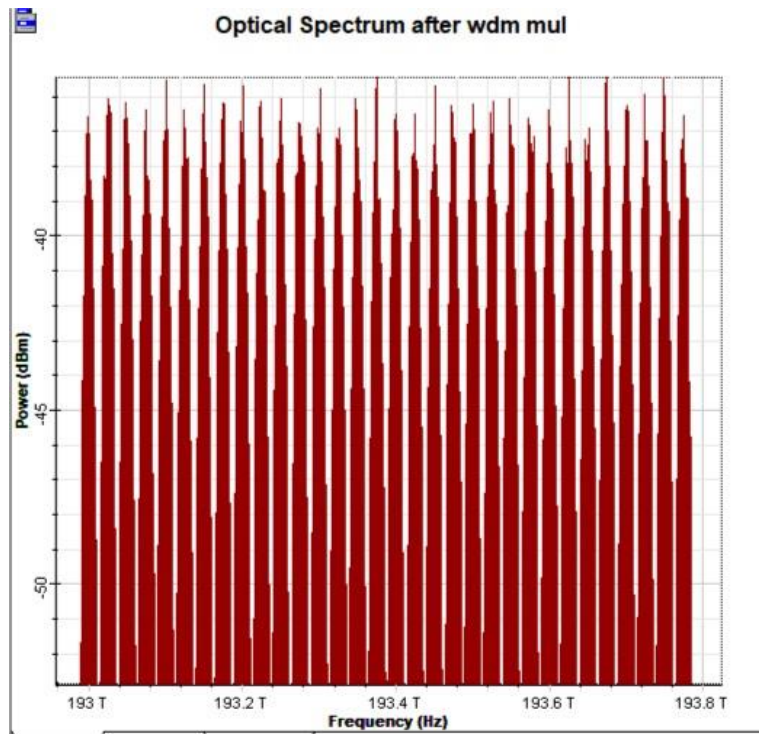
الشكل (12-4) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 50GHz [الباحث]

حيث يمتد طيف الإشارة من 193THz إلى 194.55THz ، ونلاحظ عدم وجود تداخل بين القنوات حيث كانت قيمة Q-Factor للقنوات المتعددة مرتفعة (حوالي 20) كما هو موضح بالشكل (13-4) (عند الإرسال بطاقة 5dBm) .



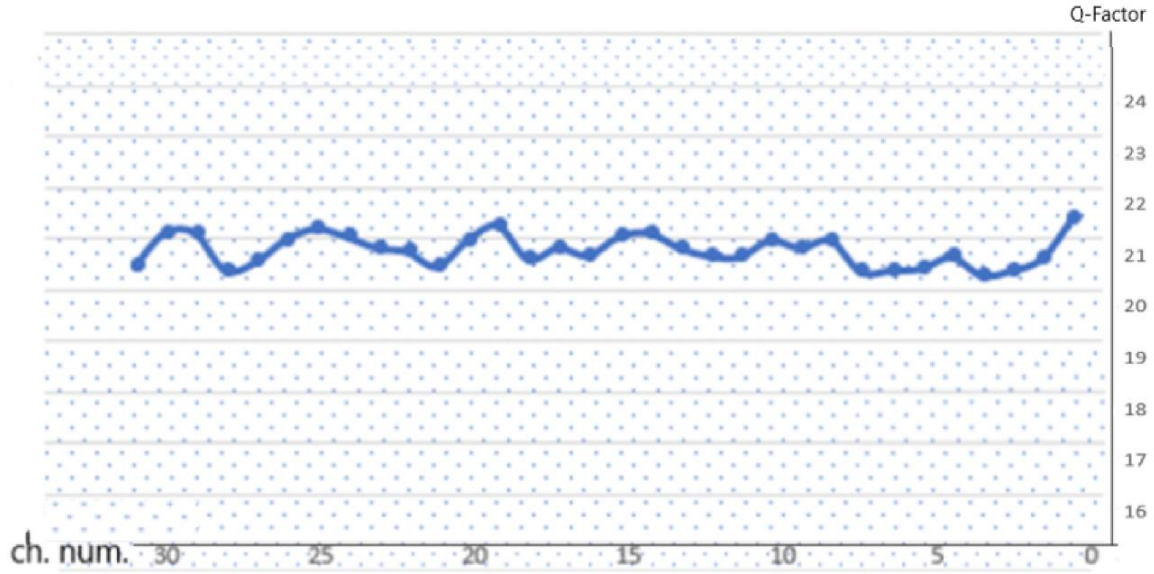
الشكل (4-13) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 50GHz

تم إنقاص التباعد إلى 25GHz والذي يعطي فعالية طيفية مساوية لـ 4b/s/Hz ، وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (4-14) .



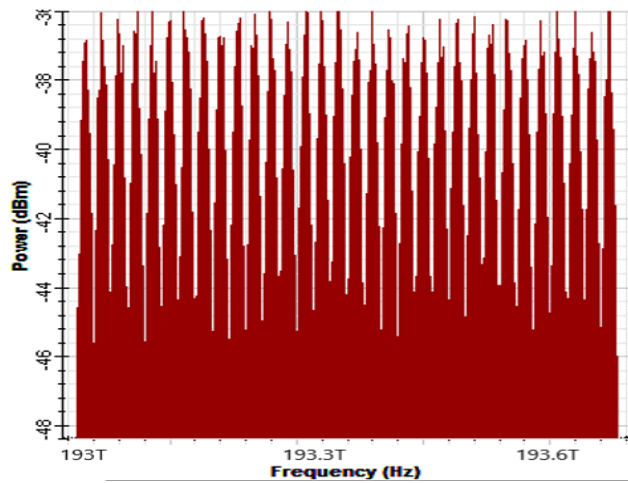
الشكل (4-14) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 25GHz [الباحث]

إن طيف الإشارة لـ 32 قناة يمتد من 193THz وحتى 193.775THz وبتباعد 25GHz بين كل قناتين متجاورتين، ونلاحظ عدم وجود تداخل بين القنوات المتجاورة حيث بقيت قيمة Q-Factor للقنوات المتعددة مرتفعة (حوالي 20) كما هو موضح بالشكل (4-15) ، ونلاحظ أنها نفس القيمة بالحالة السابقة (عند تباعد 50GHz) ، أي أنه تم الحصول على ضعف الفعالية الطيفية دون التأثير على أداء النظام.



الشكل (4-15) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 25GHz [الباحث]

تم إنقاص التباعد إلى 20GHz والذي يعطي فعالية طيفية مساوية لـ 5b/s/Hz ، وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (4-16)



الشكل (4-16) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 20GHz [الباحث]

إن طيف الإشارة لـ 32 قناة يمتد من 193THz وحتى 193.62THz وبتباعد 20GHz بين كل قناتين متجاورتين، ونلاحظ وجود تداخل بين القنوات المتجاورة (عند طاقة إشارة -45dBm تقريباً) ، وهذا التداخل أدى لانخفاض قيمة Q-Factor ، حيث كانت قيمة Q-Factor للقنوات المتعددة حوالي (9) كما هو موضح بالشكل (4-17) ، حيث نلاحظ أن قيمة Q-Factor انخفض للنصف تقريباً ، وبالتالي فإن زيادة الفعالية الطيفية لهذا الحد من أجل النظام المدروس ستؤدي إلى تدهور أداء النظام .



الشكل (4-17) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 20GHz [الباحث]

بالنتيجة فإن النظام المدروس يقدم فعالية طيفية تصل لـ 4b/s/Hz وبتباعد قنوات 25GHz دون أن يؤثر ذلك على أداء النظام .

• مقارنة العمل المقدم مع الدراسات السابقة:

يوضح الجدول (3-4) مقارنة الأداء مع الدراسات السابقة ، حيث تمت المقارنة بناءً على المعامل Q-Factor ، السعة الكلية ، المسافة المختبرة والفعالية الطيفية .

الجدول (3-4) مقارنة النتائج مع الأعمال المقدمة في الفصل السابق [الباحث]

الدراسة (الباحث)	التقنية المستخدمة	سعة الإرسال الكلية (عدد الأقفان * معدل النقل لكل قناة)	الفعالية الطيفية (b/s/Hz)	Q-Factor	مسافة الإرسال (KM)
(Tomas 2020)	DWDM CP-DQPSK	32*100Gb/s 3.2Tb/s	1	7	150
العمل المقدم 1 DWDM DP-QPSK	DP-QPSK CD & DSP	32*100Gb/s 3.2Tb/s	2	19.46	160
العمل المقدم 2 DWDM DP-16QAM	DP-16QAM CD & DSP	32*100Gb/s 3.2Tb/s	4	20	160

كما هو موضح بالجدول قدم نظام DWDM المعتمد على تقنية CP-DQPSK فعالية طيفية تصل إلى 1b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، وتم الحصول على قيمة Q-factor مساوية ل 7 من أجل مسافة إرسال 150Km .

قدم العمل الذي تمت دراسته خلال الفصل الثالث والذي يستخدم نظام DWDM و المعتمد على تقنية DP-QPSK فعالية طيفية أعلى مقارنة بالدراسات السابقة، والتي وصلت ل 2b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، كما تم الوصول إلى معامل Q-Factor مساوي ل 19.46 من أجل مسافة إرسال 160Km .

قدم العمل الذي تمت دراسته خلال هذا الفصل والذي يستخدم نظام DWDM و المعتمد على تقنية DP-16QAM فعالية طيفية أعلى مقارنة بنظام DWDM DP-QPSK ، والتي وصلت ل 4b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، كما تم الوصول إلى معامل Q-Factor مساوي ل 20 من أجل مسافة إرسال 160Km .

4-3- خلاصة :

تم في هذا الفصل دراسة لنظام التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية باستخدام التعديل المطالي المتعامد من الدرجة 16 (DWMD 16QAM) . حيث تم الإرسال عبر 32 حامل فرعي سعة كل حامل 100Gb/s وبمعدل إجمالي (3.2Tb/s) و بتباعد بين القنوات قدره 25GHz والذي يعطي فعالية طيفية مقدارها (4b/s/Hz) .

حيث أظهرت النتائج أنه عند انقاص طاقة الإرسال عن الحد +5dBm تقل قيمة كل من OSNR و المعامل Q-Factor ، كما أظهر النظام أداء أفضل عند تعويض التأثيرات اللاخطية ضمن وحدة DSP في طرف الإستقبال حيث كانت قيمة معدل خطأ الرمز SER أخفض وقيمة Q-Factor أعلى عند استخدام تقنية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال مقارنة بحالة الإرسال دون تعويض .

كما أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام المدروس يقدم فعالية طيفية تصل ل 4b/s/Hz وبتباعد قنوات 25GHz دون أن يؤثر ذلك على أداء النظام، حيث أنه عند تباعد قناة 20GHz بدأ حصول تداخل بين القنوات المتجاورة مما أثر سلباً على أداء النظام المدروس.

وبالمقارنة مع الدراسات المرجعية السابقة تبين أن نظام DWDM DP-16QAM قدم فعالية طيفية وسعة إرسال أعلى بكثير مقارنة بالدراسات السابقة كما قدم أداء أفضل بالنسبة لقيمة المعامل Q-factor الذي يحدد جودة النظام .

الفصل الخامس

**تصميم وتنفيذ نظام اتصالات ضوئي DWDM هجين باستخدام تقنيتي التعديل
(16QAM & QPSK)**

**Design and implementation of a DWDM Hybrid (16-Qam &
QPSK) system**

سيتم في هذا الفصل تصميم وتنفيذ نظام تجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية هجين Hybrid DWDM يعتمد على التعديل بإزاحة الطور الرباعي QPSK و التعديل المطالي المتعامد من المرتبة 16 16QAM ودراسة إمكانية التعايش بينها وأثرها على أداء النظام . وستتم المحاكاة في بيئة 17 Optisystem و سيتم اختبار النتائج و تقييمها بناءً على المعاملات OSNR, SER, Q-factor.

سيتم تصميم نظام Hybrid DWDM ذو 32 قناة (16 قناة 16QAM و 16 قناة QPSK) وكل قناة بمعدل 100Gb/s وبمعدل إجمالي (3.2 Tb/s)، و سيتم اختبار النتائج من أجل مدى مبدئي 160Km .

5-1- تصميم النظام :

5-1-1- قسم الإرسال :

كما هو موضح بالشكل (5-1) يتكون قسم الإرسال من 32 قناة ، يتم استخدام ليزر Laser Diod لأجل كل قناة و يغذي هذا الليزر بالنسبة للقنوات الستة عشر (9 حتى 24) وحدة إرسال DP-QPSK والتي يتم التحكم بها باستخدام مولد تتابع PSK . وبالنسبة لبقية القنوات (1-8 ، 24-32) يغذي الليزر وحدة إرسال DP-16QAM والتي يتم التحكم بها باستخدام مولد تتابع QAM .

- إن قيمة الطور Φ_i ترتبط برقم تسلسل مولد التتابع M بالعلاقة :

$$\Phi_i = \left(\frac{2\pi}{M}(i - 1) + \Phi \right), i = 1, 2, \dots, M \quad (5.1) [20]$$

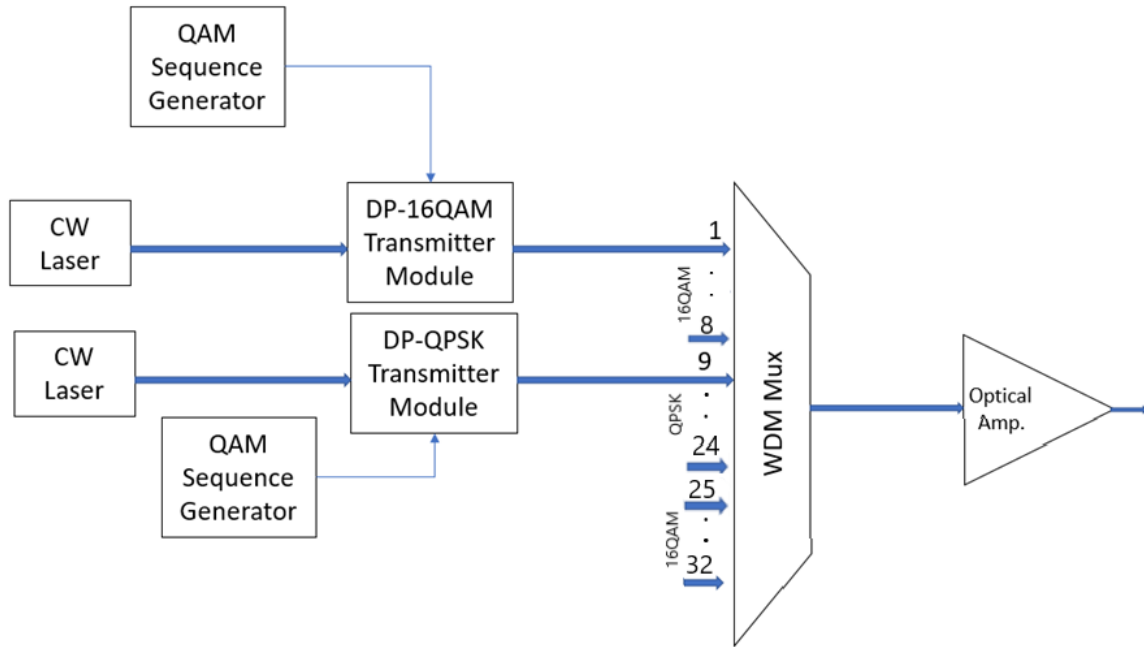
حيث أن : $M = 2^h$

حيث أن h هي عدد البتات بالرمز (في حالة QPSK يكون h = 2 وفي حالة 16-QAM يكون h=4 كون مولد التتابع هذا مسؤول عن أحد الاستقطابات فقط) و Φ هي مقدار انزياح الطور .

الجدول (5-1) محددات الليزر المستخدم لنظام WDM Hybrid [الباحث]

Frequency	193–194.55 THz
Power	-5dBm = 0.3mw to +5dBm = 3mw
Line-width	0.1MHz
Initial phase	0 deg
Wavelength Spacing	50GHz

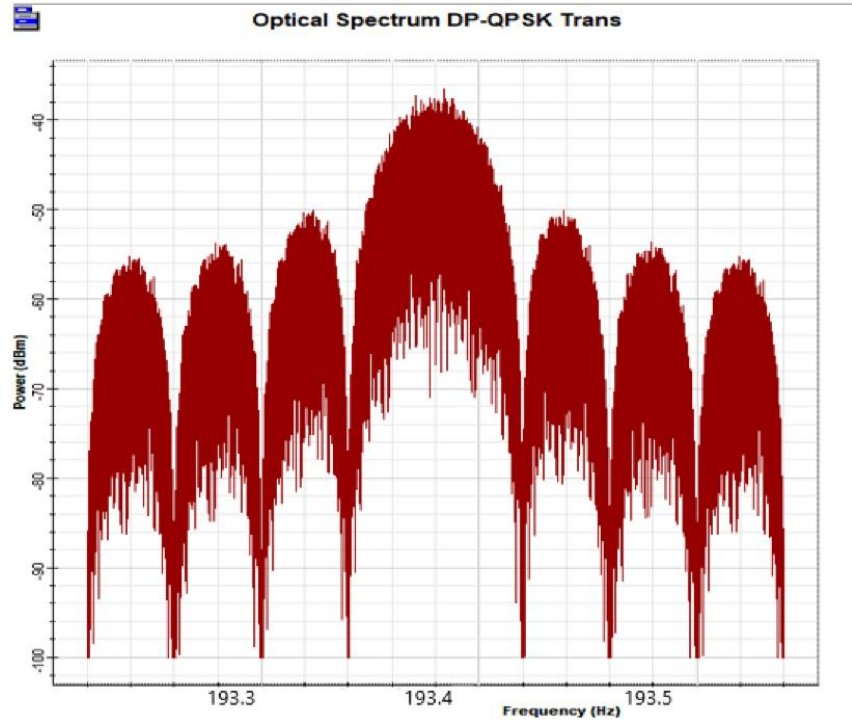
بعد تجميع القنوات باستخدام مجمع WDM يتم تضخيم الإشارة قبل إرسالها بواسطة مضخم ضوئي.



الشكل (5-1) قسم الإرسال في نظام DWDM Hybrid [الباحث]

• **ملاحظة :** تم شرح مكونات وحدتي إرسال DP-QPSK و DP-16QAM والعلاقات المرتبطة بهم في الفصلين السابقين ولم يتم إيرادهم هنا لتجنب التكرار .

