الجمهورية العربية السورية
جامعة السورية الخاصة
كلية الهندسة
قسم هندسة الشبكات والاتصالات

# تقنية اتصالات لاسلكية تستخدم الليزر، لنقل البيانات عبر الفضاء الحر

# Wireless communication technology that uses lasers to transmit data over free space

**مشروع أعُد لنيل درجة الإجازة في هندسة الشبكات والاتصالات**

**إعداد الطلاب:**

أمجد جلال الرجو　　محمود فايز نونو　　فادي سائد طربين

**بإشراف:**

د. محمد عثمان　　م.يزن ابو رافع

**العام الدراسي**

**2025-2024 م**

# كلمـة شكـر

إلى من كان لنا قدوة ولم يبخل علينا بنصائحه وتوجيهاته، وإلى من كان

لنا عوناً حتى إنهاء هذا العمل

# الفهرس:


جدول الأشكال: ..... iv

الرموز والمصطلحات العلمية ..... vii

الملخص : ..... viii

الفصل الأول:.....

الموجات الكهرومغناطيسية .....

1-1 نظرة عامة حول مفهوم الموجات الكهرومغناطيسية: ..... 1

2-1 أنواع الموجات الكهرومغناطيسية: ..... 4

3-1 الضوء والموجات الكهرومغناطيسية..... 5

1-3-1 الطاقة في الموجات الكهرومغناطيسية:..... 6

1- 4 الظواهر المرافقة لانتشار الضوء في الأوساط :..... 7

5-1 الطيف المرئي:..... 10

الفصل الثاني..... 11

القضايا الأساسية المتعلقة بأنظمة الاتصالات البصرية .....11

1-2 مقدمة عامة :..... 12

2-2 أهمية المشروع :..... 12

3-2 أهداف المشروع:..... 12

4-2 أنظمة الاتصالات البصرية: ..... 13

5-2 تطور أنظمة الاتصالات الضوئية..... 14

6-2 بنية نظام الاتصالات البصري: ..... 16

7-2 التعديل الرقمي في الاتصالات البصرية:..... 21

8-2 مقارنة بين الألياف البصرية والكابلات المحورية :..... 25

9-2 الانتشار في الألياف الضوئية :..... 27

10-2 الضياعات في أنظمة الاتصالات الضوئية:..... 28

الفصل الثالث..... 32

أنظمة اتصالات البصرية في الفضاء الحر .....
3-1 مقدمة في اتصالات الفضاء الحر ..... 33
3-2 لمحة تاريخية .....:..... 33
3-3 الاتصالات باليزر عبر الهواء ..... 34
3-4 تطبيقات نظام اتصال باليزر عبر الهواء.....34
3-5 التعديل المستخدم بأنظمة اتصالات fso .....37
3-6 نوافذ الارسال التي يعمل عندها الاتصال بالليزر عبر الهواء.....38
3-7 القيود على الاتصال عبر الألياف الضوئية.....39
3-8 مقارنة بين الاتصال بالليزر عبر الهواء والاتصال بالالياف الضوئية.....40
3-9 الضياعات الجوية في القضاء الحر: ..... 43
الفصل الرابع ..... 56
التطبيق العملي والنتائج.....
4 -1 محددات الأداء: ..... 57
4-2 تصميم الشبكة: ..... 58
4-3 محاكاة نظام اتصال ليزري عبر الهواء _تقنية تعدد المرسلات والمستقبلات :.....61
4-4 دراسة أثر زيادة عدد المرسلات والستقبلات على أداء نظام اتصالات fso.....76
4-5 الاستنتاجات والنتائج: ..... 84
4-6 الخاتمة: ..... 92
5 الفصل الخامس..... 89
5-1 الآفاق المستقبليّة: ..... 90
6 الفصل السادس..... 91
6-1 التحديات والصعوبات: ..... 92
المراجع : ..... 95

## جدول الأشكال:


| رقم الشكل | اسم الشكل | رقم الصفحة |
|---|---|---|
| **الفصل الأول** | | |
| (الشكل1-1) | طاقة الموجات الكهرومغناطيسية. | 6 |
| (الشكل1-2) | استقطاب الموجات الكهرومغناطيسية. | 7 |
| (الشكل1-3) | الانعكاس المنتظم للأشعة الكهرومغناطيسية. | 8 |
| (الشكل1-4) | انكسار الضوء . | 9 |
| **الفصل الثاني** | | |
| (الشكل 2-1) | المخطط الصندوقي العام لبنية نظام الاتصالات البصري. | 17 |
| (الشكل 2-2) | آلية عمل الثنائيات المشعة للضوء – المرسلات الضوئية. | 18 |
| (الشكل 2-3) | البنية الأساسية لمرسل الليز الضوئي. | 19 |
| (الشكل 2-4) | التعديل المطالي في أنظمة الاتصالات البصرية. | 19 |
| (الشكل 2-5) | التعديل المباشر في أنظمة الاتصالات البصرية. | 20 |
| (الشكل2-6) | التعديل الخارجي في أنظمة الاتصالات البصرية – معدل ماك زيندر. | 21 |
| (الشكل2-7) | نموذج لتنفيذ دارة OOK. | 22 |
| (الشكل2-8) | دارة تنفيذ التعديل الترددي. | 22 |
| (الشكل2-9) | إشارة PPM لإشارة رقمية واحدات وأصفار. | 23 |
| (الشكل2-10) | دارة تنفيذ الإبدال بتعديل الطور. | 24 |
| (الشكل2-11) | المستقبلات البصرية. | 23 |
| (الشكل2-12) | بنية الألياف البصرية. | 24 |
| (الشكل2-13) | بنية الكابلات المحورية – الكابلات النحاسية. | 26 |
| (الشكل2-14) | آلية الانعكاس في الألياف البصرية. | 28 |
| (الشكل2-15) | الضياعات الخطية في الألياف البصرية. | 30 |
| **الفصل الثالث** | | |
| (الشكل3-1) | البنية العامة لنظام انصالات بصري باستخدام الليزر في الفضاء الحر | 36 |
| (الشكل3-2) | نوعية المعلومات التي يمكن نقلها باستخدام أنظمة الاتصال عبر الهواء | 37 |
| (الشكل3-3) | طوبولوجيا شبكات الاتصال البصري في الفضاء الحر | 42 |
| (الشكل3-4) | ضياعات تباعد الحزمة في أنظمة الاتصالات البصرية في الفضاء الحر | 45 |

| | | |
|---|---|---|
| (الشكل 3-5 ) | العلاقة بين زواية تباعد الحزمة وقطر فتحة عدسة المرسل | 47 |
| (الشكل 3-6 ) | الضياعات الناتجة عن الأحوال الجوية | 50 |
| الشكل( 3_7) | الضياعات الناجمة عن حرارة الشمس على سطح الأرض | 51 |
| **الفصل الاربع** | | |
| (الشكل4-1) | مخطط العين في أنظمة الاتصالات الضوئية. | 57 |
| (الشكل4-2) | المخطط الصندوقي العام للشبكة الضوئية المصممة | 59 |
| (الشكل4-3) | التصميم المستخدم لمحاكاة النظام | 61 |
| (الشكل4-5) | محاكاة الصميم الثاني | 68 |
| (الشكل4-7) | مخطط العين للتصميم الثاني عند قطر عدسة استقبال cm9 | 76 |
| (الشكل4-8) | محاكاة التصميم الثالث _أثر زيادة عدد المرسلات والمستقبلات | 77 |
| (الشكل4-9) | مخطط العين للتصميم الثالث عند قطر عدسة استقبال cm9 | 84 |
| | | |
| **الجدول (3-1 )** | مقارنة بين أنظمة الاتصال الليزرية عبر الهواء وأنظمة الاتصال عبر الالياف الضوئية وأتظمة الاتصال عبر الكابلات النحاسية | 41 |
| **(الجدول3-2)** | معامل جزئيات الامتصاص عند طول موجي محدد | 44 |
| **الجدول (3-3)** | مجال الرؤية من اجل معدلات تساقط الأمطار | 50 |
| **الجدول(4-1)** | معاملات المستخدمة في المحاكاة. | 60 |
| **(الجدول4-2 )** | مؤشرات الأداء _تغيير قطر عدسة الاستقبال _مستقبل وحيد . | 63 |
| **(الجدول4-3 )** | مؤشرات الأداء _عند تغير المسافة بين عدستين _مستقبل وحيد . | 64 |
| **(الجدول4-4 )** | مؤشر الأداء_تغير استطاعة الارسال مستقبل وحيد | 65 |
| **(الجدول4-5)** | مؤشر الأداء تغير معدل النقل مستقبل وحيد | 66 |
| **(الجدول4-6)** | مؤشر الأداء تغير قطر عدسة الاستقبال تعدد المستقبلات تصميم ثاني | 70 |

## الرموز والمصطلحات العلمية

| الرمز | المصطلح العلمي |
|---|---|
| **LED** | **Light emitting diode** |
| LASER | **Light amplification bysimulated lmition radiation** |
| FSO | **Free space optics** |
| OOK | **On_off keying** |
| OTDR | **Optical time domain reflect meter** |
| MZ | **Match _zehnder modulator** |
| EDFA | **Erbium _doped fiber amplifier** |
| NRZ | **Not return to zero** |
| PD | **Photodiode** |
| LPF | **Low-Pass Filter** |
| BER | BIT ERROR RATE |
| MZ | **Mach-Zehnder** |

## ملخص

نقدم في هذا المشروع دراسة عامة في مجال الاتصالات باستخدام الليزر عبر الهواء ودراسة العوامل المؤثرة على قناة الاتصال الليزرية لنقل بيانات الشبكة بسرعة 1.25 Gbps لمسافات تصل لأكثر من2kmحيث نعرض أولاً دراسة نظرية عن الاتصالات الضوئية في الفضاء الحر ونتحدث عن مزايا وسلبيات هذه التقنية ثم ننتقل لدراسة الضياعات الجوية التي قد تؤثر على الإشارة الليزرية عبر الهواء ومن ثم نقوم باستخدام عدة تقنيات مستخدمة لتحسين الأداء كزيادة قطر فتحة عدسة الاستقبال وتعدد المرسلات والمستقبلات وندرس مؤشرات الأداء لتحديد الأفضل بينها والمناسب من خلال المحاكاة لعدة تصاميم لنظام اتصالات ليزري عبر الهواء باستخدام برنامج optisystem واختيار التصميم الذي يحقق موثوقية عالية وأداء جيد بأقل التكاليف.

# الفصل الأول:

# الموجات الكهرومغناطيسية

## 1-1 نظرة عامة حول مفهوم الموجات الكهرومغناطيسية:

تعرف الموجات الكهرومغناطيسية بأنها الموجات التي يمكنها التنقل عبر الفضاء أو الفراغ بحرية، دون الحاجة إلى وسيط مادي لنقل طاقتها من موقع إلى آخر كما في الموجات الميكانيكية، ويمكن ملاحظة ذلك من خلال الموجات الضوئية التي تعتبر من الأمثلة على الموجات الكهرومغناطيسية؛ إذ يمكنها التنقل دون الحاجة إلىوسيط مادي، خلافاً للموجات الصوتية والتي تعتبر مثالاً على الموجات الميكانيكية التي تحتاج إلى وسطمادي لنقلها .

يتم إنشاء الموجات الكهرومغناطيسية عن طريق اهتزاز الشحنة الكهربائية، مما يولد موجة تحتوي على مكون كهربائي ومغناطيسي، ويجدر بالذكر هنا أن الموجة الكهرومغناطيسية تنقل طاقتها عبر الفرارغ بسرعة $3x10^8 m/s$، أما عبر المادة فهي تنتقل بسرعة كلية أقل من السرعة السابقة.[16]

طبق الفيزيائي الألماني هنريك هرتز معادلات ماكسويل لإنتاج واستقبال الموجات الراراديوية، وأصبحت وحدة قياس تردد الموجات ال اراديوية (دورة واحدة في الثانية) تعرَف باسم هرتز، تيمنًا باسم هنريك هرتز. وحلت تجاربه مع الموجات الراراديوية مشكلتين.

الأولى: أثبت بما لا يقبل الشك ما طرحه ماكسويل نظريًا فقط، بكون سرعة الموجات الراراديوية تساوي سرعة الضوء، وأثبت هذا تشكل الموجات الراراديوية من الضوء.

والثانية: اكتشف طريقة تحرر المجالين الكهربائي والمغناطيسي، والتخلي عن الأسلاك، كما هو الحالفي موجات ماكسويل (الموجات الكهرومغناطيسية).

وللموجات الكهرومغناطيسية العديد من الخصائص التي يمكن ذكر بعضها كالآتي:

1. تنتشر الموجات الكهرومغناطيسية عن طريق الموجات الكهربائية والمغناطيسية المتذبذبة بزوايا قائمة على بعضها البعض .
2. تمتلك الموجات الكهرومغناطيسية خصائص التداخل والانحرارف كغيرها من الموجات .
3. تعتبر الموجات الكهرومغناطيسية موجات مستعرضة.

## 2-1 أنواع الموجات الكهرومغناطيسية:

يشمل الطيف الكهرومغناطيسي جميع ترددات الموجات بما في ذلك الراديو والضوء المرئي والأشعة السينية،وتتكون جميع الموجات الكهرومغناطيسية من فوتونات تنتقل عبر الفراغ لتتفاعل مع المادة، ليتم امتصاص

بعض الموجات، أما الموجات المتبقية فيتم عكسها، وبشكل عام يمكن تصنيف الموجات الكهرمغناطيسية إلى7 أنواع أساسية هي كما يلي:

- موجات الراديو:

تعد موجات الراديو من الموجات ذات التردد الأدنى في الطيف الكهرومغناطيسي، ويمكن استخدام هذا النوع لنقل إشارات أخرى إلى أجهزة الاستقبال، لترجمتها إلى معلومات قابلة للاستخدام، ويعود السبب في إصدار هذه الموجات إلى العديد من المصادر الطبيعية أو المصنّعة من قبل الإنسان، كما أنها قد تنبعث أيضاً من النجوم، والكواكب، والأجسام الكونية الأخرى.

- موجات الميكروويف :

وهي ثاني أقل موجات الطيف الكهرومغناطيسي في التردد، وعلى الرغم من أن الطول الموجي لموجات الراديو قد يصل في طوله إلى عدة أميال إلا أنّ موجات المايكروويف يتراوح طولها الموجي بين عدة سنتيمترات إلى قدم، ويمكن لهذه الأشعة اختراق العوائق مثل السحب والدخان وغيرها، ويتم استخدام هذا النوع من الموجات في الرادار، والمكالمات الهاتفية الأرضية، ونقل بيانات الحاسوب وغيرها.[16]

- موجات الأشعة تحت الحمراء:

يقع هذا النوع من الموجات في النطاق منخفض متوسط الترددات في الطيف الكهرومغناطيسي أي بين موجات الميكروويف وموجات الضوء المرئي، ويتراوح طولها بين عدة مليمترات إلى أطوال مجهرية، وتنتج الموجات ذات الطول الموجي الأطول من هذا النوع حرارة وتشمل الإشعاع المنبعث من النار، الشمس،وغيرها، وتستخدم الموجات ذات الطول الموجي الأقصر في أجهزة التحكم عن بعد وتقنيات التصوير.

- أشعة الضوء المرئية:

يعتبر هذا النوع من الموجات من الموجات الأقل تردداً في الطيف الكهرمغناطيسي، وهي تتراوح بين الضوء المرئي الأحمر إلى الضوء المرئي البنفسجي، ومن الجدير بالذكر بأن المصدر الطبيعي الأكثر وضوحاً للضوء المرئي هو الشمس، ويظهر لون الأشياء من حولنا عادة بناءً على الطول الموجي للضوءالذي يمتصه الجسم أو يعكسه.

الموجات فوق البنفسجية:

لهذا النوع من الموجات أطوال موجية أقصر من الضوء المرئي، وهي تعتبر السبب الرئيسي في حروق الشمس ومن الممكن أن تسبب السرطان للكائنات الحية، ومن الجدير بالذكر بأن العمليات التي تتم على درجات حرارة عالية تنبعث منها الأشعة فوق البنفسجية، كما يساعد اكتشاف هذه الموجات في التعرف على بنية المجرات .

الأشعة السينية:

وهي موجات عالية الطاقة ذات أطوال موجية تتراوح بين 0.03 نانوميتر إلى 3 نانوميتر أي أن طولها الموجي مقارب لطول الذرة، وتنبعث الأشعة السينية من مصادر تنتج درجات حرارة عالية جداً مثل هالة الشمس، وتشمل المصادر الطبيعية للأشعة السينية الظواهر الكونية ذات الطاقة الهائلة مثل النجوم النابضة والثقوب السوداء وغيرها، ويستخدم هذا النوع من الموجات في تكنولوجيا التصوير، وذلك لعرض الهياكل العظمية داخل الجسم.

أشعة غاما:

يعتبر هذا النوع من الموجات بأنه ذو التردد الأعلى بين الموجات الكهرومغناطيسية، وتنبعث فقط من الأجسام الكونية الأكثر نشاطًا مثل النجوم النابضة والنجوم النيوترونية وغيرها، ومن المصادر الأرضية مثل البرق والانفجا ارت النووية والانحلال الإشعاعي، ومن الجدير بالذكر بأنه يتم قياس أطوال هذا النوع على المستوى دون الذري، ويمكن لأشعة جاما تدمير الخلايا الحية، ولحسن الحظ فإن الغلاف الجوي للأرض يمتص هذه الأشعة قبل أن تصل إلى الكوكب .

## 1-3 الضوء والموجات الكهرومغناطيسية:

يتكون الضوء من حزم منفردة من الطاقة تدعى الفوتونات، والتي تحمل زخمًا (عزمًا)، ولا تمتلك كتلةً، وتسير بسرعة الضوء، ويمتلك الضوء خصائص الموجات والجزيئات معًا. تشير مصطلحات الضوء، والموجات الكهرومغناطيسية، والإشعاع جميعها إلى الظاهرة الفيزيائية نفسها؛ الطاقة الكهرومغناطيسية. يمكن وصف هذه الطاقة عبر معرفة التردد، أو الطول الموجي، أو الطاقة .

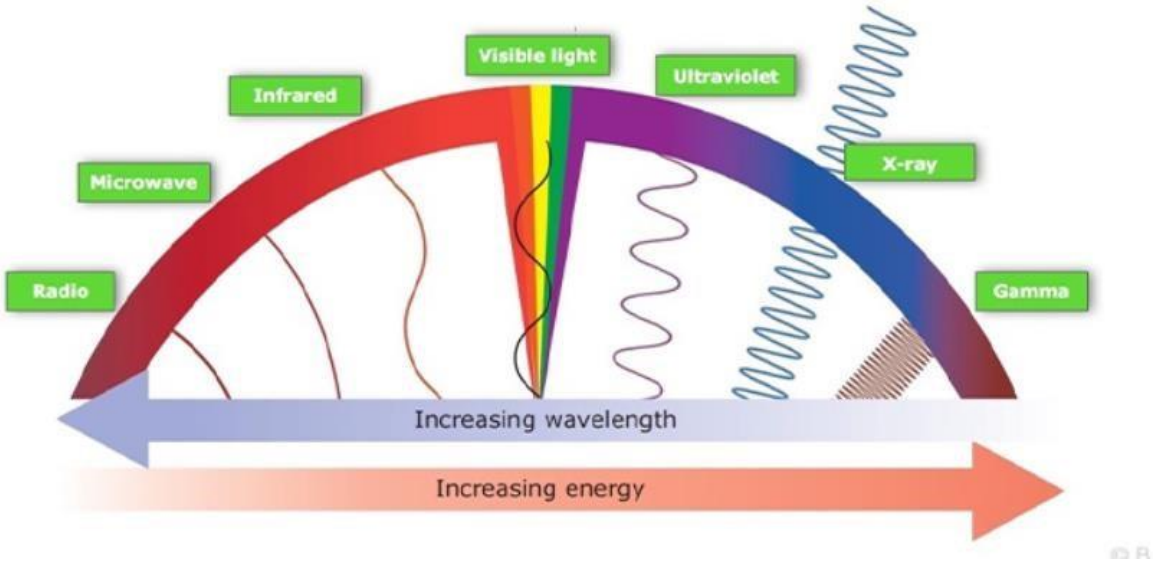
توصف الموجات الراديوية والميكروية عادةً بصيغة راديوية، وتقاس بالـ(هرتز)، ويوصف الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء بصيغة الطول الموجي، ويُقاس بالـ(متر)،

أما الأشعة السينية x–ray – وأشعة غاما (Gamma) فيُشار إليها بصيغة وحدات الطاقة، وتقاس بالـ(إلكترون فولت). يُعد هذا تقليدًا علميًا متعارفًاعليه، يسمح بالاستخدام المناسب للوحدات التي تمتلك أرقامًا ليست كبيرةً جدًا أو صغيرةً جدًا.

## 1-3-1 الطاقة في الموجات الكهرومغناطيسية:

يوصَف **تردد الموجة** بأنه عدد القمم التي تتجاوز نقطةً محددةً خلال الثانية الواحدة، فتسمى الموجة الواحدة أو الدورة الواحدة في الثانية بِهرتز Hz تيمنًا باسم هنريك هرتز الذي أسس وجود الموجات الراديوية.

وكما تحتوي الموجة الكهرومغناطيسية على قمة، ومنخفض (قعر أو قاع)، مشابهة لموجات المحيطات،وتتمثل المسافة بين القمم **بالطول الموجي**. يمكن وصف الموجات الكهرومغناطيسية بصيغة طاقتها، بوحدة قياس تدعى (إلكترون فولت)، وهي كمية الطاقة الحركية اللازمة لتحريك إلكترون بجهد كهربائي مقداره واحد فولت . وتزداد الطاقة كلما قصر الطول الموجي إذا ما تحركنا في المجال الطيفي من الأطوال الموجية الطويلة إلى القصيرة .

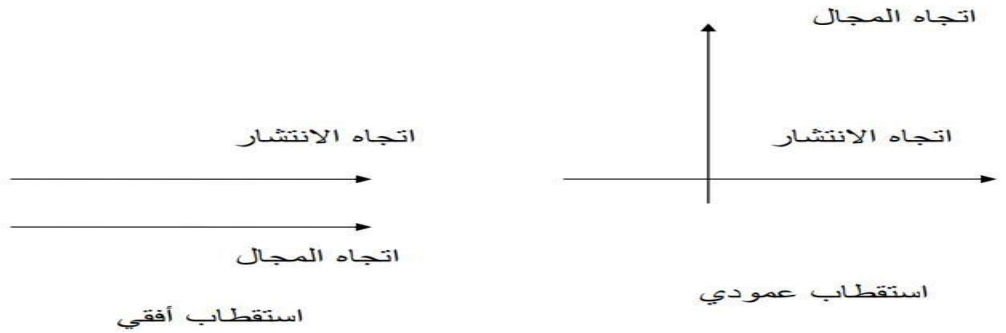



الشكل(1-1) طاقة الموجات الكهرومغناطيسية.

## 1- 4 الظواهر المارفقة لانتشار الضوء في الأوساط:

❖ **استقطاب الضوء:**

تحوي الموجة الكهرومغناطيسية على حقلين كهربائي ومغناطيسي وهما متعامدان على بعضهما البعض، وفي الزمن نفسه متعامدان على اتجاه انتشار الموجة. تمر تلك الموجة الضوئية خلال مادة (شبكة في الوسط) تسمح بمرور المركبة الرأسية للشعاع ولا تسمح بمرور المركبة الأفقية فيسقط على الحائل **ضوء مستقطب**، يتموج أرسيًا وفقد موجته المغناطيسية المقترنة به. في هذه الحالة تسمى موجة مستقطبة خطياً، ويسمى الاتجاه الذي يحدث فيه اهتزاز الموجة المستقطبة باتجاه الاستقطاب Polarization Axis.[18]



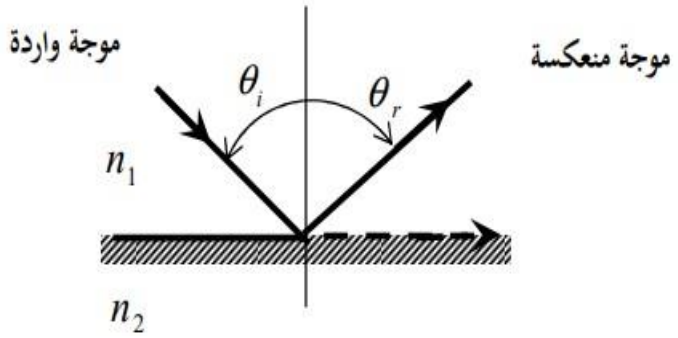

الشكل(1-2) استقطاب الموجات الكهرومغناطيسية .

❖ **انعكاس الضوء:**

يعبر انعكاس الضوء عن الظاهرة التي تحدث عندما تواجه الأمواج سطحًا أو حدودًا أخرى لا تمتص طاقة الإشعاع فترتد الأمواج بعيدًا عن السطح. وتختلف درجة انعكاس الضوء بحسب الأجسام والأسطح التي تنعكس عنها هذه الأشعة، حيث تعكس الاجسام ذات الأسطح اللامعة أو المصقولة الضوء بشكلٍ أكبر مقارنةً مع الأجسام ذات الأسطح الباهتة أو غير المصقولة؛ أي يمكن القول إن نوع الأسطح يشكل حجر الأساس في تحديد درجة انعكاس الضوء هذه. أما نوعي الانعكاس فهما:

1. **انعكاس الضوء المنتظم** :الذي يحدث عندما يسقط شعاع ضوئي على سطح مصقول وأملس كالمرآة أو أي سطحٍ معدنيٍ مثلًا، لينعكس عندها الشعاع الضوئي بنفس زاوية وروده. أي تنعكس الأشعة على شكل حزمةٍ ضوئيةٍ من الأشعة المتوازية. وتتساوى هنا كل من زاويتي الانعكاس وزاوية السقوط

2. **الانعكاس المنتشر أو ما يسمى الانعكاس غير المنتظم** :والذي يحدث عندما يسقط الشعاعِ الضوئي على سطحٍ خشنٍ غير أملسٍ أو مصقولٍ، فيسبب ذلك انتشار الضوء في اتجاهاتٍ مختلفة وبالتالي تكون زاوية السقوط وزاوية الانعكاس مختلفتين.




الشكل(1-3) الانعكاس المنتظم للأشعة الكهرومغناطيسية.

