



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة بابل

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء / المرحلة الرابعة

البك الاسلكي الضوئي و التوهين الحاصل خلاله

بحث تخرج مقدم الى

عمادة كلية التربية للعلوم الصرفة / قسم الفيزياء وهو جزء من متطلبات نيل
درجة البكالوريوس / تربية في الفيزياء

اعداد

ضحى عبد الرزاق كريم

اشراف

د. علي رزاق

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{وَقَدْ رَبَّنِي عَلِيمًا}

صدق الله العلي العظيم

سورة طه - آية 114

الأمعاء

إلى زوجي الغالي د. زمان عبيد

أمدك ثمرة هذا الحب، عرفانا بدعمك اللامحدود، وصبرك، وتشجيعك

الدائم لي في كل خطوة

كعب السند قبل أن أبدأ، والقوة التي منحني الاستمرار حتى النهاية

وجودك في حياتي نعمة أعتز بها، وهذا الإنجاز ما كان ليكتمل لولاك بعد الله

لك مني كل الحب والتقدير والامتنان

الشكر و التقدير

الحمد لله الذي وفقني وأعانني على إتمام هذا البحث
أتقدم بخالص الشكر ومعظيم الامتنان لكل من كان له دور في إنجاز هذا العمل،
وأسأل الله أن يجزيهم عنى خير الجزاء

وأخص بالشكر أسرتي الكريمة لما قدموه لي من دعم معنوي وتشجيع مستمر،
وكان لوقوفهم إلى جانبي الأثر الكبير في تذليل الصعوبات ومواصلة العمل
حتى إتمام هذا البحث

كما أتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى أساتذتي الأفاضل لما قدموه من توجيه
علمي وملاحظات قيّمة أسهمت في إخراج هذا البحث بصورته العلمية، ولا أنسى
كل من قدّم لي المساعدة من زملاء وأصدقاء

وفي الختام، أسأل الله أن يجعل هذا العمل خالصًا لوجهه الكريم، وأن ينفع به

جدول المحتويات

العنوان	رقم الصفحة
الاية القرانية	أ
الاهداء	ب
شكر و تقدير	ج
الفصل الأول	
المقدمة	1
المنارات و الحمام	2
التلغراف و الهاتف	2
الراديو و التلفاز	3
الحواسيب و الانترنت	3
تاريخ الاتصالات البشرية	4
المنتجات لاتجاريه للاتصالات البصرية	5
الفصل الثاني	
المقدمة	7
البث اللاسلكي	10
الاتصالات اللاسلكية البصرية في الفضاء الحر	11
مكونات منظومة الاتصالات اللاسلكية البصرية	13
الاطوال الموجية العاملة في الاتصالات اللاسلكية البصرية	18
الضوء و الطيف الكهرومغناطيسي و ضوء الليزر	19
العوامل المسببة للتوهين الجوي في منظومة الاتصالات اللاسلكية البصرية	21
الضوضاء	25
تطبيقات الاتصالات اللاسلكية البصرية	27
محاسن و مساوى الاتصالات اللاسلكية البصرية	30
الفصل الرابع	
المناقشة	32
الاستنتاجات	33
المصادر	34

الفصل الأول

1-1 المقدمة :-

شهد العالم في العقود الأخيرة تطورًا متسارعًا في تقنيات الاتصالات، نتيجة الزيادة الكبيرة في الطلب على نقل البيانات بسرعات عالية وكفاءة أكبر، مع تقليل التداخل والتأخير. وقد أدى هذا التطور إلى البحث عن بدائل وتقنيات حديثة قادرة على تلبية متطلبات الأنظمة الاتصالية المتقدمة، ومن بين هذه التقنيات برزت تقنية البث اللاسلكي الضوئي كأحد الحلول الواعدة في مجال الاتصالات الحديثة. يعتمد البث اللاسلكي الضوئي على استخدام الموجات الضوئية، سواء كانت في نطاق الضوء المرئي أو الأشعة تحت الحمراء، لنقل المعلومات عبر الفضاء الحر دون الحاجة إلى وسائط مادية مثل الألياف الضوئية أو الكابلات التقليدية. وتتميز هذه التقنية بعدة مزايا، من أهمها السعات العالية لنقل البيانات، وانخفاض مستوى التداخل الكهرومغناطيسي، وارتفاع مستوى الأمان، بالإضافة إلى سهولة التركيب وقلة التكلفة مقارنة ببعض تقنيات الاتصالات الأخرى. وعلى الرغم من المزايا الكبيرة التي يوفرها البث اللاسلكي الضوئي، إلا أنه يواجه مجموعة من التحديات التي تؤثر بشكل مباشر على كفاءة وأداء النظام، ويُعد التوهين. من أبرز هذه التحديات. حيث يشير التوهين إلى الانخفاض التدريجي في شدة الإشارة الضوئية أثناء انتقالها عبر الوسط الناقل، مما يؤدي إلى تقليل جودة الإشارة المستقبلية ويؤثر على موثوقية الاتصال. ينشأ التوهين في أنظمة البث اللاسلكي الضوئي نتيجة عدة عوامل، من بينها الامتصاص والتشتت الناتج عن جزيئات الهواء، والظروف الجوية المختلفة مثل الضباب، والأمطار، والغبار، إضافة إلى تأثير المسافة بين المرسل والمستقبل وعدم دقة المحاذاة بينهما. وتزداد أهمية دراسة هذه العوامل في البيئات المفتوحة، حيث تتأثر الإشارة الضوئية بشكل كبير بالتغيرات المناخية والبيئية. إن فهم ظاهرة التوهين وتحليل مسبباتها يُعد أمرًا أساسيًا لتصميم أنظمة بث لاسلكي ضوئي ذات كفاءة عالية وأداء مستقر. كما أن دراسة التوهين تساهم في تطوير تقنيات تحسين الإشارة، واختيار الأطوال الموجية المناسبة، وتحديد المسافات المثلى للإرسال، مما يساعد في تقليل فقدان الإشارة وتحسين جودة الاتصال. يهدف هذا البحث إلى تسليط الضوء على مفهوم البث اللاسلكي الضوئي، وشرح آلية عمله، مع التركيز بشكل خاص على ظاهرة التوهين والعوامل المؤثرة فيها. كما يتناول البحث دراسة تأثير التوهين على أداء النظام، واستعراض بعض الأساليب المستخدمة للحد من آثاره، بما يساهم في تعزيز كفاءة أنظمة الاتصالات الضوئية اللاسلكية وتوسيع نطاق تطبيقاتها المستقبلية [1].