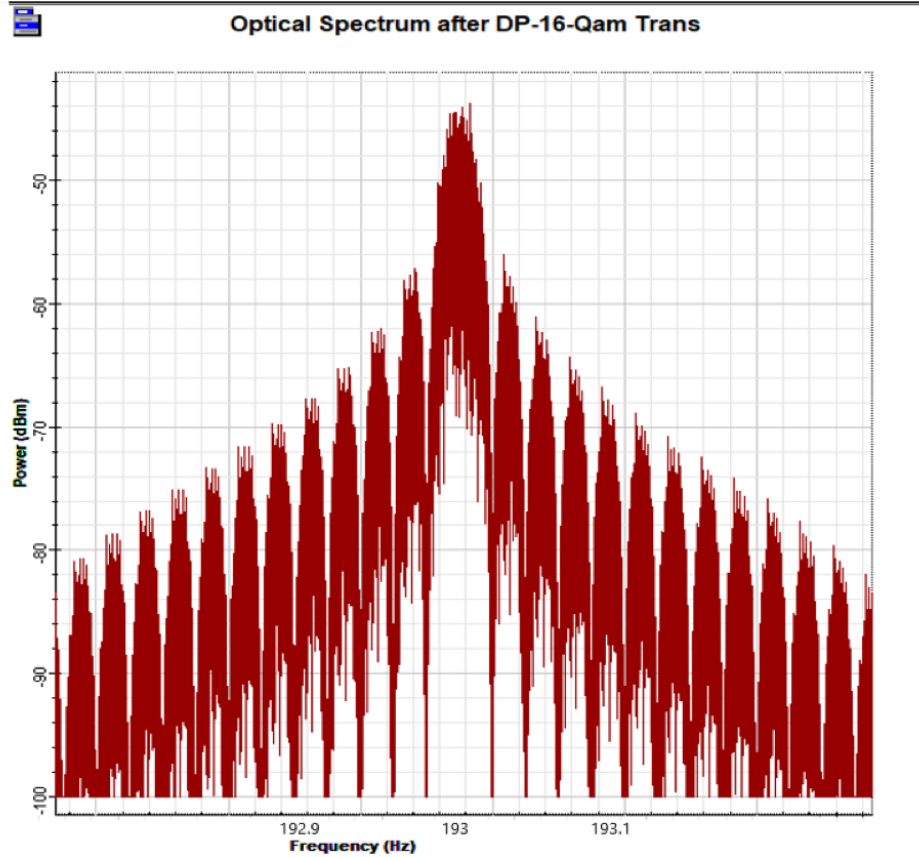
يكون شكل الطيف بعد وحدة إرسال DP-QPSK للقناة رقم 9 كما في الشكل (2-5) .



الشكل (2-5) طيف الإشارة على خرج وحدة إرسال DP-QPSK للقناة رقم 9 [الباحث]

نلاحظ أن مركز طيف الإشارة يكون عند القيمة 193.4THz للقناة رقم 9 مع وجود توافقيات جانبية والتي تنتج عن عملية التعديل (تحميل إشارة المعلومات على إشارة الحامل) .

ويكون شكل الطيف بعد وحدة إرسال DP-16QAM للقناة الأولى كما في الشكل (3-5) .



الشكل (3-5) طيف الإشارة على خرج وحدة إرسال DP-16QAM للقناة الأولى [الباحث]

ونلاحظ أن مركز طيف الإشارة يكون عند القيمة 193THz للقناة رقم 1 مع وجود توافقيات جانبية والتي تنتج عن عملية التعديل (تحميل إشارة المعلومات على إشارة الحامل) .

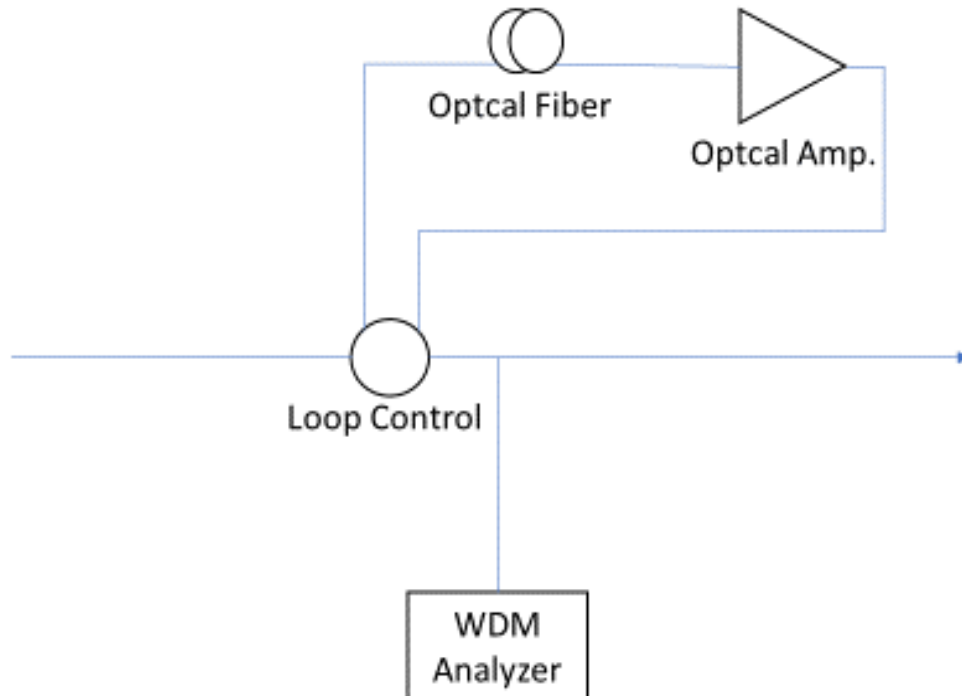
5-1-2- الوصلة الضوئية

تنتشر الإشارة ذات الـ 10 حوامل فرعية عبر الليف الضوئي من النوع (SMF) على مسافة 160Km، كونه يعطي فعالية طيفية أعلى لمسافة إرسال أكبر مقارنة بالليف ذو النوع (MMF) ، حيث تم تمثيل الوصلة الضوئية كما يوضح الشكل (4-5) من وصلة بطول 80Km مع مضخم ضوئي نوع (EDFA) (مضخم الألياف المشبعة بالإربيوم) والذي يعمل بفعالية عالية مع أنظمة DWDM و عند الحزمة C (التي نعمل عندها) و حيث أنه يقوم بالتعويض بشكل متساوي لكافة القنوات ، ويتم تكرار الوصلة مرتين بواسطة حلقة تحكم (Loop Control) .

تم اختيار بارامترات الليف الضوئي وفق الجدول (2-5) .

الجدول (2-5) بارامترات الليف الضوئي لنظام DWDM Hybrid [الباحث]

Parameter	Value
Reference wavelength	1550 nm
Length	160Km
Attenuation	0.2 dB/km
Dispersion	16.75 ps/nm/km
Dispersion slope	0.075 ps/nm ² /km
PMD co-efficient	0.05 ps/sqrt(km)



الشكل (4-5) الوصلة الضوئية لنظام DWDM Hybrid [الباحث]

5-1-3- قسم الإستقبال :

يتكون قسم الإستقبال كما يوضح الشكل (5-5) من مفكك تجميع WDM والذي يخرج 32 إشارة خاصة بالقنوات المرسله

بالنسبة لقنوات DP-QPSK تدخل الإشارة إلى مرشح غاوص ليتم ترشيحها، تدخل بعدها على وحدة استقبال DP-QPSK والتي تقوم بفصل الإشارة الواردة إلى أربع إشارات كل إشارتين باستقطاب مختلف وبين كل إشارة و أخرى فرق طور 90 درجة ، تدخل هذه الإشارات بعدها إلى وحدة المعالجة الرقمية DSP التي تقوم بمعالجة الإشارة و تعويض التأثيرات اللاخطية ، تأتي بعدها مرحلة أخذ القرار بواسطة Decision Maker ، و من ثم يتم تفكيك الترميز بواسطة PSK Sequence Decoder ، يتم بعدها جمع الإشارات بواسطة محول P/S وبالتالي نحصل على إشارة المعلومات المرسله .

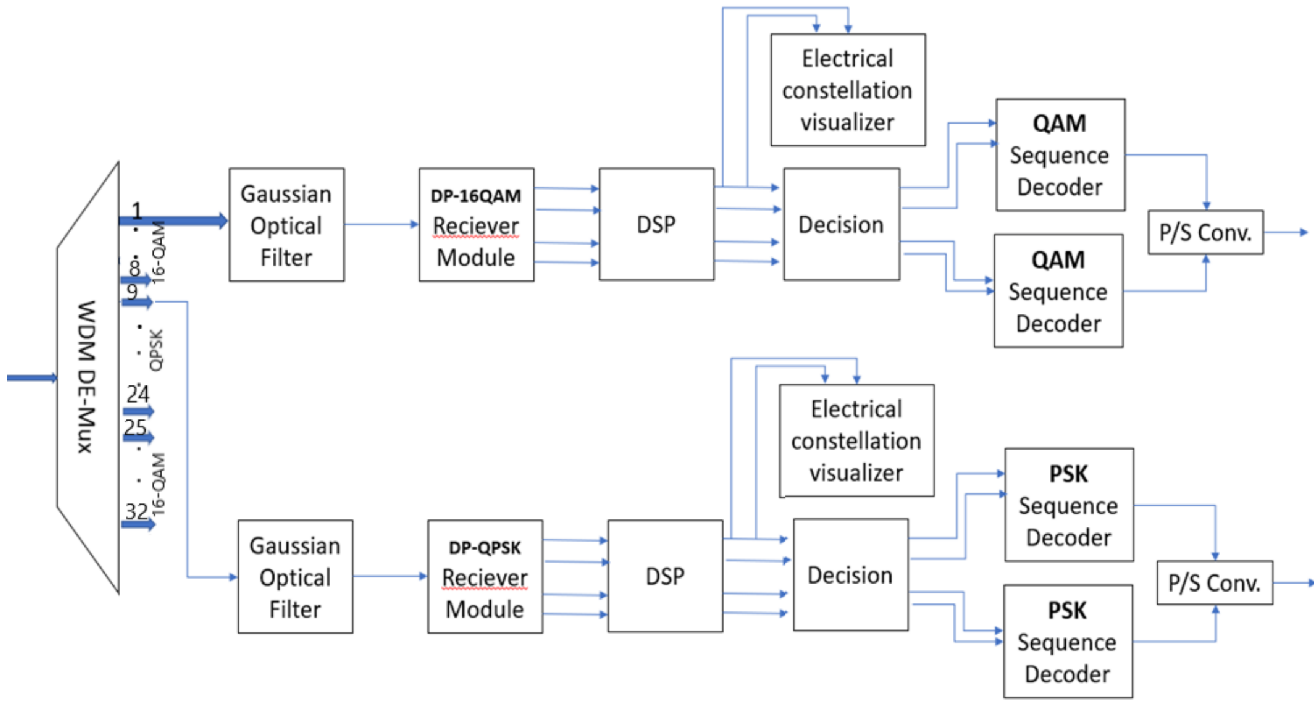
أما بالنسبة لقنوات DP-16QAM تدخل الإشارة إلى مرشح غاوص ليتم ترشيحها، تدخل بعدها على وحدة استقبال DP-16QAM والتي تقوم بفصل الإشارة الواردة إلى أربع إشارات كل إشارتين باستقطاب مختلف وبين كل إشارة و أخرى فرق طور 90 درجة ، تدخل هذه الإشارات بعدها إلى وحدة المعالجة الرقمية DSP التي تقوم بمعالجة الإشارة و تعويض التأثيرات اللاخطية ، تأتي بعدها مرحلة أخذ القرار بواسطة Decision Maker ، و من ثم يتم تفكيك الترميز بواسطة QAM Sequence Decoder ، يتم بعدها جمع الإشارات بواسطة محول P/S وبالتالي نحصل على إشارة المعلومات المرسله .

- إن قيمة الطور Φ_i ترتبط برقم التسلسل المحتمل لمولد التتابع M بالعلاقة :

$$\varphi_i = \left(\frac{2\pi}{M}(i-1) + \phi \right), i = 1, 2, \dots, M \quad (5.2) [20]$$

حيث أن : $M = 2^h$

حيث أن h هي عدد البتات بالرمز (في حالة QPSK يكون h = 2 وفي حالة 16-QAM يكون h=4 كون مولد التتابع هذا مسؤول عن أحد الإستقطابات فقط) و ϕ هي مقدار انزياح الطور .



الشكل (5-5) قسم الإستقبال في نظام WDM Hybrid [الباحث]

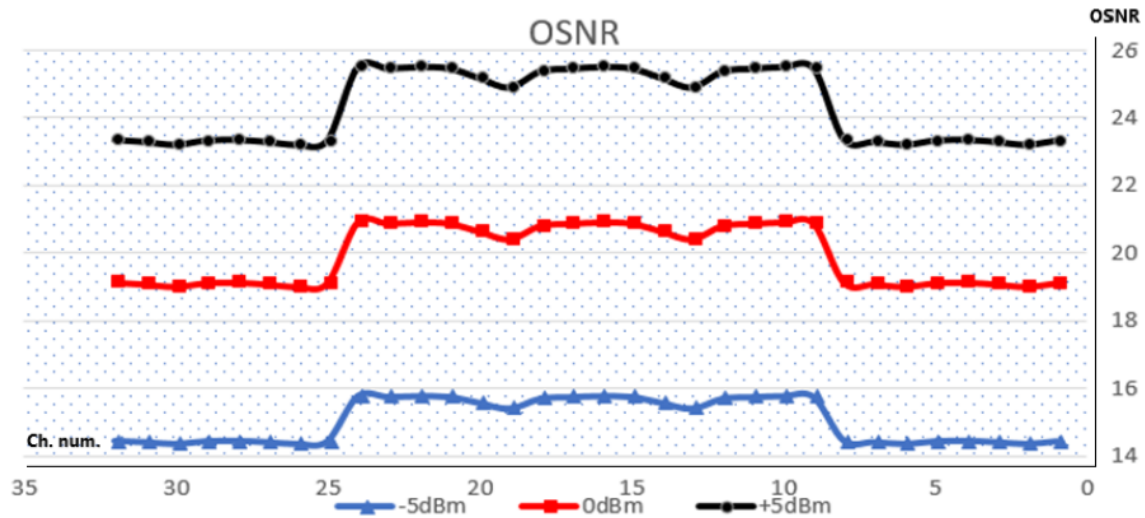
5-2- مناقشة النتائج :

تمت محاكاة النظام على بيئة Optisystem 17 للحصول على النتائج وتحليلها، حيث تم تصميم نظام DWDM Hybrid (QPSK&16QAM) ذو 32 قناة بمعدل إرسال كلي (3.2Tb/s) ومسافة إرسال 160KM.

5-2-1- دراسة أثر تغير طاقة الإرسال :

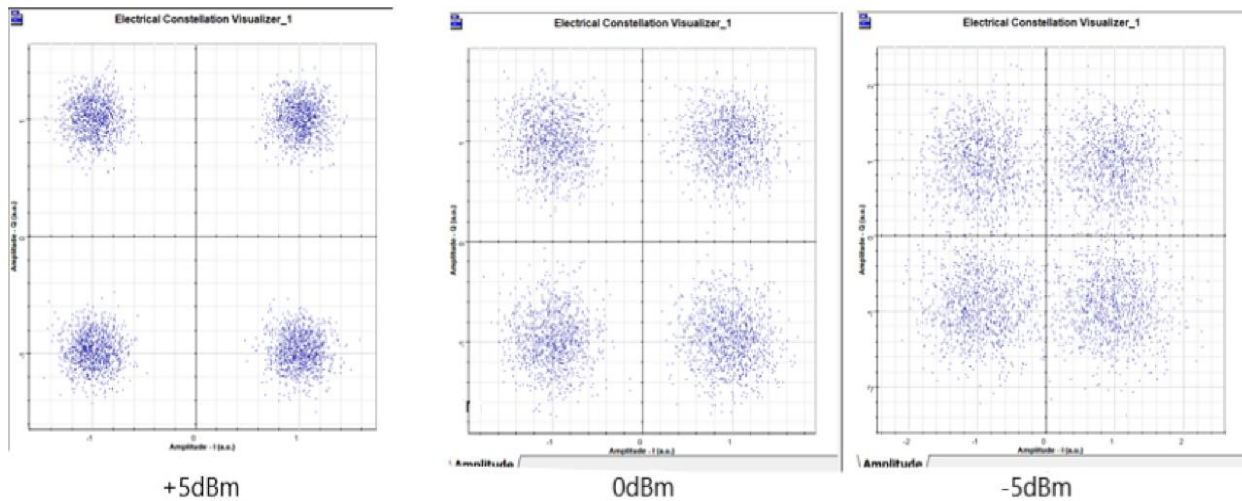
تم بداية دراسة أثر تغير طاقة الإرسال على الإشارة حيث تم أخذ قيمة OSNR وشكل الإشارة بعين الاعتبار ومقارنة النتائج للقنوات المتعددة من أجل عدة قيم لطاقة الإرسال .

يوضح الشكل (5-6) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR للقنوات المتعددة.