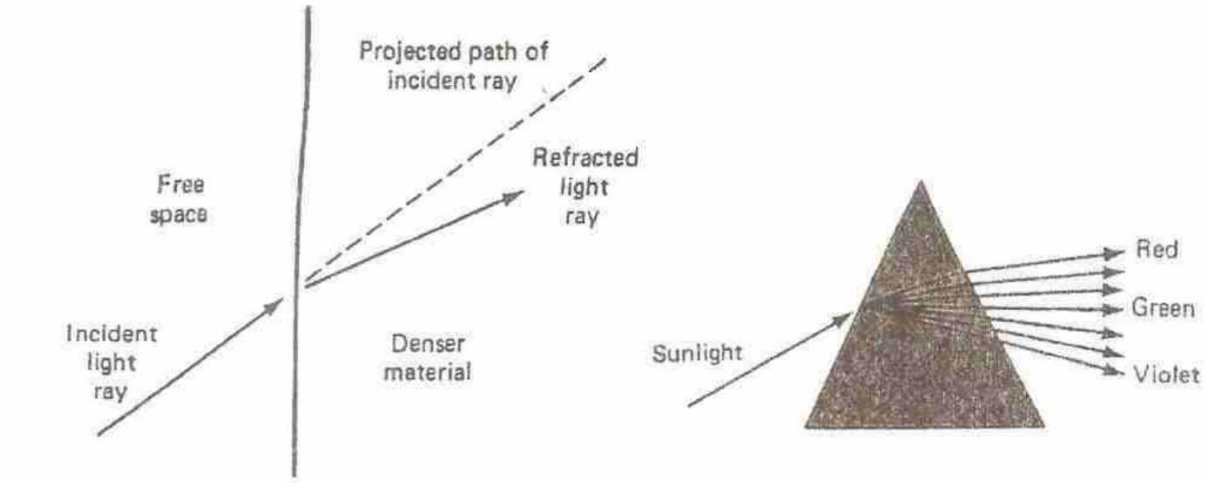
**- انكسار الضوء:**

يعبر انكسار الضوء عن انحناء الأشعة الضوئية عند انتقالها من وسط شفاف إلى آخر. ونتيجة اختلاف كثافة الأوساط التي يعبرها الشعاع الضوئي يؤدي ذلك إلى تغيير سرعة هذه الأشعة مما يسبب بدوره تغييراً في اتجاه حركتها.

وتعتمد درجة الانكسار على أمرين اثنين هما:

1. **التغير في سرعة الأشعة الضوئية** :كما أسلفنا في الفقرة السابقة، تتغير سرعة انتقال الأشعة الضوئية بحسب نوع الأسطح التي تمر خلالها.

2. **زاوية سقوط الأشعة على الأسطح** :ويعتبر هذا الأمر مهمًا للغاية لفهم آلية الانكسار، حيث تؤثر زاوية سقوط الأشعة بشكل كبير في درجة الانكسار التي تظهر لدينا. وكلما ازدت زاوية سقوط الضوء على السطح، كلما ازدادت زاوية الانكسار وبدا الجسم منكسرا بشكل أكبر. أما في حالورود الشعاع الضوئي بشكل ناظمي (عمودي) على السطح، عندها سيبطئ هذا الانتقال من سرعة الضوء إلا أنه لن يؤثر على اتجاه حركته ولن يسبب انكسارا ظاهراً. ومن الجدير بالذكر أن زاوية سقوط الأشعة الضوئية تقاس اعتمادًا على المستقيم الناظم على السطح.




الشكل(1-4) انكسار الضوء.

## 1-5 الطيف المرئي:

يعرف الطيف المرئي The visible spectrum باسم طيف الضوء الأبيض وهو جزء من الموجات الكهرومغناطيسية، والضوء الذي يحوي ألوان الطيف، وقد سُميّ بذلك نظراً لأنّ العين البشرية تتمكّن من رؤيته عن طريق الخلايا الموجودة فيها والتي تعمل كمستقبِلات لمجموعة من الأطوال الموجية المكونة للطيف المرئي، وتتكوّن منطقة الطيف المرئي من أطوال موجية مرئية؛ إذ إن الطول الموجِي يمثل المسافة بين قمتي موجتين متتاليتين، والتي تتراوح من الطول الموجي الأطول الذي يعادل تقريبًا 700 نانومتر ويُمثّل اللون الأحمر، ولغاية الطول الموجي الأقصر والذي يعادل تقريبًا 400 نانومتر ويُمثّل اللون البنفسجِي. كان لإسحاق نيوتن العديد من التجارب في مجال البصريات ومنها تجربته مع المنشور، حيث اكتشف ظهور الضوء في 7 ألوان على صورة قوس قزح، وذلك بسبب تشتت ضوء الشمس مِن خلال المنشور الزجاجي وانفصاله إلى أطوال موجية مختلفة، ويُعرف هذا النطاق مِن الألوان باسم (ROYGBIV) والذي يتكوّن من الحروف الأولى لكل ألوان الطيف باللغة الانجليزية كالآتي؛ اللون الأحمر(R) ، ثمّ اللون البرتقالي(O) ، ثمّ اللون الأصفر (Y)، ثمّ اللون الأخضَر(G) ، ثمّ اللون الأزرق(B) ، ويليه اللون النيلي(I) ، ثمّ اللون البنفسجي (V) ، كما يعد إسحاق نيوتن صاحب تجربة دائرة ألوان الطيف. ويجدر بالذكر أنّ سبب رؤية اللون الأبيض هو نتيجة لامتزاج لونين أو أكثر من ألوان الطيف المرئي المعروف بمزيج(ROYGBIV) ؛ وذلك لعدم امتلاكه لطول موجي مميز، أما في حال عدم وجود موجات الطيف المرئي فإن العين المجردة ترى اللون الأسود حينها؛ وهذا ما يُفسر ظهور الغرفة معتمة عندما تكون الأضواء مغلقة.

# الفصل الثاني:

# القضايا الأساسية المتعلقة بأنظمة الاتصالات البصرية

# الفصل الثاني
# مقدمة عامة

## 2-1 مقدمة عامة:

تعتبر الألياف الضوئية من أكثر الأوساط تقدماً والوحيدة القادرة على مواكبة خدمات أجيال الاتصالات الحديثة. ويقصد باتصالات الألياف الضوئية جميع التقنيات المتعلقة بإرسال المعطيات كنبضات ضوئية عبر الزجاج أو الأسلاك البلاستيكية أو الألياف. وتتميز الألياف الضوئية بسعتها الكبيرة مقارنة بالأسلاك النحاسية التقليدية بالإضافة لكونها لا تتأثر بإشارات التداخل الكهرطيسي مما يعني عدم الحاجة لإعادة إرسال الإشارات ،كما أنها أخف وزناً وأصغر حجماً من الكابلات النحاسية وتنقل الإشارات الرقمية والتماثلية.

وبالإضافة لأهمية الألياف وتطبيقاتها تعد الشبكات الضوئية من التقنيات المفضلة فالشبكات الضوئية تخفض تكلفة استثمار الشبكة وتقلل من استهلاك الطاقة وتؤدي لنقاط فشل أقل في الشبكة. وقد تزايد الاهتمام في الآونة الأخيرة من قبل مزودات الخدمة لتحسين وتطوير شبكاتهم وذلك نتيجة الطلب الكبير على عرض المجال الترددي مثل تطبيقات بث إشارة الفيديو عالية الدقة ولجعل هذا الأمر قابل للتحقيق يجب أن يكون هناك فعالية كبيرة بين التكلفة الكلية للبنية التحتية للشبكة والخدمات التي ممكن تقديمها للمستخدمين.

## 2-2 أ همية المشروع:

هناك زيادة كبيرة في الطلب على عرض المجال من قبل المشتركين في كل عام مما يدفع شركات الاتصالات لزيادة سعة شبكاتها بشكل مستمر من أجل مواكبة تلك الزيادة. في هذا المشروع نسعى لتصميم شبكة ضوئية غير فعالة ذات التقسيم بتجميع طول الموجة والزمن عالية الأداء ومتوافقة مع متطلبات الشبكات الضوئية بحيث تقدم معدل نقل بيانات يصل إلى 40Gbps ولمسافة نقل لا تقل عن 40km .

## 2-3 أهداف المشروع:

- مقارنة التقنيّات المستخدمة للجيل القادم للشبكات الضوئية غير الفعّالة.
- تحسين أداء الشبكات الضوئية غير الفعّالة باستخدام تقنيّة التجميع بتقسيم طول الموجة والزمن TWDM-PON.
- تصميم شبكة TWDM-PON تحقّق المواصفات المعياريّة.
- تصميم بنية تحتيّة لشبكات الاتصالات الخلوية باستخدام TWDM-PON.

## 2-4 بيئة العمل البرمجية المستخدمة:

Optisystem هو برنامج قوي لتصميم واختبار ومحاكاة شبكات الألياف البصرية. بتعبير أدق، يعد هذا البرنامج أداة شاملة لتصميم ومحاكاة طبقة الإرسال لشبكات الألياف البصرية الحديثة. في أنظمة الاتصالات، تواجه شبكات الألياف البصرية العديد من التحديات والتفاصيل، ويؤثر عدم الالتزام بها بشكل كبير على جودة اتصالات الخطوط. من ناحية أخرى، تتطلب التجربة المادية والخطأ الكثير من التكاليف ومن المستحيل بطبيعة الحال تعويض الأضرار المالية في معظم الحالات، لذلك قبل التنفيذ الفعلي لهذه الشبكات، يتم استخدام برامج التحليلات والمحاكاة لتقليل هذه الأخطاء.

optisystem هو برنامج جديد نسبيًا في هذا المجال وله ميزات جيدة لهذا العمل. مع واجهة مستخدم بسيطة للغاية، يوفر هذا البرنامج للمستخدم إمكانية استخدام جميع أنواع التوصيلات الضوئية وجميع أنواع الكابلات والعناصر التي تتطلبها هذه الشبكات، والتي يمكن أن تتراوح من مشروع مشغل تناظري صغير إلى بنية تحتية اتصالات ضخمة. تستخدم على المستويين الوطني وعبر القارات ومحاكاة وتحسين الشبكة بدقة. تسمح لك الواجهة الرسومية لهذا البرنامج بترتيب جميع العناصر والاتصالات بشكل مرئي ورؤية تأثير التغييرات المطبقة على الفور من خلال تغيير المواصفات والتكوينات الجديدة. سيؤدي استخدام هذا البرنامج بالتأكيد إلى تقليل التكاليف ومنع العديد من الخسائر المحتملة بسبب التنفيذ المادي غير السليم.

## 2-5 أنظمة الاتصالات البصرية:

تزايد الاهتمام في الآونة الأخيرة من قبل مزودات الخدمة لتحسين وتطوير شبكاتهم وذلك نتيجة الطلب الكبير على التطبيقات عريضة المجال مثل تطبيقات بث إشارات الفيديو عالية الدقة. وبالتالي ترغب مزودات الخدمة بتزويد المستخدمين بخدمات الحزمة العريضة حيث تتمتع أنظمة الألياف البصرية بالعديد من المزايا التي تجعلها مفضلة أكثر من أنظمة الاتصالات السلكية التقليدية، ومن أهم هذه المزايا:

- سهولة التصنيع والتركيب وذلك كونها أخف وزناً وأصغر حجماً من الأسلاك النحاسية من حيث نصف قطر الكابل. كما أن تكاليف تصنيع الألياف الضوئية منخفضة أكثر من تكاليف تصنيع الأسلاك النحاسية .
- استهلاك طاقة منخفضة مقارنة بالأسلاك النحاسية وذلك يجعلها مقاومة للعديد من الأخطار المتعلقة بالتيار الكهربائي المنتشر في الأسلاك النحاسية .
- مناسبة لنقل المعطيات الرقمية والتماثلية .

- عرض حزمة مرتفع مما يعني إمكانية نقل بيانات كبيرة بواسطة ليف ضوئي واحد .
- معزولة كهربائياً وذات مناعة ضد التداخلات حيث نلاحظ أحياناً عند إجراء مكالمات هاتفية سماع أصوات محادثات هاتفية أخرى وهو ما يطلق عليه باختلاط الكلام (crosstalk) وهذا النوع من التداخلات لا يحدث عند استخدام الألياف الضوئية مهما قربت المسافة .
- سرعة عالية في النقل لكون الوسط الناقل للمعلومات هو الضوء ولا يولد هذا الضوء أي مجال مغناطيسي خارج الألياف وبالتالي من الصعب التجسس على المعلومات التي يحتويها الكبل البصري.
- ضياعات الإرسال صغيرة تصل إلى أقل من 0.15dB/km.
- لا تتأثر بالحقل الكهرومغناطيسي لكونها مصنعة من مواد عازلة لا تتأثر بحقول المصادر الكهرومغناطيسية الصناعية كالمحركات والأجهزة الكهربائية المختلفة أو المصادر الطبيعية كالبرق.
- عالية الموثوقية حيث أن الإشارة ضمن الألياف الضوئية تستطيع الوصول لمسافات بعيدة جداً قبل أن تتخامد أو تحتاج لإعادة توليدها حيث يتم وضع مكررات على مسافة 100 km بين كل مكرر وأخر وهذا يقلل من عدد المكررات وبالتالي من صيانة النظام .
- عمر تشغيل الألياف الضوئية في حدود 25 عام مقارنة بـ 15 عاماً للأنظمة الأخرى.
- لا تصدأ ولا تتآكل لكونها مصنّعة بشكل أساسي من الزجاج والبلاستيك.

## 2-6 تطور أنظمة الاتصالات الضوئية:

تعد الاتصالات الضوئية امتداداً طبيعياً للاتصالات الميكروية نظراً لأن كلاً منهما ينقل المعلومات باستخدام الأمواج الكهرطيسية ويكمن الفارق الأساسي بينهما بتردد الموجة الحاملة، حيث إنها في النظم الميكروية من مرتبة الغيغا هرتز أما في النظم الضوئية التيرا هرتز وهذا من شأنه نقل المعلومات بسعة كبيرة.

حتى منتصف الثمانينات كانت معظم شبكات الاتصال في العالم تعمل إما باستخدام الكابلات المحورية وإما بالأقمار الصناعية وكانت السعة القصوى للاتصال بهذه الكابلات 560Mbps ولكن عملياً كان معدل النقل هو 140Mbps أما في الفضاء الحر فكان من الممكن نقل ثماني قنوات اتصال بمعدل قدره 140Mbps لكل منها .

أما الاتصالات بين القارات كانت مقسمة بين استخدام السواتل والكابلات المحورية عبر البحار والمحيطات ولزيادة معدل البتات كان لابد من استخدام تردد موجي أعلى ولذلك وقع الخيار على الترددات الضوئية بعد توفر المرسلات و المستقبلات الضوئية المناسبة كالثنائيات الضوئية LED و الليزرات المضيئة Laser والكواشف الضوئية photodiode الحساسة للضوء .

مرت الألياف البصرية خلال تطورها بأجيال عديدة يمكن تقسيمها لخمسة أجيال وهي:

- الجيل الأول: وصمم هذا الجيل ليقوم بنقل معلومات معدلة بمعدل يتراوح بين 2Mbps و140Mbps.

وكانت تعمل في أطوال موجية تتراوح بين 810–900 nm والموافقة للنافذة الأولى لمنحني التخامد للألياف الضوئية. حقق هذا الجيل معدل نقل للبت مقداره 45Mbps لمسافة 10km من دون مكررات الكترونية ويعود السبب في عدم تجاوز هذا المعدل إلى التشتت النمطي للألياف الضوئية المتعددة الأنماط. ولتحسين أداء هذا الجيل جرى العمل على محورين، فمن الجهة الأولى جرى تطوير المرسلات الليزرية نصف الناقلة لتعمل ضمن النافذة الثانية لتمرير الألياف الضوئية بطول موجي 1300nm حيث قيمة التخامد أقل وذات عرض طيفي ضيق 10nm للحد من التشتت اللوني للألياف ومن جهة ثانية جرى تطوير ألياف ضوئية وحيدة النمط SMF للتخلص من التشتت .

- الجيل الثاني: وفي هذا الجيل تم تطوير المنابع والكواشف الضوئية لتعمل عند الطول الموجي 1300nm بمعدل فقد 1dB/km حيث استطاعت أنظمة الجيل الثاني العمل بمعدل 1.7Gbps لمسافة 50km وأصبح المعدل محدوداً بتخامد الليف.
- الجيل الثالث: يستخدم مرسلات ليزرية بطول موجة 1550nm يقع في النافذة الثالثة حيث الضياع في حده الأدنى 0.2Db/km ووصل معدل الإرسال في هذا الجيل لقيمة 10Gbps لمسافة نقل100km محدداً بالتشتت اللوني، واستخدم هذا الجيل الألياف الضوئية أحادية النمط مما يقلل التشتت وبالتالي الحصول على سعات نقل كبيرة.
- الجيل الرابع: بدأت مرحلة الجيل الرابع عندما بدأ تجميع قنوات الاتصال بإرسال كل قناة بطول موجي مختلف بطريقة مشابهة لطريقة التجميع بتقسيم التردد FDM المستخدمة في أنظمة الاتصالات التقليدية. ولذلك سمُّيت بتقسيم طول الموجة وما يزال هذا الجيل هو الأساس لنظم الاتصالات بالألياف الضوئية .
- الجيل الخامس: تم الاستفادة في هذا الجيل من التطور التقني للعناصر الضوئية حيث أصبح بالإمكان الحصول على مستقبلات بحساسية عالية وسرعات كبيرة تصل حتى 80Gbps.

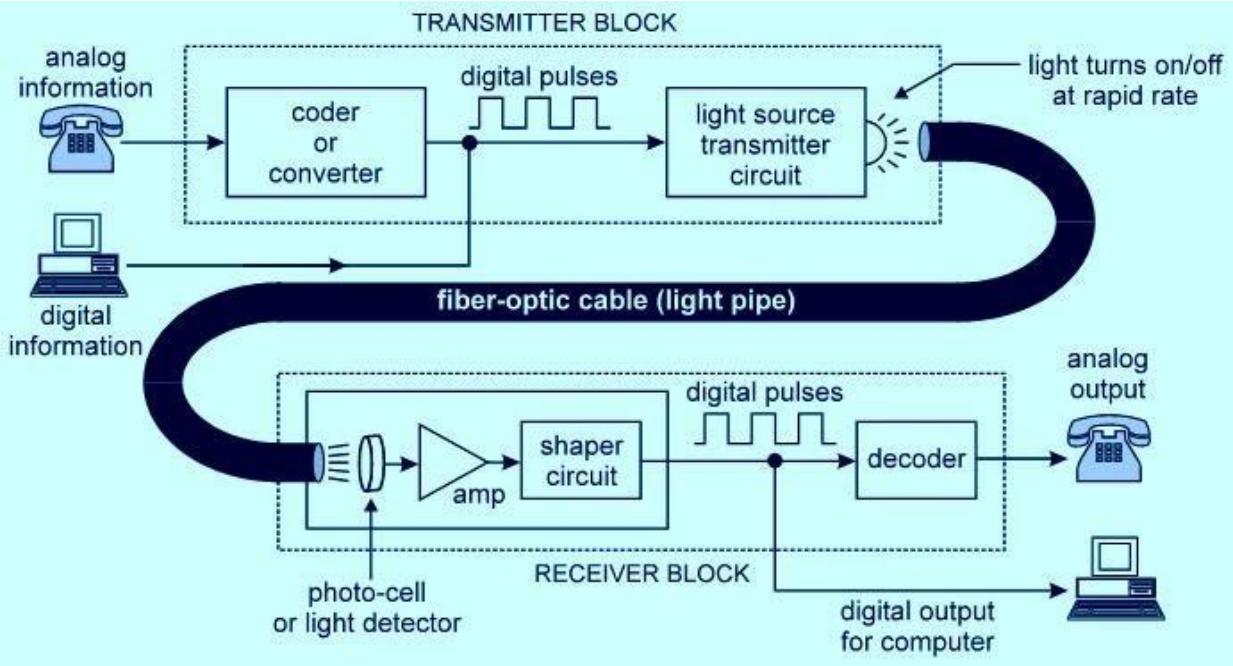
وبشكل عام يمكن تصنيف شبكات الألياف الضوئية بحسب المساحات التي تغطيها إلى:

- شبكات شاملة Global Network: وتغطي مساحات ذات أبعاد أكبر من 100km وتصل إلى 1000km بسعة اتصال تقدر بـ 1Tbps.
- شبكات واسعة WAN لمناطق بأبعاد أقل من 100km وبمعدل بتات أقل من 1Tbps.
- شبكات حضرية MAN لمناطق بأبعاد أقل من 20KM وبمعدل بتات أقل من 10Gbps.
- شبكات محلية LAN لمناطق بأبعاد أقل من 1km وبمعدل بتات أقل من 100Mbps.

## 2-7 بنية نظام الاتصالات البصري:

يبين الشكل(2-1) المكونات الأساسية لمنظومة الاتصالات البصرية، فمن جهة الإرسال هنا كمصدر معلومات قد يكون قناة صوتية أو قناة فيديو أو أي معطيات رقمية أخرى تحوّل هذه المعلومات فيما بعد لإشارات ضوئية من خلال تعديل مرسل ضوئي(ديود ضوئي – ديود ليزري) ومن ثم تحقن

هذه الأشعة في الليف البصري وفي طرف الاستقبال تعالج هذه الإشارة الضوئية بالترشيح والتكبير الضوئي وتحول لإشارة الكترونية بهدف استرداد المعلومات المرسلة .

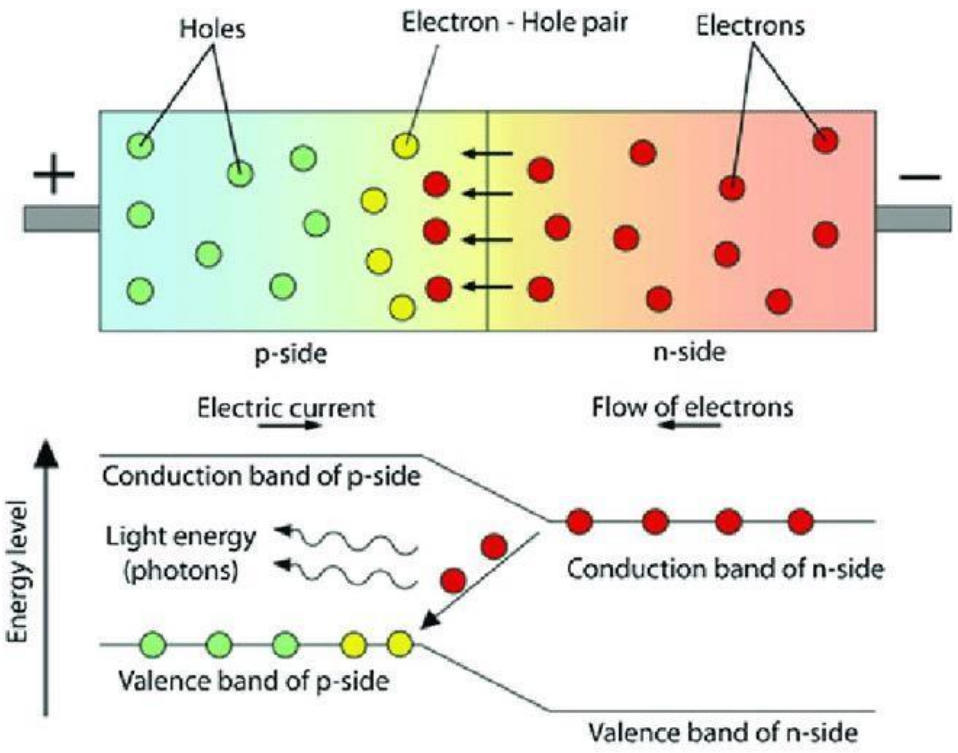



الشكل( 2–1) المخطط الصندوقي العام لبنية نظام الاتصالات البصري.

يتكون المرسل من جزأين أساسين هما: المنبع الضوئي والمعدل الضوئي. يتولى المنبع الضوئي تأمين الإشارة الضوئية الحاملة للمعلومات، حيث يقوم بتحويل الطقة الكهربائية إلى إشارة ضوئية بتردد معين واستطاعة كافية. وتنقسم المنابع الضوئية في أنظمة الاتصالات البصرية إلى نوعين هما الثنائيات المشعة للضوء LED والليزر LASER.

أما الليد فهو عبارة عن وصلة ثنائية نصف ناقلة تكون من مادتي أنصاف النواقل إحداهما من النوع n–type والأخرى من النوع p–type حيث تقوم الذرات في هذه الوصلة بالتلقائي للضوء عند كل اتحاد زوج الكترون–ثقب نتيجة تطبيق جهد انحياز أمامي على طرفي الوصلة الثنائية.

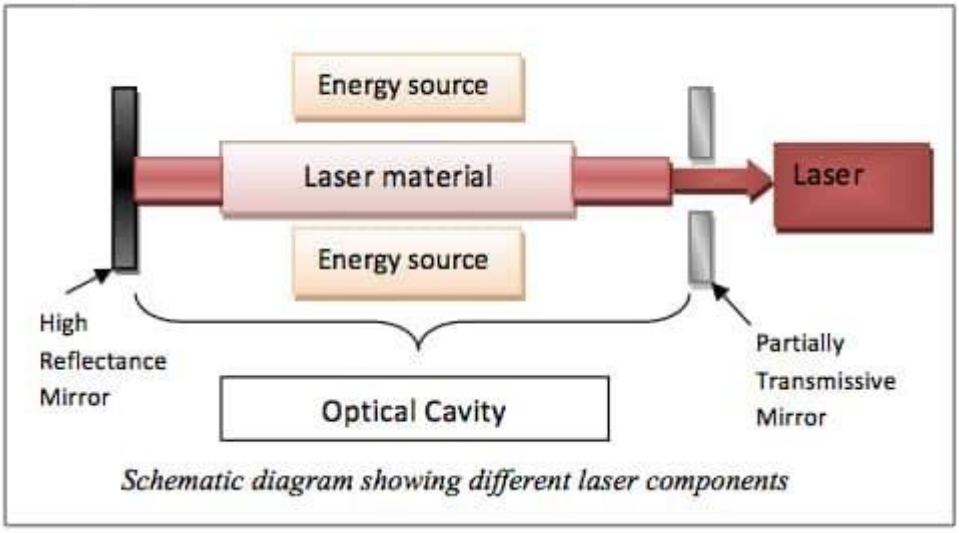
وتكون الفوتونات مستقلة عن بعضها البعض ويكون اتجاه الإصدار التلقائي للضوء عشوائياً.




الشكل(2–2) آلية عمل الثنائيات المشعة للضوء – المرسلات الضوئية .

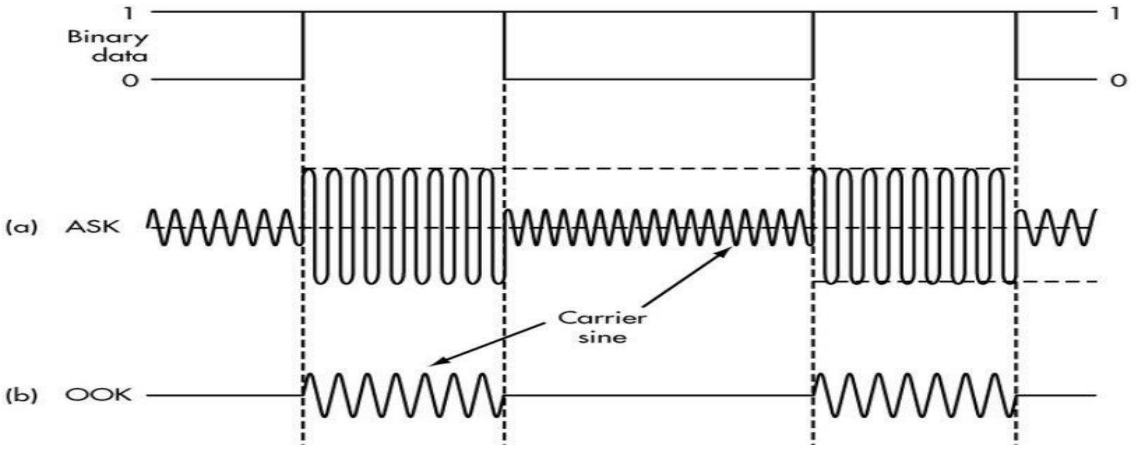
من أحد مساوئ الحزمة الضوئية الناتجة عن الثنائيات المشعة للضوء أنها تتسع بشكل سريع مما يؤدي لضياعات كبيرة عند دخولها ضمن الألياف البصرية ولذلك يتم استخدام عناصر إضافية لتجميع الحزمة الضوئية المشتتة بحيث تدخل بكاملها لليف. أما السيئة الأخرى هي أن عرض الطيف يكون كبير نسبياً. أما الليزر فهو التضخيم للضوء بالإصدار المحثوث للأشعة ويحدث ذلك عند مرور فوتون ضوئي بتواتر معين بجانب ذرة مثارة والتي تقوم بدورها بإصدار فوتون جديد له نفس خواص الفوتون المحرّض.