1-2 المنارات و الحمام

استخدم الحمام الزاجل كوسيلة لنقل الرسائل عبر التاريخ منذ آلاف السنين في ثقافات وحضارات متعددة، ويُعتقد أن أصول استخدامه في التدريب نقلت عن الفرس القدماء الذين درّبوا الطيور على الرجوع إلى موطنها بعد إطلاقها حاملةً الرسائل، وكانت هذه المهارة أساس نظام "البريد بالحمام وقد استخدم الرومان الحمام الزاجل في شؤونهم العسكرية منذ أكثر من ألفي عام، وقد ذكر المؤرخ فرونتينوس أن يوليوس قيصر استعمل الحمام لنقل الرسائل خلال حملاته في غاليا (حاليا فرنسا) كما كانت تقاليد عديدة في العصور القديمة تستفيد من قدرة الحمام على الطيران لمسافات طويلة، فعلى سبيل المثال كان يُستخدم لإبلاغ أسماء الفائزين في الألعاب الأولمبية القديمة إلى المدن المختلفة عن طريق الحمام الزاجل وفي أوائل القرن التاسع عشر الميلادي، أنشأت الحكومة الهولندية نظامًا من الحمام الزاجل لنقل الرسائل في جاوة وسومطرة في آسيا، حيث كانت الطيور تُستخدم في الشبكات المدنية والعسكرية لنقل الأخبار قبل انتشار التلغراف في عام 1860 استخدم الصحفي ورائد تأسيس وكالة رويترز، بول جوليوس رويتر أسطولًا من أكثر من 45 طائرًا لنقل أسعار الأسهم والأخبار بين آخن (المانيا) وبروكسل (بلجيكا) خلال فترة انقطاع خط التلغراف، وقد استمرت هذه الخدمة لنحو سنة حتى تم ربط خطوط التلغراف بين المدن وأغلق هذا الطريق البديل [2]

1-3 التلغراف و الهاتف:

شهد القرن التاسع عشر تطورًا كبيرًا في تقنيات الاتصالات السلكية، حيث قام المخترعان البريطانيان تشارلز ويتستون وويليام فوثرجيل كوك عام 1837 بتطوير نظام التلغراف الكهربائي، والذي عُدّ أول نظام تلغراف عملي قابل للاستخدام التجاري، وتم افتتاح أول خط تلغراف تجاري يعمل بهذا النظام في 9 أبريل 1839. وقد اعتبر المخترعان أن جهازهما يمثل تحسينًا للتلغراف الكهرومغناطيسي القائم آنذاك، وليس اختراعًا جديدًا كليًا. وفي الفترة نفسها، عمل صمويل مورس بشكل مستقل على تطوير نظام تلغراف كهربائي يعتمد على نبضات كهربائية مرمّزة، وتميز هذا النظام باستخدام شفرة مورس التي قدّمت أسلوبًا أكثر كفاءة في الإشارة ونقل المعلومات. وأسهمت هذه التطورات في إنجاز أول كابل تلغراف عابر للمحيط الأطلسي بنجاح في 27 يوليو 1866، الأمر الذي أتاح لأول مرة إمكانية الاتصال السريع بين القارات. لاحقًا، انتقلت تقنيات الاتصالات من نقل الإشارات إلى نقل الصوت، حيث شهد عام 1876 تسجيل اختراع الهاتف الكهربائي بشكل مستقل من قبل ألكسندر غراهام بيل وإليشا جراي، مع الإشارة إلى أن أنطونيو ميوتشي كان قد

طوّر في عام 1849 جهازًا أوليًا لنقل الصوت كهربائيًا، إلا أن تطبيقه العملي كان محدودًا لاعتماده على التأثير الإلكتروني. وفي أواخر القرن التاسع عشر، وتحديدًا خلال عامي 1878 و1879، بدأت أولى الخدمات الهاتفية التجارية بالظهور في مدن مثل نيو هافن في الولايات المتحدة ولندن في بريطانيا، مما شكّل مرحلة جديدة في

تاريخ الاتصالات الحديثة[3]