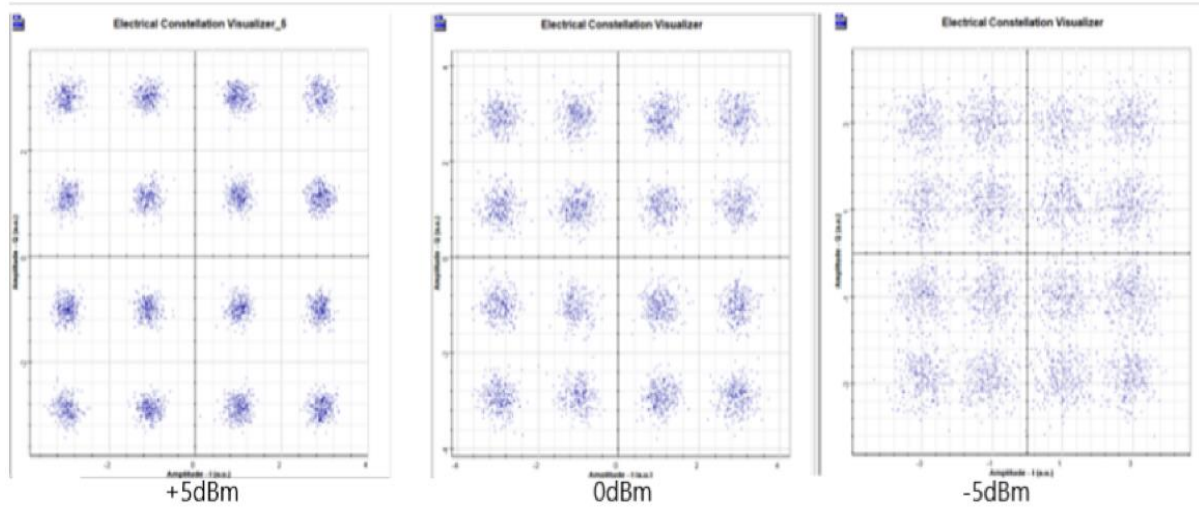
الشكل (5-6) أثر تغير طاقة الإرسال على قيمة OSNR [الباحث]

كما يوضح الشكل (5-7) تغير شكل كوكبة إشارة الإستقبال (electrical constellation) الخاصة بنظام QPSK على خرج وحدة المعالجة الرقمية DSP مع زيادة طاقة الإرسال .



الشكل (5-7) أثر تغير طاقة الإرسال على شكل (electrical constellation) QPSK [الباحث]

و يوضح الشكل (5-8) تغير شكل كوكبة إشارة الإستقبال (electrical constellation) الخاصة بنظام 16QAM على خرج وحدة المعالجة الرقمية DSP مع زيادة طاقة الإرسال .



الشكل (5-8) أثر تغير طاقة الإرسال على شكل 16QAM (electrical constellation) [الباحث]

نلاحظ من (5-6) الشكل التأثير الواضح لزيادة طاقة الإرسال على الإشارة حيث زادت قيمة OSNR بمقدار حوالي 10 ديسبل عند الإرسال بطاقة +5dBm (ما يعادل 3.16mw) مقارنة بالإرسال بطاقة -5dBm . ونلاحظ أن قيمة OSNR لقنوات 16QAM أقل بحوالي 2DB من قنوات QPSK وذلك بسبب انخفاض طاقة الإشارة لهذه القنوات.

كما نلاحظ من الشكل (5-7) أنه عند طاقة إرسال +5dBm يكون استخلاص المعلومات من الإشارة بالنسبة لأقنية QPSK أسهل .

ونلاحظ أيضاً من الشكل (5-8) أنه عند طاقة إرسال +5dBm يكون استخلاص المعلومات من الإشارة بالنسبة لأقنية 16QAM أسهل.

5-2-2- أثر تقليل التباعد بين القنوات :

بهدف الحصول على أعلى فعالية طيفية دون أن تؤثر على أداء النظام، تم دراسة أثر تقليل التباعد بين القنوات.

حيث أن نظام 16QAM يقدم فعالية طيفية نظرية تصل إلى $(4b/s/Hz)$ ، وبالتالي فإن نظام DP-QPSK يقدم فعالية طيفية نظرية تصل إلى $(8b/s/Hz)$ كونه يعتمد على استقطابين حيث أن عدد البتات بالرمز يكون 8 Bits/Symbol .

إلا أن نظام QPSK يقدم فعالية طيفية نظرية $(2b/s/Hz)$ ، وبالتالي فإن نظام DP-QPSK يقدم فعالية طيفية نظرية $(4b/s/Hz)$ كونه يعتمد على استقطابين حيث أن عدد البتات بالرمز يكون 4 Bits/Symbol . وبسبب الاختلاف في الفعالية الطيفية للنظامين يجب العمل عند التباعد الأكبر بين القنوات، أي الفعالية الطيفية الأقل والمتمثلة بالنظام DP-QPSK .

وبالتالي يجب أن يكون تباعد القناة أكبر من قيمة معينة وهي معدل الرمز .

$$\text{Channel Spacing} > \text{Symbol Rate}$$

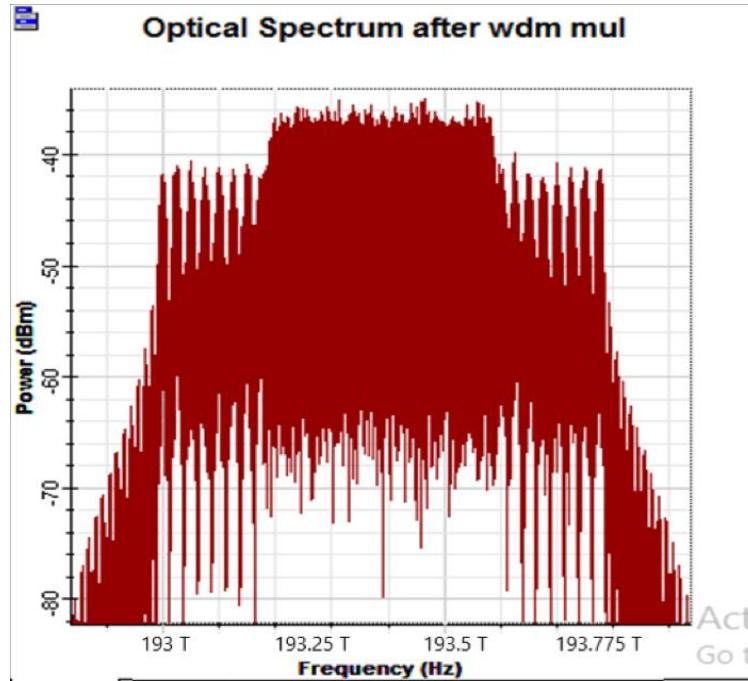
$$\text{Channel Spacing} > \frac{\text{BitRate}}{\text{Bits/Symbol}}$$

وبالتالي في الحالة التي يتم دراستها يكون

$$\text{Channel Spacing} > 25\text{GHz}$$

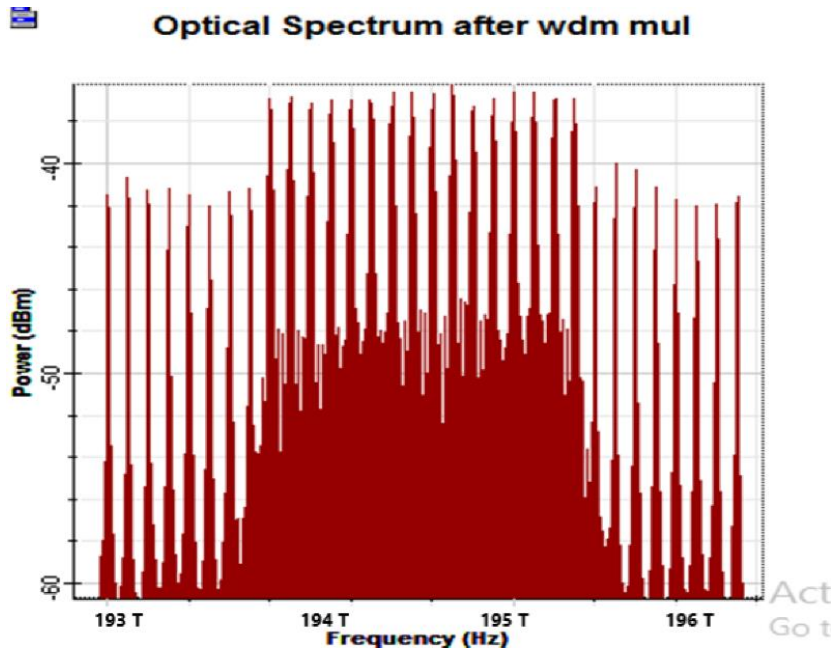
إلا أنه عمليا يتم الأخذ بعين الاعتبار الإنحناء Roll-off لشكل الطيف الترددي مع إضافة هوامش جانبية لتجنب التداخل .

- من أجل تباعد طيفي 25GHz (للحصول على فعالية طيفية حوالي $4b/s/Hz$ وهي القيمة النظرية)، نلاحظ كما يبين الشكل (5-9) التداخل الحاصل بين القنوات بسبب عدم أخذ الهوامش المذكورة سابقاً بعين الاعتبار :



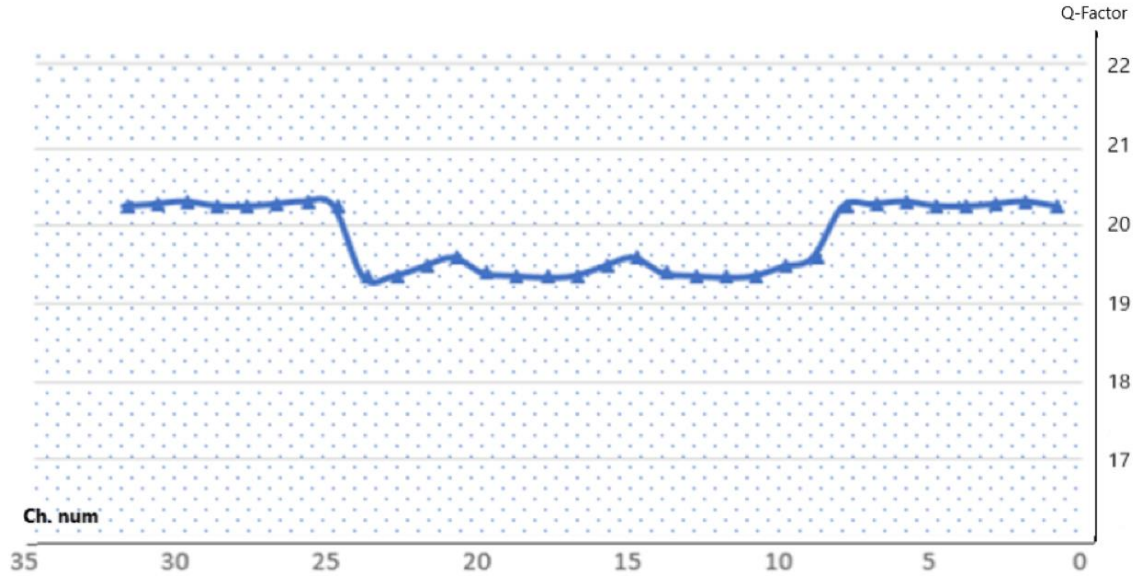
الشكل (5-9) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 25GHz [الباحث]

- من أجل ملاحظة عند أي تباعد بين القنوات تبدأ عملية التداخل (للحصول على أفضل فعالية طيفية) تم بداية الدراسة عند تباعد 100GHz والتي تعطي فعالية طيفية مساوية لـ 1b/s/Hz وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (5-10)



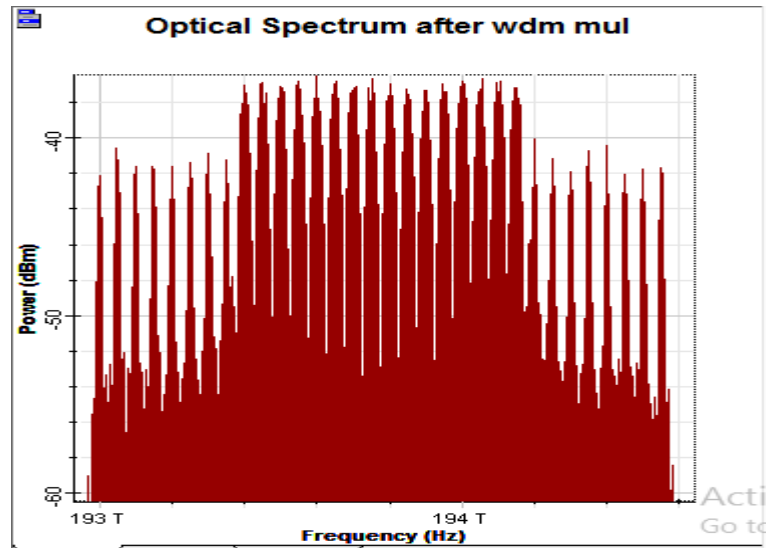
الشكل (5-10) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 100GHz [الباحث]

حيث يمتد طيف الإشارة من 193THz إلى 196.1THz ، ونلاحظ عدم وجود تداخل بين القنوات حيث كانت قيمة Q-Factor مرتفعة (حوالي 19-20) للقنوات المتعددة كما هو موضح بالشكل (5-11) عند الإرسال بطاقة 5dBm .



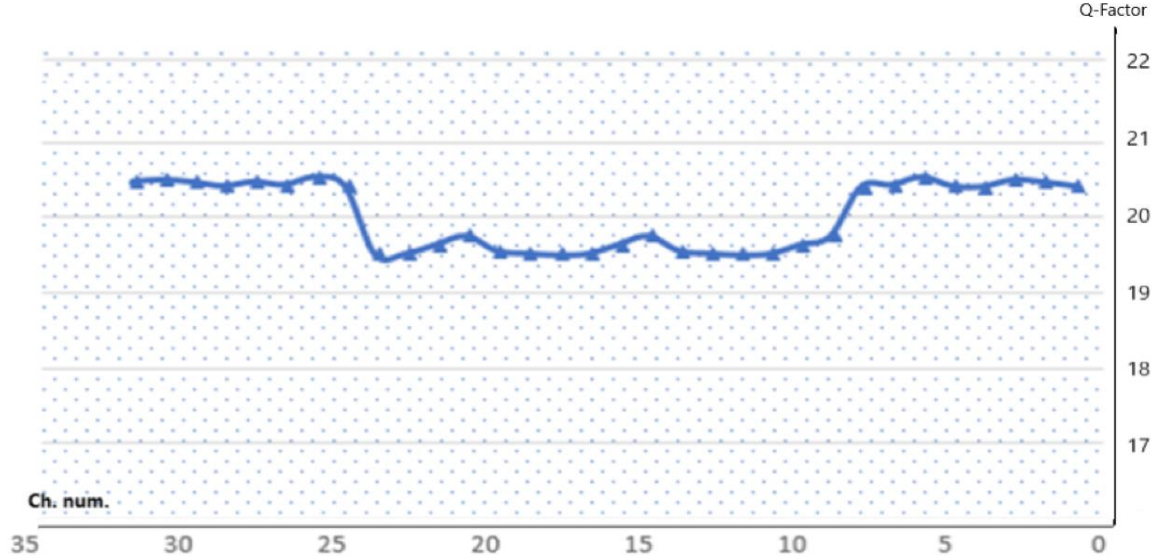
الشكل (5-11) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 100GHz [الباحث]

تم إنقاص التباعد إلى 50GHz والذي يعطي فعالية طيفية مساوية لـ 2b/s/Hz ، وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (5-12) .



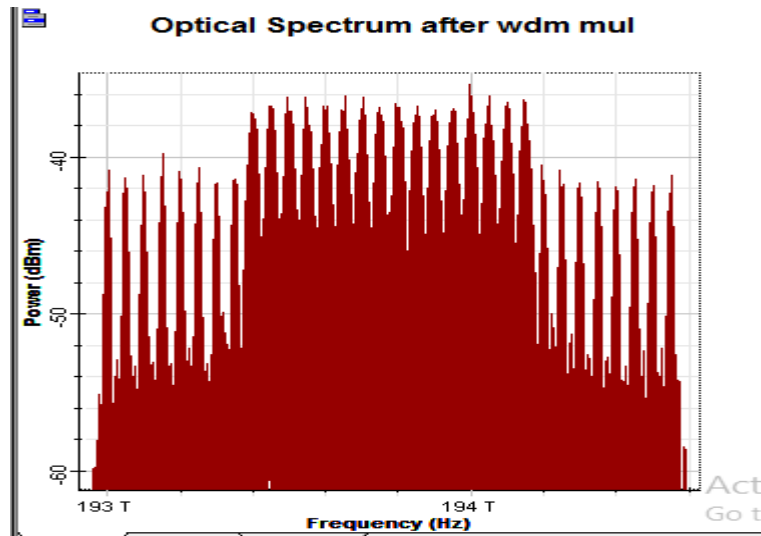
الشكل (5-12) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 50GHz [الباحث]

إن طيف الإشارة لـ 32 قناة يمتد من 193THz وحتى 194.55THz وبتباعد 50GHz بين كل قناتين متجاورتين، ونلاحظ عدم وجود تداخل بين القنوات المتجاورة حيث بقيت قيمة Q-Factor للقنوات المتعددة مرتفعة (حوالي 19-20) كما هو موضح بالشكل (5-13) ، ونلاحظ أنها متقاربة مع الحالة السابقة (عند تباعد 100GHz) ، أي أنه تم الحصول على ضعف الفعالية الطيفية دون التأثير على أداء النظام.