يبين الشكل ( 2–3) البنية الأساسية لليزر والتي تتكون من حجرة تضخيم مكونة من مرآتين على الأطراف وعدد من الذرات بينهما بحيث يكون عدد الذرات المثارة أكبر من الذرات غير المثارة لضمان الزيادة في شدة الحزمة الضوئية بعد عبورها حجرة التضخيم تسمح المرايا للحزمة الضوئية بالانعكاس من جديد للداخل وبالتالي إصدار فوتونات جديدة وتكون عاكسيه إحدى المرآتين كاملة بينما الثانية جزئية مما يسمح بتمرير جزء من الحزمة للوسط الخارجي وتشكيل حزمة ليزرية. وبما أن إصدار الفوتونات يعيد الذرات للسوية الأساسية فإنه يجب تقديم الطاقة إلى الذرات من أجل إثارتها مجدداً واستمرار عملية توليد الحزم الليزرية. وتتميز حزمة الليزر بكون طيفها ضيق لأن تواتر الفوتونات الناتجة متساوي كما أنها مترابطة وانفراج الحزمة الليزرية صغير على عكس الثنائيات المشعة عند الابتعاد عن منبع الليزر.




الشكل(2–3) البنية الأساسية لمرسل الليزر الضوئي .

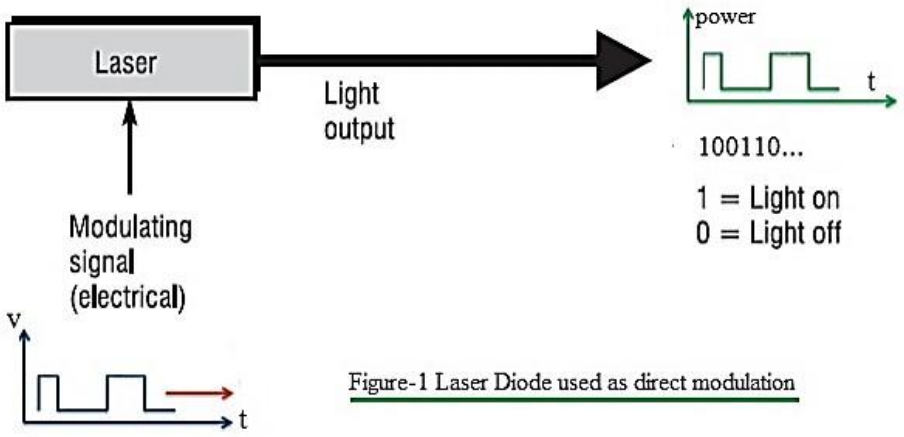
في حين أن الهدف من المعدل الضوئي هو تغيير إحدى خواص الإشارة الضوئية (مطال –تردد–طور) بما يتناسب مع سلسلة البتات المبعثرة عن المعطيات المراد إرسالها وبالتالي تتحول الإشارة من شكلها الكهربائي لشكلها الضوئي. ومن أشهر وأبسط أنواع التعديل هو التعديل( ook) وهو تعديل مطالي يجعل المنبع الضوئي في حالة عمل عند ورود البت 1 ويحجب الضوء عند ورود البت 0 وبالتالي ينتج عن المرسل نبضات ضوئية موافقة لإشارة المعلومات الكهربائية كما يبين الشكل( 2–4).




الشكل(2–4) التعديل المطالي في أنظمة الاتصالات البصرية .

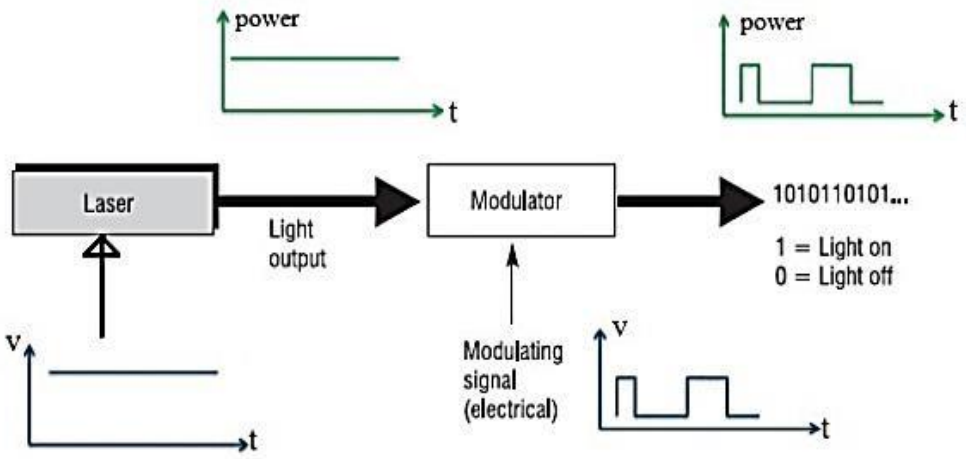
هناك طريقتان أساسيتان للتعديل هما التعديل المباشر ويستخدم مع الثنائيات المشعة بسبب انخفاض زمن بقاء الذرات في السوية المثارة مقارنة مع الليزر وفي هذه الطريقة تتحكم سلسلة المعطيات مباشرة بالمنبع الضوئي، وعند استخدام التعديل المباشر مع الليزارت فإن النبضات الناتجة عن التعديل تعاني من تغير التردد الحامل مع الزمن والتي تؤدي لاتساع غير مرغوب في طيف الإشارة وللتخلص من هذه الظاهرة يتم زيادة

طاقة الليزر عند ورود البت 0 مما ينتج عنه انخفاض في أداء النظام ولذلك تستخدم طريقة التعديل المباشرفي أنظمة الاتصال ذات السرعات المنخفضة نسبياً.




الشكل(2-5) التعديل المباشر في أنظمة الاتصالات البصرية .

أما التعديل الخارجي يتم بواسطة معدلات خارجية تختلف بحسب المادة المستخدمة في تصنيعها، معدل LiNbo3 أو معدل نصف ناقل وفي كلا المعدلين يوجد نموذجين الأول يحتوي على وصلة واحدة يتم من خلالها الربط بين سلسلة المعطيات و الإشارة الضوئية وعندها يدعى المعدل Coupler والنموذج الثاني يتألف من وصلتين وعندها يدعى ماك زيندر MZ والذي يستخدم بشكل أكبر لعة أسباب أهمها أن معدل الاخماد ذو قيمة مرتفعة تتراوح بين 15-20 dB. حيث يعرف معدل الاخماد بأنه نسبة الطاقة المرسلة عند إرسال البت 1 إلى الطاقة المرسلة عند إرسال البت 0. والسبب الثاني الذي يجعل من المعدل MZ مفضلاً بشكل أكبر هو ان فرق الطور بين طرفي MZ يكون صفراً عند عدم تطبيق جهد على الوصلة أي أن موجتي الدخل والخرج تتداخلان تداخلاً بناء وعند تطبيق جهد معين على الوصلة يصبح فرق الطور بين الدخل والخرج 180 درجة أي تتداخل الموجتان تداخلاً هداماً ولا تظهر إشارة على الخرج.




الشكل(2-6) التعديل الخارجي في أنظمة الاتصالات البصرية – معدل ماك زيندر.

## 2-8 التعديل الرقمي في الاتصالات البصرية:

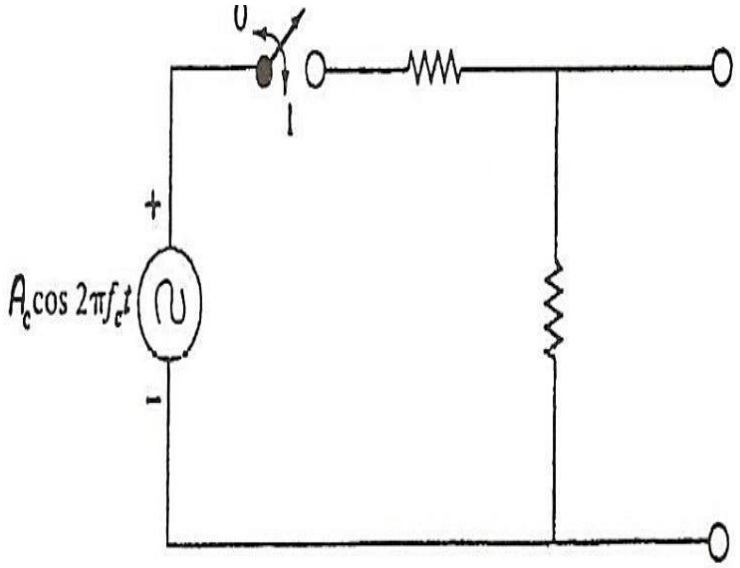
في نماذج التعديل الرقمي تكون إشارة المعلومات (ذات الترددات المنخفضة) عبارة عن سلسلة من الواحدات والأصفار وتكون الموجة الحاملة عبارة عن إشارة جيبية (ذات تردد عالي)، تتغير أحد بارامترات إشارة المعلومات، وللتعديل الرقمي مميزات يتفوق بها على التعديل التماثلي نلخصها بالنقاط التالية:

- إمكانية التحكم بالخطأ (كشفه وتصحيحه).
- ممانعة أكبر ضد الضجيج .
- زيادة سعة النظام (زيادة عدد المشتركين بالنظام).
- استهلاك طاقة أقل والتكلفة المنخفضة .
- بساطة التصميم.

وفيما يلي نسرد أهم تقنيات التعديل الرقمي المستخدمة وأشهرها:

- الابدال بالفصل والوصل: On-Off Keying (OOK)

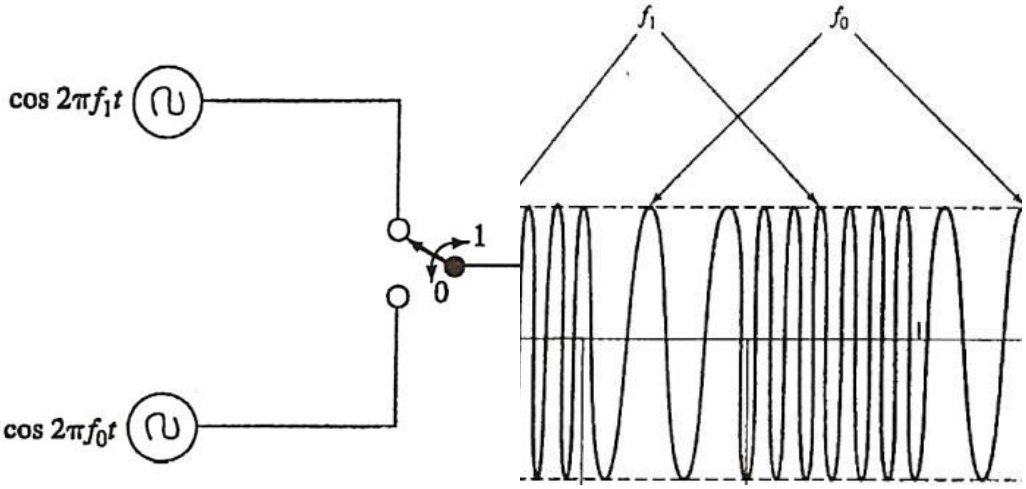
يعد هذا النوع من أنواع التعديل الأكثر استخداماً بأنظمة الاتصال عبر الهواء. بسبب بساطته ومرونته عند لا خطية الليزر. يمكن أن تستخدم OOK إما أشكال نبضات لا ترجع إلى الصفر( NRZ) أو الرجوع إلى الصفر (RZ) في NRZ-OOK قمة طاقة النبضة الضوئية يتم تمريرها رقمياً بالرمز" 1" ويتم تمرير القيم الأدنى بالرمز" 0" وعرض النبضة الضوئية يساوي زمن الرمز(البت) من جهة المستقبل يعتمد قرارا" 0" أو "1" على طاقة الرمز المستقبل ويتم مقارنته مع عتبة، ويتم اتخاذ القرار على أساس طاقة الرمز أعلى أو أخفض من قيمة العتبة. [9]




الشكل(2-7) نموذج لتنفيذ دارة OOK.

- الابدال بإزاحة التردد FSK:

تعتمد هذه الطريقة على التعديل الترددي بإشارة رقمية حيث أنه يتم تمثيل الواحد بتردد معين f1 والصفر بتردد آخر f2 مع ثبات المطال والطور، وهذه الطريقة مستخدمة بكثرة لأن هذا النوع أقل حساسية لأخطاء الإرسال من التداخلات والضجيج والتشتت للإشارة .



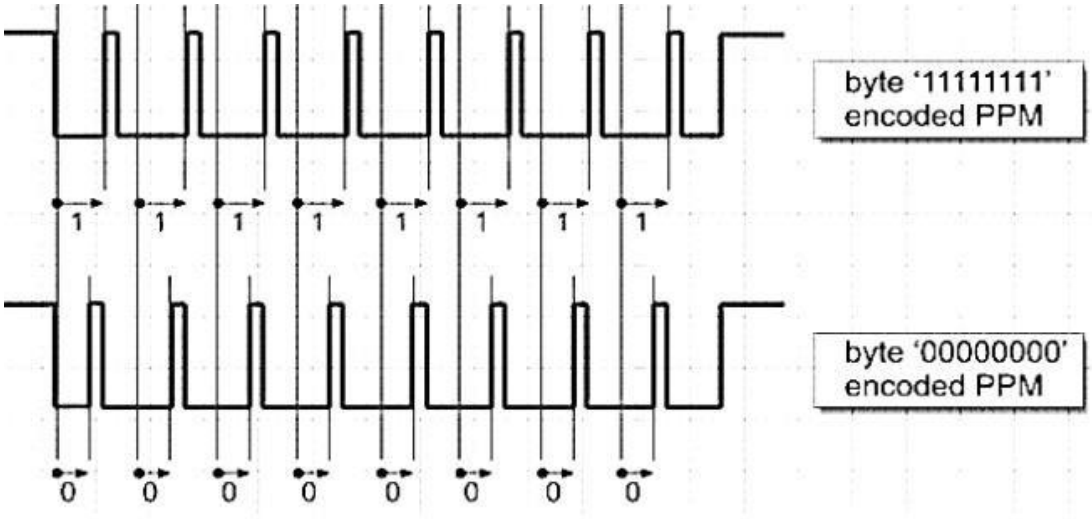

الشكل (2-8) دارة تنفيذ التعديل الترددي .

- تعديل مكان النبضة PPM:

نوع آخر من أنواع التعديل المستخدم هو PPM، هذا التعديل مناسب تماماً للكشف المباشر عن الإشارة الضوئية المرسلة. يقدم تعديل PPM ميزة كبيرة في التخلص من تبعيات عتبة القرار على طاقة الإدخال . القيد الرئيسي هو أنه يتطلب نطاق ترددي أكبر من المطلوب في حالة تعديل OOK، وبهذا التعديل يتم ترميز M bit ضمن نبضة مرسلة واحدة .

تحتاج PPM إلى تصميمات معقدة للمستقبل والمرسل بسبب المزامنة العالية اللازمة بينهما. إذا واصلنا زيادة M ، فإن الفواصل الزمنية التي ترد فيها النبضات الضوئية تقل. هذا يميل إلى زيادة المعلومات المرسلة لكل إشارة. وبالتالي كفاءة نقل أعلى، ولكن أيضاً يزيد من عرض النطاق الترددي المطلوب ب M / log2M مرة،والذي بدوره يقلل من كفاءة استخدام الحزمة.[3]

ببساطة يقوم هذا النوع من التعديل بإزاحة النبضة عن موقعها بحسب ارتفاع الإشارة أو قيمتها فعندما تكون الإشارة بأعلى قيمة لها أو لها القيمة 1 يكون انزياح النبضة عن موقعها كبيراً وعندما تكون بأصغر قيمة لها أو لها القيمة 0 يكون انزياح النبضة على فترة زمنية أقل.



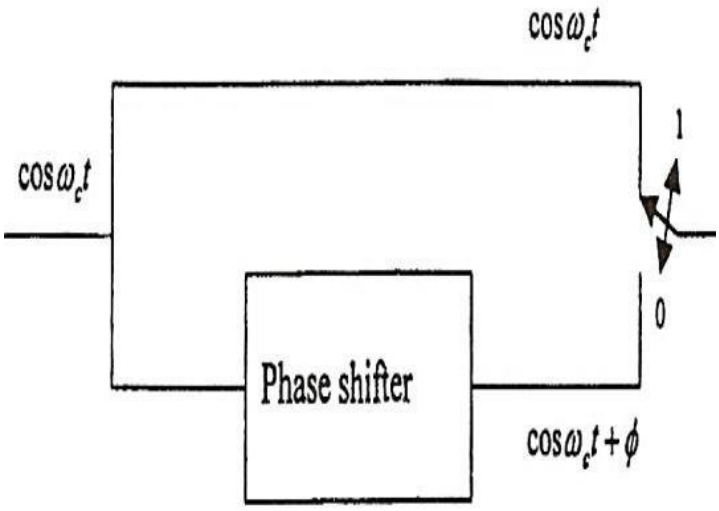

الشكل (2-9) إشارة PPM لإشارة رقمية واحدات وأصفار .

هذه التقنية تعتبر أفضل من تقنية OOK عند النقل لمسافات طويلة لأنها توفر في طاقة الإرسال المستمدة من البطاريات كما هو معروف بأنظمة الاتصالات البصرية تحت الماء .

• التعديل بإزاحة الطور PSK :

تعتمد هذه الطريقة على التعديل الطوري بإشارة رقمية فيتم تغيير الطور بمقدار 180 درجة عند كل تغيير في المعلومات بين 1,0 أو بالعكس مع تثبيت قيمتي المطال والتردد، ويمتاز هذا النوع من التعديلات بامتلاكه ممانعة أكبر ضد الضجيج مقارنة مع التعديل الرقمي بإزاحة التردد والمطال .

إلّا أن سيئة التعديل الرقمي بإزاحة الطور PSK أنه أكثر تعقيداً في كشف الإشارة مقارنة مع التعديل الرقمي بإزاحة المطال والتردد .



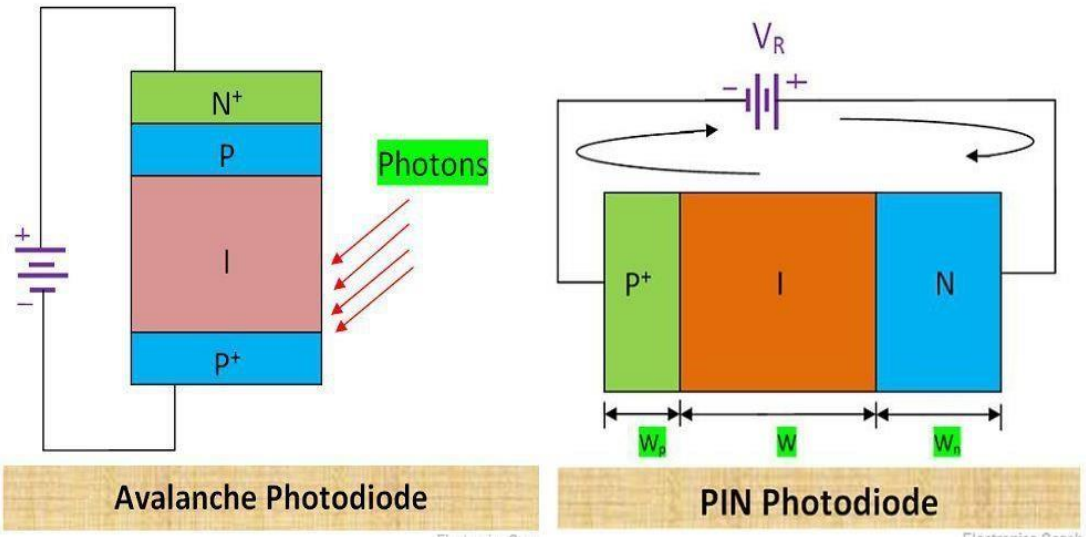

الشكل(2-10) دارة تنفيذ الإبدال بتعديل الطور .

بالانتقال لطرف الاستقبال نجد أن الكاشف الضوئي في تحويل الإشارة الضوئية المسلطة عليه لإشارة كهربائية حيث يمكن استخلاص المعلومات المرسلة منها باستخدام الدارات الالكترونية. تعتمد الكواشف في عملها على ظاهرة امتصاص أنصاف النواقل للفوتونات، مما يؤدي لتوليد حوامل شحنات حرة تسبب مرور تيار كهربائي وتدعى بظاهرة أثر المفعول الكهروضوئي. ومن أهم الخصائص التي يتم النظر إليها عند دارسة الكاشف الضوئي هي:

- نسبة تيار خرج الكاشف إلى استطاعة الضوء الداخلة وتقاس بواحدة A/W .
- تيار التسرب من الثنائي الضوئي الناتج عن حوامل الشحنة المتولدة بالتأثير الحراري.
- سرعة النقل العظمى الممكنة لكاشف ضوئي معين وبعبارة أخرى سرعة تغير الخرج مع تغير الدخل أي سرعة تغير تيار الخرج مع تغير الطاقة الضوئية الواردة للكاشف .

من أهم الكواشف المستخدمة حالياً في أجهزة استقبال نظم الاتصالات الضوئية هو الثنائي الضوئي PIN والثنائي الضوئي الجرفي APD حيث تميز هذه الكواشف بصغر حجمها وحساسيتها واستجابتها السريعة وضجيجها المنخفض .

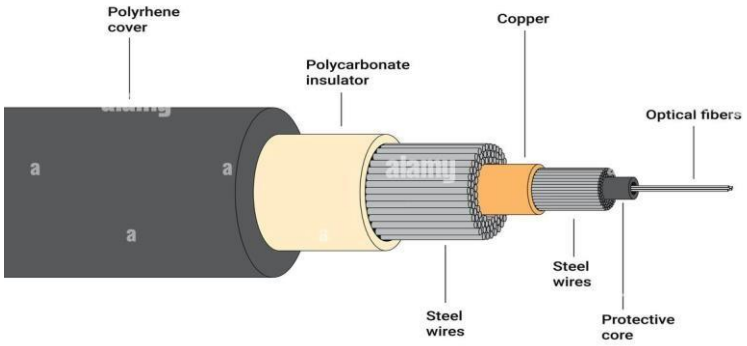
ويتفوق الكاشف الضوئي PIN على نظيره الجرفي بأنه أرخص وأقل حساسية لتغيرات درجة الحرارة ويتطلب جهد انحياز عكسي أقل وكما أن سرعة الاستجابة متقاربة بينهما ولذلك يفضل استخدام PIN في أغلب التطبيقات .




الشكل(2-11) المستقبلات البصرية .

يعد الليف الضوئي كبل ضوئي موجه يصنع عادة من الزجاج أو البلاستيك حيث ينقل الإشارات الكهربائية على شكل نبضات ضوئية بين المرسل والمستقبل ويستخدم مبدأ الانعكاس الداخلي لنقل الإشارة وتوجيه الضوء عبر الليف، وكما يوفر هذا النوع سرعات تصل لعدة غيغابت وأكثر ولا تتأثر بالتداخلات الكهرطيسية. تتكون البنية الأساسية لهذا الليف من طبقتين أساسيتين هما:

- طبقة القلب: تمثل مركز الليف مصنوعة من الزجاج أو البلاستيك ينتشر فيها الضوء .
- طبقة اللحاء العاكسة: طبقة تحيط بالقلب الزجاجي لها معامل انكسار n2 أصغر من معامل انكسار القلب n1 وهو الشرط المطلوب لحصول عملية انعكاس داخلي كلي ويعتبر هذا الشرط أساس توجيه الضوء في الألياف الضوئية إذ ينعكس الضوء كلياً لداخل القلب الزجاجي حتى يصل لنهاية الليف.
- طبقة الغلاف الواقي: تحيط بالطبقتين السابقتين من أجل الحماية من التلف والكسر، وعزل الأجزاء الداخلية لليف بغرض حمايتها .




الشكل(2-12) بنية الألياف البصرية .

وتصنّف الألياف الضوئية وفقاً لمعيارين هما نمط الانتشار وطريقة تغير قرينة الانكسار بين القلب والغلاف في الليف الضوئي.

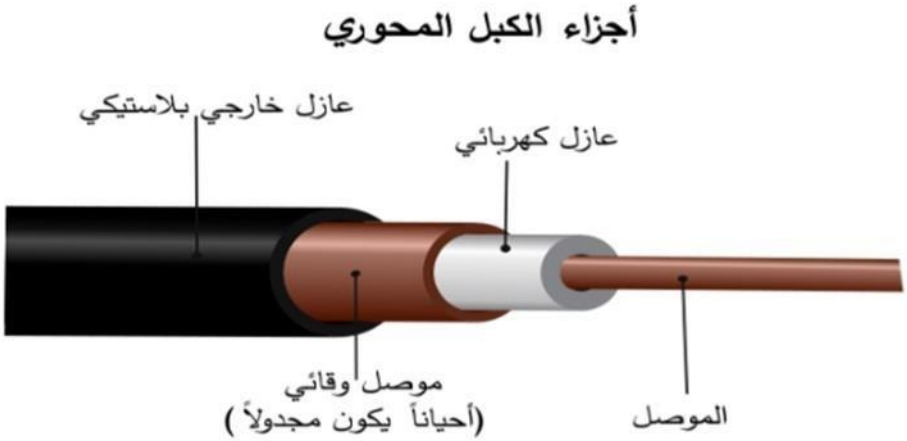
وبناءً على ذلك يمكن تصنيف الألياف الضوئية لعدة أصناف:

- ألياف وحيدة النمط SMF: ينتشر الضوء في هذا النوع وفق مسار وحيد وتتميز هذه الألياف بسعتها الكبيرة واستخدامها للمسافات الطويلة والتي قد تصل إلى 10km، ويصل نصف قطر القلب فيها إلى حوالي 9um ويبلغ قطر الغلاف أضعاف قطر القلب وتنتشر فيه الإشارة الضوئية وفق مسار وحيد .

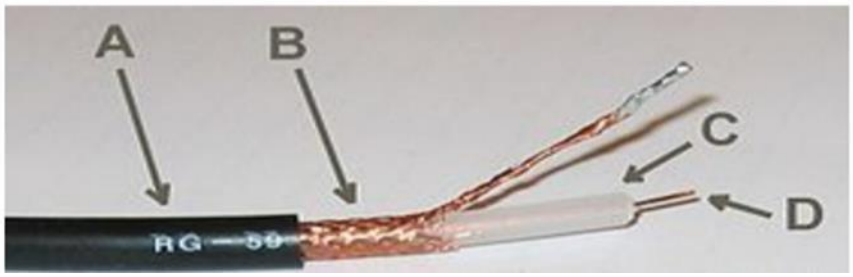
- ألياف متعددة الأنماط بمعامل انكسار درجي MMF: ينتشر الضوء في هذا النوع وفق عدد من المسارات المختلفة وفي هذا النوع يبقى معامل الانكسار القلب ثابت وكذلك الحال بالنسبة لمعامل انكسار الغلاف بينما يحدث تغير مفاجئ عند السطح الفاصل بين القلب والغلاف. وتتميز هذه الألياف بكبر قطر القلب وكبر فتحة النفوذية العددية والتي تمكن من دخول كمية كبيرة من الضوء لليف الضوئي وتستخدم للنقل لمسافات قصيرة وبسعات محدودة بتكلفة منخفضة.
- ألياف متعددة الأنماط بمعامل انكسار متدرج MMF: معامل انعكاس هذه الألياف متدرج إذ تبلغ أعلى قيمة له في مركز الليف وتنخفض قيمة معامل الانعكاس تدريجياً كلما اتجهنا نحو الغلاف حيث تكون قيمة معامل الانكسار ثابتة وتتفوق هذه الألياف على ذات معامل الانكسار الدرجي نظراً لقلة التخميد فيها فضلاً عن كون قطرها أصغر تستخدم لنقل المعلومات لمسافات متوسطة وبسعة مقبولة.