1-4 الراديو التلفاز

شهدت تقنيات الاتصال اللاسلكي تطورًا تدريجيًا منذ القرن التاسع عشر، حيث قام جيمس ليندسي عام 1832 بتقديم تجربة لطلابه بعنوان *الاتصال اللاسلكي*، والتي مثّلت إحدى المحاولات المبكرة لفهم إمكانية نقل الإشارات دون استخدام الأسلاك. وفي عام 1854، تمكن ليندسي من تطبيق هذه التجربة عمليًا عبر منطقة امتدت بين اسكتلندا ومدينة وودهيفن، لمسافة قُدّرت بنحو ثلاثة كيلومترات، وكان الماء هو الوسط الناقل للإشارة بين المنطقتين، مما شكّل خطوة مهمة في تاريخ الاتصالات غير السلكية. وفي ديسمبر من عام 1901، نجح غولييلمو ماركوني في تحقيق أول اتصال لاسلكي بعيد المدى عبر المحيط الأطلسي، حيث تم إرسال إشارة من منطقة جونز في كندا إلى منطقة بولدو في إنجلترا، وهو إنجاز علمي كبير أسهم في حصوله على جائزة نوبل في الفيزياء التي تقاسمها مع زميله براون. وعلى الرغم من ذلك، فإن التجارب الأولى للاتصال باستخدام موجات الراديو قصيرة المدى كانت قد أُجريت سابقًا من قبل نيكولا تسلا عام 1893، وذلك ضمن بحث قدّمه إلى الجمعية الوطنية للكهرباء، مما يؤكد أن تطور الاتصالات اللاسلكية كان نتاج جهود علمية متراكمة. وفي مجال نقل الصورة، شهد عام 1925 إنجازًا مهمًا عندما تمكن جون لوغي بايرد من إجراء أول تجربة ناجحة لعرض صور متحركة داخل إحدى الشركات الكبرى في لندن. وقد اعتمد الجهاز الذي اخترعه على قرص ميكانيكي دوّار يُستخدم لإجراء مسح ضوئي للصورة وتحليلها، ولذلك عُرف هذا النظام باسم التلفاز واستند هذا الجهاز إلى البث التجريبي الذي أطلقته هيئة الإذاعة الميكانيكي البريطانية والتي بدأت بثها التلفزيوني

التجريبي في 30 سبتمبر 1929. [4]

1-5 الحواسيب و الانترنت

شهد تاريخ الحواسيب والاتصالات تطورًا مستمرًا منذ منتصف القرن العشرين، حيث شكّلت محاولات العلماء الأولى لبناء حواسيب قادرة على معالجة المعلومات عن بعد حجر الأساس للتطورات اللاحقة. في عام 1940، قام العالم جورج ستيببترز

بتنفيذ تجربة أرسل فيها مسائل رياضية إلى حاسوبه في نيويورك من جامعة دارتموث، واستقبل النتائج مرة أخرى عن بعد، مما اعتُبر أول تطبيق عملي لفكرة الحوسبة عن بعد ونقل البيانات بين الحواسيب . وفي أواخر الستينيات، ظهرت فكرة الشبكات الموزعة التي لا تعتمد على حاسوب مركزي واحد، حيث أنشئت شبكة تتكون من أربعة مضيفين في عام 1969، عُرفت باسم أربانت، وكانت هذه الشبكة البداية العملية لتطوير شبكة الإنترنت الحديثة. وقد مكنت هذه الشبكات العلماء والباحثين من إرسال البيانات مجزأة وبطريقة مستقلة بين نقاط مختلفة، مما أسهم في تحسين سرعة وموثوقية الاتصالات الرقمية. مع ازدياد الاعتماد على الشبكات الحاسوبية، ظهرت الحاجة لتقنيات نقل البيانات بسرعة أكبر دون الحاجة للأسلاك التقليدية. ومن هنا نشأت تقنية الاتصالات الضوئية في الفضاء الحر، التي تعتمد على انتقال الضوء عبر الهواء أو الفراغ لنقل المعلومات بين نقطتين. وتعتبر هذه التقنية مفيدة جدًا في الحالات التي يصعب فيها استخدام الأسلاك بسبب التكلفة العالية أو العوائق البيئية، كما تُستخدم في ربط الحواسيب بين المباني، الشبكات المحلية، أو حتى بين الأقمار الصناعية. وتتميز هذه التقنية بسرعات نقل عالية، إلا أن فعاليتها تتأثر بالظروف الجوية مثل الغبار أو الضباب. ويُعد الجمع بين تطور الحواسيب، الشبكات الموزعة، وتقنيات البث الضوئي خطوة أساسية نحو تحقيق شبكات اتصال أكثر كفاءة، تمثل الأساس

للتقنيات الحديثة التي نستخدمها اليوم في نقل البيانات والاتصالات اللاسلكية[5]

6-1 تاريخ الاتصالات البشرية

بدأ الإنسان يستخدم الاتصالات البصرية بأشكال مختلفة منذ آلاف السنين، حيث اعتمد القدماء على الإشارات الضوئية لنقل المعلومات عبر مسافات بعيدة. فقد استخدم الإغريق القدماء نظامًا أبجديًا مشفرًا من المشاعل للإشارة بين النقاط البعيدة، وهو ما يُعد من أقدم أنظمة الاتصالات البصرية المسجلة في التاريخ. ومع تطور تقنيات الاتصال في العصر الحديث، طُوّرت أنظمة الإشارات البصرية المحمولة مثل التلغراف الشمسي اللاسلكي المعروف باسم الهليوغراف، والذي يستخدم ومضات من ضوء الشمس المنعكس عبر المرايا لإرسال الإشارات المشفرة لمسافات طويلة، وقد استخدم هذا الجهاز بصورة واسعة في العمليات العسكرية والمسح الجغرافي منذ أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين.

في عام 1880 عمل العالم ألكسندر غراهام بيل مع مساعده تشارلز سومنر تاينتر على تطوير جهاز يسمح بنقل الصوت عبر ضوء الشمس، وقد نجحوا في تنفيذ أول تجربة إرسال صوت لاسلكي في العاصمة واشنطن عندما أرسل بيل رسالة عبر شعاع ضوئي بين مبنيين على بعد نحو 213 وهو ما يعد من أولى التجارب في نقل الصوت باستخدام الضوء.