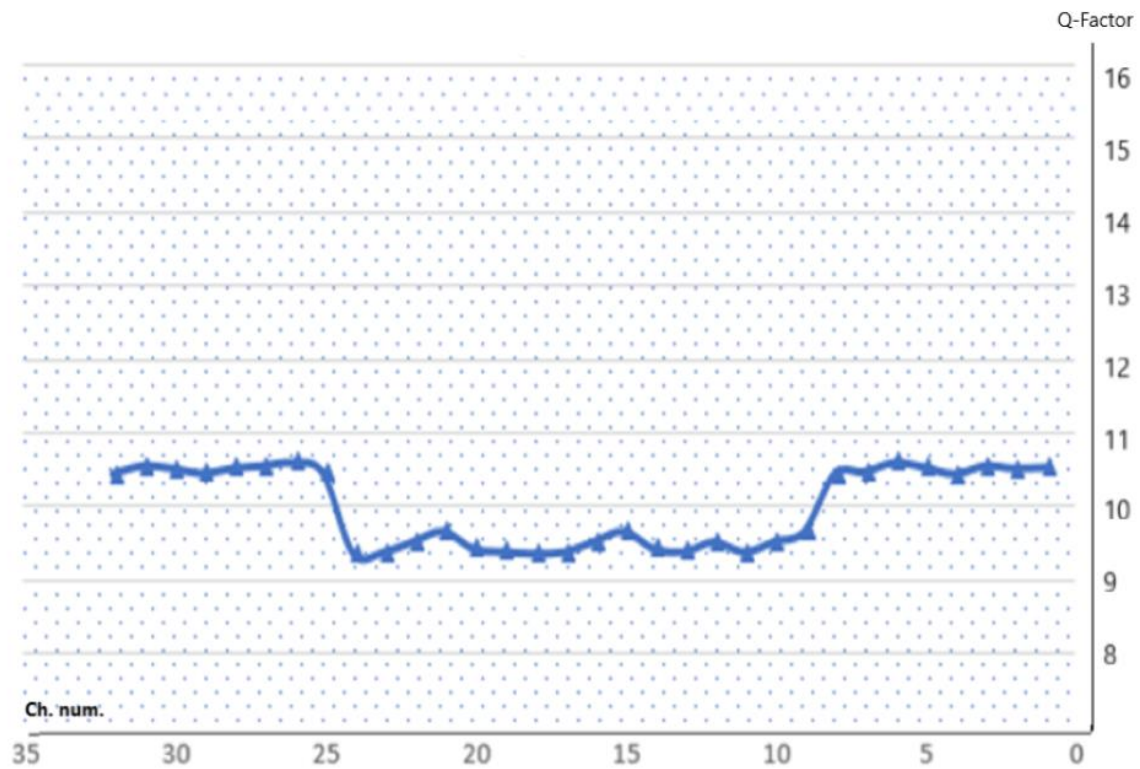
الشكل (5-13) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 50GHz [الباحث]

تم إنقاص التباعد إلى 40GHz والذي يعطي فعالية طيفية مساوية لـ 2.5b/s/Hz ، وتم الحصول على شكل الطيف الترددي الموضح بالشكل (5-14)



الشكل (5-14) طيف الإشارة لـ 32 قناة DWDM بتباعد 40GHz [الباحث]

إن طيف الإشارة لـ 32 قناة يمتد من 193THz وحتى 194.24THz وبتباعد 40GHz بين كل قناتين متجاورتين، ونلاحظ وجود تداخل بين القنوات المتجاورة (عند طاقة إشارة -45dBm تقريباً) ، وهذا التداخل أدى لانخفاض قيمة Q-Factor ، حيث كانت قيمة Q-Factor للقنوات المتعددة حوالي (9-10) كما هو موضح بالشكل (5-15) ، حيث نلاحظ أن معدل الخطأ ارتفع للضعف تقريباً ، وبالتالي فإن زيادة الفعالية الطيفية لهذا الحد من أجل النظام المدروس ستؤدي إلى تدهور أداء النظام .



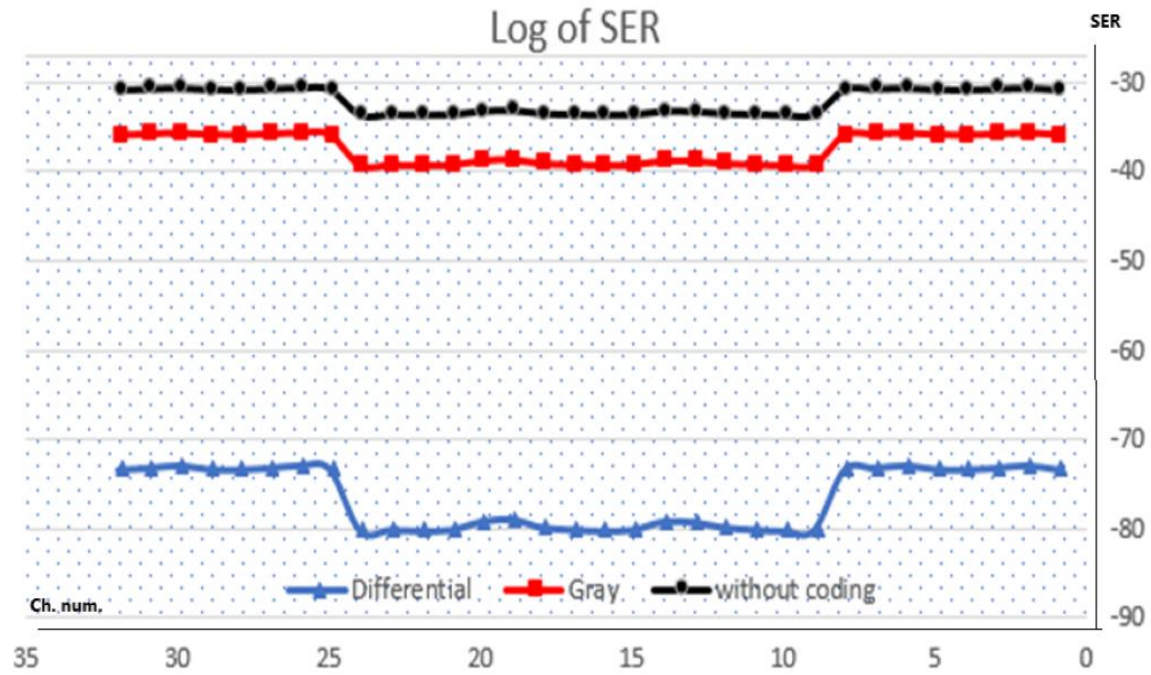
الشكل (5-15) قيم Q-Factor عند تباعد ترددي 40GHz [الباحث]

بالنتيجة فإن النظام المدروس يقدم فعالية طيفية تصل لـ 4b/s/Hz وبتباعد قنوات 50GHz دون أن يؤثر ذلك على أداء النظام .

5-2-3- دراسة أثر استخدام أنواع مختلفة من الترميز :

تم دراسة تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER باستخدام أنواع مختلفة من الترميز (ترميز جراي - الترميز التفاضلي - بدون ترميز) .

يوضح الشكل (5-16) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER لأنواع الترميز المختلفة .



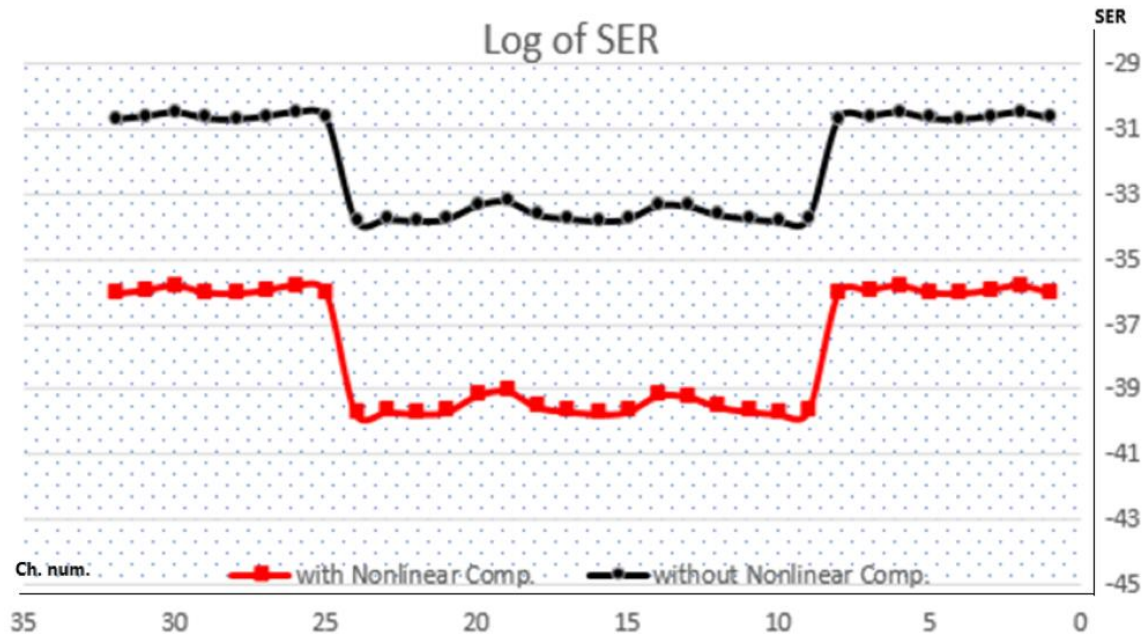
الشكل (5-16) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER لأنواع الترميز المختلفة . [الباحث]

نلاحظ من الشكل أن معدل خطأ الرمز SER انخفض بمقدار أكثر من 100 بالمئة مقارنة بترميز جراي أو حالة الإرسال بدون ترميز، وبالتالي فإن الترميز التفاضلي (Differential Coding) يعطي أفضل أداء مقارنة بترميز جراي أو حالة الإرسال بدون ترميز .

5-2-4- دراسة أثر استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية ضمن وحدة DSP :

تم دراسة تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER عند استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في وحدة المعالجة الرقمية DSP في طرف الإستقبال مقارنة بعدم استخدام تلك الخاصية.

يوضح الشكل (5-17) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER عند استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال .



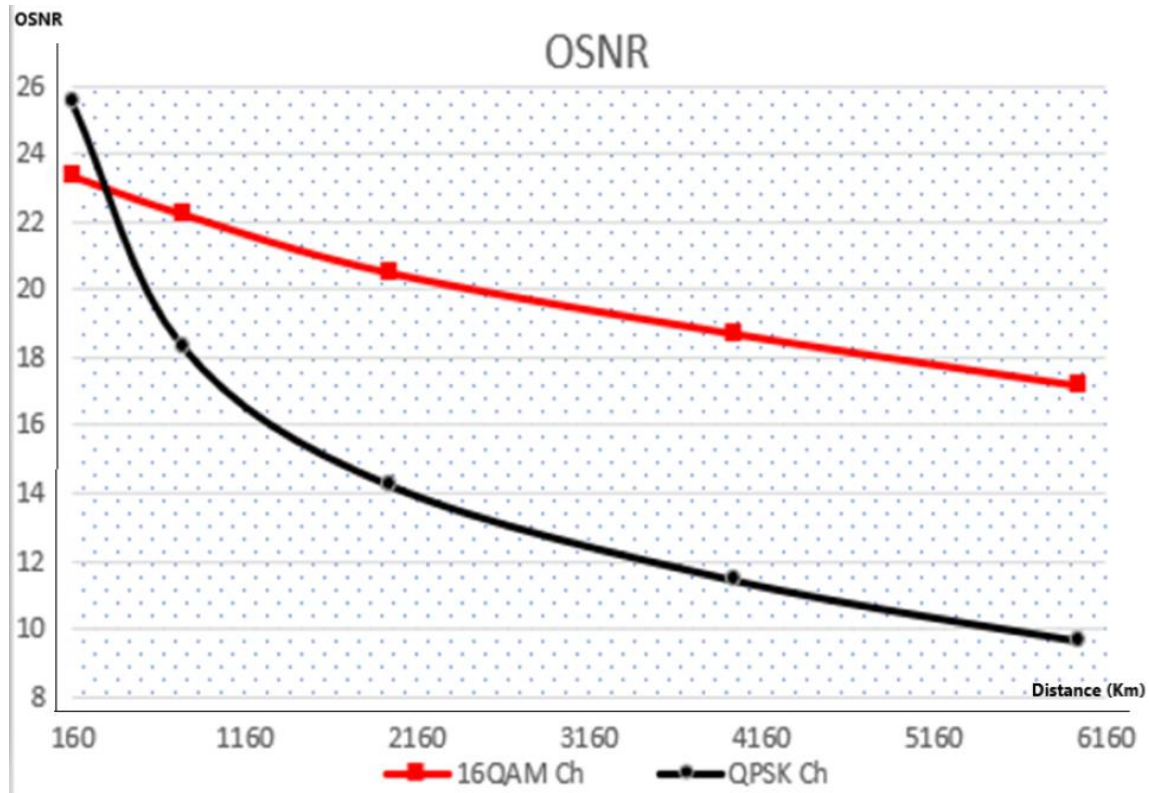
الشكل (5-17) تغير قيمة معدل خطأ الرمز SER عند تعويض التأثيرات اللاخطية [الباحث]

نلاحظ من الشكل أنه عند استخدام خاصية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال انخفضت قيمة معدل خطأ الرمز بحوالي 18% مقارنة بحالة عدم استخدام تلك الخاصية .

5-2-5 - دراسة أثر تغير مسافة الإرسال :

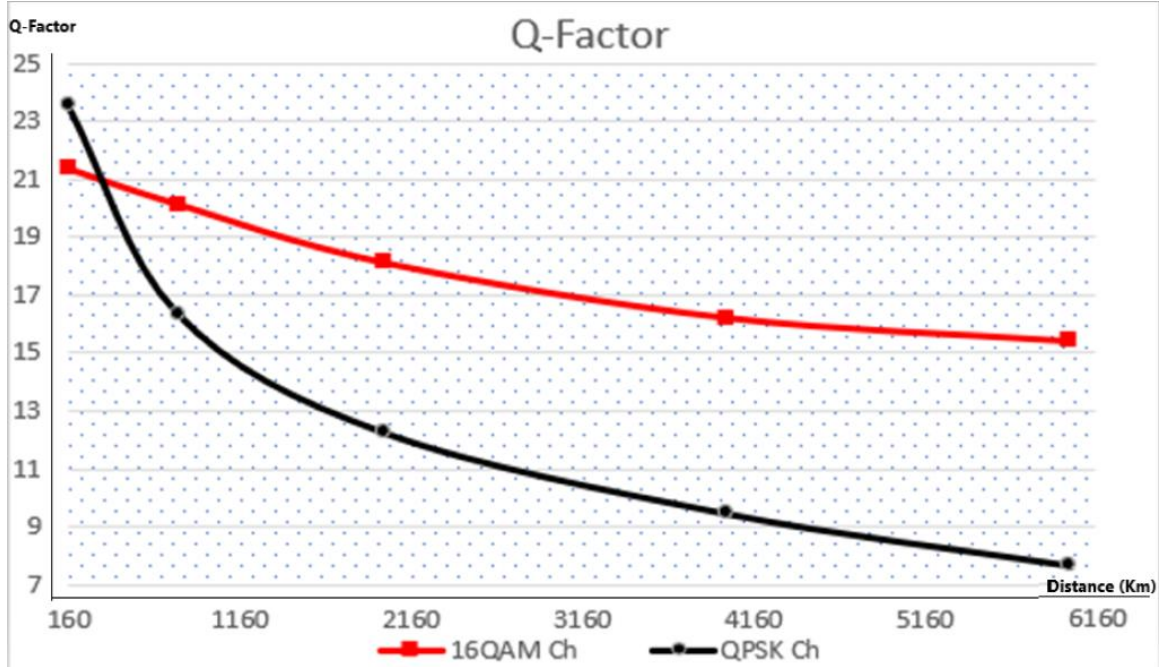
تم دراسة تغير قيمة OSNR عند تغير مسافة الإرسال لقنوات QPSK وقنوات 16QAM حيث تم حساب القيم للمسافة من 160km وحتى 6000km عبر زيادة تكرار وصلة الليف مع المضخم عبر حلقة التحكم . Loop Control

يوضح الشكل (5-18) تغير قيمة OSNR عند تغير مسافة الإرسال لقنوات QPSK وقنوات 16QAM .



الشكل (5-18) تغير قيمة OSNR عند تغير مسافة الإرسال [الباحث]

و يوضح الشكل (5-19) تغير قيمة Q-Factor عند تغير مسافة الإرسال لقنوات QPSK وقنوات 16QAM .



الشكل (5-19) تغير قيمة Q-Factor عند تغير مسافة الإرسال [الباحث]

نلاحظ من الشكل (5-18) أنه عند زيادة مسافة الإرسال تظهر قنوات 16QAM أداءً أفضل من قنوات QPSK حيث أن قيمة OSNR انخفضت بشكل أكبر لقنوات QPSK مع زيادة مسافة الإرسال مقارنة بقنوات 16QAM .

و نلاحظ أيضاً من الشكل (5-19) أنه عند زيادة مسافة الإرسال تظهر قنوات 16QAM أداءً أفضل من قنوات QPSK حيث أن قيمة Q-Factor حافظت نسبياً على قيمها مع زيادة مسافة الإرسال بالنسبة لقنوات 16QAM مقارنة بقنوات QPSK التي تناقصت بشكل واضح فيها مع زيادة مسافة الإرسال .

ملاحظة : عادة تظهر أنظمة QPSK المستقلة أداءً أفضل بالنسبة لمسافة الإرسال مقارنة بأنظمة 16QAM ذات الفعالية الطيفية الأعلى، ولكن في هذا النظام المدروس (الهجين) فإن أفضلية 16QAM لديها تباعد ترددي يساوي ضعف التباعد الترددي الذي تم الوصول إليه سابقاً بأنظمة 16QAM (كونه تم اعتماد التباعد الترددي المسموح من قبل أنظمة QPSK)، مما أعطى هامش إضافي و أداءً أفضل لأفضلية 16QAM مع مسافة الإرسال مقارنة بأفضلية QPSK عند نفس التباعد الترددي .

• مقارنة العمل المقدم مع الأعمال المقدمة في الفصلين الثالث والرابع :

يوضح الجدول (3-5) مقارنة الأداء مع الأعمال المقدمة في الفصول السابقة ، حيث تمت المقارنة بناءً على المعامل Q-Factor ، السعة الكلية ، مسافة الإرسال المختبرة والفعالية الطيفية .

الجدول (3-5) مقارنة النتائج مع الأعمال المقدمة في الفصول السابقة [الباحث]

مسافة الإرسال (KM)	Q-Factor	الفعالية الطيفية (b/s/Hz)	سعة الإرسال الكلية (عدد الأقنية*معدل النقل لكل قناة)	التقنية المستخدمة	الدراسة (الباحث)
160	19.46	2	32*100Gb/s 3.2Tb/s	DP-QPSK CD & DSP	العمل المقدم 1 DWDM DP-QPSK
160	20	4	32*100Gb/s 3.2Tb/s	DP-16QAM CD & DSP	العمل المقدم 2 DWDM DP-16QAM
160 1000	19 14.5	2	32*100Gb/s 3.2Tb/s	(QPSK+16QAM) CD & DSP	العمل المقدم 3 DWDM Hybrid

قدم العمل الذي تمت دراسته بالفصل الثالث والذي يستخدم نظام DWDM و المعتمد على تقنية DP-QPSK فعالية طيفية تصل ل 2b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، حيث تم الوصول إلى معامل Q-Factor مساوي ل 19.46 من أجل مسافة إرسال 160Km .

كما قدم العمل الثاني والذي تمت دراسته بالفصل الرابع والذي يستخدم نظام DWDM و المعتمد على تقنية DP-16QAM فعالية طيفية أعلى مقارنة بنظام DWDM DP-QPSK ، والتي وصلت ل 4b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، حيث تم الوصول إلى معامل Q-Factor مساوي ل 20 من أجل مسافة إرسال 160Km .