## 2-9 مقارنة بين الألياف البصرية والكابلات المحورية:

تعتبر الكابلات النحاسية وسائط نقل مكونة من عدة طبقات متحدة المحور بقطر 5-15 mm تنقل الإشارات الكهربائية الراديوية RF وهي مكونة من موصل عادة النحاس في المركز تنتقل من خلاله الإشارات المرسلة يحيطه مادة عازلة تفصله عن الموصل الثاني ، ويتم تغليف الغمد بموصل آخر خارجي من رقائق معدنية مجدولة تعمل كدرع ضد الضجيج وتكمل الدارة باعتبارها الموصل الثاني ويتم تغليف الموصل الثاني بعازل آخر ومن ثم غطاء بلاستيكي لحماية الكبل بالكامل. يستخدم هذا النوع من الكابلات لإرسال بيانات بسرعة عالية تصل إلى رتبة الميغابت على مسافات كبيرة وواسعة لعدة كيلومترات. ويستخدم في عمليات نقل البث التلفزيوني وشبكات الراديو السلكية والراديوية وشركات الهاتف وموفرو الانترنت لنقل البيانات والفيديو والاتصالات الصوتية .




نموذج كبل محوري.




الشكل(2-13) بنية الكابلات المحورية – الكابلات النحاسية .

هناك نوعان رئيسيان من الكابلات المحورية أحدهما بمقاومة( 50 أوم) تستخدم لنقل البيانات والاتصالات الراديوية والأخرى بمقاومة( 75 أوم) تستخدم في الغالب لإشارات الفيديو. وهناك عدة فروقات بين الكبل النحاسي المحوري والليف البصري نذكر أهمها في النقاط التالية:

- تحمل الألياف البصرية الإشارات على شكل نبضات ضوئية بينما تحمل الكابلات المحورية الإشارة على شكل إشارات كهربائية .
- تصنّع الالياف البصرية من البلاستيك والزجاج بينما يتكون قلب الكبل المحوري من سلك معدني مصنوع من النحاس .
- تبدي الألياف البصرية ممانعة أكبر من الكابلات المحورية للضجيج .
- تعتبر الكابلات المحورية أرخص من حيث التكلفة مقارنة مع الألياف البصرية .
- لا تأثر الإشارة في الكابلات النحاسية بعملية الثني للكبل بينما يحدث تشوهات وضياعات للإشارة عند ثني الليف البصري.
- توفر الألياف البصرية معدل نقل بيانات عالي وعرض نطاق ترددي أكبر مقارنة بالكابلات النحاسية .

- تعتبر عمليات الصيانة والتركيب للكابلات النحاسية أسهل بكثير من عمليات الصيانة والتركيب للألياف الضوئية .
- الألياف البصرية ذات وزن خفيف وقطر صغير مقارنة بالكابلات النحاسية.
- يمكن لكلا النوعين نقل الإشارات الرقمية والتناظرية .
- تتخامد الإشارة في الكابلات المحورية بشكل أكبر مقارنة بتخامد الإشارة في الألياف الضوئية .
- تعد الألياف الضوئية أكثر أمناً من الكابلات النحاسية لكونه يصعب التنصت على النبضات الضوئية على خلاف الإشارات الكهربائية التي يمكن التنصت عليها بكل سهولة .
- تتأثر الكابلات المحورية بظاهرة اختلاط الكلام بشكل أكبر.
- تستطيع الألياف الضوئية أن تحمل عدد أكبر من الإشارات حيث يتيح استخدامها لاستقبال حوالي ألف قناة.

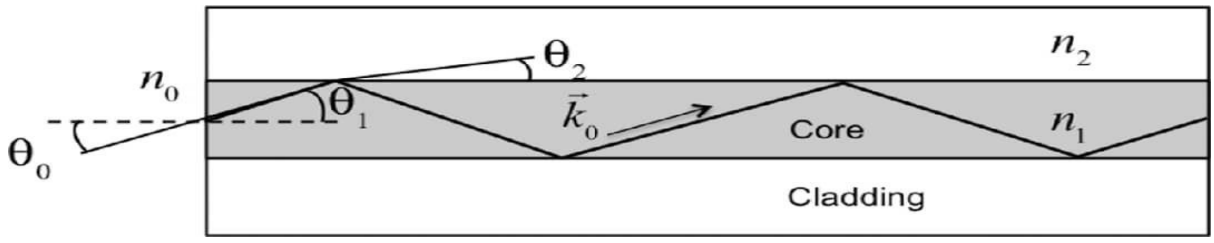
## 2-10 الانتشار في الألياف الضوئية:

ينتشر الضوء في الليف الضوئي بالاعتماد على ظاهرة الانكسار الكلي حيث ينكسر الشعاع الضوئي مبتعداً عن الناظم على السطح الفاصل عندما يرد من وسط ذو قرينة انكسار مرتفعة لوسط ذو قرينة انكسار منخفضة وذلك حسب قانون Snell في الانكسار:

$$N1.\sin(\theta 1) = N2.\sin(\theta 2) \qquad (1-2)$$

حيث:

- n1 قرينة انكسار القلب .
- n2 قرينة انكسار الغلاف .
- $(\theta 1)$ زاوية الورود.
- $(\theta 2)$ زاوية الانكسار .




الشكل( 2−14) آلية الانعكاس في الألياف البصرية .

وبزيادة زاوية الورود سوف تزداد زاوية الانكسار مبتعدة عن الناظم وعند الوصول لزاوية ورود معينة تدعى الزاوية الحرجة سينكسر الشعاع بزاوية انكسار قائمة وينتشر الشعاع موازياً للحد الفاصل بين السطحين (القلب والغلاف) ولضمان انتشار الشعاع الضوئي ضمن الليف يجب أن تكون زاوية الورود أكبر من الزاوية الحرجة.

عادة يتم الربط بين زاوية الورود وقرائن الانكسار للوسط $n_0$ والقلب n1 والغلاف n2 بعلاقة تدعى الفتحة العددية لليف والتي تعطى بالمعادلة التالية:

$$NA=n_0.\sin(\theta 1)=\sqrt{n1^2-n2^2} \quad (2-2)$$

## 2−11 الضياعات في أنظمة الاتصالات الضوئية:

الألياف الضوئية كغيرها من قنوات الاتصال تسبب تخميد للإشارات المارة عبرها ولكن تختلف آلية التخميد والضياع حسب طبيعة قناة الاتصال ففي الوصلات الميكروية اللاسلكية يتعلق التخميد بنموذج انتشار الأمواج الكهرطيسية والتشويش في الوسط بالإضافة للتردد الحامل للإشارة، بينما في الألياف الضوئية يتعلق التخميد بنوع المادة المصنع منها بالإضافة لآليات تفاعل الضوء مع المادة من انتثار وامتصاص وغيرها. حيث تحدّ هذه الضياعات من أداء النظام بشكل عام ومن مسافة الاتصال بشكل خاص وذلك لأن المستقبل يتطلب حد معين من الاستطاعة المستقبلة حتى يتمكن من الكشف الصحيح عن المعلومات وبالتالي لزيادة مسافة الاتصال لابد من استخدام المضخمات الضوئية أو المكررات ورغم ذلك فإن الألياف الضوئية ذات الضياعات المنخفضة مطلوبة بسبب الرغبة في زيادة المسافة بين المضخمات .

عادة ما يعبر عن معامل الضياع بواحدة dB/km فمن أجل ليف ضوئي بمعامل تخميد α وطول L تكون العلاقة بين تغير الاستطاعة الضوئية خلال مسافة ما تعطى بالشكل:

$$Pout/Pin=\exp(-\alpha L) \quad (3-2)$$

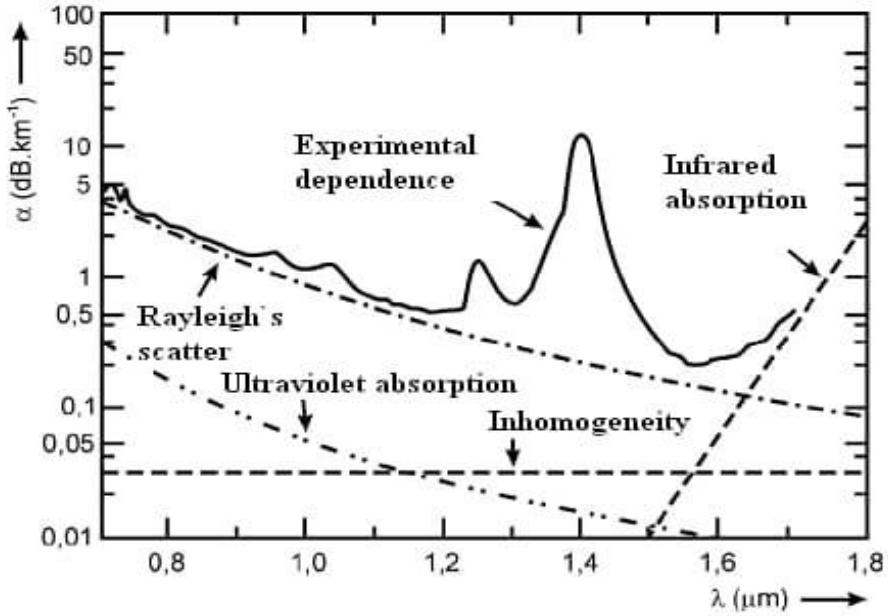
يتعلق معامل التخميد بشكل أساسي بطول الموجة حيث يبين الشكل(2−3) معامل التخميد بدلالة طول الموجة من أجل ليف ضوئي وحيد النمط ذو ضياع منخفض جداً ومن الملاحظ أن أقل قيم للضياعات هي عند العمل بطول موجة تقع ضمن المجال 1.4−1.6 um .

وتنقسم أليات الضياع في الألياف الضوئية لضياعات خطية وضياعات لاخطية وتنتج الضياعات الخطية عن عدة معاملات وهي:

- امتصاص المادة: والذي من الممكن أن يكون امتصاص داخلي ناتج عن الامتصاص الذاتي لجزيئات المادة المصنع منها الليف الضوئي. وامتصاص خارجي ينتج عن وجود شوائب ضمن الليف و الذي يظهر بشكل كبير عند العمل بطول موجة 0.6−1.6 um .
- انتثار ريلي: ويفسر ظاهرة تبعثر الضوء بالاصطدام بحبيبات ذات أبعاد صغيرة بالنسبة لطول الموجة والذي يعطى بالعلاقة:

$$a = \frac{C}{\lambda^4} \quad (4-2)$$

- عيوب مرشد الموجة: إن الليف الضوئي المثالي وحيد النمط ذو البنية الأسطوانية المثالية يرشد الأمواج الضوئية داخل قلب الليف الضوئي دون تسرب لطبقة الغلاف ولكن عملياً الاختلافات فينصف قطر القلب تؤدي لضياعات إضافية تزيد من التخميد الكلي لليف بنسبة 0.03dB/km إذا لم تزيد الاختلافات عن 1%.




الشكل( 2-15)الضياعات الخطية في الألياف البصرية .

أما الضياعات اللاخطية فتنتج من معاملين أساسين وهما:

- الانتثار المحرض: وينتج عن تفاعل الأمواج الكهرطيسية مع المادة وتحويل جزء من الطاقة إلى الضوء بطول موجة مختلف .
- التعديل الطوري غير الخطي: تتعلق قرينة انكسار المادة بالشدة الضوئية بسبب الاستجابة اللاتوافقية للإلكترونات مع الشدة العالية، ويظهر على شكلين هما التعديل الذاتي للطور وهو ينتج عن توليد ترددات جديدة في الإشارة نتيجة تغير ثابت انتشار النمط مع تغير الشدة الضوئية والتعديل المتصالب (المتقاطع ) للطور وهو ينتج في حال وجود عدة أطوال موجية حيث ينزاح طور الموجة نتيجة تأثير الموجات الأخرى.

بالإضافة إلى الضياعات في الألياف الضوئية هناك ظاهرة أخرى تعاني منها الإشارة عند انتشارها وهي ظاهرة التشتت. حيث أن عرض الحزمة في الألياف الضوئية يتعلق بعرض الإشارة الضوئية المنتقلة عبر الليف ويختلف عرض الإشارة زمنياً أثناء الانتشار لعدة أسباب منها:

- اختلاف المسارات التي تسلكها مركبات الإشارة .
- اختلاف سرعة مركبات الإشارة حسب الطول الموجي .
- اختلاف سرعات مركبات الإشارة حسب الاستقطاب .

هذه الأسباب ينتج عنها ظاهرة تدعى تشتت ولها عدة أنواع حسب السبب الذي أدى لحدوثها فاختلاف المسارات يسبب تشتت الأنماط واختلاف السرعة حسب طول الموجة يسبب تشتت لوني، واختلاف السرعة

حسب القطبية تسبب تشتت قطبية وجميع هذه الأشكال تدخل في حسابات التشتت الكلي لليف والذي يسبب تداخل بين الرموز وبالتالي تراجع في الأداء وخصوصاً مع زيادة طول الليف. وللتخفيف من هذه ظاهرة التشتت يمكن استخدام ألياف وحيدة النمط ذات قرينة انكسار متدرجة واستخدام منبع ضوئي وحيد اللون أو ضيق المجال.

# الفصل الثالث

# أنظمة الاتصالات البصرية في الفضاء الحر

## الفصل الثالث

## الاتصالات البصرية في الفضاء الحر

### 3-1 مقدمة في اتصالات الفضاء الحر

يعتبر الاتصال بأشعة الليزر عبر الهواء (Free Space Optics) FSO واحدة من مفاتيح التكنولوجيا لتحقيق سرعات عالية في نقل البيانات تستخدم أشعة الليزرات فيها كحوامل للإشارات، وتقدم مرسلات الليزر وظائف شبكية بعرض حزمة عالي يقدم الاتصال بالليزر عبر الهواء فوائد كبيرة على الاتصالات اللاسلكية التقليدية RF من حيث نقل بيانات بمعدلات أعلى سرية أعلى بحيث لا يمكن اعتراض الإشارات الليزرية والتنصت عليها مثل إشارات RF ولا يمكن التشويش عليها، مع متطلبات طاقة أقل، وحجم أصغر. كما يمكن مكاملة أنظمة الألياف الضوئية معها بسهولة. [1]

تعتبر الاتصالات باستخدام الليزر عبر الهواء وبالألياف الضوئية أحد فروع الإلكترونيات الضوئية Optoelectronics التي تدمج نوعين أساسيين من العلوم هما الإلكترونيات والضوء. ويعتمد علم الإلكترونيات الضوئية على معالجة الإشارات الكهربائية وتحويلها إلى إشارات ضوئية وبالعكس، بحيث تنقل المعلومات ضوئيا وذلك بتحميلها على إشارات ضوئية ذات طول موجي مناسب للإرسال ثم يتم استخلاصها

من الإشارات الضوئية المستقبلة في طرف الاستقبال

### 3- لمحة تاريخية:

تعود تجارب استخدام الضوء في الاتصالات إلى عام 1880م عندما أجرى مخترع الهاتف؛ ألكسندر جراهام بل تجربة نقل الصوت من خلال الضوء بواسطة جهاز ابتكره لهذه الغاية وتم نقل الصوت بهذه الطريقة مسافة 200 متر . وكان هذا الجهاز يتألف من مرآة هي عبارة عن لوح معدني رقيق عاكس وأمكن استقبال الضوء بواسطة خلية حساسة للضوء من مادة السلينيوم واستعادة الإشارة الصوتية منها على بعد 200 متر وسمي ابتكاره هذا بالهاتف الضوئي. كما قام الرومان قديماً باستخدام الضوء في الاتصالات بحيث قاموا باستخدام الصحون المعدنية الكبيرة كمرايا لتعكس أشعة الشمس لنقل الإشارات لمسافات بعيدة المدى. أيضاً منذ عدة

قرون تم استخدام الضوء الوامض لإرسال رسائل بين السفن بالبحر. في بدايات القرن التاسع عشر استخدم الجيش الأمريكي أدوات مماثلة لنقل معلومات برقية من قمة جبل إلى قمة جبل آخر. [1]

لكن هذه الطرائق لم تكن فعالة لنقل المعلومات بسبب ما تعاني من تغيرات الأحوال الجوية من هطول الأمطار الغبار كما أنها عرضة للتنصت . ولم يتعدى الهاتف الضوئي مرحلة التجارب لعدم وجود مصدر ضوئي ذو كفاءة جيدة بل استخدم الشمس وعدم وجود وسط ناقل قليل الفقد بل استخدم الهواء .

وانتظرت هذه التجارب ثمانين عاما أخرى قبل أن تتخطى مرحلة مهمة وهي ابتكار الليزر عام 1960م فالليزر LASER: Light Amplification by Stimulated Imation Radiation يوفر مصدر إشعاع ضوئي ضيق الحزمة عالي الطاقة يغذى بمصدر كهربائي مما شكل وسيلة مناسبة لحمل المعلومات. [2]

وفي عام 1970م ابتكرت إحدى الشركات المتخصصة بتقنية الزجاج كابل الليف الضوئي. كما تم ابتكار الثنائي الباعث للضوء LED Light Emitting Diode واستخدم في الشبكات القصيرة من أجل الربط بين أجهزة الحاسوب وشبكات المعلومات المحلية وأنظمة التحكم في الطائرات.

**3-3 الاتصالات بالليزر عبر الهواء :**

إن أنظمة الاتصال بالأشعة الليزرية عبر الهواء (FSO) هي واحدة من الحلول المستخدمة لتلبية متطلبات زيادة النطاق الترددي لشبكة الإنترنت الجديدة. ويعد الاتصال بأنظمة الليزر عبر الهواء هو البديل الأكثر عملية لحل مشاكل ضيق عرض الحزمة، وكمكمل للوصلات الراديوية. توفر وصلات FSO معدل بيانات عالي في كل من التطبيقات طويلة المسافة والتطبيقات قصيرة المسافة. يتميز الجانب الأقوى لاتصالات FSO سواء بأنظمة الاتصالات التماثلية أو الرقمية في النطاق الترددي الهائل المتاح عند الترددات البصرية. [9]

**1-3-3 تطبيقات الاتصال بالليزر عبر الهواء :**

- الاتصال LAN-LAN بين الأبنية بسرعات Fast Ethernet و Gigabit Ethernet
- الاتصال LAN-LAN بين المدن.
- خدمة التوصيل السريعة بعرض حزمة عالي إلى شبكات الألياف الضوئية.
- الاتصال بين الأرض والأقمار الصناعية في الفضاء أو بين الأقمار الصناعية.
- الاتصال بين السفن بالبحر بمعدل بيانات عالي وسرية تامة.
- تطبيقات عسكرية.

- خط بديل عن الألياف الضوئية : حيث يمكن إضافة وصلات ليزرية بالإضافة للألياف الضوئية في حال حدوث أي عطل على الألياف يتم نقل الاتصال مباشرة عبر الوصلات الليزرية.
- ناقل لإشارات الهاتف الخلوي: حيث يمكن استخدامه لنقل حركة الهاتف الخلوي من أبراج الهوائي إلى المرافق السلكية في شبكة الهاتف العامة.
- تسريع الخدمة يمكن أيضاً استخدامه لتوفير خدمة فورية لعملاء الألياف البصرية أثناء بناء البنية التحتية للألياف.
- إمكانية الوصول إلى الميل الأخير في هذه الأيام، أكثر من 95% من المباني في المدن لا تملك إمكانية الوصول إلى البنية التحتية للألياف الضوئية، لذلك تستخدم الوصلات الليزرية كحل واعد لتوصيل المستخدمين النهائيين بمزودي الخدمة أو بالشبكات الأخرى الموجودة. علاوة على ذلك، توفر الوصلات الليزرية اتصال عالي السرعة يصل إلى Gbps ، وهو ما يتجاوز بكثير قدرة الأنظمة البديلة.

**3-3-2 فوائد الاتصال بالليزر عبر الهواء :**

- سرية عالية بإرسال البيانات.
- نقل المعلومات إلى مسافات بعيدة.
- معدل نقل بيانات عالي.
- عدم الحاجة إلى ترخيص من لجنة الاتصال الدولية لعدم الحاجة لحجز نطاق ترددي لتطبيق الاتصال.
- وزن خفيف، حجم صغير ، واستهلاك خفيف للطاقة الكهربائية مقارنة بالاتصال بالـ RF
- النقل والانتشار السريع للإشارات.
- زيادة السرية بسبب ضيق قطر شعاع الليزر ليتم استخدامه بتطبيقات عسكرية ونقل معلومات حساسة.
- تكلفة أقل بإصلاح الأعطال مقارنة باستبدال ألياف ضوئية جديدة.
- مناعة ضد التداخلات الكهرومغناطيسية بحيث لا يمكن أن تؤثر الإشارات الراديوية عليها.
- الليزرات المستخدمة بمجالات الاتصالات غير مؤذية للعين، كما أنها غير مؤذية للكائنات الحية التي قد تعترض طريقها مثل الطيور وغيرها.

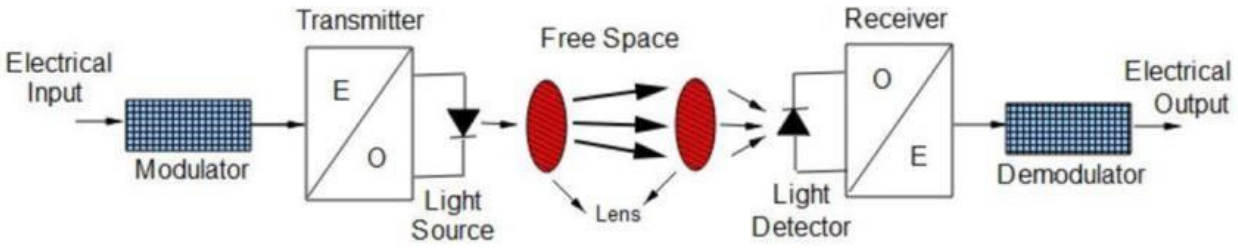
- الخطأ على معدل نقل البيانات صغير
- أقل تكلفة مقارنة بشبكات الألياف الضوئية.

**3-3-3 القيود على الاتصال بالليزر عبر الهواء :**

التأثيرات الجوية يمكن أن تخفض أداء الاتصال بسبب الامتصاص وتبعثر شعاع الليزر . . الحاجة إلى خط نظر مباشر وواضح بين المرسل الليزري والمستقبل بحكم أن الليزر لا يمكن يخترق الأشجار والتلال والأبنية وغيرها ولا ينعرج بشكل كامل.

- تأثير الأشعة الشمسية على الاتصال والحاجة إلى وضع أجهزة الاتصال بحيث نتجنب أن يكون المستقبل مواجها للشمس

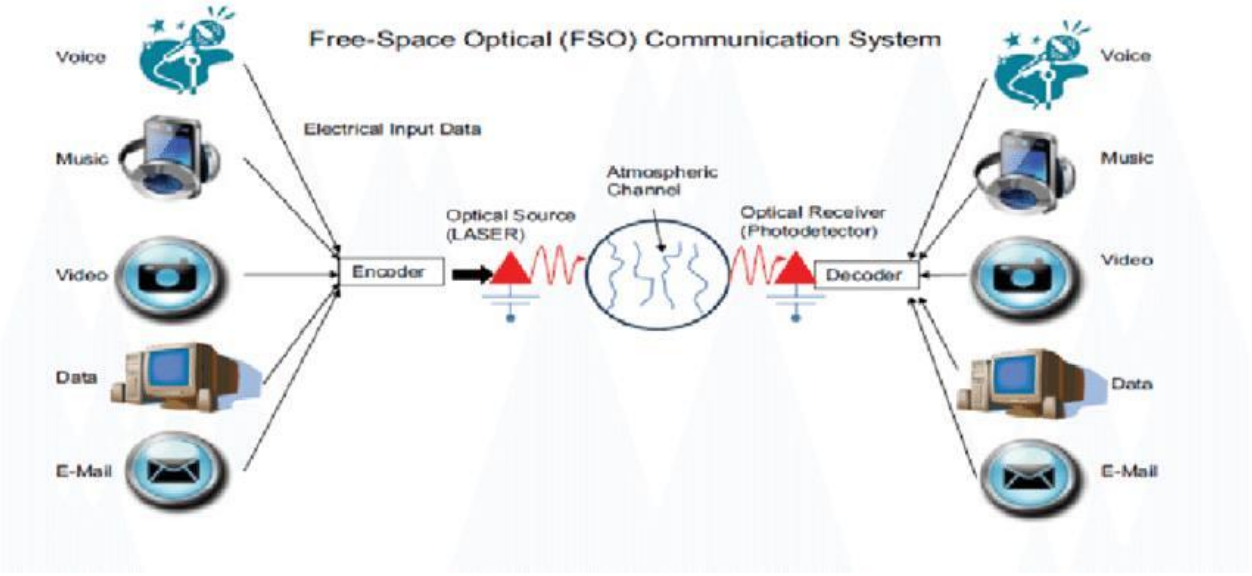
**3-4 مكونات نظام اتصال بالليزر عبر الهواء :**




الشكل (3-1) البنية العامة لنظام اتصالات بصري باستخدام الليزر في ا الفضاء الحر.