لاحقًا في القرن العشرين، بدأ استخدام الاتصالات البصرية في التطبيقات العسكرية بشكل عملي، ففي الحروب المختلفة تم الاعتماد على الإشارات الضوئية في حالات انقطاع الاتصالات السلكية، كما طوّرت أجهزة بصرية مثل أنظمة إرسال المورس الضوئية للتواصل بين القوات، بما في ذلك استخدام أجهزة خاصة للتواصل مع الطائرات والمناطق.

ثم جاءت خطوة تكنولوجية مهمة مع اختراع الليزر في الستينيات، حيث أتاح هذا الاختراع إمكانيات جديدة في الاتصالات البصرية في الفضاء الحر، مما دفع المنظمات العلمية والعسكرية لاستغلال الضوء المكثف في نقل البيانات لمسافات طويلة دون الحاجة لوسائط مادية مثل الأسلاك أو الألياف.

وتطورت هذه التقنيات لاحقًا لتشمل نظامًا متعددة في الاتصالات الحديثة، بدءًا من الأنظمة اللاسلكية البصرية عالية السرعة، وصولًا إلى طرق إرسال ضوء تحت الأحمر المستخدمة في أجهزة التحكم عن بُعد التي تُعد من أبسط أشكال الاتصالات الضوئية [6].

7-1 المنتجات التجارية للاتصالات البصرية

شهدت تقنية الاتصالات البصرية في الفضاء الحر منذ أواخر القرن العشرين وحتى الوقت الحالي اهتمامًا متزايدًا من الشركات والمختبرات البحثية، نظرًا لقدرتها على نقل البيانات بسرعة عالية وبدون الحاجة للأسلاك التقليدية. في عام 2008 شركة MRV قدمت

نظامًا يعتمد على البصريات في الفضاء الحر بمعدل نقل بيانات يصل إلى عشرة غيغابت في الثانية، وكان من المفترض أن يغطي مسافة تصل إلى كيلومترين مع إتاحة عالية، إلا أن الجهاز لم يعد متاحًا بعد نهاية عمره الافتراضي، وانخفضت المسافة العملية الفعلية إلى 350 مترًا فقط

في عام 1013 أطلقت شركة مستكوم نظامًا جديدًا متسلسلاً قادرًا على نقل البيانات بنفس السرعة مع مدى اتصال محسّن يصل إلى 2.5 كيلومتر ومع ذلك،

ولضمان نسبة تشغيل تصل إلى 99.99% تم دمج النظام مع ترددات لاسلكية هجينة، مما أدى إلى انخفاض معدل البيانات إلى مستويات منخفضة جدًا أثناء الظروف الجوية السيئة، حيث قد يصل إلى 10 ميغابت في الثانية في أبريل 2014 عرضت الشركة بالتعاون مع المركز العلمي والتكنولوجي فيرود سرعة نقل تصل إلى 30 غيغابت في الثانية في المختبر كما تقدّم بعض الشركات الأخرى مثل البيت بوينت حلولًا هجينة مماثلة، تجمع بين الضوء والترددات اللاسلكية لتعزيز موثوقية الاتصال على الرغم من هذه التطورات، ظلّت الموثوقية تحديًا رئيسيًا في التطبيقات التجارية للاتصالات البصرية. فقد أظهرت الدراسات المستقلة وجود عدد كبير من الحزم المفقودة وأخطاء الإشارة حتى على مسافات قصيرة تتراوح بين 400-500 متر وأكدت الدراسات الداخلية التي أجرتها الشركات المصنعة أن العوامل الجوية مثل المطر والضباب والغبار وارتفاع درجات الحرارة تؤثر بشكل كبير على استقرار وجودة الوصلات البصرية. ويُعد الضباب العامل الأكثر تأثيرًا، حيث يمنع الوصلات التي تزيد عن 500 متر من تحقيق معدلات خطأ منخفضة على مدار العام

كما أظهرت التجارب العسكرية أن استخدام الأنظمة البصرية محدود عند مواجهة الظروف الجوية الصعبة، رغم أن بعض الدراسات العسكرية قدرت أن الوصلات الأرضية قد تصل إلى 2-3 كيلومترات تحت ظروف مثالية. وقد مولت برامج بحثية FOS مثل دابرا أكثر من 130 مليون دولار أمريكي من 1998 إلى 2006 لدعم تطوير أنظمة أكثر موثوقية مع برامج متخصصة مثل أوركا وأوركلي، إلا أن أي نظام قادر على مواجهة جميع الظروف الجوية الشائعة لم يتم إنشاؤه حتى عام 2014 وشارك القطاع الخاص أيضًا في هذه الجهود، حيث استثمرت شركات ناشئة مثل تيرايم وبدعم من مستثمرين مثل سوفت بانك وموبيس فينتشر كابيتال في تحسين المنتجات، إلا أن العديد من هذه المحاولات لم تنجح في تقديم منتجات تجارية موثوقة بمسافات مناسبة.