قدم العمل الذي تمت دراسته خلال هذا الفصل والذي يستخدم نظام DWDM هجين يعتمد على تقنيتي تعديل DP-16QAM و DP-QPSK معامل Q-Factor مساوي ل 19 من أجل مسافة إرسال 160Km ، حيث تم الحصول على فعالية طيفية مساوية للفعالية الطيفية التي تم الحصول عليها بنظام DWDM DP-QPSK بسبب استخدام أقنية فرعية تستخدم نفس التقنية ، والتي تساوي 2b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية

3.2Tb/s . كم تم الوصول إلى قيمة Q-Factor مساوية ل 14.5 من أجل مسافة إرسال بعيدة المدى (1000km) .

ملاحظة : تم مقارنة كافة الأعمال المقدمة مع الدراسة المرجعية في فقرة الخاتمة .

5-3 - خلاصة :

تم في هذا الفصل دراسة لنظام التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية الهجين Hybrid DWDM والذي يعتمد على التعديل بإزاحة الطور الرباعي QPSK و التعديل المطالي المتعامد من المرتبة 16 16QAM . حيث تم الإرسال عبر 32 حامل فرعي (16 ل 16QAM و 16 ل QPSK) سعة كل حامل 100Gb/s وبمعدل إجمالي (3.2Tb/s) و بتباعد بين القنوات قدره 50GHz والذي يعطي فعالية طيفية مقدارها (2b/s/Hz) . حيث أظهرت نتائج المحاكاة أنه عند انقاص طاقة الإرسال تقل قيمة كل من OSNR و المعامل Q-Factor ، ولوحظ أنه من أجل مسافة الإرسال الأولية 160Km كانت قيمة استطاعة الإشارة لقنوات 16QAM أخفض بمقدار 4dBm تقريباً مقارنة بقنوات QPSK ، مما أدى إلى قيم OSNR و Q-Factor أقل، وعند زيادة مسافة الإرسال تناقصت قليلاً قيمة كل من OSNR و Q-Factor ، إلا أنه في قنوات QPSK كان التناقص أكبر و أسرع مقارنة بقنوات 16QAM التي حافظت نسبياً على قيم OSNR و Q-Factor عند زيادة مسافة الإرسال. كما أن النظام أعطى أفضل أداء عند استخدام الترميز التفاضلي مقارنة بترميز غراي أو حالة الإرسال بدون ترميز ، حيث كانت قيمة معدل خطأ الرمز SER أخفض عند استخدام الترميز التفاضلي و كذلك كانت قيمة Q-Factor أعلى عند استخدام ذلك الترميز . كما أظهر النظام أداء أفضل عند تعويض التأثيرات اللاخطية ضمن وحدة DSP في طرف الإستقبال، حيث كانت قيمة معدل خطأ الرمز SER أخفض وقيمة Q-Factor أعلى عند استخدام تقنية تعويض التأثيرات اللاخطية في طرف الإستقبال مقارنة بحالة الإرسال دون تعويض . قدم هذا النظام تحسين كبير على مستوى الإشارة حيث تم الوصول إلى نتائج جيدة (Q-Factor=14.5DB) من أجل الإرسال بعيد المدى (1000KM) .

5-4- الخاتمة :

5-4-1- مقارنة النتائج التي تم الوصول إليها مع الدراسات السابقة :

يوضح الجدول (6-1) مقارنة الأداء مع دراسات سابقة استخدمت فيها تقنيات مختلفة لتعويض الضعف في أنظمة الاتصالات الضوئية، حيث تمت المقارنة بناءً على المعامل Q-Factor ، السعة الكلية ، مسافة الإرسال المختبرة والفعالية الطيفية المحققة .

الجدول (6-1) مقارنة النتائج مع الدراسات السابقة [الباحث]

الدراسة (الباحث)	التقنية المستخدمة	سعة الإرسال الكلية (عدد الأقنية * معدل النقل لكل قناة)	الفعالية الطيفية (b/s/Hz)	Q- Factor	مسافة الإرسال (KM)
(Tomas 2020)	DWDM CP- DQPSK	32*100Gb/s 3.2Tb/s	1	7	150
العمل المقدم 1 DWDM DP-QPSK	DP-QPSK CD & DSP	32*100Gb/s 3.2Tb/s	2	19.46	160
العمل المقدم 2 DWDM DP-16QAM	DP-16QAM CD & DSP	32*100Gb/s 3.2Tb/s	4	20	160
العمل المقدم 3 DWDM Hybrid	(QPSK+16QAM) CD & DSP	32*100Gb/s 3.2Tb/s	2	19 14.5	160 1000

كما هو موضح بالجدول قدم نظام DWDM المعتمد على تقنية CP-DQPSK فعالية طيفية تصل إلى 1b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، وتم الحصول على قيمة Q-factor مساوية ل 7 من أجل مسافة إرسال 150Km .

قدم العمل الأول الذي تمت دراسته خلال الفصل الثالث والذي يستخدم نظام DWDM و المعتمد على تقنية DP-QPSK فعالية طيفية أعلى مقارنة بالدراسات السابقة، والتي وصلت ل 2b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، كما تم الوصول إلى معامل Q-Factor مساوي ل 19.46 من أجل مسافة إرسال 160Km .

كما قدم العمل الثاني والذي تمت دراسته بالفصل الرابع والذي يستخدم نظام DWDM و المعتمد على تقنية DP-16QAM فعالية طيفية أعلى مقارنة بنظام DWDM DP-QPSK ، والتي وصلت ل 4b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى 3.2Tb/s ، كما تم الوصول إلى معامل Q-Factor مساوي ل 20 من أجل مسافة إرسال 160Km .

قدم العمل الرابع والذي تمت دراسته بالفصل الخامس والذي يستخدم نظام DWDM هجين يعتمد على تقنيتي تعديل DP-16QAM و DP-QPSK معامل Q-Factor مساوي ل 19 من أجل مسافة إرسال 160Km ، حيث تم الحصول على فعالية طيفية مساوية للفعالية الطيفية التي تم الحصول عليها بنظام DWDM DP-QPSK بسبب استخدام أفنية فرعية تستخدم نفس التقنية ، والتي تساوي 2b/s/Hz من أجل سعة إرسال كلية 3.2Tb/s . كم تم الوصول إلى قيمة Q-Factor مساوية ل 14.5 من أجل مسافة إرسال بعيدة المدى (1000km) .

5-4-2- خلاصة النتائج :

- قدم نظام DWDM DP-QPSK المصمم أداء أفضل ومقاومة أعلى للتأثيرات اللاخطية مقارنة مع الدراسات السابقة ، حيث تم الوصول إلى قيمة Q-Factor مرتفعة والتي تقابلها قيمة BER منخفضة ، مما يعني أداء أفضل للنظام ، كما قدم فعالية طيفية أكبر بأكثر من الضعف مقارنة بالدراسات السابقة، مما يعني إمكانية إرسال معدل نقل أعلى من أجل نفس عرض المجال الترددي المستخدم.
- حيث تم الوصول إلى فعالية طيفية مساوية ل $2b/s/Hz$ من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى $3.2Tb/s$ ، كما تم الوصول إلى معامل Q-Factor مساوي ل 19.46 من أجل مسافة إرسال $160Km$.
- قدم نظام DWDM DP-16QAM المصمم فعالية طيفية تساوي ضعف الفعالية الطيفية التي تم الوصول إليها بنظام DWDM DP-QPSK ، والذي يعني إمكانية إرسال ضعف معدل النقل من أجل نفس عرض المجال الترددي المستخدم .
- حيث تم الوصول إلى فعالية طيفية مساوية ل $4b/s/Hz$ من أجل سعة إرسال كلية تصل إلى $3.2Tb/s$ ، كما تم الوصول إلى معامل Q-Factor مساوي ل 20 من أجل مسافة إرسال $160Km$.
- تم الوصول إلى نظام هجين يجمع أقنية أنظمة DWDM QPSK & 16QAM والذي يعطي إمكانية لاستخدام جيل مرن من أنظمة الاتصالات، إلا أن ذلك تم باعتماد الفعالية الطيفية المسموح بها من قبل أنظمة DWDM QPSK ، كما تم الوصول إلى مسافات إرسال بعيدة المدى مع الحفاظ على أداء نظام مقبول .
- حيث تم الحصول على معامل Q-Factor مساوي ل 19 من أجل مسافة إرسال $160Km$ ، و تم الحصول على فعالية طيفية تساوي $2b/s/Hz$ من أجل سعة إرسال كلية $3.2Tb/s$. كما تم الوصول إلى قيمة Q-Factor مساوية ل 14.5 من أجل مسافة إرسال بعيدة المدى ($1000km$).

الآفاق المستقبلية

- دراسة إمكانية تصميم نظام هجين باستخدام صيغ تعديل متعددة المستويات أخرى بدل تقنيتي DP-QPSK و DP-16QAM ، ودراسة إمكانية تحقيق فعالية طيفية أعلى باستخدامهم دون التأثير بشكل كبير على أداء النظام .
- دراسة زيادة الفعالية الطيفية عبر زيادة معدل الإرسال بدل إنقاص التباعد بين القنوات، ودراسة أثر ذلك على القنوات المتجاورة .
- دراسة أثر استخدام المضخمات الضوئية المختلفة (EDFA, FRA, SOA) على أنظمة DWDM ودراسة أداء النظام وخط النقل عند كل من تلك المضخمات .

الأبحاث المنشورة

أولاً - جرى قبول نشر بحث بعنوان : تحسين الفعالية الطيفية لنظام اتصالات التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية الكثيف DWDM باستخدام صيغة التعديل متعددة المستويات QPSK

- مجلة : جامعة دمشق للعلوم الهندسية

- تاريخ الإيداع : 2022/10/27

- تاريخ قبول النشر : 2023/5/3

ثانياً - جرى قبول نشر بحث بعنوان : تحسين أداء أنظمة اتصالات تعدد الإرسال بتقسيم طول الموجة الكثيف DWDM باستخدام تقنية التعديل المطالي التربيعي ثنائي الاستقطاب من الدرجة 16 DP-16QAM

- مجلة : جامعة دمشق للعلوم الهندسية

- تاريخ الإيداع : 2023/6/6

- تاريخ قبول النشر : 2023/8/22

References

- [1] Verplaetse M., Breyne L., Van Kerrebrouck J., Ossieur P. and Torfs G. (2019). Electronic Dispersion Precompensation of Direct-Detected NRZ using Analog Filtering. *EEE Photonics Technology Letters*, 31, 71–74.
- [2] Song Z ; Man J ; Wei L ; Can Li ; Rongtao Su ; Pu Zhou ; Zong f. (2022). *Temperature control on fiber Bragg gratings to suppress spectral broadening of 100-W fiber oscillator*. National University of Defense Technology.
- [3] Kathy B ; Jiawen Li (2022) . *Double-Clad Fiber-Based Multifunctional Biosensors and Multimodal Bioimaging Systems: Technology and Applications*. Castor Optics Inc.
- [4] Kumar G ; Kumar CH. (2020) . Effect of OPC on Fiber Nonlinearities for Dense Soliton Optical Communication Medium. *Journal of Optical Communications* 61, 1–7.
- [5] Xiong Wu, Junwei Z, Gai Z, Alan P ; Tao L, and Chao Lu (2021) . *C-Band 112-Gb/s PAM-4 Transmission over 50-km SSMF Using Absolute-Term Based Nonlinear FFE-DFE*. Asia Communications and Photonics Conference.
- [6] Meena S, Masih A;. (2020) . *Performance Analysis of Equalizers as Dispersion Compensation for Optical Communication Networks*. Gedrag en Organisatie.

- [7] Mazurczyk, M;. (2014) . Spectral Shaping in Long Haul Optical Coherent Systems With High Spectral Efficiency. *Journal of Lightwave Technology* 32.16, 2915–2924.
- [8] Chowdhury M, Hossan MD, Amirul I, (2018) . A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications. *IEEE*, 6, 4–13.
- [9] Zhu, Xianming, et al.; . (2020) . *Performance Analysis of Equalizers as Dispersion Compensation for Optical Communication Networks*. Gedrag en Organisatie.
- [10] Valts, Dilendorfs; Sandis, Spolitis; Vjaceslavs, Bobrovs; (2017) . *Comparison of Dispersion Compensation Methods for 40 Gbit/s WDM-PON Transmission Systems*. Progress In Electromagnetics Research Symposium. Springer.
- [11] Fadil, Paloi; Taimur, Mirza; Shyqyri, Haxha. (2017) . Optimisation of dispersion compensating in a long-haul fibre for RF transmission of up to 100 Gbit/s by using RZ and NRZ formats. *Optik* 131, 640–654.
- [12] Jansen, S L; Krummrich, P M et al.; (2006) . Long-Haul DWDM Transmission Systems Employing Optical Phase Conjugation. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 12.4: 505–520.
- [13] Casimer M. DeCusatis, Carolyn J. Sher DeCusatis, (2006) . *FIBER OPTIC ESSENTIALS*. Elsevier Inc.
- [14] D. Nettet, (2015) . NG-PON2 Technology and Standards. *Light Technol.*, 33, 1136–1143,.

- [15] Ravneet K, Sanjeev D (2015) . A Review on Passive Optical Network. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 3, 4 .
- [16] Naqshbandi, R.K. (2016) . TWDM-PON-AN optical backhaul solution for hybrid optical wireless networks. *Journal of Modern Optics*, 1530 : 6–8.
- [17] Sonakshi, Divya Dhawan, (2016) .High Speed TWDM PON – A Review. *IJRITCC*, 4, 11.
- [18] Coelho L, D. (2010) . *Modeling , Simulation and Optimization of Optical Communication Systems Using Advanced Modulation Format*. Technical University Of Munchen, 192.
- [19] Lee H, Choo J, Kim J, (2020) . *Multiplexed Passive Optical Fiber Sensor Networks*. MPDI.
- [20] Kalyani V, Sharma V, (2016) .*Different types of Optical Filters and their Realistic Application*. researchgate.
- [21] Winston W, (2015) .*Merits of Coherent Detection Optical Transmission*. neophotonics.
- [22] Agarwal, Ruchi; Mishra, Vivekanand; (2012) .Comparison of pre, post and symmetrical dispersion compensation scheme with 10 Gb/s NRZ link for SCM sys. *International Journal of Electronics Signals and Systems*.
- [23] Ayotte, S.,et al;. (2007) .Dispersion compensation by optical phase conjugation in silicon waveguide. *Electronics Letters* 43.19

- [24] Di Che; Qian Hu; William Shieh;. (2016) . Linearization of direct detection optical channels using selfcoherent subsystems. *Journal of Lightwave Technology* 34.2, 516–524.
- [25] Kazuro Kikuchi;. *Coherent Optical Communications: Historical Perspectives and Future Directions*. Springer.
- [26] Kim; Kyoung S; Chai Ji, Jeong; Hoon Jae, Lee;. (2010) . Effect of fiber dispersion and self-phase modulation in multi-channel subcarrier multiplexed optical signal transmission. *Journal of the Optical Society of Korea* 14.4, 351–356
- [27] Kobayakov, Andrey et al.;. (2010) . Stimulated Brillouin scattering in optical fibers. *Advances in optics and photonics* 2.1, 1–59.
- [28] Li Zhe, et al.;. (2017) . SSBI mitigation and the Kramers–Kronig scheme in single-sideband directdetection transmission with receiver-based electronic dispersion compensation. *Journal of Lightwave Technology* 35.10
- [29] Pelusi, M D., et al.;. (2010) . Dispersion compensation of 100 GHz spaced WDM 40 Gb/s signals by phase conjugation in As₂S₃ glass. *Australian Conference on Optical Fibre Technology (ACOFT), IEEE*, 35th.
- [30] Randel; Sebastian, et al; (2010) . Advanced modulation schemes for short-range optical communications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 16.5: 1280–1289.