يتألف نظام الاتصال بالليزر عبر الهواء من ثلاث مكونات المرسل، قناة تمثل خط نظر انتشار الإشارة المرسلة (الهواء)، المستقبل . يمكن أن يكون المرسل إما ديود ليزري (LD)أو ديود مشع (LED)لإرسال الإشعاع الضوئي عبر الغلاف الجوي. يعتمد اختيار المرسل الليزري في تطبيقات الاتصالات الليزرية عبر الهواء على عوامل مختلفة من المهم أن يرتبط الطول الموجي للإرسال بإحدى النوافذ الجوية. نوافذ الغلاف الجوي الجيدة هي حوالي 850 نانومتر وحتى 1550 نانومتر في نطاق الطول الموجي تحت الأحمر القصير. في المدى الطيفي للأشعة تحت الحمراء الطويلة، توجد بعض النوافذ ذات الطول الموجي بين 3-5 مايكرومتر (خاصة 3.5-3.6 مايكرومتر ) و 8-14 مايكرومتر . ومع ذلك، فإن توفر

مرسلات ليزرية مناسبة في نـ الطول الموجي الطويل محدود إلى حد كبير في الوقت الحالي. بالإضافة إلى ذلك، تحتاج معظم المرسلات الليزرية إلى تبريد مما يحد من استخدامها في تطبيقات الاتصالات التجارية. [3]




- الشكل (3-2) نوعية المعلومات التي يمكن نقلها باستخدام أنظمة الاتصال عبر الهواء

### 3-5 التعديل المستخدم بأنظمة اتصالات FSO

تلاحظ أن الإشارة قبل إرسالها عبر الهواء يتم تعديلها وفيما يلى أنواع التعديل الأكثر استخداماً بأنظمة الاتصال عبر الهواء :

- On-Off Keying (OOK)

بعد هذا النوع من أنواع التعديل الأكثر استخداماً بأنظمة الاتصال عبر الهواء، بسبب بساطته ومرونته عند لاخطية الليزر. يمكن أن تستخدم OOK إما أشكال نبضات لا ترجع إلى الصفر (NRZ)أو الرجوع إلى الصفر (RZ )في NRZ-OOK قمة طاقة النبضة الضوئية يتم تمريرها رقمياً بالرمز "1" ويتم تمرير القيم الأدنى بالرمز "0" وعرض النبضة الضوئية يساوي زمن الرمز (البت). من جهة المستقبل يعتمد قرار "0" أو"1" على طاقة الرمز المستقبل ويتم مقارنته مع عتبة، ويتم اتخاذ القرار على أساس طاقة الرمز أعلى أو أخفض من قيمة العتبة. [13]

- تعديل مكان النبضة PPM

نوع آخر من أنواع التعديل المستخدم بأنظمة الاتصال عبر الهواء هو PPM هذا التعديل مناسب تماماً للكشف المباشر عن الإشارة الضوئية المرسلة عبر القضاء يقدم تعديل PPM ميزة كبيرة في التخلص من تبعيات عتبة القرار على طاقة الإدخال القيد الرئيسي هو أنه يتطلب نطاق ترددي أكبر من المطلوب في حالة تعديل OOK، وبهذا التعديل يتم ترميز M bit ضمن نبضة مرسلة واحدة

تحتاج PPM إلى تصميمات معقدة للمستقبل والمرسل بسبب المزامنة العالية اللازمة بينهما. إذا واصلنا زيادة M، فإن الفواصل الزمنية التي ترد فيها النبضات الضوئية تقل. هذا يميل إلى زيادة المعلومات المرسلة لكل

إشارة. وبالتالي كفاءة نقل أعلى، ولكن أيضاً يزيد من عرض النطاق الترددي المطلوب M/log2m مرة والذي بدوره يقلل من كفاءة استخدام الحزمة. [3]

**3-6 نوافذ الارسال التي يعمل عندها الاتصال بالليزر عبر الهواء :**

توجد عدة نوافذ للإرسال مناسبة( الضياعات أصغر من dB/km0.2) وتوجد هذه النوافذ حول عدة موجات مركزية محددة

- **نافذة 850 نانومتر:**

تتميز بضياعات منخفضة نافذة 850 نانومتر مناسبة للغاية لتشغيل أنظمة الاتصال بالليزر عبر الهواء. بالإضافة إلى ذلك، تتوفر مكونات أجهزة الكشف والكاشف الموثوقة وعالية الأداء وغير المكلفة بشكل عام وتستخدم بشكل شائع في شبكات مزود الخدمة اليوم ومعدات الإرسال. [3]

- **نافذة 1060 نانومتر:**

تظهر نافذة الإرسال 1060 نانومتر قيم ضياعات منخفضة للغاية. ومع ذلك، فإن مكونات الإرسال لإنشاء نظام ضوئي عبر الهواء محدودة للغاية وعادة ما تكون ضخمة في نطاق الطول الموجي هذا، وذلك لعدم استخدام هذه النافذة بشكل خاص في أنظمة الاتصالات، مكونات الإرسال عالية الجودة نادرة. تتوفر الليزرات نصف الناقلة عند الطول الموجي القريب من 980 نانومتر مثل ليزر الضخ 980 نانومتر المستخدم لمضخمات الألياف (وهي متاحة تجارياً). على الرغم من أن مدى الطول الموجي 980 نانومتر

يواجه ضياعات جوية تصل إلى عدة dB/Km حتى في ظل ظروف الطقس الصافية. [3]

- **نافذة 1250 نانومتر:**

تظهر نافذة الإرسال 1250 نانومتر ضياعات منخفضة، لكن أجهزة الإرسال العاملة في نطاق الطول الموجي هذا نادرة. تتوفر هذه الليزرات في مجال الاتصالات عند طاقات منخفضة والتي تعمل عادة ما بين 1310-1280 نانومتر وهي متاحة تجارياً. هذا الطول الموجي مناسب فقط للاستخدام في الأنظمة الضوئية عبر الهواء. [3]

- **نافذة 1550 نانومتر:**

إن نطاق 1550 نانومتر مناسب تماما للإرسال في الفضاء الحر عبر الهواء نظراً للضياعات المنخفضة عند الطول الموجى هذا ، بالإضافة إلى وفرة مكونات الإرسال والكشف عالية الجودة، تتضمن المكونات تكنولوجيا الليزرات نصف الناقلة عالية السرعة المناسبة لعمل WDM كذلك المضخمات SOA,EDF المستخدمة لتضخيم طاقة الارسال نظراً لظروف الضياعات المنخفضة وتوفر المكونات عند الطول الموجي هذا، فإن عملية تنجيز وتطوير أنظمة الاتصالات عبر الهواء متاحة [3]

**3-7 القيود على الاتصال عبر الألياف الضوئية**

- أجهزة اختبار خاصة بنظم الألياف الضوئية مطلوبة. معدات الاختبار المستخدمة بشكل تقليدي للشبكات التقليدية القائمة على الإلكترون ليست ذات فائدة في شبكة الألياف البصرية. أجهزة مثل (OTDR (Optical Time Domain Reflect meter ، مطلوبة، ومكلفة وهو جهاز يستخدم لفحص الليف الضوئي لتحديد العطل إن وجد ومكانه. [5]
- القابلية للتلف الفيزيائي الألياف عبارة عن كابلات صغيرة، وهي عرضة بدرجة كبيرة للقطع أو التلف أثناء العمليات الإنشائية أو الزراعية بالمناطق التي يتم تمديد الألياف فيها. ويمكن لهذه الأحداث تعطيل الخدمة لمجموعات كبيرة من الأشخاص، حيث يمكن أن توفر كابلات الألياف الضوئية إمكانات هائلة لنقل البيانات. لهذا السبب عندما يتم اختيار كابلات الألياف الضوئية كوسيلة نقل، فمن الضروري الاهتمام بآلية الحفاظ على الاتصال من خلال ضمان وجود خط اتصال إضافي في حال فقد الاتصال بالرئيسي يقوم الإضافي بالعمل ريثما يتم إصلاح الخط الرئيسي. [7]

- الأضرار التي تلحق بكابلات الألياف الضوئية بسبب الحياة البرية. على سبيل المثال تستخدم القنادس والقوارض الأخرى الكابلات الليفية المكشوفة لشحذ أسنانهم، والحشرات مثل النمل يستخدمون الغلاف البلاستيكي للألياف الضوئية في نظامهم الغذائي، لذلك يمكن العثور عليهم في كثير من الأحيان يقومون في قضم كابلات الألياف الضوئية. من المعروف أيضاً أن أسماك القرش تقطع كابلات الألياف الضوئية عن طريق قضمها عندما توضع تحت الماء، خاصة في نقاط التكرار. هناك نبات يسمى نبات شجرة عيد الميلاد يعامل كبل الألياف الضوئية كجذر شجرة ويلتف بنفسه حول الكبل بإحكام بحيث تصبح عرضة للكسر والتلف.

- تتطلب مهارات خاصة. لا يمكن ربط الألياف الضوئية ببعضها بطريقة سهلة مثل ربط الكابلات النحاسية وتتطلب تدريباً إضافياً للأفراد ودقة عالية باللحام وبأجهزة القياس . [7]
- يحتاج ربط كبلات الألياف الضوئية إلى عناية خاصة لأنه إذا كان التوصيل غير صحيح، سينتج الكثير من الضياعات عند الأطوال الموجية العالية. [7]
- نظرا لأن الألياف الضوئية لا تحتوي على موصلية كهربائية، لذلك لا يتم استخدام كابل نحاسي إضافي مع الألياف الضوئية لتوفير مصدر طاقة للمكررات . [7]

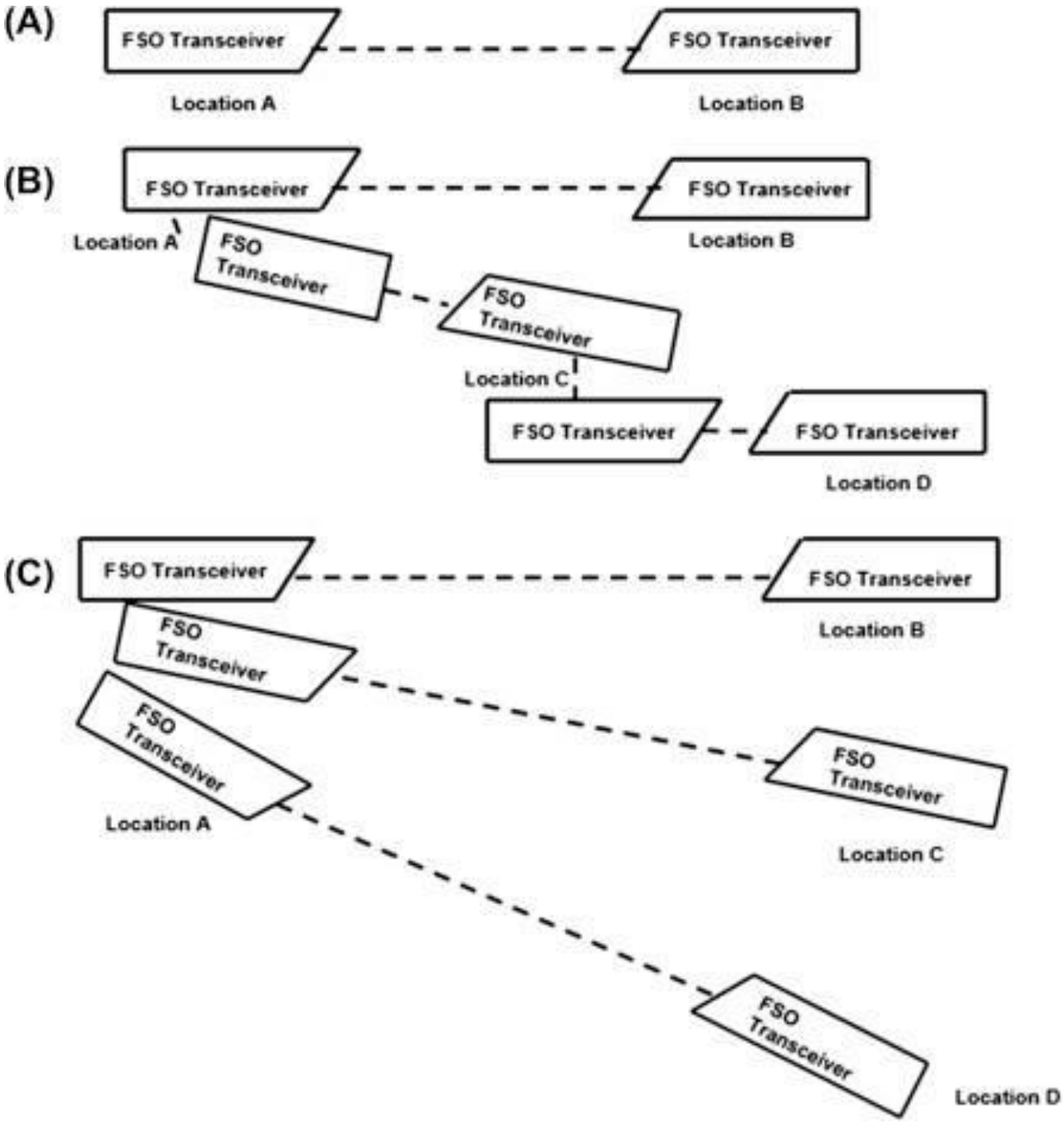
**3-8 مقارنة بين الاتصال بالليزر عبر الهواء والاتصال بالألياف الضوئية:**

- يمكن أن تحمل الألياف الضوئية شعاع الليزر وبالتالي المعلومات لمسافات طويلة تصل إلى مسافات أبعد من غيرها من نظم الاتصالات المختلفة قد تصل حتى Km200 بدون مكررات
- يعبر الليزر عبر الهواء بشكل أسرع من عبوره الزجاج .
- عملية تمديد الألياف الضوئية مكلفة وتتطلب وقت أكبر وذلك لأن تمديدها يتطلب القيام بعمليات الحفر والتمديد والردم.
- بمجرد نشر الألياف، فإنه من الصعب إعادة نشرها في حال كان العميل بحاجة إلى الانتقال لمكان آخر أو استخدام موفر خدمة آخر وذلك بسبب الحاجة لسحب التمديدات القديمة والقيام بعمليات تمديد جديدة، مما يجعل من الصعب للغاية استرداد الاستثمار في إطار زمني معقول. [6]

- توفر التقنيات الضوئية بالليزر عبر الهواء طريقة فعالة واقتصادية للوصول إلى "الميل الأخير" من خلال الاتصال بالبنية التحتية للألياف الأساسية مباشرة إلى منشآت العملاء. [6]

الجدول (3-1) مقارنة بين أنظمة الاتصال الليزرية عبر الهواء وأنظمة الاتصال عبر الألياف الضوئية وأنظمة الاتصال عبر الكابلات النحاسية

| الميزات | FSO | Fiber | DSL |
|---|---|---|---|
| زمن التجيز والتوصيل | أيام قد تصل إلى أسابيع | 12 – 4 شهر | 12 – 6 شهر |
| | قليل | كبير | كبير |
| الموثوقية | متوسط | عالي | عالي |
| طوبولوجيا الوصل | النقطة النقطة، نقطة لعدة النقاط شبكة | النقطة لنقطة ,نقطة العدة نقاط شبكة | نقطة لنقطة |
| محدودية المسافة | 200_2000m | 200km | 5.5km |
| عرض الحزمة \السرعة | 1.25GBPS | 10Gbps | 2Mbps |




الشكل (3-3) طبولوجيا شبكات الاتصال البصري في الفضاء الحر.

### 3_9 الضياعات الجوية في الفضاء الحر:

تتكون قناة الاتصال الليزرية عبر الجو من عدة غازات وجزيئات صغيرة أخرى مثل الغبار والدخان وما إلى ذلك معلقة في الغلاف الجوي، وإلى جانب ذلك هنالك ترسبات كبيرة بسبب تساقط الأمطار والثلوج والضباب ينتج عن كل من هذه المكونات في الغلاف الجوي انخفاض في مستوى الطاقة أي تخميد الإشارة الضوئية بسبب عدة عوامل بما في ذلك امتصاص الضوء بواسطة جزيئات الغاز.

### 3-9-1 أشكال الضياعات الجوية:

### 3-9-1-1 الضياعات الناتجة عن الامتصاص والتبعثر:

عند استخدام الأطوال الموجية المرئية وتحت الحمراء يكون عامل الامتصاص الأساسي هي جزيئات الماء في الهواء ثاني أكسيد الكربون والأوزون.

يمكن قياس التخميد الذي تعانى منه الإشارة الضوئية عندما تمر عبر الغلاف الجرى بالاعتماد على الطاقة الواصلة عند المستقبل PRec و PTran

تعبر نفوذية الجو عن معدل الطاقة المستقبلة بالنسبة للطاقة المرسلة، وتعطى علاقة نفوذية الجو Ta بالعلاقة

التالية:

$$\mathrm{Ta} = \frac{\mathrm{PRec}}{\mathrm{PTran}}$$

ترتبط نفوذية الغلاف الجوي بمعامل التخميد في الغلاف الجوي ومسافة الإرسال بالعلاقة التالية:

$$ta = \mathrm{e}^{-\int_0^R y(p).dp}$$

حيث (p) معامل التخميد الناتج عن الامتصاص والتبعثر .

R :المسافة بين المرسل و المستقبل.

وبالتالي يمكن حساب الضياعات بالديسبل التي تتعرض لها الحزمة الضوئية أثناء الانتشار عبر الغلاف الجوي باستخدام العلاقات التالية

$$Loss=-10.log10Ta$$

ويعطى معامل التخميد الناتج عن الامتصاص والتبعثر بالمعادلة التالية:

$$Y(\lambda)= am(\lambda) + ßm(\lambda) + \alpha a(\lambda)+ ßa(\lambda)$$

$am(\lambda)$ معامل الامتصاص الجزيئي

$Bm(\lambda)$ معامل التبعثر الجزيئي

$\alpha a(\lambda)$ معامل الامتصاص الذري

$Ba(\lambda)$ معامل التبعثر الذري

تعتمد ظاهرة الامتصاص بالهواء بشكل أساسي على طول الموجة المستخدم ويوضح الجدول (3-2) التالي بعض القيم التي تعبر عن معامل جزيئات الامتصاص تبعاً لطول الموجة المستخدم في حالة شروط جوية صافية

الجدول (3-2) معامل جزيئات الامتصاص عند طول موجة محدد.

| معامل الامتصاص الجزيئي dB/km | طول الموجة nm |
|---|---|
| 0.13 | 550 |
| 0.41 | 850 |
| 0.01 | 1550 |

وبالنسبة لظاهرة التبعثر تعتمد بشكل أساسي على نصف قطر الحبيبات التي يصطدم بها الشعاع الليزري إذا كانت $r<\lambda$ تصنف عملية التبعثر على أنها تبعثر ريليه Rayeigh وفي حال كانت $r=\lambda$ تقريباً تصنف عملية التبعثر على أنه تبعثر Mia و في حال كانت $r>\lambda$ يمكن تفسير عملية التبعثر باستخدام نظرية الضوء الهندسي.

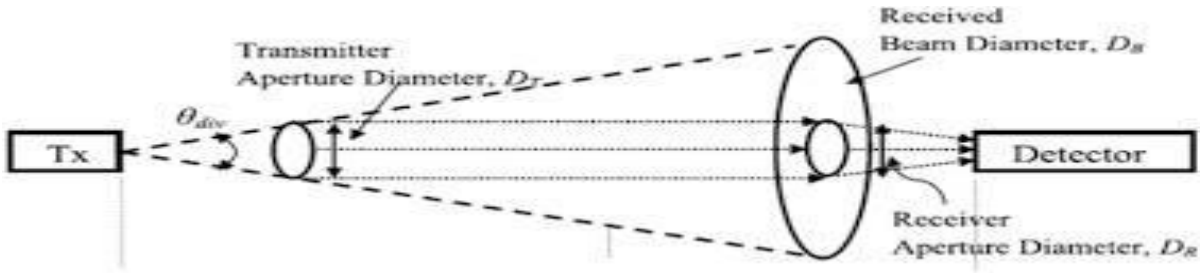
### 3-9-1-2 ضياعات الانتشار:

ونعني بذلك ضياع استطاعة الإشارة أو طاقة الإشارة الليزرية أثناء انتشارها عبر الهواء حيث يعطى معامل ضياع الهواء بالعلاقة التالية:

$$Ls = (\frac{\gamma}{4\pi r})$$

### 3-9-1-3 ضياعات تباعد الحزمة:

عندما تنتشر الحزمة الضوئية عبر الجو فإن الحزمة تتباعد كلما بعدت المسافة بين المرسل والمستقبل وقد يؤدي ذلك لحالة لا تتمكن فيه فتحة المستقبل من جمع أجزاء من الحزمة المرسلة مما يؤدي الضياعات تباعد الحزمة كما هو مبين في الشكل التالي:




الشكل (43) ضياعات تباعد الحزمة في أنظمة الاتصالات البصرية في الفضاء الحر.

ينقل نظام FSO النموذجي بشكل عام شعاعاً ضوئياً يبلغ قطره5-8cm من جهة المرسل. ينتشر هذا الشعاع وتتباعد الحزمة ليصل قطرها لحوالي 1-5 أمتار بعد الانتشار على مسافة كيلومتر واحد. ولكن من المعلوم أن المستقبل له مجال رؤية ضيق وهو غير قادر على جمع كل الطاقة المرسلة مما يؤدي لفقدان جزء من الطاقة.

تعطي العلاقة التي تعبر عن الطاقة التي قام بتجميعها واستقبالها المستقبل بالشكل التالي:

$$Pr=Pt.Gt.Gr.Ls$$

حيث

pt: الطاقة المرسلة.

Ls :ما ضياعات الانتشار

Gr,Gt: ربح الهوائي الفعال لكل من المرسل و المستقبل.

علماً أن المعاملات السابقة تعطي بالعلاقات التالية:

$$\mathrm{Gr} = (\frac{4Dr}{\lambda})$$

$$\mathrm{GT} = (\frac{4DT}{\lambda})$$

حيث:Dt,Dr تعبران عن قطر كل من عدسة المرسل والمستقبل

باستبدال العلاقات السابقة بعلاقة الطاقة المستقبلة نحصل على المعادلة التالية

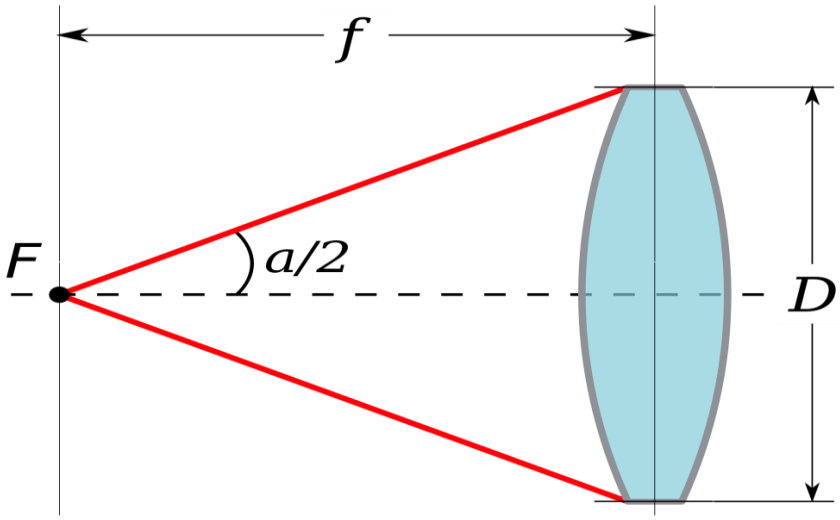
$$\mathrm{Pr} = Pt\left(\frac{Dt\ dr}{yr}\right)$$

لذلك تعطى ضياعات تباعد الحزمة المحدود كضياعات هندسية بالعلاقة التالية:

$$\text{Geometric loss} = -10\log\left(\frac{Dt\ dR}{yR}\right)$$

بشكل عام يفضل أن يكون المرسل الليزري مع تباعد حزمة ضيق لكن تباعد الحزمة الضيقة قد يؤدي لفشل الاتصال لذلك يجب اختيار تباعد حزمة مناسب من أجل تحقيق ديمومة الاتصال بين المرسل والمستقبل دون الحاجة لاستخدام نظام ملاحقة وفي الوقت ذاته التخفيف من ضياعات الحزمة حيث أن زاوية تباعد الحزمة تتناسب عكساً مع قطر فتحة عدسة المرسل:

$$\theta = \left(\frac{Y}{DT}\right)$$




الشكل (3-5) العلاقة ببين زاوية تباعد الحزمة وقطر فتحة عدسة المرسل.

في حالة تباعد الحزمة غير المحدود تصنع زاوية تباعد الحزمة مع قطر عدسة المرسلDT حجم الحزمة بالشكل التالي $(DT + \theta.R)$من أجل مسافة إرسال R. وعندئذ تكون نسبة الطاقة المستقبلة إلى الطاقة المرسلة تعطى بالعلاقة

$$\frac{PR}{PT} = \frac{D_R^2}{(Dr + 0.R)^2}$$

**3-1-9-4** ضياعات الأحوال الجوية السائدة:

يخضع أداء وصلة FSO لعدة عوامل جوية مثل الضباب والثلج والمطر مما يؤدي لانخفاض في طاقة الإشارة المستقبلة ومن بين هذه العوامل الجوية عادة ما يهيمن الضباب على التوهين في الغلاف الجوي لأن حجم جسيمات الضباب يمكن مقارنتها بطول الموجة المستخدم في أنظمة FSO. يمكن لهذا الضباب أن يغير خصائص الإشارة الضوئية أو يمكن أن يعيق مرور الضوء تماماً بسبب الامتصاص والانتثار والانعكاس.

الرؤية الجوية :هي االمقياس المفيد للتنبؤ بالظروف الجوية للغلاف الجوي وتعرف بأنها المسافة التي تمر بها الحزمة المضيئة المتوازية في الجو حتى تنخفض شدتها بنسبة 2% من قيمتها الأصلية.

## 1-4-1-9-3 تأثير الضباب:

الضياع بسبب الضباب يمكن تقديره بتطبيق نظرية تبعثر Mie على الرغم من أن هذه العملية تتضمن حسابات معقدة وتتطلب معلومات مفصلة عن معاملات الضباب. لتخفيف هذا التعقيد تم وضع تطبيق بديل يعتمد على معلومات الرؤية ضمن مجال الإرسال حيث الضياع بسبب الضباب يتم توقعه باستخدام نماذج تجريبية عشوائية. إن طول الموجة nm550 عادة يؤخذ كطول موجة مرجعي لمجال الرؤية وتعطى العبارة التي تعطي الضياع بسبب الضباب باستخدام نموذج تجريبي شائع لتبعثر Mie بالعلاقة التالية:

$$\mathrm{B_{fog}(Y)} = \frac{3.91}{V}\left(\frac{Y^{-P}}{500}\right)$$

حيث:

P معامل توزع حجم التبعثر.

V مجال الرؤية (km)

باعتماد نموذج kim تعطى قيمة هذا المعامل:

$$\mathrm{P} = \begin{cases} 1.6, & \mathrm{V}>50 \\ 1.3 & 6<\mathrm{V}<50 \\ 0.16\mathrm{V}+0.34 & 1<\mathrm{V}<6 \\ \mathrm{V}-0.5 & 0.5<\mathrm{V}<1 \\ 0 & \mathrm{V}<0.5 \end{cases}$$

وباعتماد نموذج Kruse تكون قيمة المعامل :

$$\mathrm{P} = \begin{cases} 1.6 & \mathrm{V}>50 \\ 1.3 & 6<\mathrm{V}<50 \\ 0.585v^{\frac{1}{3}} & \mathrm{V}<6 \end{cases}$$

### 3-9-1-4-2 تأثير الثلج:

الضياعات بسبب الثلج تختلف بالاعتماد على حجم حبات الثلج ومعدل تساقط الثلوج. نظراً لأن حجم حبات الثلج أكبر من حجم قطرات الماء فإنها تؤدي لخفوت اكبر في الإشارة مقارنة بقطرات المطر. يمكن أن يصل حجم حبة الثلج إلى 20 مم والتي يمكن أن تمنع مسار الإشارة الضوئية تماماً اعتماداً على قطر الشعاع الليزري. يمكن تصنيف الضياعات بسبب الثلج كضياع بالثلج الرطب والجاف. وتعطى عبارة الضياع بسبب الثلج وفقاً للعلاقة

$$\text{Bsnow}=a.s^{b}$$

حيث S معدل تساقط الثلوج ويقدر بـ mm/hr أما a,b ثوابت.