وتظل التحديات التقنية الرئيسية في هذه الأنظمة مرتبطة بالظروف الجوية، خاصة الضباب، والغبار، والأمطار، التي تسبب فقدان إشارات الضوء وارتفاع معدل الأخطاء. ولذلك، تستمر البحوث في محاولة تطوير أنظمة هجينة أكثر موثوقية، وتحسين أداء الوصلات الأرضية، وابتكار تقنيات جديدة يمكنها مقاومة التأثيرات البيئية وتحقيق سرعة نقل بيانات عالية بشكل مستمر [7]

الفصل الثاني

1-1 المقدمة

شهد العالم في العقود الأخيرة تطورًا تكنولوجيًا متسارعًا استدعى بالضرورة ظهور طرق تواصل واتصال تتناغم مع هذه الطفرة التقنية، وذلك بسبب الحاجة الماسة والمزايدة لنقل البيانات بسرعة كبيرة جدًا. وقد تفاقمت هذه الحاجة نتيجة ندرة الأطياف الترددية المتاحة والتي تساعد بشكل كبير على نقل البيانات بدون حدوث تداخلات في شبكات المناطق الحضرية، بالإضافة إلى مشكلة عرض النطاق الترددي المحدود في العديد من التقنيات التقليدية. لذلك كان لابد من إيجاد حلول جذرية للتخلص من هذه المشاكل المعقدة، فظهرت عدة تقنيات متقدمة كان من أهمها تقنية الألياف الضوئية، وهي ألياف تصنع من زجاج خاص نقي للغاية، تكون طويلة ورفيعة ولا يتعدى سمكها سمك الشعرة، حيث يجمع العديد من هذه الألياف في حزم داخل الكابلات الضوئية، وتستخدم في نقل الإشارات الضوئية لمسافات بعيدة جدًا اعتمادًا على مبدأ الانعكاس الكلي للضوء. تتعدد استعمالات الألياف الضوئية إلا أن الربط بالإنترنت يعد أحدثها وأكثرها شيوعًا، إلا أن تلك التقنية مع تطورها المستمر والكبير في مجال الاتصالات لاقت العديد من المشاكل، حيث أن نظام الألياف البصرية يعتبر أكثر حساسية من نظام الأسلاك المعدنية التقليدية، فعلى سبيل المثال الألياف البصرية أقل وزنًا وأرق وأصغر حجمًا مقارنة بالأسلاك الأخرى مما يسهل قطعها بكل سهولة ولو على سبيل الصدفة، وتكون النتيجة الحتمية لذلك هو تعطيل الخدمة للعديد من الشركات والأفراد، حيث أن شبكة ألياف واحدة تعمل على نقل بيانات أكثر بكثير من عدة شركات تقليدية أخرى. ومن ضمن المشاكل التي تواجه التعامل مع الألياف البصرية هي أن انتشار الضوء فيها يكون أحادي الاتجاه فقط، أي أنه في اتجاه واحد فقط، وفي حال ما إذا كان الاتصال ثنائي الاتجاه ضروريًا لنقل المعلومات، يشترط لذلك وضع كيبيلين متزامنين لتحقيق ذلك، والتكلفة المادية أيضًا من أهم المشاكل التي تعيق الألياف البصرية حيث أن تكاليفها أقل على المدى الطويل ولكن يجدر الذكر بأن التكاليف الخاصة بتركيب الألياف كبيرة جدًا، وذلك حيث تتطلب عملية التركيب معدات متخصصة لكشف مشاكل الألياف البصرية في حالة وجودها بسبب المشاكل التي ظهرت في الألياف البصرية كان لابد من ظهور بديل آخر، وكان البديل هو تكنولوجيا الراديو لنقل المعلومات، وهي استخدام موجات الراديو لحمل المعلومات مثل الصوت، وذلك عن طريق تعديل وتضمين خصائص موجات الطاقة الكهرومغناطيسية التي تنتقل عبر الفضاء، ويكون التعديل بهذه الخصائص إما في المجال أو في التردد أو في طور الموجة أو في عرض النبضة. عندما تمر موجات الراديو وتصل بموصل للكهرباء يحدث المجال المتذبذب تيارًا مترددًا يمر عبر الموصل ويمكن بعدها استخراج المعلومات في