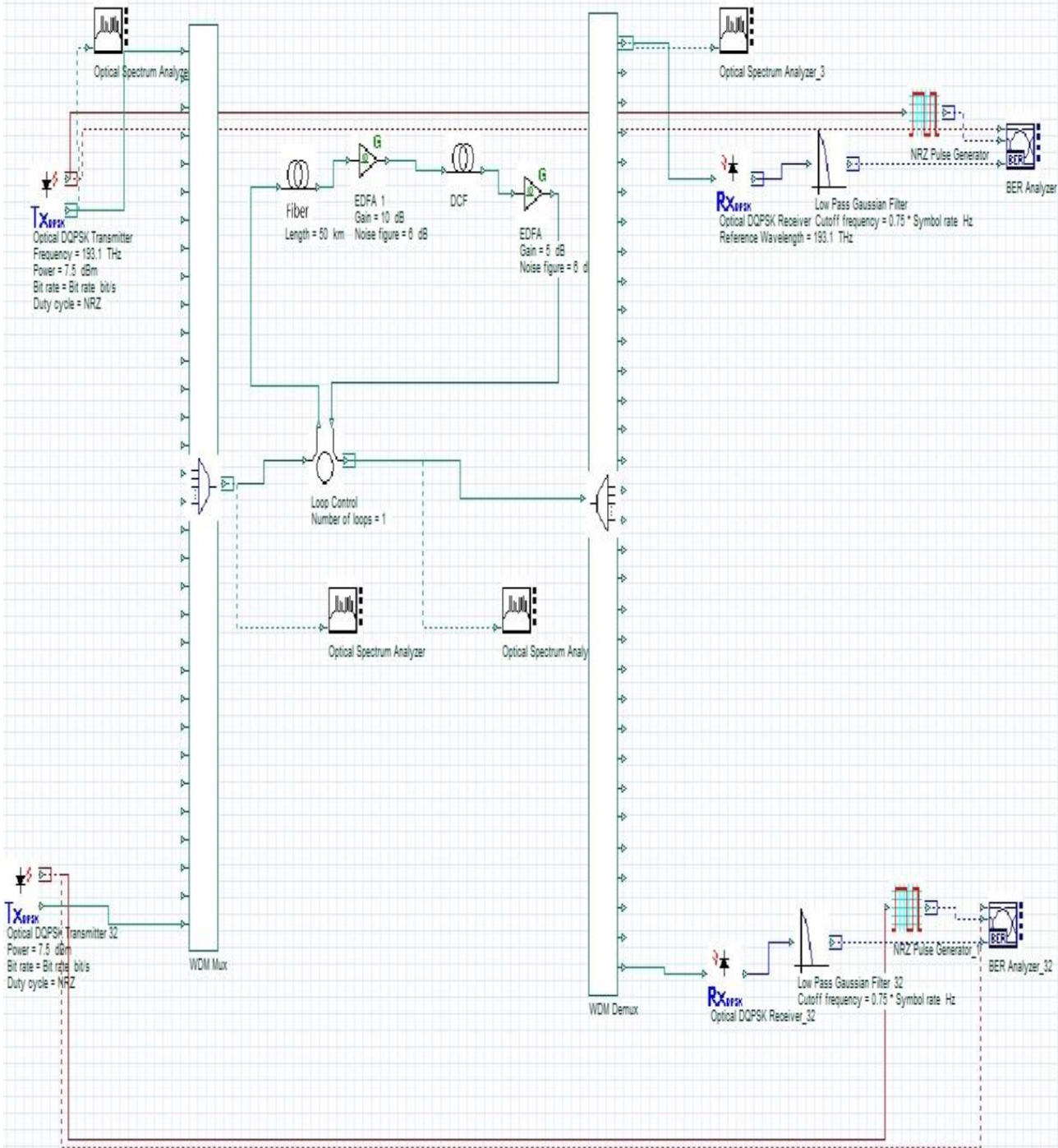
- [31] Renaudier; Jeremie, et al.;. (2008) . Linear fiber impairments mitigation of 40-Gbit/s polarizationmultiplexed QPSK by digital processing in a coherent receiver. *Journal of Lightwave Technology* 26.1: 36–42.
- [32] Sultana; Nasrin; Islam, M S;. (2012) .Analysis of XPM effect with SPM and GVD in WDM fiber optic transmission system. *International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*.
- [33] Sheetal, Anu; Sharma, Ajay K; Kaler, R S;. (2010) .Simulation of high capacity 40 Gb/s long haul DWDM system using different modulation formats and dispersion compensation schemes in the presence of Kerr's effect. *Optik–International Journal for Light and Electron Optics* 121.8: 739–749.
- [34] Tsukamoto; Satoshi; Kazuhiro Katoh; Kazuro Kikuchi;. (2006) . Coherent demodulation of optical multilevel phase–shift–keying signals using homodyne detection and digital signal processing. *IEEE Photonics Technology Letters* 18.10: 1131–1133.
- [35] Xia, Chunmin; Werner, Rosenkranz;. (2007) . Nonlinear electrical equalization for different modulation formats with optical filtering. *Journal of Lightwave Technology* 25.4: 996–1001.
- [36] Jansen, S L; Krummrich, P M et al.;. (2006) . Long–Haul DWDM Transmission Systems Employing Optical Phase Conjugation. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 12.4: 505–520.
- [37] Sharan L, Shanbhag A, Chaubey V.K; (2016) . *Design and simulation of modified duobinary modulated 40 Gbps 32 channel DWDM optical link for improved non–linear performance* . Cogent Engineering .

- [38] Li X, N. Bamiedakis, I. White; (2016). *Wireless Visible Light Communications Employing Feed-Forward Pre-Equalization and PAM-4 Modulation*. Lightwave Technology.
- [39] Yi X, Buchali F, Chen W, Shieh W; (2006). *Adaptation algorithms for receiver based electronic dispersion equalization*. researchgate.
- [40] Oumer B, (2015) .*Channel Equalization Linear, Non linear, Blind and Time Domain and Interference Cancellation*. researchgate.
- [41] Bass M. (2010) Handbook Of Optics 3^{ed} McGraw Hill 1153.
- [42] Venghaus, H. and Grote, N. eds., (2017). Fibre optic communication: key devices *Springer* 161.
- [43] 29. Antoniadis, N.N., Ellinas, G. and Roudas, I. eds., (2011). *WDM Systems and Networks: Modeling, Simulation, Design and Engineering*. Springer Science & Business Media.
- [44] Mukherjee, B., (2006). *Optical WDM networks*. Springer Science & Business Media.
- [45] Palermo S, (2022) . *Special Topics in Optical Interconnects Circuits and System*. Texas University.
- [46] Shingade, A.A., Henry, R. and Shaligram, A., (2016), February. *Review paper for developments in Array Waveguide Gratings*. (AEEICB), 2nd International Conference on IEEE 378–382.
- [47] K. Skorupski, S. Cies , P. Panas (2020). *Numerical and Experimental Analysis of Matched Filter Interrogation of FBG Sensors with Large Side Lobes*. Lublin University of Technology, 20–618 .

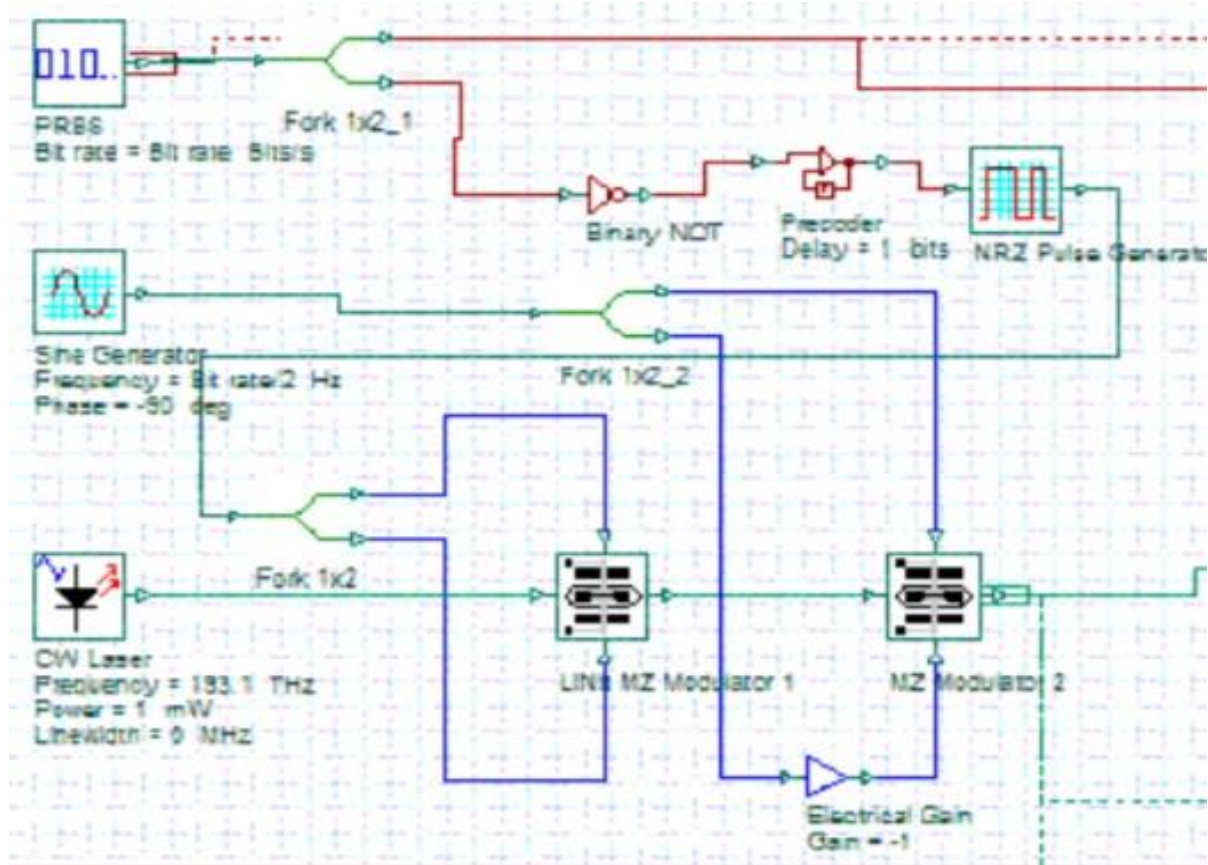
- [48] Electronics Club (2021) *Difference between Homodyne and Heterodyne Detection* .
- [49] faadoo engineers (2021) Introduction to Optical fiber System, Optical Waveguide and Optical fiber types.
- [50] Jiajun Zhou, Lin Gan , Chen Chen, Songnian Fu (2021) . 8×10 Gb/s Downstream PAM-4 Transmission for Cost-Effective Coherent WDM-PON Application. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY* , 39, 9.
- [51] Gopalan S, Hemanth C, Ranganth B, Saketh K (2022) . *Nonlinear effects on WDM optical communication system*. ResearchGate.
- [52] Mishra V, Dhadhal D , Thummar R (2023). *Implementation and analysis of 32 channel CSRZ DWDM system at narrow channel spacing*. Alliance University.
- [53] Yusuke M, Keisuke J, Tomoyuki F, Kiyoshi Y (2023). *Wavelength-Division-Multiplexing Optical-Transmission Using Signal Compensation Technique and Low-Bandwidth Optical Receivers*. Sumitomo Electric
- [54] Dina S, Haydar M (2023) .*Design of DWDM optical communication systems with different modulation formats using DCF and a repeater*. optica
- [55] Ramachandran V, Liga G, Barreiro A, Alvarado A 2023. *Capacity Region Bounds for Optical WDM Channels based on First-Order Regular Perturbation*. Eindhoven university of Technology
- [56] Tomáš H, Ján T, (2020). ON THE IMPACT OF FIBER NONLINEAR EFFECTS ON THE CP-DQPSK MODULATED ULTRA-DWDM SYSTEM. *ResearcherGate*.

الملحق A

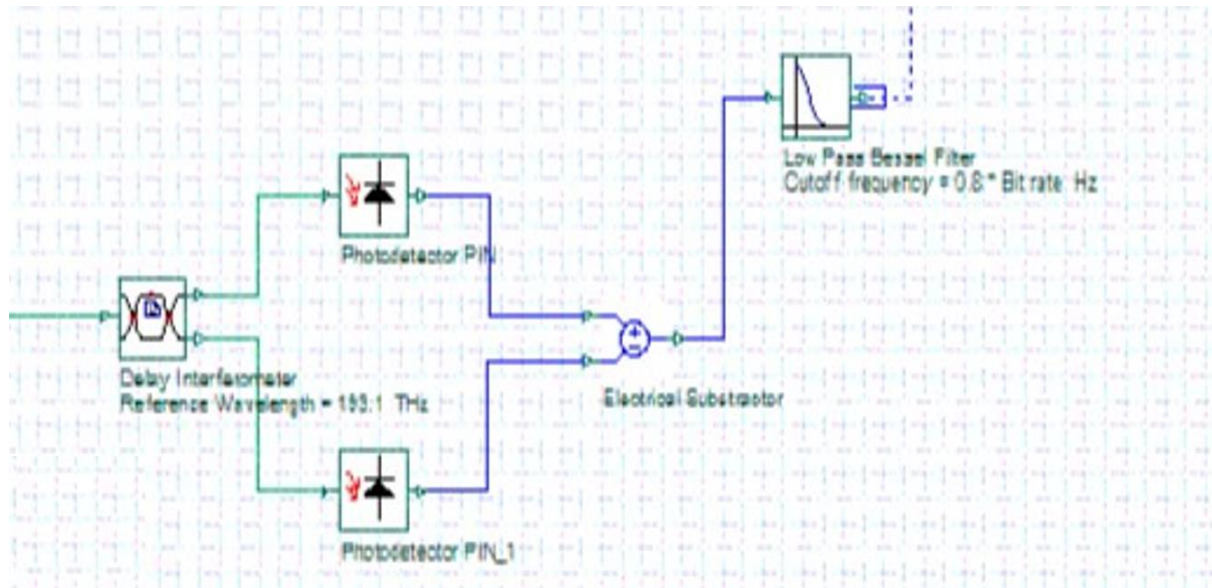
• نظام DWDM CP-DQPSK (محاكاة الدراسة السابقة [56])



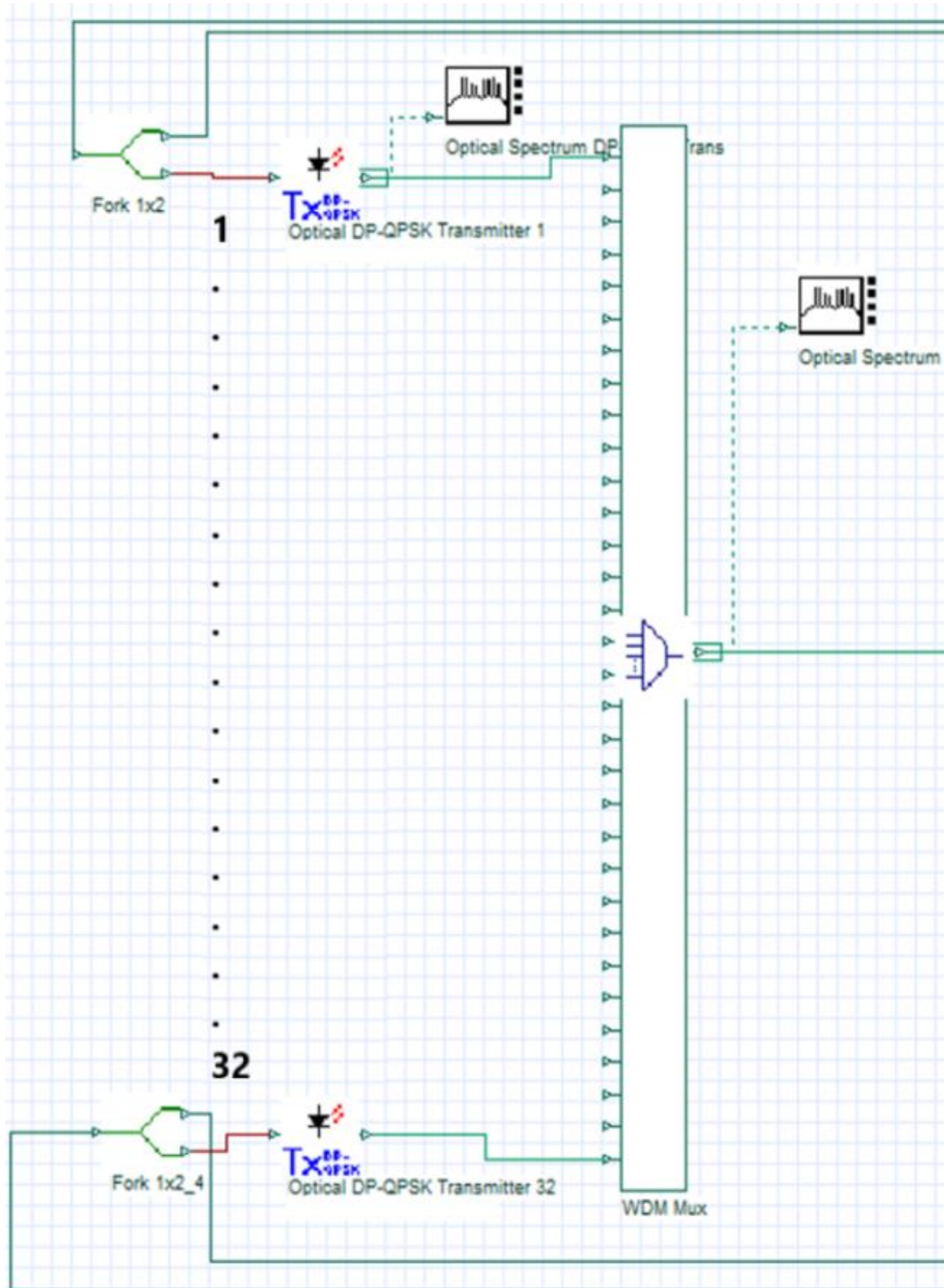
• وحدة إرسال DQPSK (محاكاة الدراسة السابقة [56])



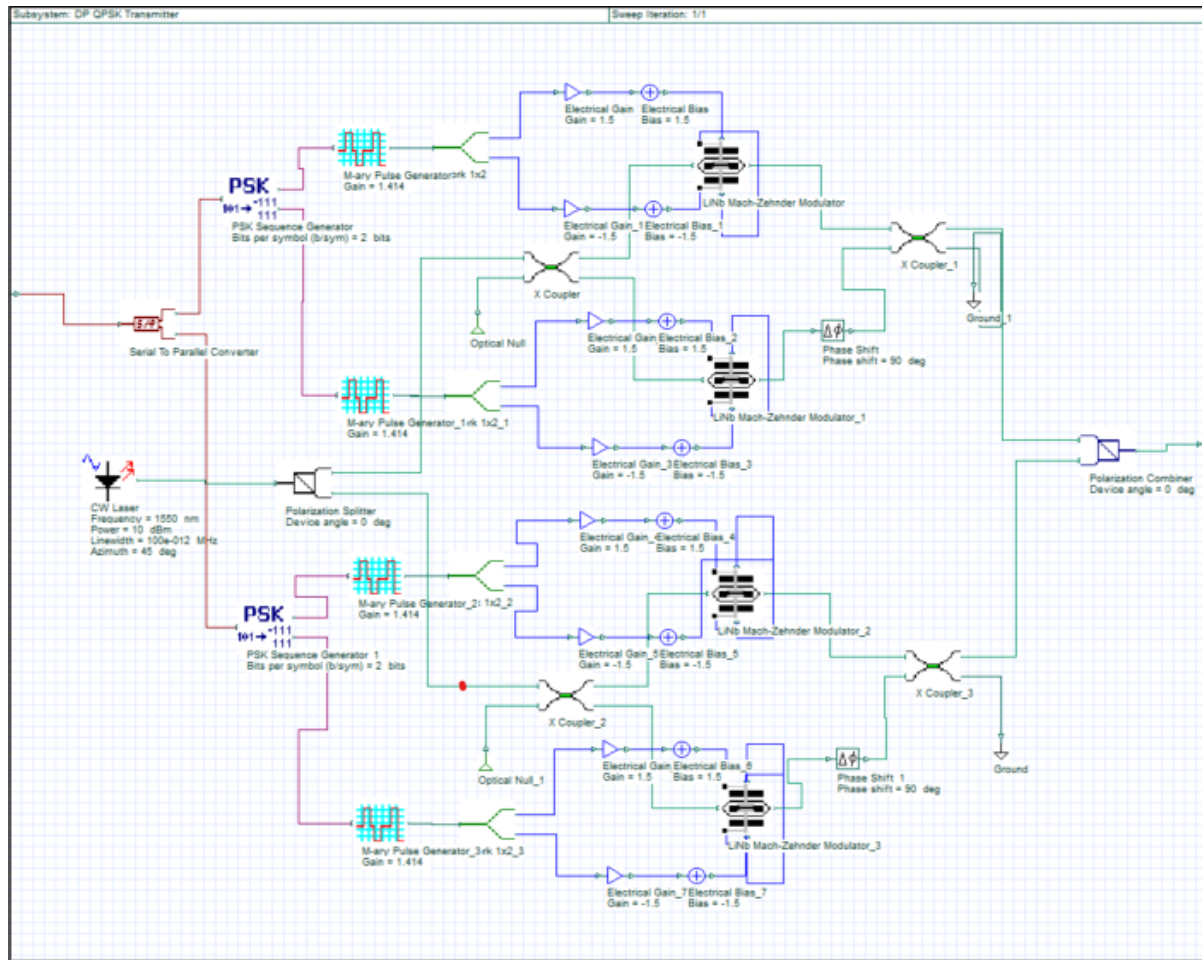
• وحدة استقبال DQPSK (محاكاة الدراسة السابقة [56])