الضياع بسبب الثلج يعتمد على مجال الرؤية ويمكن تقريبه باستخدام نموذج تجريبي بالعلاقة التالية:

$$asnow = \frac{58}{v}$$

### 3-9-1-4-3 تأثير المطر:

حجم حبات المطر المتساقطة تسبب تبعثر طول الموجة ويزداد الضياع الناتج عن المطر خطياً بزيادة معدل تساقط الأمطار. وتعطى عبارة الضياع بسبب المطر بالعلاقة:

$$\text{Brain} = 1.076R^{0.67}$$

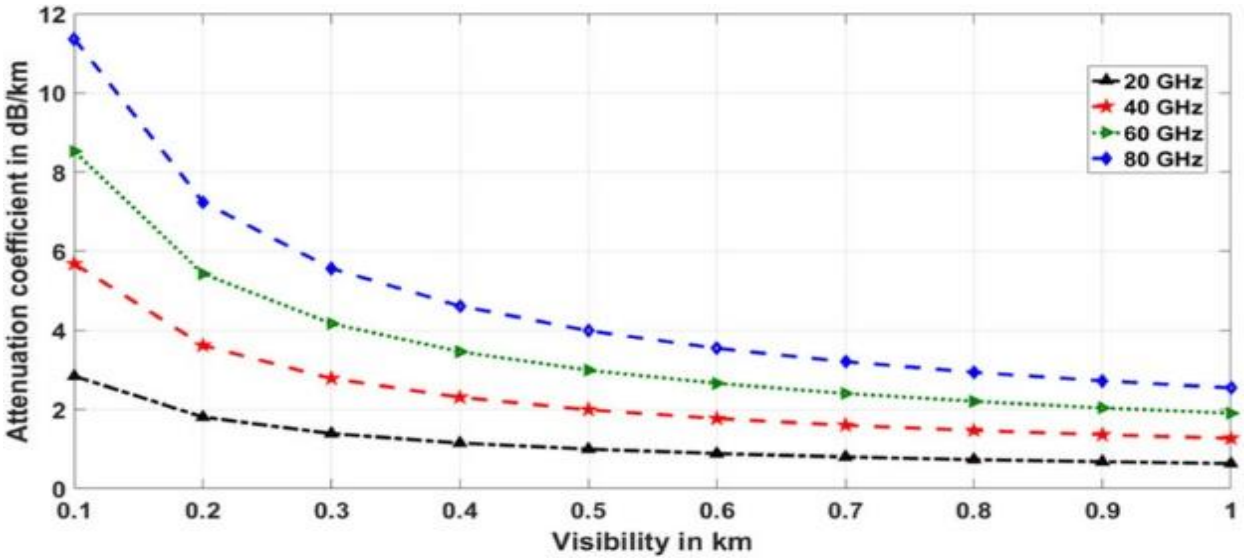
حيث R معدل تساقط الأمطار ويقدر بـ .mm/hr

وبتقريب هذه العلاقة بنموذج تجريبي نحصل على العلاقة التالية:

$$arain\frac{2.3}{v}$$

الجدول (3-3) مجال الرؤية من اجل معدلات تساقط الأمطار

| مجال الرؤية km | معدل تساقط الأمطار mn/hr | نوع المطر المتساقط |
|---|---|---|
| 1.9-2 | 25 | ثقيل |
| 2.8-40 | 12.5 | متوسط |
| 18-20 | 0.25 | خفيف (رذاذ) |

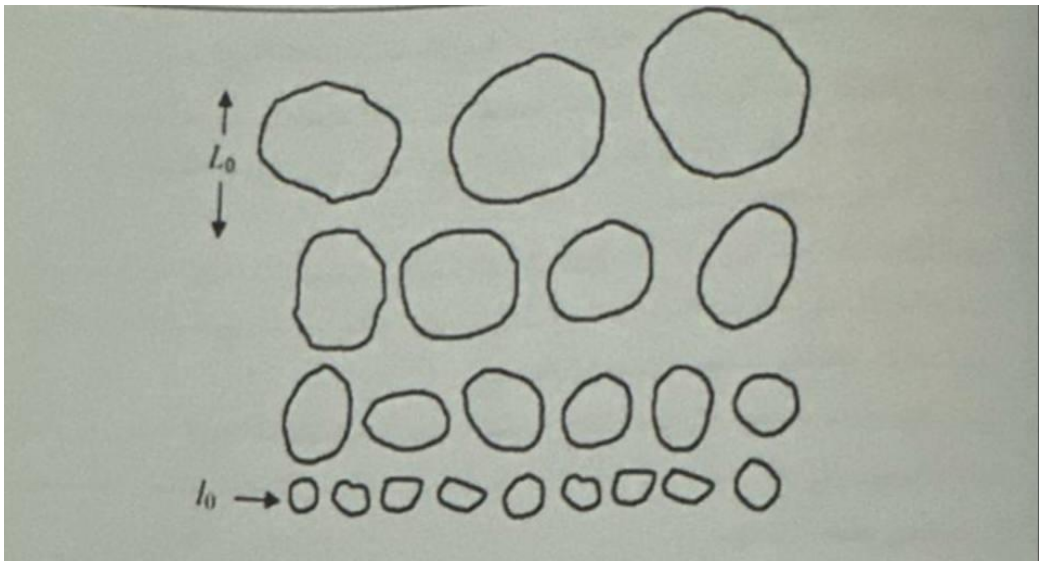



الشكل (3-6) الضياعات الناتجة عن الأحوال الجوية.

ويوضح الشكل (3-6) مقارنة بين الضياعات الناتجة عن الثلج والضياعات الناتجة عن المطر عند طول موجي 1550nm مع الرؤية حيث يتضح أن الضياع يكون أعظمي بحالة الثلوج وأصغري بحالة المطر

**3-9-1-4-4 ضياعات الاضطرابات الجوية:**

يقصد بها الضياعات الناتجة عن حرارة الشمس على سطح الأرض بحيث تنتقل هذه الحرارة عبر الهواء لتسبب عدم تجانس في الغلاف الجوي وتوزع عشوائي لدرجات الحرارة على طول مسار الشعاع الليزري وهذه الظاهرة تخلق مناطق جوية بكثافات مختلفة تعمل كعدسات تحرف مسار الليزر.




الشكل (3−7) الضياعات الناجمة عن حرارة الشمس على سطح الأرض.

ينتج الاضطراب في الغلاف الجوي عن التقلبات العشوائية لقرينة الانكسار الجوي n بسبب التأين في درجات الحرارة والضغط على طول مسار الانتشار في الغلاف الجوي. وتعطى علاقة مقياس الاضطرابات الناتجة عن تقلبات قرينة الانكسار بالعلاقة التالية:

$$cn^2 = (79x10^{-6}\frac{p}{T^2}).CT^2$$

حيث:

P:. الضغط الجوي بالملي بار

T: درجة الحرارة بالكلفن.

$CT^2$ : مربع متوسط درجة الحرارة بين نقطتين تفصل بينهما مسافة معينة على طول مسار الانتشار

deg2/m2/3

$Cn^2$ معامل يصف الاضطرابات في الغلاف الجوي، فعند الاضطرابات الجوية الضعيفة يكون هذا العامل من رتبة $10^{-7}m^{-2/3}$ أو أقل، عند الضياعات الجوية القوية يكون هذا العامل من رتبة $10^{-7}m^{-2/3}$

وبناة على حجم كثافة الاضطرابات وحجم الحزمة المرسلة تقسم الاضطرابات لثلاثة أنواع:

- **انحراف الحزمة** :تحدث في حال كانت كثافة المنطقة المعرضة للاضطرابات أكبر من حجم الحزمة المرسلة وعندئذ لا تصل الإشارة المرسلة للمستقبل نهائياً بسبب تبعثر الحزمة المرسلة بعيداً عن المسار الأصلي باتجاهات مختلفة.
- **ومضان الحزمة:** تحدث في حالة كانت كثافة المنطقة المعرضة للاضطرابات الجوية من حجم حزمة الشعاع المرسل وفي هذه الحالة يحدث تأرجح للحزمة المرسلة يعتبره المستقبل ومضان الحزمة والذي يسبب خفوت وانخفاض مستوى الإشارة إلى الضجيج.
- **اتساع الحزمة:** تحدث في حال كانت كثافة المنطقة المعرضة للاضطرابات الجوية أصغر من حجم الشعاع المرسل وفي هذه الحالة جزء من الأشعة المرسلة سوف تتعرض للانكسار والتبعثر مما يتسبب في انخفاض بطاقة الإشارة.

3-9-2 تقنيات التخفيف من الاضطرابات الجوية

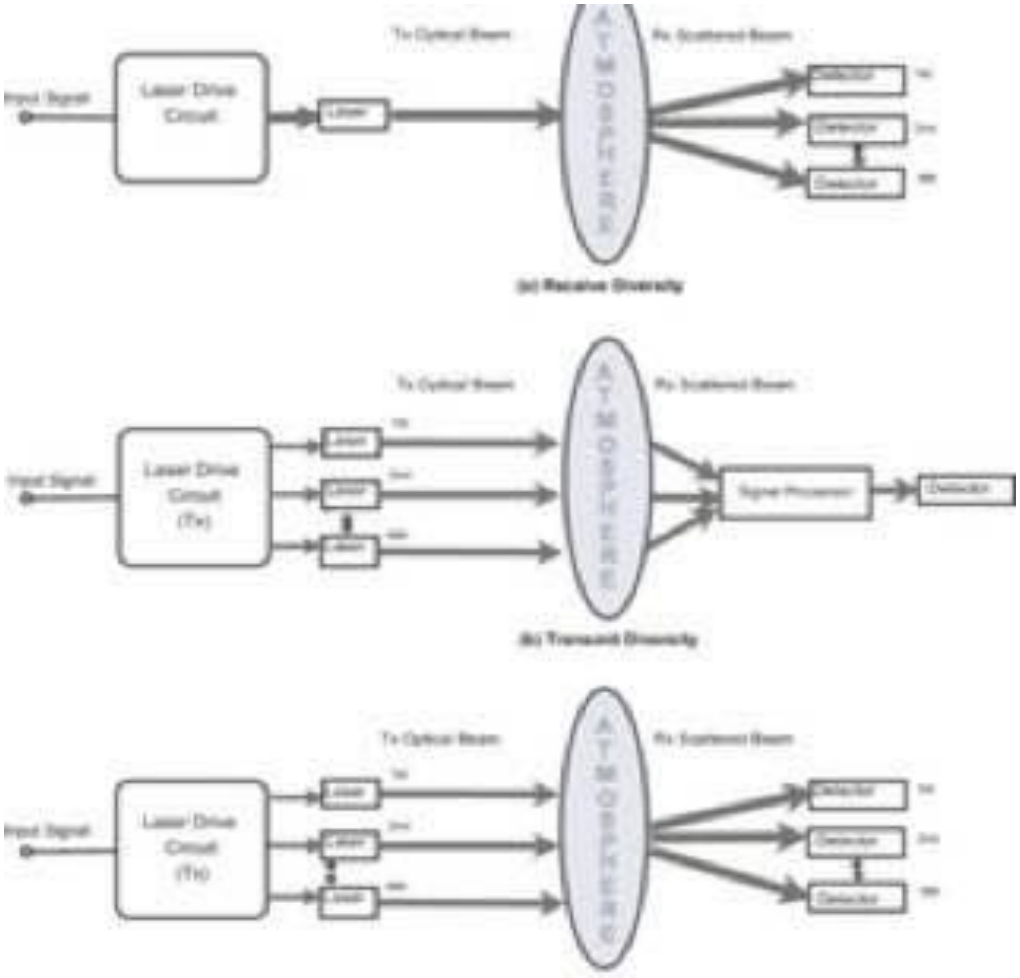
3-9-2-1 تعديل فتحة المستقبل:

تعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق فعالية كما تعتبر من أبسط الطرق لتخفيف تأثير الاضطرابات الجوية على الإشارة الضوئية الواصلة إلى المستقبل. إن العامل الأساسي خلف هذه التقنية هو في حال كانت فتحة المستقبل أكبر من حجم المنطقة المعرضة للاضطرابات الجوية، وبالتالي المستقبل سوف يقوم بتوسيط قيمة هذه الاضطرابات على الفتحة. وسيكون تأثير الومضان في هذه الحالة أقل منه في حالة مستقبل نقطي (مستقبل بفتحة صغيرة جداً) حيث يتم تحديد فتحة المستقبل المثالية حسب خصائص الوصلة الليزرية ومتطلبات النظام.

يساهم تعديل فتحة عدسة المستقبل وزيادتها بنقصان الانحراف المعياري للومضان وهو عامل يستخدم لتحديد الانخفاض في طاقة الاضطرابات بحالة تعديل فتحة المستقبل، وزيادة نسبة الإشارة إلى الضجيج عند المستقبل مما يؤدي إلى تحسين أداء نظام FSO من خلال تخفيف معدل الخطأ لمستوى مقبول.

**3-9-2-2 تعدد المرسلات** والمستقبلات:

لا يمكن دائما زيادة قطر فتحة عدسة المستقبل لبعد مستوى معين حيث ستؤدي لزيادة في ضجيج الخلفية وبالتالي قد لا تكون زيادة فتحة المستقبل الحل المثاني، ولتحقيق نفس مستوى الأداء لفتحة المستقبل يتم استبدال الفتحة الكبيرة بمجموعات من الفتحات الصغيرة مفصولة عن بعضها البعض بمسافات كافية ويمكن استخدام هذه الطريقة عند هاز الإرسال (وتسمى أيضاً بتعدد المرسلات أو في طرف الاستقبال (وتسمى عندئذ بتعدد المستقبلات أو في كلا الجانبين (وتسمى أيضاً بتعدد المدخلات والمخرجات (MIMO للتخفيف من أثر الاضطرابات الجوية.

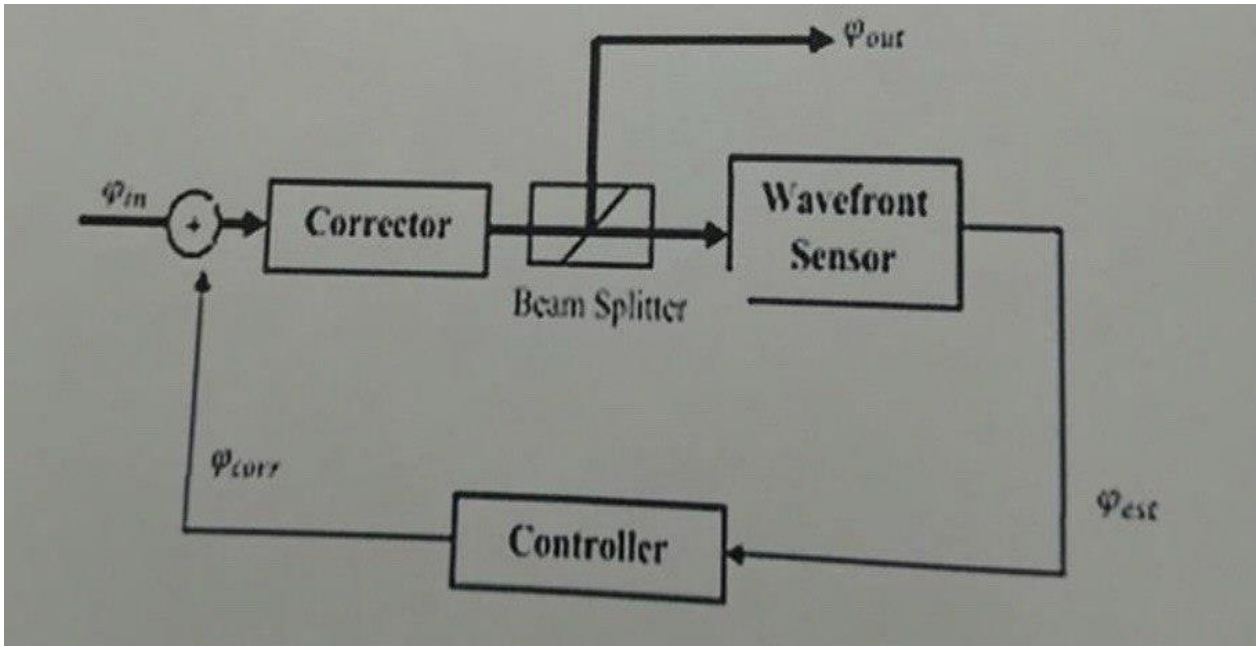


الشكل (3-8) تقنية تعدد المرسلات في أنظمة الاتصالات البصرية في القضاء الحر.

إذا تم استخدام حزمة ليزر واحدة للانتقال عبر الغلاف الجوي فإن الاضطرابات في الغلاف سوف تسبب في انقسام الحزمة إلى أجزاء صغيرة من الحزمة الأساسية. ستتحرك هذه الأجزاء بشكل مستقل عن بعضها بسبب التغيرات في معامل الانكسار للغلاف الجوي بجهة المستقبل سيتم دمج عدة أجزاء إما بتوافق في الطور أو اختلاف في الطور الأجزاء التي يتم دمجها بتوافق في الطور تسبب زيادة في الطاقة في حين الأجزاء التي يتم دمجها باختلاف بالطور ستسبب خفوت شديدة بالإشارة وهذا يؤدي لاضطرابات عشوائية بالطاقة بجهة المستقبل. إذا تم استخدام حزم متعددة مستقلة بدلا من حزمة إرسال واحدة فإن التداخل في الحزم سيؤدي الزيادة الطاقة من الحزم المختلفة وسيقلل من احتمالية حدوث خفوت في الإشارة

**3-9-2-3 البصريات التكيفية**

تستخدم البصريات التكيفية للتخفيف من تأثير الاضطرابات الجوية وتساعد على تقديم حزمة غير مشوهة عبر الغلاف الجوي. نظام البصريات التكيفية هو في الأساس حلقة تحكم مغلقة حيث يتم تصحيح الشعاع مسبقاً عن طريق إضافة مرافق الاضطراب الجوي للإشارة قبل إرسالها للغلاف الجوي. بهذه الحالة يمكن تخفيف الاضطرابات بالمكان والزمان. يتكون نظام الاتصالات البصرية التكيفي من حساس لقياس الطور ومصحح للتعويض عن الاضطرابات الحاصلة ومرآة قابلة للتحريك يتم التحكم بها بواسطة متحكم مناسب.




الشكل (3-9) البنية العامة للبصريات التكيفية.

**3-9-2-4** الترميز:

يمكن استخدام الترميز للتحكم في الأخطاء في أنظمة FSO للتخفيف من تأثير الاضطرابات الجوية التي تسبب ومضان الحزمة حيث يتضمن الترميز بتات إضافية تساعد المستقبل لاحقا في عملية تصحيح الأخطاء والتي تحدث أثناء الإرسال ضمن الجو المضطرب، وبالتالي يؤدي اختيار أساليب الترميز المناسبة لتقليل معدل الخطأ BER الخاصة بالنظام. لا يعمل ترميز القناة على تحسين قدرة حمل المعلومات فحسب بل يقلل أيضاً من طاقة الإشارة الضوئية المطلوبة عند المستقبل ويشار عادة للانخفاض بمستوى الطاقة المطلوبة على أنه ربح الترميز ويعرف على أنه الفرق في مستويات الطاقةبين النظام قبل الترميز والنظام بعد الترميز وتعطى علاقته بالشكل التالي:

$$\mu = 10 \log(\frac{puncode}{pcode})$$

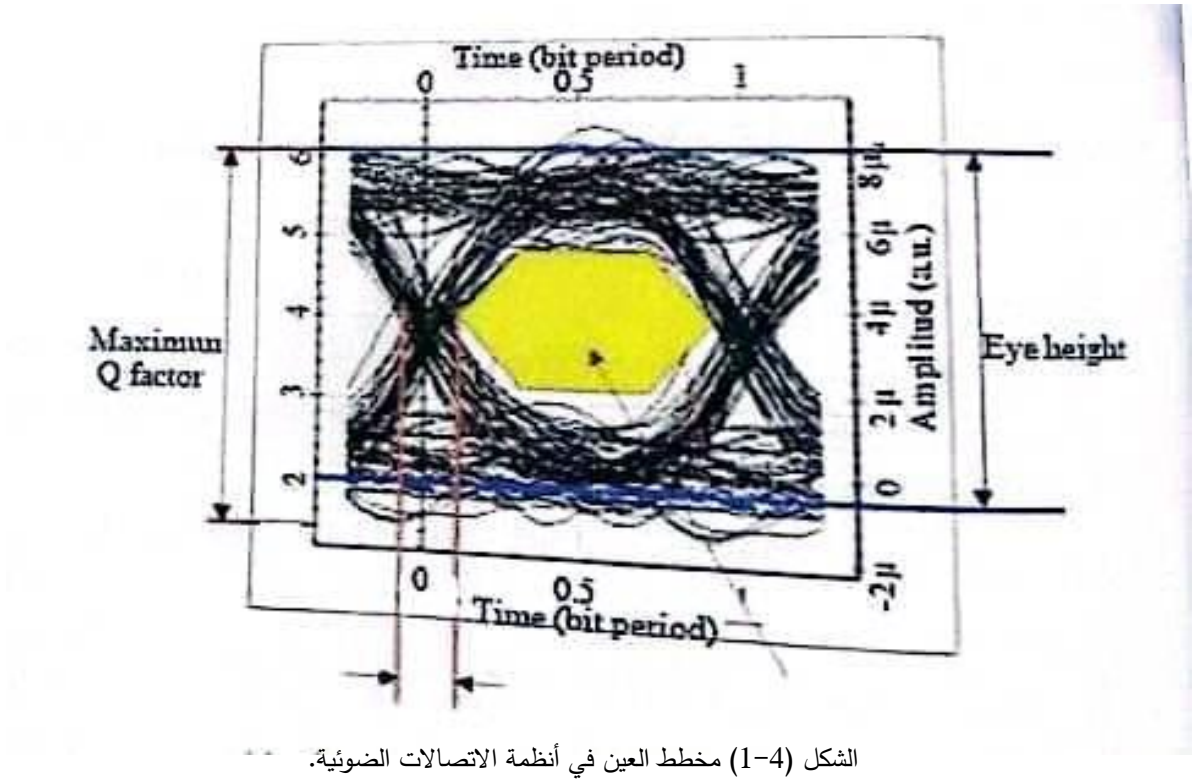
# الفصل الرابع:

# التطبيق العملي والنتائج

## 4-1 محددات الأداء:

هناك العديد من المحددات المعتمدة من أجل تقييم أداء الشبكات الضوئية، وهي معدل الخطأ ومخطط العين ومعامل الجودة، واستطاعة الضجيج واستطاعة الإشارة. أما معد الخطأ فيوصف عدد البتات الخطأ ضمن البتات المستقبلة في نظام اتصالات يعمل بوجود العديد من المنغصات كالضجيج والتداخل والتشوه. ويعرف معدل الخطأ BER بأنه نسبة عدد البتات الخطأ لنسبة عدد البتات المستقبلة. وبالتالي فإن $BER=10^{-9}$ تعني وجود خطأفي بت وحيد من اصل $10^9$ بت يتم استقبالها وكلما كانت قيمة BER منخفضة كان أداءالنظام أفضل ومن أجل أنظمة الاتصالات البصرية فإن معدل الخطأ المسموح به $10^{-9}$.

أما بالنسبة لمخطط العين تراكب لجميع البتات المتماثلة المتداخلة في الإشارة بحيث توضح فتحة العين الفرق بين البت المنطقي 0 والبت المنطقي 1 وكلما كانت فتحة الهين مفتوحة وواسعة بشكل جيد فهذا يعني أنه بالإمكانالتفريق بين البتين المنطقيين 0 و1 في المستقبل وبالتالي الحصول على نسبة إشارة الى الضجيج أفضلز وهناك العديد من مؤشرات الأداء التي يمكن قراءتها من مخطط العين مثل تذبذب الإشارة، ويمكن التعبير عنه في المعطيات المرسلة والتي تتغير خلال الزمن.ويبين الشكل(4-1)مخطط العينوالمعلومات التي يمكن استخلاصها.




الشكل (4-1) مخطط العين في أنظمة الاتصالات الضوئية.

وبالنسبة معامل الجودة يعبر عن الفقد في الإشارة بحيث نقابل القيمة العظمة لمعامل الجودة أصغر قيمة فقد في طاقة الإشارة. ويعتبر معامل الجودة من أهم المعاملات ومحددات القياس كونه مقياس ملائم لجوجدة النظام الناتجة عندما يكون هناك جمع لأكثر من نسبة إشارة للضجيج ضمن مقدار واحد. حيث هناك فقط مستويان محتملان للإشارة في أنظمة الاتصالات الرقمية الثنائية وكل مستوى من المستويين له مستوى ضجيج متعلق به ومختلف عن الآخر.

## 4-2 تصميم الشبكة:

تم تصميم نظام اتصالات FSO ومحاكاته لتوصيف الأداء باستخدام برنامج OPTISYSTEM 0.7 وهو أداة تصميم قوية تمكن من تخطيط واختبار ومحاكاة كل أنواع الوصلات الضوئية تقريباً في طبقة الإرسال لطيف واسع من الشبكات الضوئية مما يقلل من متطلبات الوقت والتكلفة المتعلقة بتصميم النظم البصرية وبط مكوناتها.

### 4-2-1 توصيف النظام:

قمنا بتقسيم نظام الاتصال المدروس لثلاثة أقسام وهي:

- مرحلة الإرسال: وتتألف من خمسة أجزاء:

1. مولد المعلومات Pseudo-Random Binary Sequence Generator :

يعطي هذا المولد المعلومات التي يتم ÷رسالها بحيث يثوم بتوليد سلسة من البتات على شكل نبضات ثنائية (سلسة من الأصفار والواحدات) بنمط معين وقابل للتكرار.

2. مولد النبضات NRZ:

هذا العنصر يقوم بترميز البيانات القادمة من العنصر السابق باستخدام تقنية عدم الرجوع للصفر وهو عبارة عن ترميز ثنائي تمثل القيمة العليا المستوى العالي 1 منطقي وتمثل القيمة الدنيا المستوى المنخفض 0 منطقي.

3. الليزر المستمر:

وهو مرسل ليزري مستمر يستخدم لنقل الإشارة باستطاعة ما ضوئياً عبر الليف.

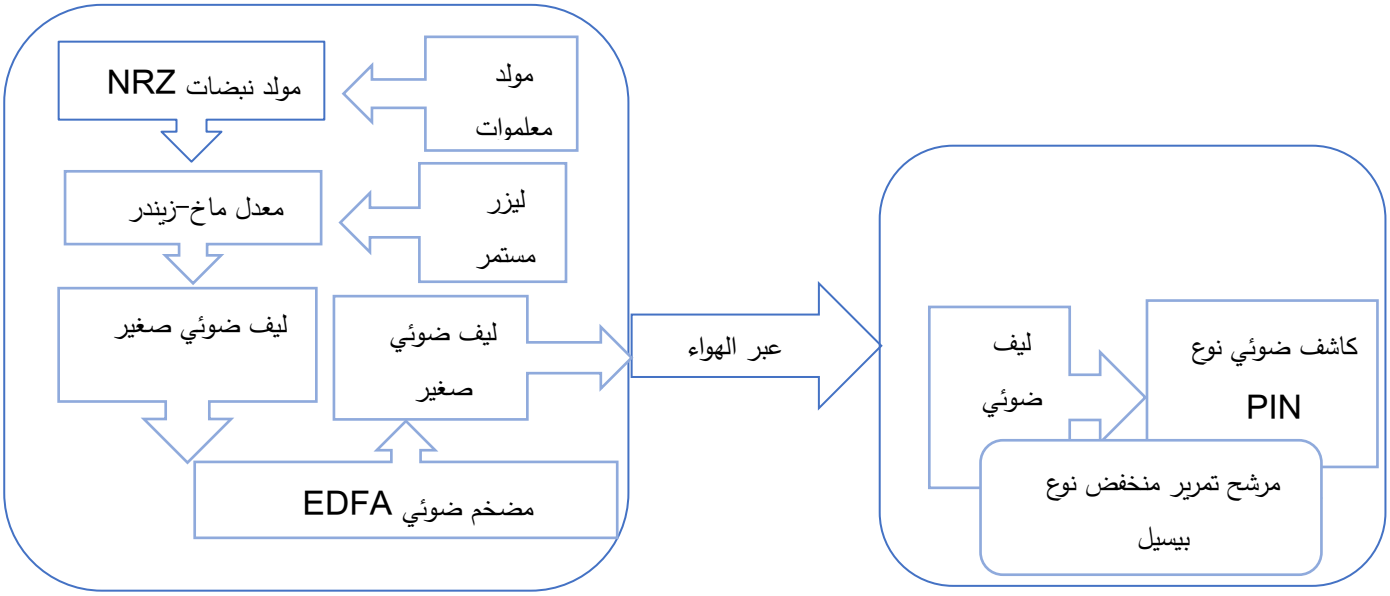
4. معدل ماخ-زيندر:

وهو معدل ضوئي وظيفته تغيير شدة مصدر الضوء من الليزر وفقاً لخرج مولد النبضات NRZ (أي تقطيع إشارة الييزر بتردد مولد النبضات NRZ).