الموجات وتحويلها مرة أخرى إلى شكلها الأصلي، إلا أن تلك التقنية واجهت مشاكل كبيرة فبمجرد توليد الموجات الراديوية وانتقالها عبر الفضاء يمكن أن يتغير مسارها بسبب الانكسار أو الانحراف أو الانعكاس، إضافة إلى احتمالية حصول تناقص في شدة الموجات بسبب التشتت الهندسي ويمكن أيضًا أن تمتص بعض الطاقة من قبل الوسيط في بعض الحالات، وقد ينشأ أيضًا ضجيج إلكتروني قد يتسبب في تغيير الإشارة المطلوبة. والمشكلة الأكبر أنها لا تستطيع نقل بيانات بمقدار 2.5 جيجا بايت بسبب أن أعلى سقف لنطاق ترددها يساوي 622 ميغا بايت، وهذه القدرة لا تستطيع تلبية الاحتياجات المطلوبة في زمن السرعة على الرغم من أنها من التقنيات الجيدة نسبيًا إلى أن أصبحت الحاجة فعلية وملحة بعد عدم ظهور تقنية تحقق أقصى قدر ممكن من الاستفادة، لذلك كان الخيار الثالث هو استخدام تقنية أسلاك النحاس، وعلى الرغم من توفر الهياكل الأساسية للنحاس في كل مكان تقريبًا من العالم إلا أن المشكلة تكمن في أن عرض النطاق الترددي لهذه التقنية يتراوح من 2 إلى 3 ميغا بايت فقط مما يمكن اعتبار أن هذه التقنية هي حل هامشي لا يمكن الاعتماد عليه في التطبيقات الحديثة إن المشاكل للتقنيات الثلاثة التي تم ذكرها رسمت ومهدت طريقًا جديدًا للتخلص منها عن طريق تقنية خالصة وجديدة كليًا وذات سرعة كبيرة قادرة على حل مشاكل المستخدمين ومشاكل العالم أجمع، وهذه التقنية ، FSO الجديدة هي تقنية الاتصال البصري في الفضاء الحر التي تعرف اختصارًا باسم وتعرف أيضًا بالاتصال اللاسلكي بالأشعة تحت الحمراء ويمكن تصنيفها كخط رؤية عادة خط رؤية ونقطة موجهة FSO مباشر أو ارتباطات منتشرة. يتضمن اتصال ووصلات ليزر من نقطة إلى نقطة من المرسل إلى المستقبل عبر الغلاف الجوي، حيث يمكن تنفيذ هذه الوصلات الضوئية في الفضاء الحر باستخدام ضوء الليزر بالأشعة تحت الحمراء، على الرغم من إمكانية الاتصال بمعدل بيانات منخفض عبر مسافات قصيرة باستخدام الثنائيات الباعثة للضوء [8]، وتعد تقنية إرسال البيانات باستخدام الأشعة تحت الحمراء شكلًا بسيطًا جدًا من الاتصالات البصرية في الفضاء جزءًا من تطبيقات الاتصالات اللاسلكية FSO الحر. من جهة الاتصالات تعتبر تقنية البصرية، ويمكن استخدام بصريات الفضاء الحر للاتصالات بين المركبات الفضائية إلى مدى بضعة كيلومترات حيث تم إظهار المسافات FSO أيضًا. تصل اتصالات إمكانات FSO بمعدلات بيانات متعددة تصل إلى جيجابت في الثانية، وتوفر تقنية بسعة اتصال عريض النطاق وباستخدام أطوال موجية بصرية. ومع ذلك يؤدي عدم التجانس في درجة حرارة وضغط الغلاف الجوي إلى حدوث تغيرات في معامل الانكسار على طول مسار الإرسال، وتؤدي هذه الاختلافات في معامل الانكسار إلى تغيرات مكانية وزمنية في الشدة الضوئية على جهاز استقبال، مما يؤدي إلى التوهين ، حيث يمكن أن تتسبب الوصلات الباهتة الناتجة عن هذه FSO في اتصالات

التأثيرات الجوية في تدهور الأداء الذي يتجلى من خلال زيادة معدل خطأ البتات وتأخيرات الإرسال إن تطوير أنظمة الاتصالات الآمنة والقابلة للانتشار بسرعة يمكن أن تتعاون مع التقنيات الأخرى لتوفير شبكة اتصالات ذات مستشعرات قوية ومتقدمة وقادرة على التغلب على مشاكل الظروف الجوية، وقد وجد الباحثون بعض الحلول مثل الهياكل متعددة الحزم أو ذات المسارات المتعددة والتي تستخدم أكثر من مرسل واحد وأكثر من جهاز استقبال واحد. إن بصريات الفضاء الحر القائمة على الطول الموجي 1550 نانومتر لديها خسارة بصرية أقل بكثير من بصريات الفضاء الحر التي تستخدم الطول الموجي 850 نانومتر في ظروف الضباب الكثيف، كما أن قادر على إرسال عدة أضعاف FSO استخدام نظام الطول الموجي 1550 نانومتر في الطاقة التي توفرها الأنظمة ذات الطول الموجي 850 نانومتر إضافة إلى كونها آمنة للعين البشرية. ومع ذلك فإن متطلبات خط الرؤية المباشر للوصلات البصرية تقلل من المرونة التي تشكل شبكات الاتصال

تعد هذه التقنية بلا شك من أحدث التقنيات الموجودة في العالم الحديث اليوم. [9]

2-2 البث اللاسلكي

البث اللاسلكي يمثل طريقة مبتكرة لنقل البيانات أو حتى الطاقة في بعض التطبيقات بين نقطتين أو أكثر من النقاط التي لا تربطها أي أسلاك أو نواقل كهربائية مباشرة، والهدف الرئيسي والأسمى من وراء تطوير الاتصالات اللاسلكية هو الاستغناء التدريجي عن الأسلاك بشتى أنواعها وتوفير خدمات الاتصالات المختلفة للمستخدمين في كل مكان وزمان، سواء كانوا في المنزل أو داخل السيارة أو على متن الطائرة أو في الباخرة أو في المؤسسات والجامعات وغيرها من الأماكن التي تتطلب تواصلًا مستمرًا، ومن جهة أخرى تسعى الاتصالات اللاسلكية جاهدة إلى توفير الخدمات والميزات نفسها التي توفرها الاتصالات السلكية التقليدية ولكن دون قيود المكان والتنقل، فعلى سبيل المثال اعتدنا سابقًا على استخدام شبكات الكمبيوتر السلكية مثل الشبكات المحلية وشبكات المدن وشبكات الواي فاي ثم تطور الأمر لاحقًا وجاءت الشبكات اللاسلكية المحلية التي تعرف تجاريًا بالواي فاي ثم تبعتها شبكات الواي ماكس ذات التغطية الأوسع، ففي حين أن تقنية الواي فاي تغطي مساحات صغيرة نسبيًا يمكن استخدامها في المنزل والمكاتب والجامعات والمطاعم والفنادق فيما يعرف بمناطق النقاط الساخنة حيث يمكنك الاتصال لاسلكيًا بحواسيب مختلفة أو الاتصال لاسلكيًا بشبكة الإنترنت في حال تواجدت في تلك المناطق المحدودة، أما شبكات الواي ماكس فهي تقوم على نفس الفكرة الأساسية ولكن بتغطية مساحات جغرافية أكبر بكثير جدًا من تلك التي تغطيها شبكات الواي فاي حيث تمتد لتشمل نطاق المدن بأكملها تقريبًا، وبالطبيعة فإن معدل نقل البيانات في الشبكات اللاسلكية يبقى أقل منه في الشبكات السلكية الثابتة كما أنها تعاني كذلك من مشكلات تقنية عديدة أبرزها مشكلات الأمن والحماية ومشكلات تداخل الموجات مع بعضها البعض مما يؤثر على جودة الاتصال واستقراره ومن ناحية أخرى يمكن تصنيف الاتصالات اللاسلكية بشكل عام إلى نوعين رئيسيين هما اتصالات لاسلكية موجهة واتصالات لاسلكية غير موجهة، ففي النوع الأول وهو الاتصالات اللاسلكية الموجهة تعتمد هذه الاتصالات على استخدام هوائيات موجهة تركز الإشارة في اتجاه محدد وكمثال بسيط وواضح عليها شبكات الهاتف المحمول المنتشرة حول العالم، وللاستخدام هذه الهوائيات الموجهة فوائد كثيرة جدًا منها أنها تسهم بشكل كبير في خفض نسبة التشويش والتداخل بين الترددات المختلفة حيث يوجد توجيه محدد للإشارة نحو وجهتها المعينة يؤدي ذلك بالنتيجة إلى إمكانية استخدام نفس الترددات عدة مرات في أماكن مختلفة مع الحفاظ على عدم حدوث أي تداخل بينها، ويسهم التوجيه أيضًا في خفض طاقة الإرسال المطلوبة بشكل ملحوظ لأن الهدف هنا محدد وليس عشوائيًا مما يوفر