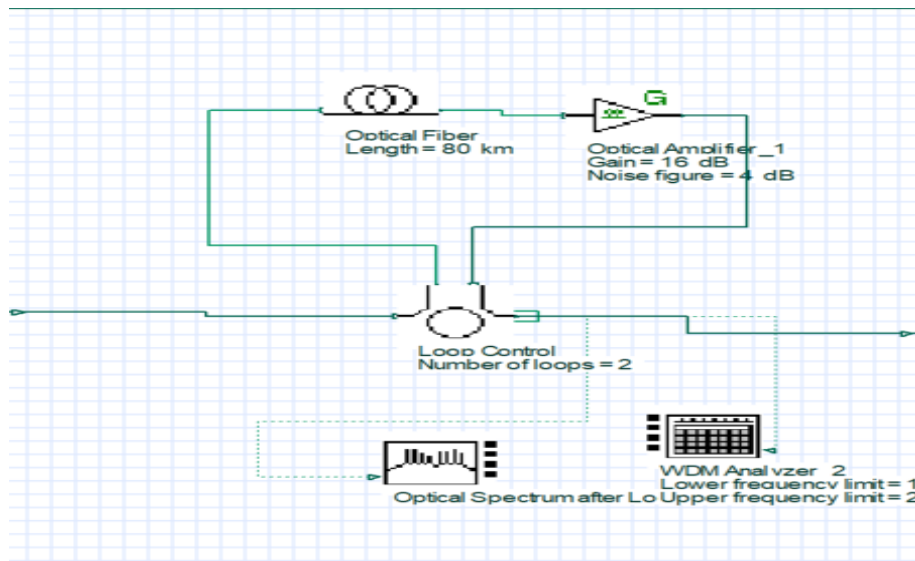
• قسم الإرسال في نظام DWDM DP-QPSK



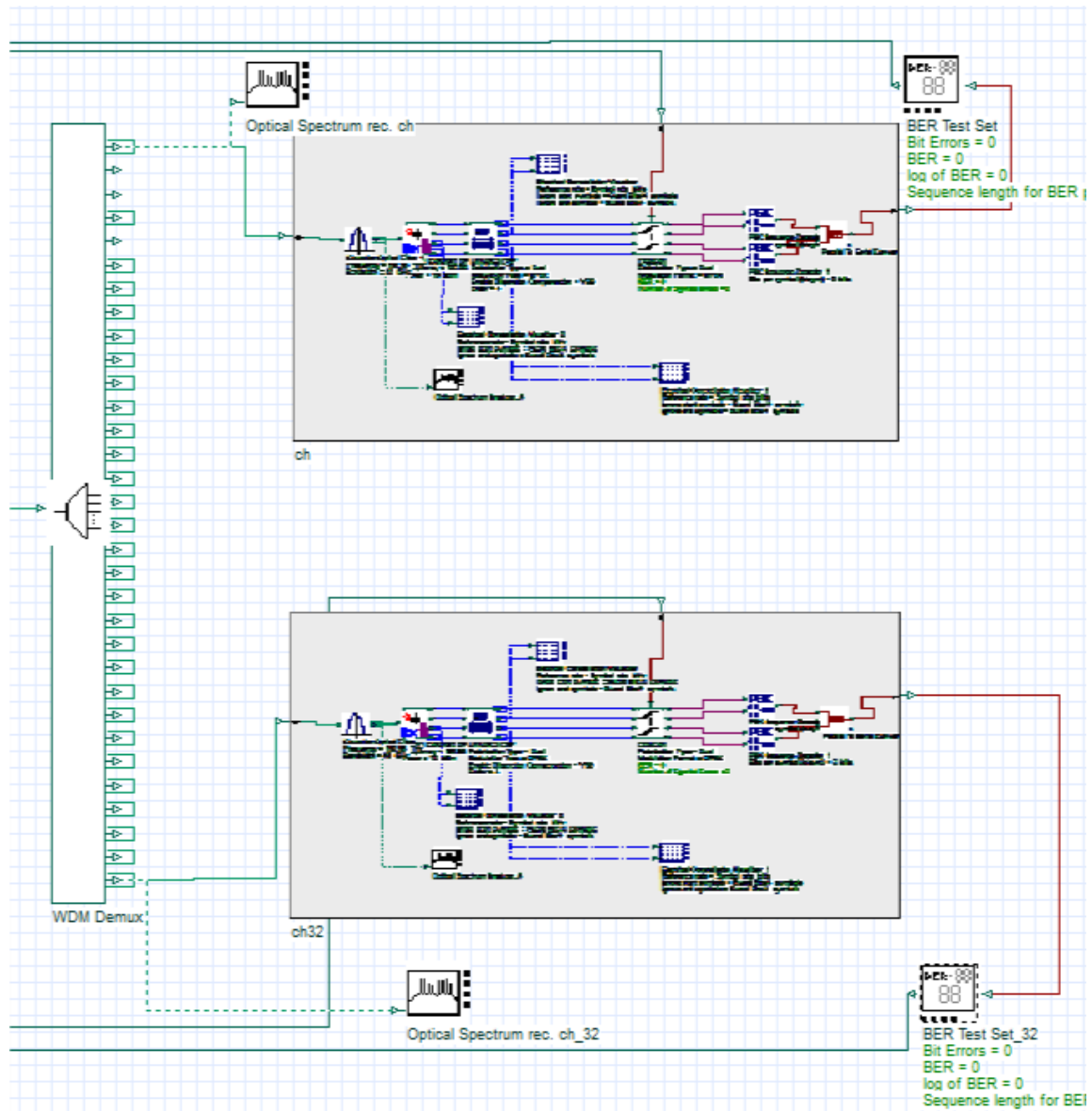
• وحدة إرسال DP-QPSK



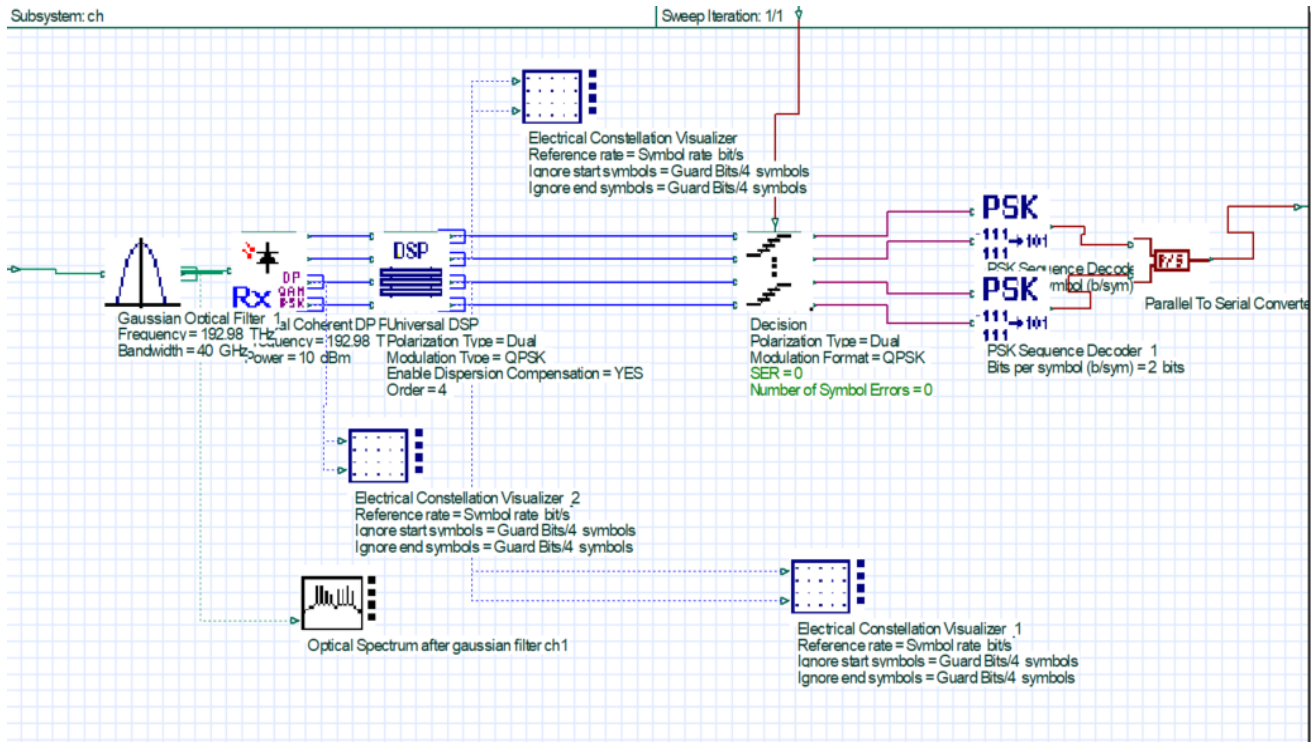
• الوصلة الضوئية



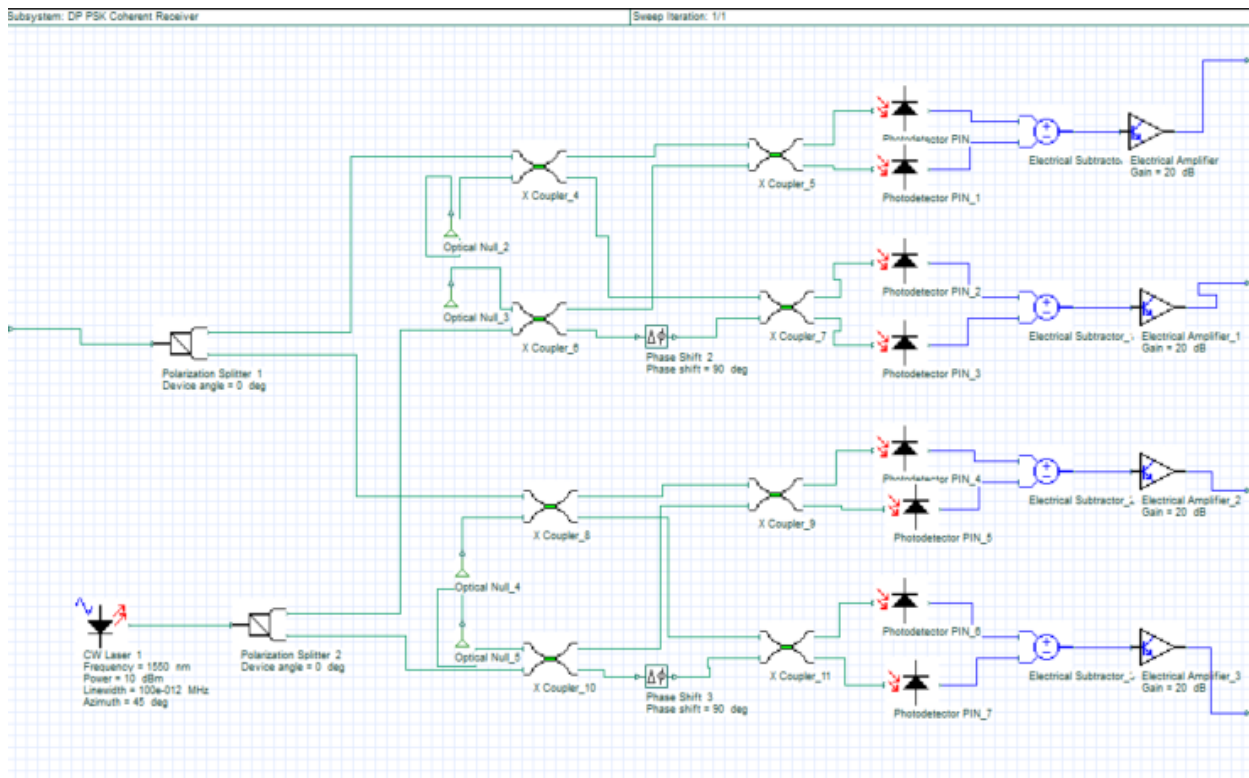
- قسم الاستقبال في نظام DWDM DP-QPSK الشامل (النظام الفرعي أوضح بالشكل التالي)