5. اللبف الضوئي: وسط نقل صغير كوصلة بين المراحل.

- مرحلة وسط الأنتشار: تعتبر المسافة الحرة بين المرسل و المستقبل هي قناة FSO وهي وسيلة انتشار للضوء الذي يتم إراسله.
- مرحلة الاستقبال: وتتضمن جزئين وهما:
  - ليف ضوئي: لنقل الإشارة القادمة من المرسل للمرحلة التي تليها (وصلة ضوئية).
  - الكاشف الضوئي: كاشف ضوئي من نوع PIN قادر على كشف الإشارة الضوئية بطولها الموجي وعرض النطاق لبتررد للنظام.
- مرشحات ترددات: وفي هذا الجزء قمنا باستخدام مرشحات التمرير المنخفض بيسل:

أحد مرشحات التمرير المنخفضة يتم استخدامه بعد مرحلة الكاشف الضوئي لتصفية الترددات العالية غير المرغوب بها بتردد قطع 75BitRate .0.



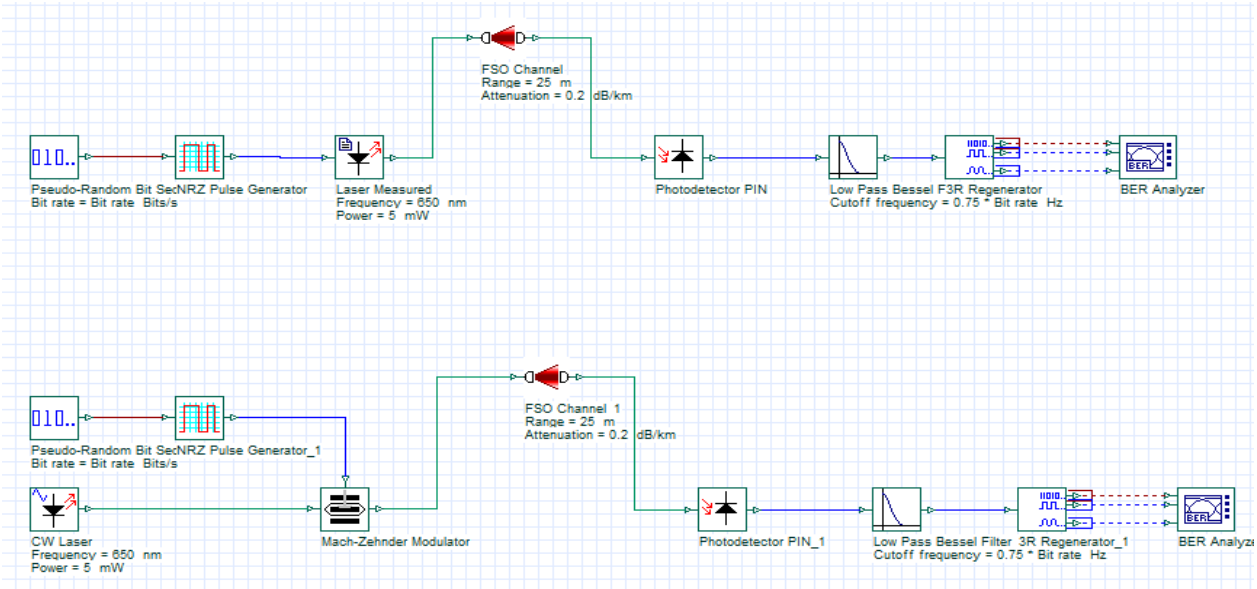

الشكل (4–2) المخطط الصندوقي العام للشبكة الشبكة الضوئية المصممة.

الجدول (4-1) المعاملات المستخدمة في المحاكاة:

| اسم المعامل | قيمة المعامل |
|---|---|
| طاقة الإرسال | 30dBm |
| قطر فتحة المستقبل | 9cm |
| قطر فتحة الإرسال | 0.5cm |
| معدل نقل البيانات | 1.25Gbps |
| طول الموجة المستخدمة | 1550nm |
| مسافة الإرسال | 2km |
| تباعد حزمة الإرسال | 1mrad |

## 4-2-2 محاكاة النظام من أجل مستقبل ومرسل وحيد:

يوضح الشكل (4-3) التصميم المستخدم لمحاكات النظام:



**اتصال ليزري عبر الهواء :**

يقوم النظام بترميز الإشارة بتقنية NRZ ومن ثم تعديلها بواسطة معدل ماك زيندر وإرسالها بليف قصيؤ للربط مع مرحلة التضخيم الضوئي قبل إرسالها عبر الهواء وباستخدام مقياس الاستطاعة الضوئي قمنا بقياس الإشارة بعد تضخيمها ليتم إرسال الإشارة عن طريق عدسة المرسل ذات القطر 0.5cm بزاوية إشعاع 1mrad من أجل مسافة 2km وبمعدل إرسال 1.25Gbps ليتم استقبالها عن طريق عدسة استقبال وترشيح الإشارة بواسطة مرشح يسيل للترددات المنخفضة.

## 4-2-2-1 نتائج زيادة قطر فتحة عدسة المستقبل:

- معدل الرسال 1.25Gbps.
- المسافة بين العدستين 2km.
- استطاعة الارسال 30dBm.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الأشعاع 1mRad ونوع المرشح المسخدم Low pass Bessel filter.

| قطر عدسة المستقبل cm | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q-factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 1 | 0 | -87.39 | -82.33 | 0 |
| 5 | 0.0059 | 2.49 | 87.39 | -78.46 | -13.32e-6 |
| 6 | 0.00015 | 3.59 | 87.38 | -75.38 | 1.46e-6 |
| 7 | 5.23e-7 | 4.87 | -87.38 | -72.62 | 4.65e-6 |
| 8 | 1.06e-10 | 6.34 | -87.37 | -70.30 | 8.33e-6 |
| 9 | 5.87e-16 | 8.0 | -87.37 | -68.26 | 1.25e-5 |
| 10 | 3.5e-25 | 9.84 | -87.36 | -66.43 | 1.72e-5 |
| 11 | 8.2e-33 | 11.86 | -87.35 | -64.77 | 2.24e-5 |
| 12 | 2.45e-45 | 14.07 | -87.34 | -63.26 | 2.8e-5 |

الجدول (4-2) مؤشرات الأداء – تغيير قطر عدسة الاسقبال – مستقبل وحيد.

يتضح من الجدول السابق أن معدل الخطأ ومعامل الجودة ةاستطاعتي الإشارة والضجيج تبدأ بالتحسن الفعلي وتأخذ قيم مثالية بدءاً من قطر عدسة مستقبل يساوي 9cm حيث يكون معدل الخطأ من رتبة 16 ويبلغ معامل الجودة 8 وذلك من أجل معدل إرسال 1.25Gbps وباستخدام مرشح بيسيل.

## 4-2-2-2 نتائج زيادة المسافة بين العدستين:

- معدل الارسال 1.25Gbps.
- استطاعة الارسال 30dBm.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- قطر فتحة عدسة المستقبل 9cm.

- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on–off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad ونوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.

| ارتفاع فتحة العين | استطاعة الإشارة المستقبلة | استطاعة الضجيج | عامل الجودة Q–factor | معدل الخطأ BER | المسافة بين العدستين km |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.0078 | −36.26 | −86.08 | 248.4 | 0 | 1 |
| 0.0034 | −43.42 | −86.79 | 127.2 | 0 | 1.2 |
| 0.00015 | −50.08 | −87.11 | 62.12 | 0 | 1.4 |
| 7.09e−5 | −56.39 | −87.26 | 30.61 | 4.4e−206 | 1.6 |
| 3.16e−5 | −62.43 | −87.33 | 15.46 | 2.97e−54 | 1.8 |
| 1.25e−5 | −68.28 | −87.37 | 8.0 | 5.87e−16 | 2 |
| 2.99e−6 | −73.99 | −87.33 | 4.28 | 1.22e−5 | 2.2 |
| −1.87e−6 | −79.40 | −87.39 | 2.24 | 0.0118 | 2.4 |

صغرى عند مسافة إرسال 2km حيق يكون معدل الخطأ من رتبة 16 ويبلغ معامل الجودة 8 وذلك من أجل معدل ارسال 1.25Gbps وباستخدام مرشح بيسيل.

الجدول (4–3) مؤشرات الأداء عند تغير المسافة بين العدستين في حالة مستقبل وحيد.

### 4–2–2–3 نتائج معدل استطاعة الارسال:

- معدل الارسال 1.25Gbps.
- المسافة بين العدستين 2km.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- قطر فتحة عدسة المستقبل 9cm.

- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on–off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad.
- نوع المرشح Low pass Bessel filter.

| ارتفاع فتحة العين | استطاعة الإشارة المستقبلة | استطاعة الضجيج | عامل الجودة Q–factor | معدل الخطأ BER | استطاعة الارسال dBm |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | −100 | −87.44 | 0 | 1 | 10 |
| 0 | −98.12 | −87.44 | 0 | 1 | 15 |
| 0 | −88.22 | −87.33 | 0 | 1 | 20 |
| 1.25e−5 | −68.26 | −87.37 | 8.01 | 5.8e−16 | 30 |
| 1.76e−5 | −66.26 | −87.36 | 10.03 | 5.15e—24 | 31 |
| 2.42e−5 | −64.26 | −87.35 | 12.88 | 1.3e−36 | 32 |
| 5.57e−5 | −87.29 | −58.26 | −24.87 | −5.67e−136 | 32 |

الجدول (4–4) مؤشرات الأداء – تغير استطاعة الارسال – مستقبل وحيد.

وبزيادة معدل استطاعة الإرسال نلاحظ أن معدل الخطأ ومعمل الجودة واستطاعتي الإشارة والضجيج تبدأ بالتحسن الفعلي ونأخذ قيم مقبولة حيث يكون معدل الخطأ من رتبة 16 ويبلغ معمل الجودة 8.01 وذلك من أجل استطاعة إرسال 30dBm وباستخدام مرشح بيسيل.

### 4–2–2–4 نتائج معدل نقل البيانات:

- استطاعة الارسال 30dBm.
- المسافة بين العدستين 2km.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.

- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- قطر فتحة عدسة المستقبل 9cm.
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad ونوع المرشح Low pass Bessel filter.

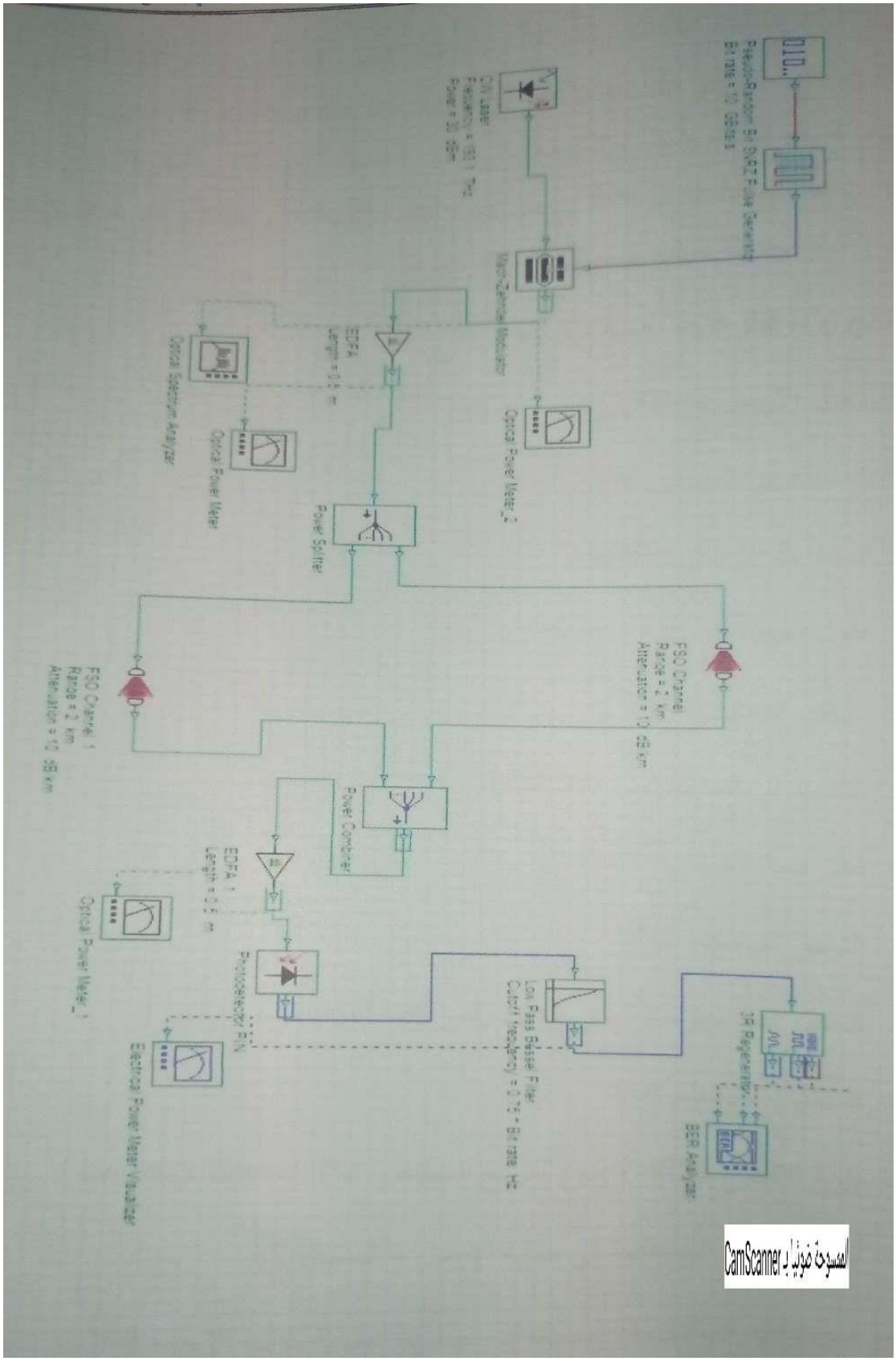
| ارتفاع فتحة العين | استطاعة الإشارة المستقبلة | استطاعة الضجيج | عامل الجودة Q-factor | معدل الخطأ BER | معدل النقل Gbps |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.12e-5 | -72.87 | -87.38 | 6.82 | 2.5e-12 | 0.6 |
| 1.20e-5 | -71.07 | -87.38 | 7.38 | 5.54e-14 | 0.8 |
| 1.26e-5 | -69.04 | -87.34 | 7.99 | 6.2e-16 | 1 |
| 1.16e-5 | -68.10 | -87.46 | 7.32 | 1.13e-13 | 1.4 |
| 1.08e-5 | -68.68 | -87.42 | 6.62 | 1.36e-11 | 1.6 |
| 1.04e-5 | -67.64 | -87.4 | 6.32 | 1.2e-10 | 1.8 |
| 1.12e-5 | -67.30 | -87.49 | 8.25 | 7.3e-17 | 2 |
| -1.12e-5 | -67.38 | 87.42 | 6.88 | 2.9e-12 | 2.2 |

الجدول (4-5) مؤشرات الأداء – تغير معدل النقل – مستقبل وحيد.

من الجداول السابقة نلاحظ أنه للحصول على إشارة مستقبلة بمعامل جودة عالي و BER منخفض نوعا ما يجب تكبير فتحة عدسة المستقبل بحيث لا يمكن كشف اللإشارة عند فتحات صغيرة وهذا ما دفعنا باتجاه التصميم الثاني لمحاولة تحسين الأداء ضمن الظروف الجوية المختلفة.

### 4-2-3 محاكاة نظام اتصال ليزري عبر الهواء – تقنية تعدد المرسلات والمستقبلات:

يوضح الشكل (4-21) التصميم الثاني لمحاكاة نظام اتصالات ليزري عبر الهواء، في هذا التصميم نستخدم تقنية تعديل فتحة عدسة المستقبل وتقنية تعدد المرسلات والمستقبلات حيث تجري عملية تجزئة الحزمة المرسلة لجزئين مع مراعاة أن تكون خصائص العدسات متماثلة ومن ثم دراسة التغييرات والتحسينات عن التصميم السابق.




الشكل (4–5) محاكاة الصميم الثاني – تعدد المرسلات والمستقبلات.

يقوم النظام بالترميز الإشارة بتقينة NRZ ومن ثم تعديلها بواسطة معدل مالك زيندر وإرسالها بليف قصير لتربط مع مرحلة التضخيم الضوئي قبل إرسالها عبر الهواء وباستخدام مقياس الاستطاعة الضوئي قمنا بقياس الإشارة بعد تضخيمها ليتم إرسال الإشارة عن طريق عدسة المرسل ذات القطر 0.5cm بزاوية إشعاع 1mrad من أجل مسافة إرسال 2km وبعدل إرسال 1.25Gbps ليتم استقبالها عن طريق عدسة استقبال وترشيح الإشارة بواسطة مرشح بيسيل للترددات المنخفضة.

### 4-2-3-1 نتائج زيادة قطر فتحة عدسة المستقبل:

- معدل الارسال 1.25Gbps.
- المسافة بين العدستين 2km.
- استطاعة الارسال 30dBm.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad ونوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.
- عدد العدسات المستخمة في عملية الإرسال والاستقبال 2.
- المضخمات المستخدمة: المضخمات البصرية المشابة بذرات الإربيوم EDFA.

| قطر عدسة المستقبل cm | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q-factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 1 | 0 | -88.12 | -83.16 | 0 |
| 5 | 0.003 | 2.7 | -88.12 | -79.29 | -6.55e-7 |
| 6 | 4.03e-5 | 3.92 | -88.12 | -76.13 | 2.06e-6 |
| 7 | 3.98e-8 | 5.35 | -88.11 | -73.45 | 5.27e-6 |
| 8 | 1.2e-12 | 6.99 | -88.10 | -71.13 | 8.79e-6 |
| 9 | 4.08e-19 | 8.84 | -88.10 | -69.09 | 1.31e-5 |
| 10 | 6.06e-28 | 10.88 | -88.09 | -67.26 | 1.78e-5 |
| 11 | 1.09e-39 | 13.12 | -88.08 | -65.60 | 2.29e-5 |
| 12 | 1.029e-54 | 15.52 | -88.08 | -64.09 | 2.86e-5 |

الجدول (4-6) مؤشرات الأداء – تغيير قطر عدسة الاستقبال.

يتضح من الجدول السابق أن معدل الخطأ ومعامل الجودة واستطاعتي الإشارة والضجيج تبدأ بالتحسن الفعلي وتأخذ قيم مثالية بدءاً من قطر عدسة مستقبل يساوي 8cm حيث يكون معدل الخطأ من رتبة 12 ويبلغ معامل الجودة 6.99 وذلك من أجل معدل إرسال 1.25Gbps وباستخدام مرشح بيسيل.

### 4-2-3-2 نتائج زيادة المسافة بين العدستين:

- معدل الارسال 1.25Gbps.
- المسافة بين العدستين 2km.

- استطاعة الارسال 30dBm.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad ونوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.
- عدد العدسات المستخمة في عملية الإرسال والاستقبال 2.
- المضخمات المستخدمة: المضخمات البصرية المشابة بذرات الإربيوم EDFA.

تشير النتائج إلى أن معدل الخطأ ومعامل الجودة واستطاعتي الإشارة والضجيج تبدأ بالتحسن الفعلي وتأخذ قيم مثالية عند مسافة إرسال 2km حيث يكون معدل الخطأ من رتبة 19 ويبلغ معامل الجودة 8.84 وذلك من أجل معدل إرسال 2Gbps وباستخدام مرشح بيسل وذلك بسبب استخدام تقنيتي تعدد المرسلات والمستقبلات مما سبب تحسناً ملحوظاً في أداء النظام.

### 4-2-3-3 نتائج زيادة معدل استطاعة الارسال:

- معدل الارسال 1.25Gbps.
- المسافة بين العدستين 2km.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- قطر فتحة عدسة المستقبل 9cm.
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).
- عدد العدسات المستخمة في عملية الإرسال والاستقبال 2.
- المضخمات المستخدمة: المضخمات البصرية المشابة بذرات الإربيوم EDFA.
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad.
- نوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.

| المسافة بين العدستين km | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q-factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 260.09 | -86.82 | -37.09 | 0.0007 |
| 1.2 | 0 | 132.28 | -87.52 | -44.25 | 0.0003 |
| 1.4 | 0 | 65.04 | -87.84 | -50.91 | 0.0001 |
| 1.6 | 6.28e-238 | 32.91 | -87.99 | -57.22 | 7.13e-5 |
| 1.8 | 3.27e-65 | 17.02 | -88.06 | -63.26 | 3.21e-5 |
| 2 | 4.08e-19 | 8.84 | 88.10 | -69.09 | 1.31e-5 |
| 2 | 1.84e-6 | 4.61 | -88.11 | -74.37 | 3.61e-6 |

الجدول (4-7) مؤشرات الأداء عند تغير المسافة بين العدستين.

وبزيادة معدل استطاعة الإرسال نلاحظ أن معدل الخطأ ومعامل الجودة واستطاعتي الإشارة والضجيج تبدأ بالتحسن الفعلي وتأخذ قيم مقبولة حيث يكون معدل الخطأ من رتبو 19 ويبلغ معامل الجودة 8.84 وذلك من أجل استطاعة إرسال 30dBm وباستخدام مرشح بيسل.

### 4-2-3-4 نتائج زيادة نعدل نقل البيانات:

- المسافة بين العدستين 2km.
- استطاعة الارسال 30dBm.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- قطر فتحة عدسة المستقبل 9cm,
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).

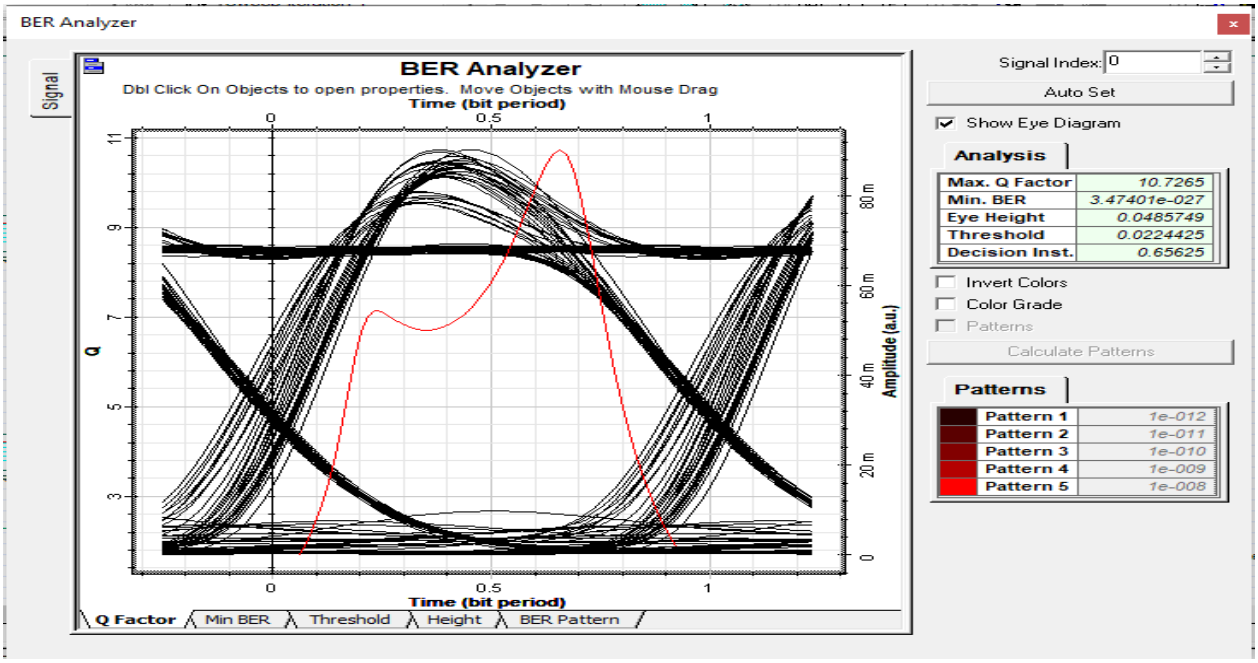
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad ونوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.
- عدد المرسلات والمستقبلات هو 2.

| استطاعة الارسال dBm | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q-factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 1 | 0 | -88.13 | -100 | 0 |
| 15 | 1 | 0 | -88.13 | -98.95 | 0 |
| 20 | 1 | 0 | -88.12 | -89.05 | 0 |
| 30 | 4.08e-19 | 8.84 | -88.10 | -69.09 | 1.31e-5 |
| 31 | 5.81e-29 | 11.09 | -88.09 | -67.09 | 1.83e-5 |
| 32 | 2.91e-44 | 13.89 | -88.08 | -65.09 | 2.48e-5 |
| 35 | 1.31e-159 | 26.88 | -88.02 | -59.09 | 5.62e-5 |

الجدول (4-8) مؤشرات الأداء تغير استطاعة الإرسال.