كثيرًا في استهلاك الطاقة، بالإضافة إلى تحقيق خصوصية كبيرة جدًا في الاتصال وقلة ملحوظة في التشويش على القناة نفسها مما يعزز جودة الخدمة المقدمة. [10] أما النوع الثاني فهو الاتصالات اللاسلكية غير الموجهة وكمثال واضح عليها البث الإذاعي التقليدي والبث التلفزيوني المفتوح حيث يتواجد عادة برج واحد مركزي في المدينة يقوم ببث الإشارة في كافة الاتجاهات والجهات الأربع وبقدرة إرسال عالية جدًا من أجل ضمان التغطية الشاملة لأكبر مساحة ممكنة من المدينة، ومن الأجهزة الأكثر شيوعًا واستخدامًا في مجال الاتصالات اللاسلكية بشكل عام نجد أجهزة الحاسب المحمول والهواتف المحمولة و الأجهزة المساعد الرقمي الشخصي التي أصبحت جزءًا لا يتجزأ من حياتنا اليومي [11].

2-3 الاتصالات اللاسلكية البصرية في الفضاء الحر

الاتصالات اللاسلكية البصرية في الفضاء الحر هي تقنية اتصالات بصرية تعتمد على استخدام انتشار الضوء في الفضاء الحر بهدف نقل البيانات بشكل لاسلكي، ويُقصد بالفضاء الحر هنا الهواء أو الفضاء الخارجي أو الفراغ بشكل عام، وهذا المفهوم يختلف تمامًا عن استخدام المواد الصلبة مثل كابلات الألياف الضوئية التي تحتاج إلى وسط مادي لنقل الإشارات الضوئية. من ناحية التطبيقات الاتصالية، تُعتبر تقنية إف إس أو جزءًا لا يتجزأ من تطبيقات الاتصالات اللاسلكية البصرية، حيث يمكن استخدام بصريات الفضاء الحر في مجالات متعددة منها الاتصالات بين المركبات الفضائية أو حتى ضمن المركبة الفضائية نفسها

مكونات النظام : الشكل المرفق يوضح بشكل مبسط المكونات الأساسية لأي نظام اتصالات بصرية يعمل في الفضاء الحر، حيث يتكون النظام بالكامل من ثلاثة أقسام رئيسية متتالية هي جهاز الإرسال، ثم قناة الإرسال المتمثلة بالفضاء الحر، وأخيرًا جهاز الاستقبال

1-3-2 جهاز الإرسال

يقوم جهاز الإرسال بمهمة أساسية وهي تحويل البيانات الكهربائية الداخلة إلى إشارات ضوئية يمكن إرسالها عبر الفضاء، ويتكون هذا الجهاز من جزأين رئيسيين يعملان معًا بتناغم، ففي البداية يستقبل جهاز التعديل الإشارة الكهربائية الواردة والتي تحمل المعلومات المطلوب نقلها سواء كانت صوتًا أو صورة أو بيانات رقمية، ويقوم هذا الجهاز بتهيئة هذه الإشارة وتحضيرها لعملية التحويل الضوئي من خلال التحكم بطريقة عمل مصدر الضوء. بعد ذلك تأتي مرحلة التحويل من كهربائي إلى بصري حيث يقوم مصدر الضوء باستقبال الإشارة الكهربائية المعدلة وتحويلها إلى إشارة ضوئية نقية، ويتم استخدام نوعين رئيسيين من مصادر الضوء