• قسم الاستقبال لكل قناة DWDM DP-QPSK

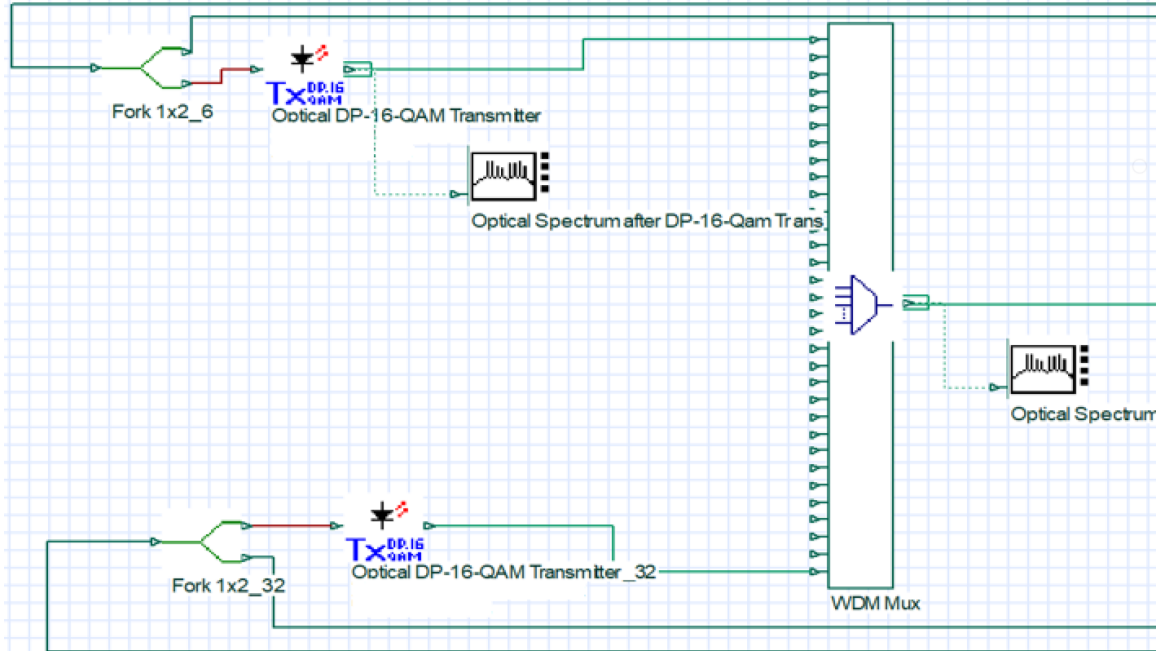


• وحدة استقبال DP-QPSK

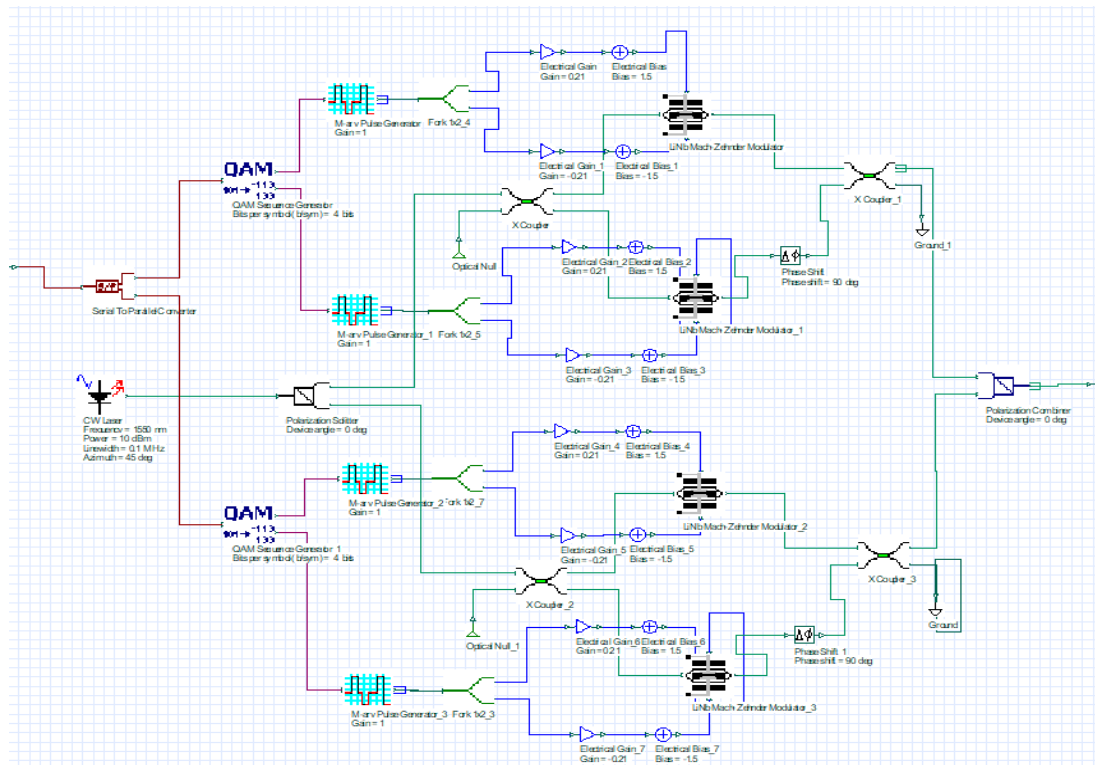


B الملحق

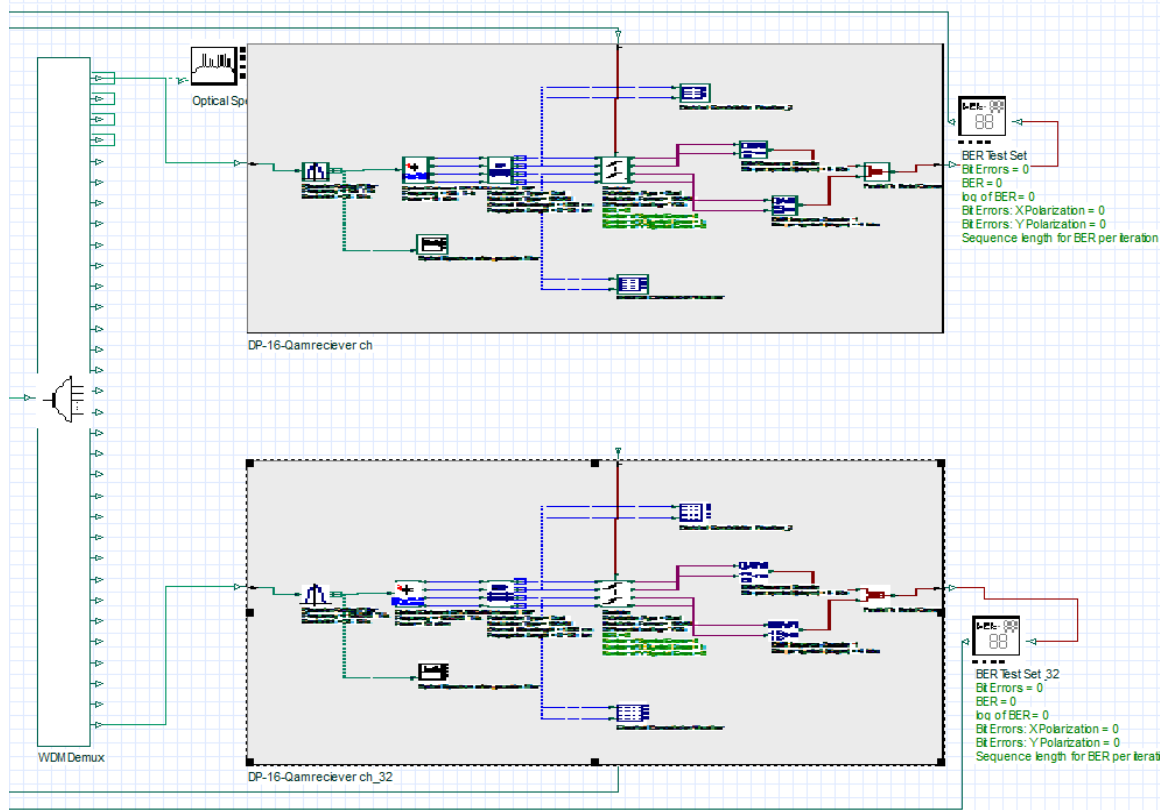
• قسم الإرسال في نظام DWDM DP-16QAM



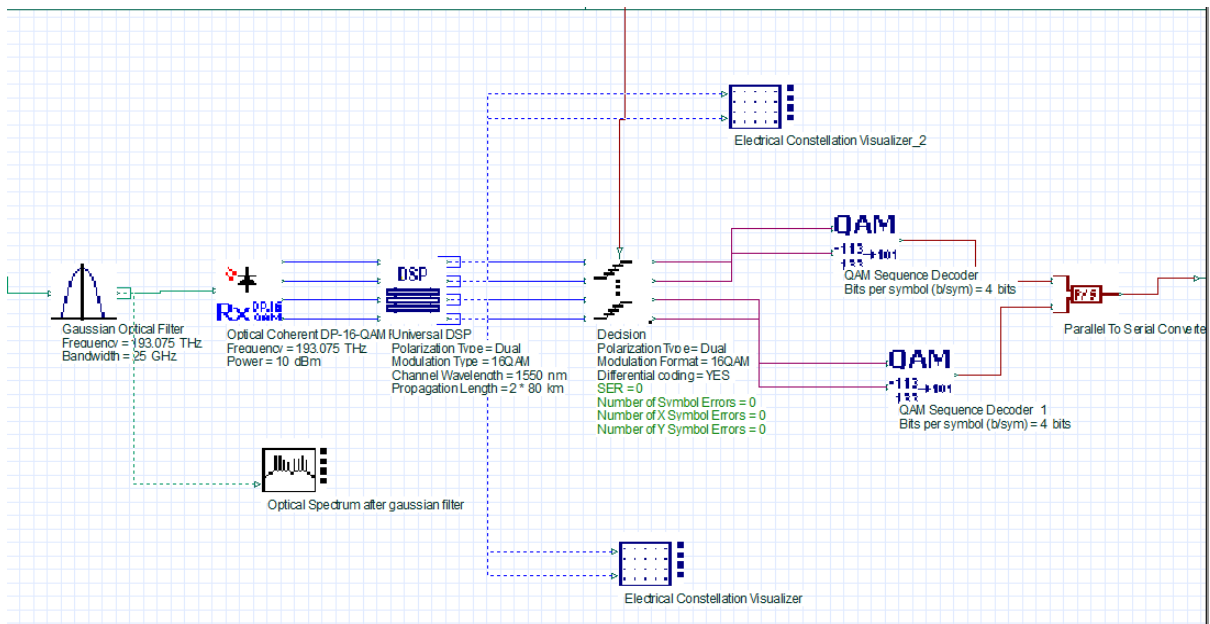
• وحدة إرسال DP-16QAM



- قسم الاستقبال في نظام DWDM DP-16QAM الشامل (النظام الفرعي أوضح بالشكل التالي)

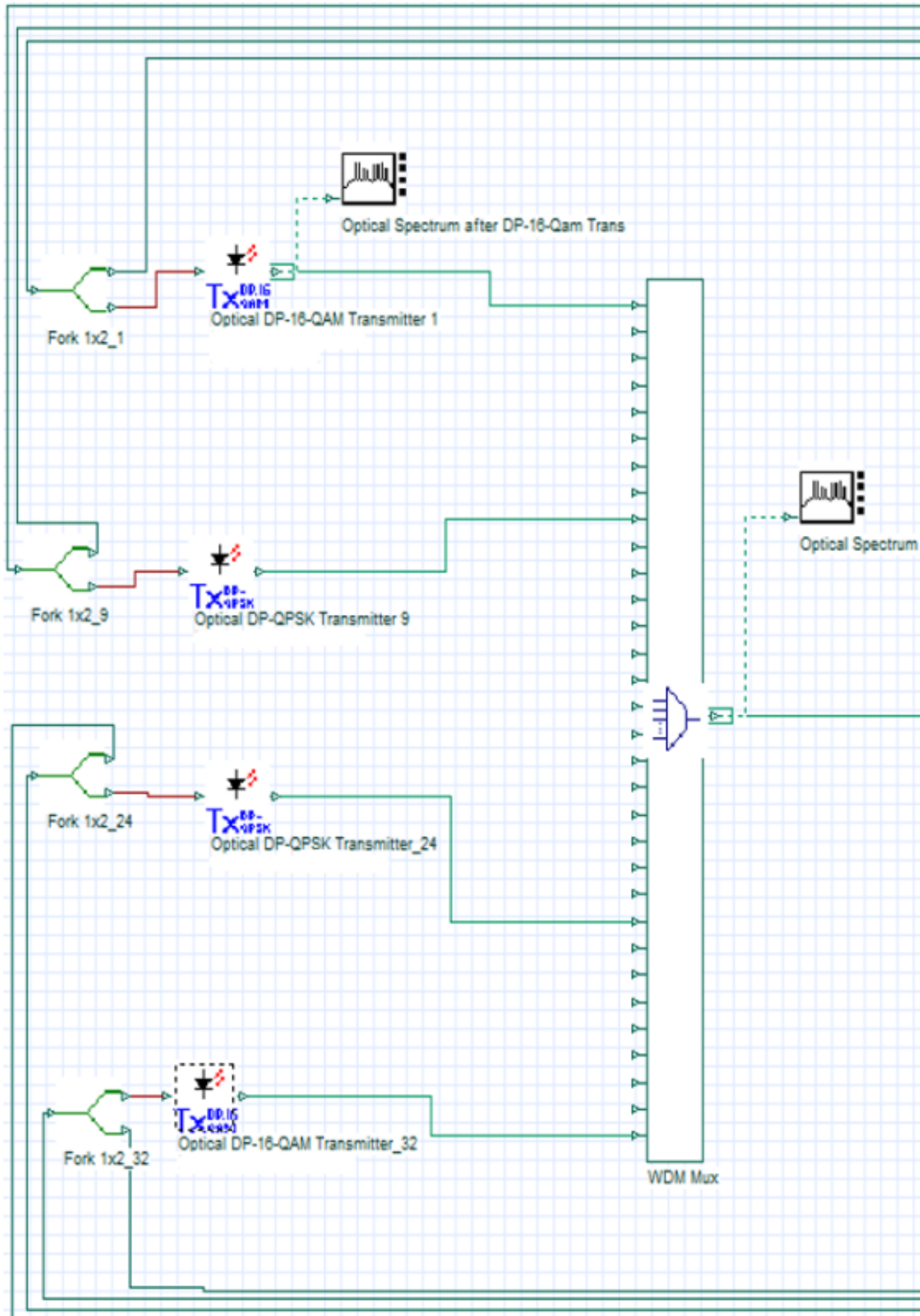


- قسم الاستقبال لكل قناة DWDM DP-16QAM

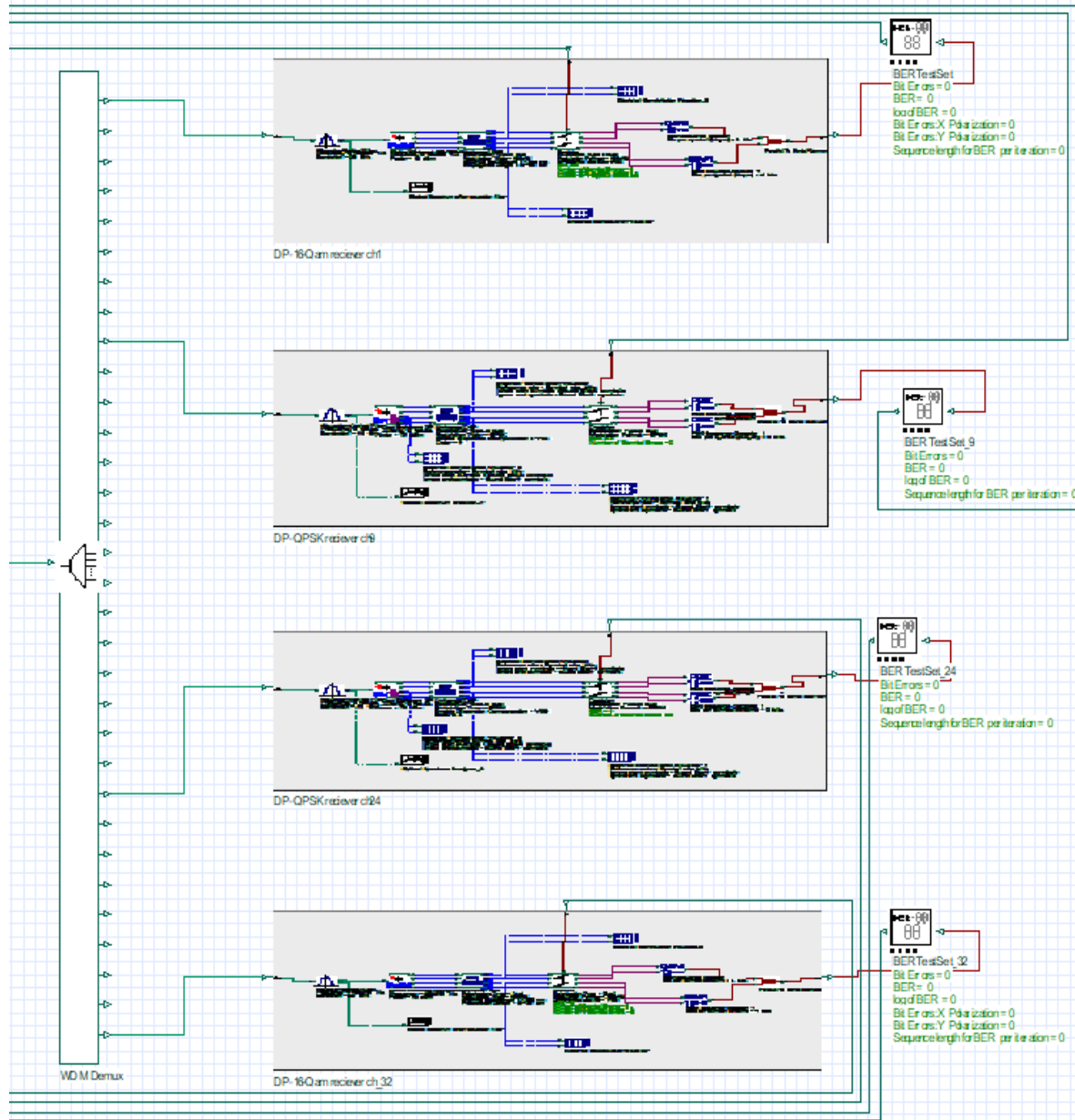


الملحق C

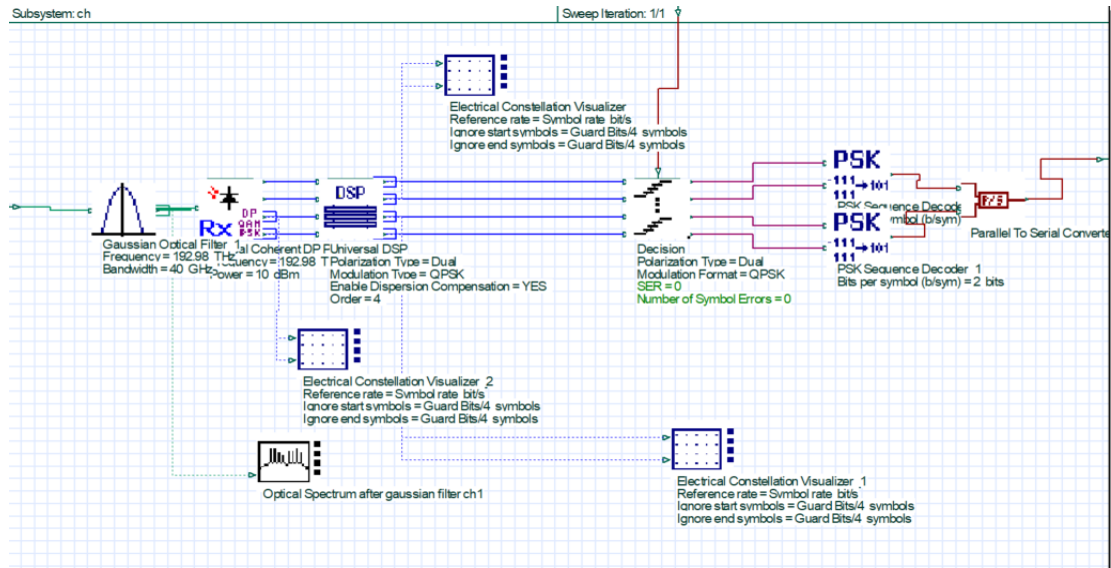
• قسم الإرسال في نظام DWDM Hybrid



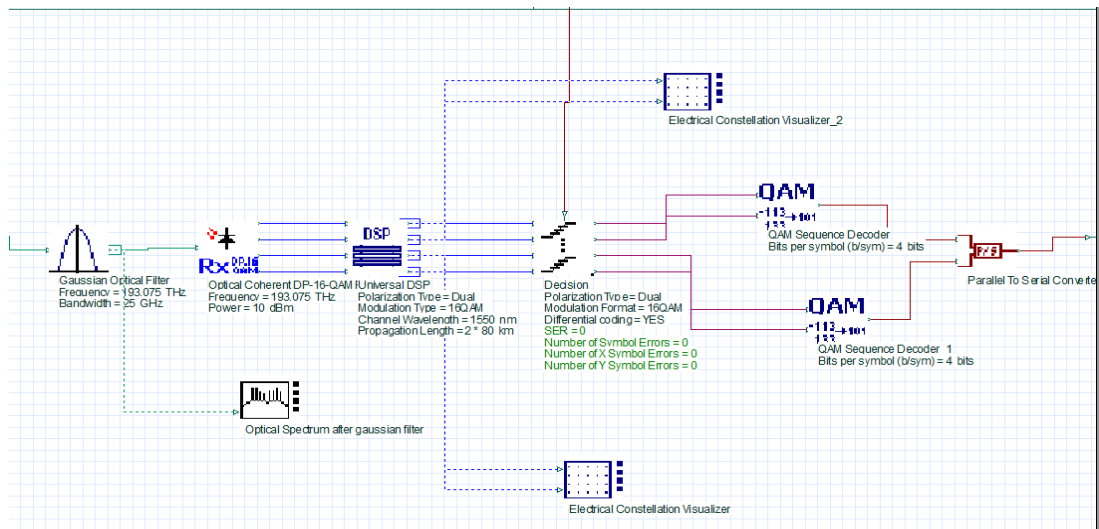
- قسم الاستقبال في نظام DWDM Hybrid الشامل (الأنظمة الفرعية أوضح بالشكل التالي)



• قسم الاستقبال لكل قناة DWDM DP-QPSK ضمن النظام الهجين



• قسم الاستقبال لكل قناة DWDM DP-16QAM ضمن النظام الهجين



Syrian Arab Republic

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

**Department of Electronics and Communications
Engineering**



Improving WDM Optical Communication System Performance using Coherent Detection and Digital Processing

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of PhD in Applied Electronics
Engineering**

Prepared by

Eng. Hasan Alraei

Supervised by

Prof. Dr. Eng. Mohamad Al-hussin

Academic Year

2023-2024