من الجدول السابق نلاحظ أن النظام يعطي قيم مقبولة لاستطاعة الإشارة المستقبلة واستطاعة الضجيج وكذلك قيماً مثالية لكل من معدل الخطأ وعامل الجودة عند استخدام معدل نقل 2Gbps على الأكثر، حيث تبلغ قيمة معدل الخطأ من رتبة 18 وبمعامل جودة 8.67 وذلك عند استخدام مرشح بيسل مع ملاحظة تدهور النظام بشكل تدريجي قبل وبعد 2Gbps.

| معدل النقل Gbps | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q-factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | 1 | 0 | -88.13 | -100 | 0 |
| 0.8 | 4.9e-11 | 6.36 | -88.09 | -74.13 | 1.007e-5 |
| 1 | 1.10e-16 | 8.18 | -88.14 | -70.34 | 1.25e-5 |
| 1.4 | 4.34e-8 | 5.28 | -88.08 | -69.90 | 8.36e-6 |
| 1.6 | 1.18e-10 | 6.32 | -88.01 | -67.57 | 1.04e-5 |
| 1.8 | 5.97e-12 | 6.77 | -88.0 | -67.63 | 1.09e-5 |
| 2 | 1.92e-18 | 8.67 | -88.02 | -68.09 | 1.31e-5 |
| 2.2 | 4.12e-11 | 6.48 | -88.12 | -68.11 | 1.03e-5 |

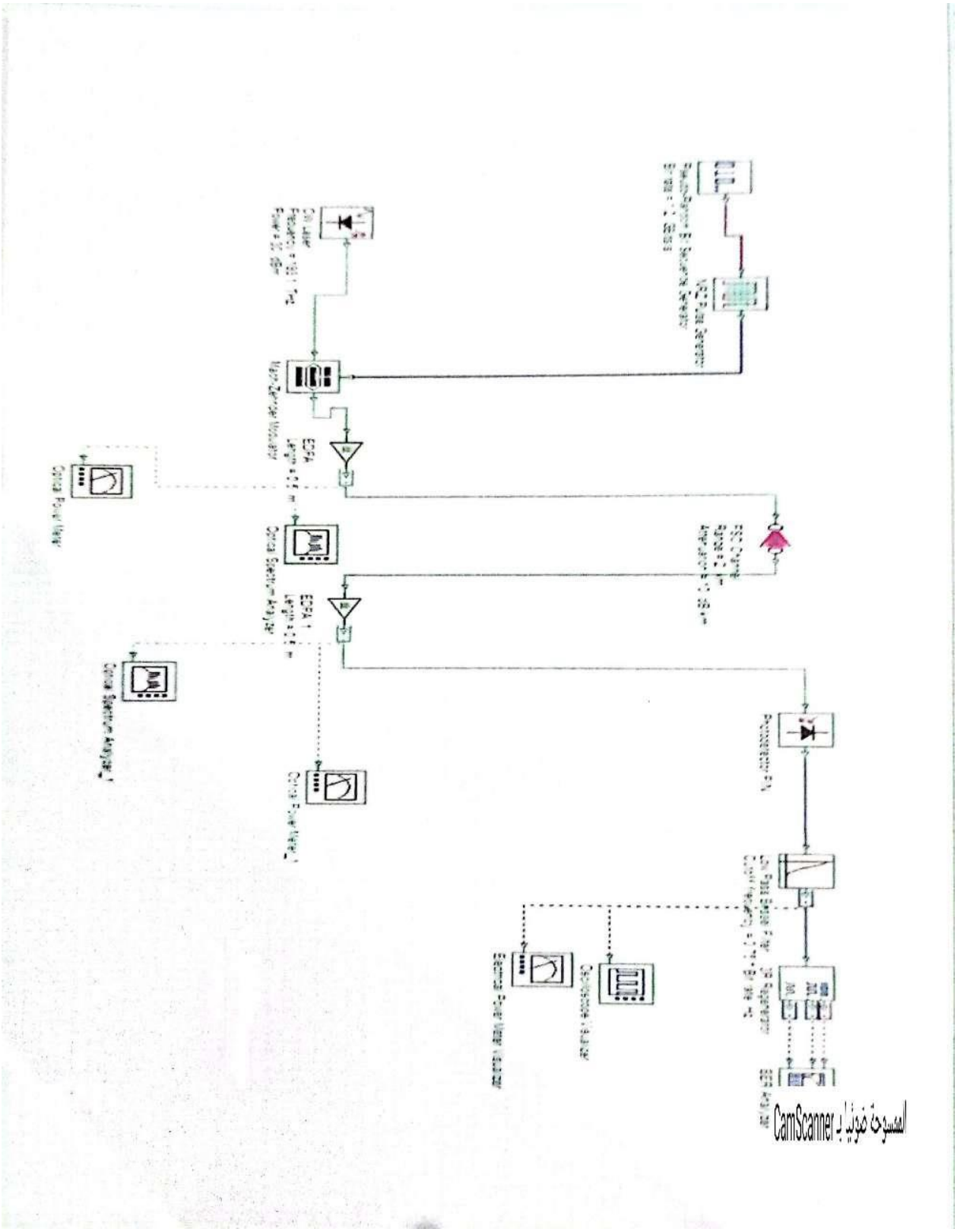



الشكل (4-7) مخطط العين للتصميم الثاني عند قطر عدسة استقبال 9cm.

مع التحسن الملحوظ بالتصميم الثاني على التصميم الأول مازال بالأمكان تحسين الأداء وتحقيق اتصال موثوق بشكل أكبر لذلك انتلقنا لتصميم ثالث يسمح بدراسة أثر زيادة عدد المرسلات والمستقبلات حيث قمنا بتقسيم الحزمة إلى ثلاثة أجزاء بطرف المستقبل بثلاث عدسات ويتم تجميع الحزمة مرة أخرى لإصالها للكاشف.

## 4-2-4 دراسة أثر زيادة عدد المرسلات والمستقبلات على أداء نظام اتصالات FSO:

يبين الشكل التالي التصميم الثالث لمحاكاة نظام اتصالات بصري ليزري عبر الهواء وباستخدام نفس البارامترات السابقة قمنا باستخلاص النتائج ومقارنتها مع الأنظمة السابقة:




الشكل (4–8) محاكاة التصميم الثالث – أثر زيادة عدد المرسلات والمستقبلات.

### 4-2-4-1 نتائج زيادة قطر فتحة عدسة المستقبل:

- معدل الارسال 1.25Gbps.
- المسافة بين العدستين 2km.
- استطاعة الارسال 30dBm.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad ونوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.
- عدد العدسات المستخدمة في عملية الإرسال والاستقبال 3.
- المضخمات المستخدمة: المضخمات البصرية المشابة بذرات الإربيوم EDFA.

| قطر عدسة المستقبل cm | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q-factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 1 | 0 | -88.29 | -83.15 | 0 |
| 5 | 0.0056 | 2.51 | -88.29 | -79.29 | -1.09e-6 |
| 6 | 0.0001 | 3.66 | -88.29 | -76.12 | 1.50e-6 |
| 7 | 2.45e-7 | 5.01 | -88.29 | -73.45 | 4.6e-6 |
| 9 | 2.18e-17 | 6.58 | 88.29 | -71.13 | 83e-6 |
| 9 | 2.44e-17 | 8.83 | -88.28 | -69.09 | 1.25e-5 |
| 10 | 1.33e-25 | 10.38 | -88.28 | -67.26 | 1.71e-5 |
| 11 | 1.01e-36 | 12.59 | -88.27 | -65.60 | 2.24e-5 |
| 12 | 2.9e-51 | 15.01 | -64.09 | -88.27 | 2.8e-5 |

الجدول(4-10) مؤشرات الأداء – تغيير قطر عدسة الاستقبال – ثلاثة مرسلات

يتضح من الجدول السابق أن معدل الخطأ ومعامل الجودة واستطاعتي الإشارة والضجيج تبدأ بالتحسن الفعلي وتأخذ قيم مثالية بدءاً من قطر عدسة مستقبل يساوي 9cm حيث يكون معدل الخطأ من رتبة 17 ويبلغ معامل الجودة 8.83 وذلك من أجل معدل إرسال 1.25Gbps وباستخدام مرشح بيسل.

### 4-2-4-2 نتائج زيادة المسافة بين العدستين:

- معدل الارسال 1.25Gbps.
- استطاعة الارسال 30dBm.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- قطر فتحة عدسة المستقبل 9cm.

- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on–off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad ونوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.
- عدد العدسات المستخمة في عملية الارسال و الاستقبال 3.

| المسافة بين العدستين km | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q–factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 257.32 | –87.19 | –37.09 | 0.00078 |
| 1.2 | 0 | 135.79 | –87.83 | –44.24 | 0.00034 |
| 1.4 | 0 | 67.09 | –88.10 | –50.91 | 0.00015 |
| 1.6 | 1.2e–239 | 33.03 | –88.22 | –57.22 | 7.09e–5 |
| 1.8 | 1.22e–61 | 16.52 | –88.27 | –63.26 | 3.16e–5 |
| 2 | 2.44e–17 | 8.38 | –88.28 | –69.09 | 1.25e–5 |
| 2.2 | 7.37e–6 | 4.31 | –88.29 | –74.73 | 2.99e–6 |

الجدول (4–11) مؤشرات الأداء عند تغير المسافة بين العدستين.

تشير النتائج إلى أن معدل الخطأ ومعمل الجودة واستطاعتي الإشارة والضجيج تبدأ بالتحسن الفعلي وتأخذ قيم مثالية عند مسافة إرسال 2km حيث يكون معدل الخطأ من رتبة 17 ويبلغ معمل الجودة 8.83 وذلك من أجل معدل إرسال 2Gbps وباستخدام مرشح بيسل وذلك بسبب استخدام تقنيتي تعدد المرسلات والمستقبلات مم يسبب تحسناً ملحوظاً في أداء النظام.

### 4-2-4-3 نتائج زيادة معدل استطاعة الارسال:

- معدل الارسال 1.25Gbps.
- المسافة بين العدستين 2km.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- قطر فتحة عدسة المستقبل 9cm.
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- المضخمات المستخدمة: المضخمات البصرية المشابة بذرات الإربيوم EDFA.
- زاوية الاشعاع 1mRad.
- نوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.
- عدد العدسات المستخمة في عملية الارسال و الاستقبال 3.

وبزيادة معدل استطاعة الإرسال نلاحظ أن معدل الخطأ ومعامل الجودة واستطاعتي الإشارة والضجيج تبدأ بالتحسن الفعلي وتأخذ قيم مقبولة حيث يكون معدل الخطأ من رتبة 17 ويبلغ معمل الجودة 8.38 وذلك من أجل استطاعة إرسال 30dBm وباستخدام مرشح بيسل.

| استطاعة الارسال dBm | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q-factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 1 | 0 | -88.28 | -100 | 0 |
| 15 | 1 | 0 | -88.28 | -98.95 | 0 |
| 20 | 1 | 0 | -88.28 | -89.05 | 0 |
| 30 | 2.44e-17 | 8.38 | -88.28 | -69.09 | 1.25e-5 |
| 31 | 1.47e-26 | 10.59 | -88.28 | -67.09 | 1.76e-5 |
| 32 | 4.12e-41 | 13.37 | -88.27 | -65.09 | 2.42e-5 |
| 35 | 2.44e-157 | 26.69 | -88.24 | -59.09 | 5.57e-5 |

الجدول (4-12) مؤشرات الأداء تغير استطاعة الأرسال.

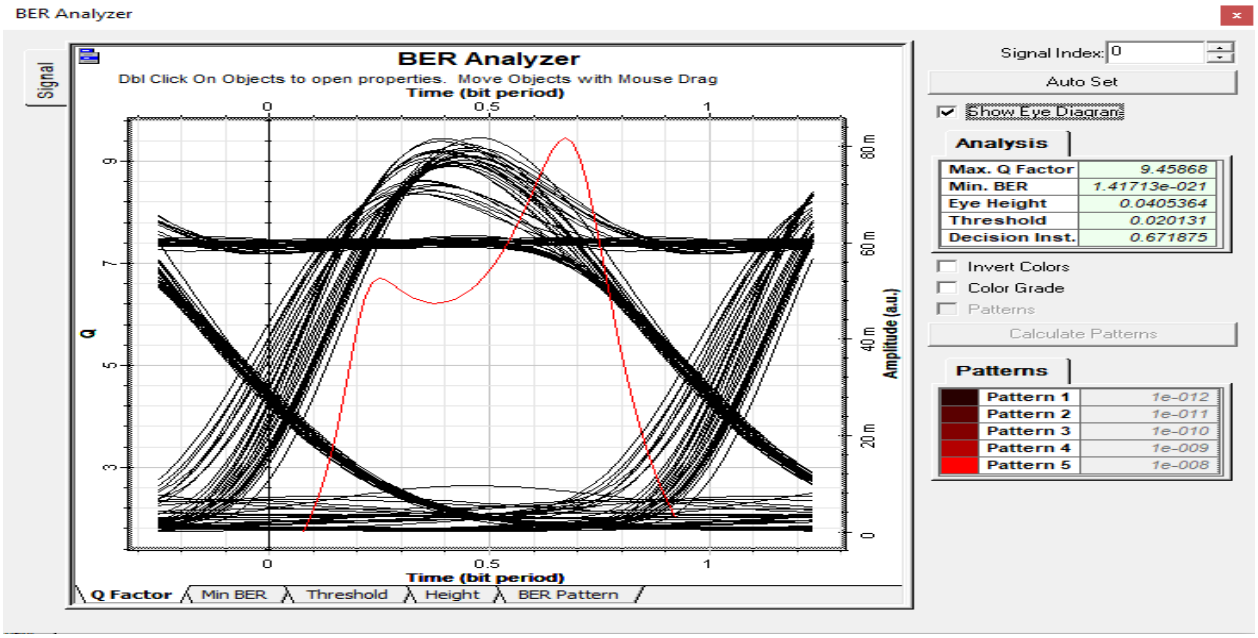
### 4-2-3-4 نتائج زيادة معدل نقل البيانات:

- استطاعة الارسال 30dBm.
- المسافة بين العدستين 2km.
- طول الموجة المستخدمة 1550nm.
- عرض المجال 10MHz.
- التخميد في الفضاء الحر 10dB/km.
- قطر فتحة المرسل 0.5cm.
- قطر فتحة عدسة المستقبل 9cm.
- الترميز المستخدم NRZ.
- المعدل المستخدم ماك زيندر (تعديل رقمي on-off key).
- المستقبل المستخدم PIN.
- زاوية الاشعاع 1mRad ونوع المرشح المستخدم Low pass Bessel filter.
- عدد المرسلات والمستقبلات هو 3.

| معدل النقل Gbps | معدل الخطأ BER | عامل الجودة Q-factor | استطاعة الضجيج | استطاعة الإشارة المستقبلة | ارتفاع فتحة العين |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.6 | 9.15e-15 | 7.59 | -88.25 | -72.87 | 1.21e-5 |
| 0.8 | 4.88e-16 | 7.99 | -88.25 | -71.07 | 1.26e-5 |
| 1 | 3.05e-16 | 8.06 | -88.22 | -70.31 | 1.23e-5 |
| 1.4 | 4.37e-9 | 5.74 | -88.22 | -68.09 | 9.13e-6 |
| 1.6 | 2.89e-13 | 7.20 | -88.21 | -68.11 | 1.14e-5 |
| 1.8 | 2.85e-11 | 6.54 | -88.23 | -67.64 | 1.05e-5 |
| 2 | 9.12e-18 | 8.05 | -88.14 | -67.31 | 1.3e-5 |
| 2.2 | 6.97e-10 | 6.04 | -88.20 | -67.74 | 9.88e-6 |

الجدول (4-13) مؤشرات الأداء – تغير معدل النقل.

من الجدول السابق نلاحظ أن النظام يعطي قيم مقبولة لاستطاعة الإشارة المستقبلة واستطاعة الضجيج وكذلك قيماً مثالية لكل من معدل الخطأ وعامل الجودة عند استخدام معدل نقل 2Gbps على الأكثر، حيث تبلغ قيمة معدل الخطأ من رتبة 18 وبمعامل جودة 8.67 وذلك عند استخدام مرشح بيسل.




## النتائج والاستنتاجات:

- من أجل الحصول على إشارة مستقبلة بمعامل جودة عالي ومعدل خطأ بت منخفض يجب تكبير فتحة عدسة المستقبل حيث لا يمكن كشف الإشارة عند فتحات صغيرة.
- تجزئة الإشارة المرسلة لعدة جزم يساهم في زيادة عامل الجودة للإشارة المستقبلية للقيمة 8.84 ويؤدي لانخفاض الخطأ إلى رتبة 19.
- استحدام تقنية تعدد المرسلات والمستقبلات تؤدي لانخفاض استطاعة الضجيج في طرف الاستقبال إلى القيمة 88.10dBm.
- يمكن استخدام تقنية تعدد المرسلات والمستقبلات بالتوازي مع زيادة قطر عدسة الاستقبال للنقل لمسافات أكبر من 2km.
- عند نقل 2Gbps على الأكثر يبدي نظام تعدد المرسلات والمستقبلات أداء أفضل حيث بنقل الإشارة بمعامل جودة يبلغ 8.6 ومعدل بت من رتبة 18.
- يتطلب كل من نظام تعدد المرسلات والمستقبلات والنظام وحيد الإرسال والاستقبال استطاعة إرسال 30dBm كحد أدنى لتقديم أداء مقبول يلبي الحاجة.

# الفصل الخامس
# الجانب العملي

## 5.1 لمقدمة

يركز هذا الفصل على الجوانب التطبيقية والتقنية لمشروع "نقل البيانات عبر الليزر باستخدام تقنية FSO (Free Space Optics)"، الذي يهدف إلى استبدال الوسائط التقليدية ككابلات الألياف الضوئية بنظام بصري لاسلكي يعتمد على شعاع الليزر. تم بناء النظام باستخدام محول إيثرنت إلى ألياف بصرية تم تعديله ليعمل مع ليزر أحمر بطول موجي 650 نانومتر. الهدف الأساسي من المشروع هو تحقيق نقل بيانات فعّال وعالي السرعة دون الحاجة إلى توصيلات مادية مباشرة، مما يفتح الباب أمام حلول مبتكرة في البيئات التي يصعب فيها تمديد الكابلات.

## 5.2مكونات النظام

تكون النظام من المكونات التالية:



**محولEthernetإلى(MediaConverter)Fiber**

تم استخدام محول من نوع **10GTEK ETHERNET MEDIA CONVERTER** والذي يدعم تحويل الإشارة من إيثرنت (RJ45) إلى ألياف بصرية(SFP/SC) ، ويعمل بسرعة تصل إلى 1 جيجابت في الثانية. هذا المحول يحتوي على دائرة تحويل تعتمد على الشريحة **IC 88E1111**من شركةMarvell ، والتي تعمل على معالجة وتحويل الإشارة من شكلها الكهربائي إلى الشكل البصري.



**ليزردايود :(LaserDiode):**

استُخدم ليزر أحمر بطول موجي **650نانومتر** وبقدرة 5 ميلي واط .(mW) يتميز هذا النوع بسهولة توفره، وقدرته على نقل الإشارات الضوئية لمسافات قصيرة إلى متوسطة، إضافة إلى وضوحه البصري مما يسهل عملية المحاذاة.



**عدسات تركيز:**

استُخدمت عدسات لتجميع وتركيز الشعاع الليزري لتقليل التشتت الضوئي، وزيادة كفاءة النقل بين جهازي الإرسال والاستقبال، وخصوصًا عند المسافات المتوسطة (أكثر من 10 أمتار).



**مستقبل ضوئي :(PhotodiodeModule)**

في الجهة المقابلة، استُخدم مستقبل ضوئي متصل بوحدة تحويل ضوئي-كهربائي، قادرة على استرجاع الإشارة الضوئية وتحويلها مرة أخرى إلى إيثرنت عبر منفذ RJ45.

**أجهزة الحوسبة الطرفية :**

شملت جهازَي حاسوب متصلين بالمحولين على طرفي النظام لاختبار الاتصال، وقياس سرعة نقل البيانات، وفحص جودة الإشارة.

### 5.3 خطوات التنفيذ:

1. **تحليل بنية الإشارة**

تم فهم طريقة انتقال بيانات الإيثرنت عبر وسائط الفايبر، والتأكد من أن الإشارة الناتجة من منفذ SFPيمكن التعامل معها ضوئيًا باستخدام ليزر خارجي.

2. **تعديل المحول**

بعد نزع كابل الفايبر من محول 10GETK، تم توصيل خرج SFP مباشرة إلى وحدة ليزر بعد تمريرها بدائرة تحويل بسيطة لضبط الإشارة، مع الحفاظ على التوافق مع خرج SFP القياسي.

3. **إعداد الليزر**

تم تثبيت الليزر الأحمر على قاعدة ثابتة موجهة مباشرة إلى المستقبل، مع إضافة عدسة لتقليل التشتت. تم تشغيل الليزر بالتزامن مع نشاط البيانات، مما يسمح بنقل الإشارة الرقمية على شكل ومضات ضوئية مشفّرة.

4. **بناء المستقبل البصري**

تضمن الجانب المستقبِل وحدة فوتوديود تعمل على تحويل الشعاع إلى إشارة كهربائية رقمية، ومن ثم تمريرها إلى مدخل Fiber-to-Ethernet لتعود الإشارة إلى شكلها الشبكي القياسي.

5. **اختبارات الأداء**

تم استخدام أدوات مثل iPerf و Wiresharkلاختبار جودة الاتصال، قياس السرعة، وتحليل فقدان الحزم وزمن التأخير

### 5.4 المشاكل والتحديات

واجه المشروع عدة تحديات خلال التنفيذ العملي، من أبرزها:

- **الاهتزاز وفقدان المحاذاة**

أي انحراف بسيط في اتجاه الليزر أدى إلى انقطاع الإشارة. تم حل المشكلة باستخدام قواعد تثبيت محكمة، واختبار العمل في بيئة خالية من الرياح.

- **الضوء المحيط**

بما أن الليزر المستخدم يعمل في الطيف المرئي(650nm) ، فقد تأثرت الإشارة بالضوء الطبيعي والصناعي، مما تطلّب إجراء التجارب في بيئة منخفضة الإضاءة أو استخدام فلاتر ضوئية أمام المستقبل.

- **انخفاض كفاءة الاستقبال**

بسبب التعديل اليدوي على المحول، لم تكن الإشارة الضوئية مكافئة تمامًا لإشارة الفايبر، مما أدى إلى بعض الفقدان. حُلّت المشكلة بتحسين دائرة التغذية والربط للمستقبل، وضبط زاوية الليزر بدقة عالية.

- **محدودية المسافة**

لوحظ أن الإشارة تبدأ بالضعف بعد حوالي 25 مترًا، مما يتطلب تطوير النظام باستخدام ليزر أقوى أو تقنيات تركيز شعاع أدق.

## 5.5 النتائج

تمكن النظام بعد ضبطه من تحقيق **اتصال مستقر بين جهازين** عبر شعاع ليزر دون استخدام أي كابل مادي. بلغت **سرعة نقل البيانات 160 ميغابت في الثانية(Mbps)** ، وهي سرعة ممتازة لمشروع يعتمد على وسيط بصري حر. تم نقل الملفات بكفاءة، وظهر الاتصال في الشبكة وكأنه اتصال سلكي مباشر.

كما أظهرت أدوات تحليل الشبكة استقرارًا في البينغ، مع زمن استجابة منخفض نسبيًا، وعدم فقدان للحزم عند الحفاظ على التوازي البصري. تعكس هذه النتائج نجاح النظام في تطبيق عملي يثبت فعالية FSO في نقل البيانات بديلًا عن البنية التحتية التقليدية.

## 4.6التطبيقات المستقبلية

يفتح هذا المشروع المجال لاستخدام تقنيات FSO في حالات كثيرة، مثل:

- **الاتصال بين مبنيين متقابلين دون تمديد كابل.**
- **الشبكات المؤقتة في حالات الطوارئ أو الكوارث الطبيعية.**
- **ربط أجهزة في مناطق وعرة أو عالية يصعب تمديد الكابلات إليها.**
- **الربط بين وحدات إنترنت الأشياء IoT أو الكاميرات الأمنية** في مواقع متباعدة.

كما يمكن تطوير النظام ليشمل:

- **أنظمة تتبع تلقائي للشعاع باستخدام محركات ومحاور دوارة.**
- **تشفير الإشارة الضوئية** لزيادة الأمان.
- **دمج بروتوكولات تصحيح الخطأ FEC** لضمان سلامة البيانات عبر المسافات الطويلة

# الفصل الخامس
# الخلاصة والأفكار التطويرية والأفاق المستقبلية

## الخلاصة:

نقدم في هذا المشروع دراسة عامة في مجال الاتصالات باستخدام الليزر عبر الهواء ودراسة العوامل المؤثرة على قناة الاتصال الليزرية لنقل بيانات الشبكة بسرعة 1.25 Gbps لمسافات تصل لأكثر من2kmحيث نعرض أولاً دراسة نظرية عن الاتصالات الضوئية في الفضاء الحر ونتحدث عن مزايا وسلبيات هذه التقنية ثم ننتقل لدراسة الضياعات الجوية التي قد تؤثر على الإشارة الليزرية عبر الهواء ومن ثم نقوم باستخدام عدة تقنيات مستخدمة لتحسين الأداء كزيادة قطر فتحة عدسة الاستقبال وتعدد المرسلات والمستقبلات وندرس مؤشرات الأداء لتحديد الأفضل بينها والمناسب من خلال المحاكاة لعدة تصاميم لنظام اتصالات ليزري عبر الهواء باستخدام برنامج optisystem واختيار التصميم الذي يحقق موثوقية عالية وأداء جيد بأقل التكاليف.

## الآفاق المستقبلية:

- في هذا المشروع وتم اعتماد فكرة تعديل فتحة المستقبل وتعدد المرسلات والمستقبلات لتحسين أداء الاتصال وتخفيف الضياعات ولكن هناك حلول أخرى يمكن النظر إليها كالترميز وإمكانية مكاملة هذه الأنظمة مع الأنظمة اللاسلكية الراديوية وغيرها من الحلول التي تحسن من الأداء وتخفف من تأثير الضياعات.
- يمكن التطرق مستقبلاً إلى مشاكل إدارة الطاقة وتأمين استمرارية عمل النظام لأكبر حيز زمني ممكن.
- يمكن تحسين الأداء باستخدام تقنية تعدد المرسلات والمستقبلات وتقنية تغيير قطر عدسة الاستقبال بالتوتزي مع استخدام مضخمات ضوئية.
- دراسة النظام مع مكررات مضاعفة الاستطاعة على طريق الحزمة ومعرفة المسافة المطلوبة لتحقيق افضل استفادة.
- دراسة الوصلة في الفضاء الخارجي حيث التخامد والضياع صفر مع التطبيق تعديلات متعددة مثل wdm&dwdm وتحقيق اقصى معدل ارسال للبيانات ممكن بين الأقمار الصناعية.

# الفصل السادس
# الصعوبات والتحديات واجهت المشروع

## 1-6 الصعوبات والتحديات التي واجهت المشروع :

- صعوبة توفير القطع المكونة للمشروع
- صعوبة تهيئة نظام الاتصالات
- الوضع الأمني في البلاد
- حالة الكهرباء
- صعوبة معايرة نصف قطر الأشعاع الخاص بالليزر
- تلف بعض العناصر أثناء الاستخدام
- عدم كفاءة العناصر الغير مستوردة

# قائمة المراجع

[1] A. Müller.etc.2024 . "**Advancements in III-V Semiconductor Lasers for Free-Space Optical Communications**".

[2] K. Tanaka .etc.2023."**High-Power UV LED Arrays for Atmospheric Transmission**".

[3] S. Petrović.etc.2024. "**Low-Noise Avalanche Photodiodes for Turbulent FSO Channels**".

[4] M. O'Sullivan.etc.2023. "**Adaptive Receivers for Hybrid RF/FSO Systems**".

[5] E. Johnson.etc.2024. ."**Silicon Photonics for Coherent Optical Beam Steering**".

[6] G. Rossi .etc.2023."**Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers Using MEMS**".

[7] B. Thrane.etc.2024. "**Terabit/s FSO Links Under Fog and Turbulence**".

[8] C. Fischer .etc.2023."**Dual-Polarization Techniques for 5G Backhaul FSO**".

[9] R. Costa .etc.2024."**Machine Learning-Based QoS Optimization for FSO Networks**".

[10] T. Nguyen.etc.2023. "**Latency-Sensitive Protocols for Drone-Assisted FSO**".

[11] K. Watanabe .etc.2024."**Dynamic Traffic Distribution in Hybrid RF/FSO Data Centers**".