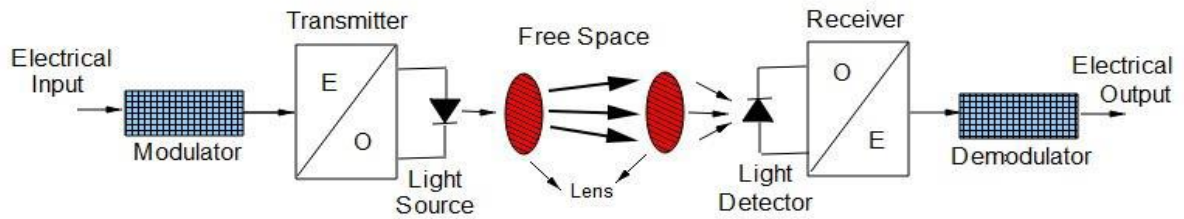
في هذه التقنية، فأما الليزر فيستخدم في الوصلات البعيدة المدى والتي تتطلب سرعات عالية في نقل البيانات وذلك لأنه يعطي شعاعًا ضوئيًا مركّزًا جدًا وأحادي الاتجاه، وأما الثنائيات الباعثة للضوء فتستخدم في الوصلات قصيرة المدى ذات معدلات البيانات المنخفضة نسبيًا نظرًا لأن شعاعها الضوئي يكون أقل تركيزًا وأوسع انتشارًا [12]

2-3-2 قناة الإرسال (الفضاء الحر)

بعد أن يتم تحويل الإشارة الكهربائية إلى ضوئية، تنتقل هذه الإشارة عبر الفضاء الحر للوصول إلى وجهتها، والفضاء الحر هنا يعني الوسط المفتوح بين المرسل والمستقبل والذي قد يكون الهواء في الغلاف الجوي للأرض أو الفضاء الخارجي الخالي من الهواء. تمر الإشارة الضوئية عبر عدسات تعمل على تركيز الشعاع وتوجيهه نحو المستقبل، وهذه المرحلة هي الأكثر تحديًا في النظام بأكمله لأن الإشارة الضوئية معرضة أثناء رحلتها عبر الفضاء للعديد من المؤثرات الخارجية مثل الظروف الجوية كالضباب والأمطار والغبار، وكذلك اضطرابات الهواء وتغيرات درجات الحرارة التي قد تؤدي إلى انحراف الشعاع الضوئي أو تشتيته أو إضعافه قبل وصوله إلى الجهة المستقبلة .

2-3-3 جهاز الاستقبال

عندما تصل الإشارة الضوئية إلى وجهتها بعد رحلتها عبر الفضاء، يقوم جهاز الاستقبال باستقبالها وإعادة تحويلها إلى شكلها الأصلي، ويتم ذلك أيضًا على مرحلتين متعاكستين تمامًا مع مرحلة الإرسال، ففي البداية تقوم العدسة المستقبلة بتجميع أكبر قدر ممكن من الضوء القادم وتركيزه على الكاشف الضوئي، ثم تأتي مرحلة التحويل من بصري إلى كهربائي حيث يقوم الكاشف الضوئي باستقبال الإشارة الضوئية الواردة وتحويلها مرة أخرى إلى إشارة كهربائية خام، بعد ذلك يتولى جهاز إزالة التعديل مهمة استخراج المعلومات الأصلية من هذه الإشارة الكهربائية المستلمة وإعادة بنائها بالشكل الذي كانت عليه عند الإرسال، ليتم في النهاية الحصول على البيانات المطلوبة بشكله الأصلي.



الشكل 1-2 يوضح منظومة اتصال لاسلكية بصريه

2-4 مكونات منظومة الاتصالات اللاسلكية البصرية

نظام الاتصالات البصرية بشكل عام هو أحد أشكال الاتصال عن بعد التي تعتمد على استخدام الضوء كوسيلة أساسية لنقل المعلومات، حيث تتكون تجهيزات هذا النظام من ثلاثة أجزاء رئيسية مترابطة هي المرسل الذي يقوم بتحويل وترميز البيانات العادية إلى إشارة ضوئية نقية، ثم قناة الإرسال التي تحمل هذه الإشارة الضوئية عبر الوسط الناقل إلى وجهتها المحددة، وأخيرًا المستقبل الذي يعمل على استنساخ الرسالة الأصلية واستخراجها من الإشارة الضوئية المستلمة بعد رحلتها عبر القناة [13].

2-4-1 وحدة الإرسال البصرية

يمثل المرسل في أي منظومة اتصالات مصدر الرسالة الأساسي الذي يرغب في إحداث تأثير معين لدى المستقبل، وقد يكون هذا المستقبل فردًا واحدًا أو مجموعة كبيرة من الأفراد، حيث يقوم المرسل بإنشاء رسالة معينة تحتوي على رموز ومفاهيم محددة ثم ينقلها إلى المستقبل من أجل مشاركته في أفكاره وتوجهاته، وتتباين قدرات الأفراد على إرسال الأفكار بشكل كبير حسب قدراتهم الاتصالية وثقافتهم المتنوعة، ويعتبر المرسل هو العنصر الأهم والأكثر تأثيرًا في عملية الاتصال برمتها حيث يتحمل المسؤولية الكاملة عن كفاءة وفاعلية واستمرارية عملية الاتصال. من الناحية التقنية يعمل المرسل البصري كواجهة رئيسية تربط بين المجالين الكهربائي والبصري عن طريق تحويل الإشارات الكهربائية الواردة إلى إشارات بصرية نقية يمكن إرسالها عبر الأوساط الناقلة المختلفة، وتتكون وحدة الإرسال من عدة مكونات أساسية لا غنى عنها في أي نظام اتصالات بصري:

- المعلومات

تتناقل المعلومات في الوقت الحاضر بشكل واسع وبانسيابية عالية جدًا لم يشهد لها التاريخ مثيلاً، وتأتي المعلومات على نوعين رئيسيين يختلفان في طبيعتهما وطريقة معالجتهما اختلافًا جوهريًا. النوع الأول هو المعلومات التماثلية والتي يمكن التعبير عنها بمتغيرات تتغير قيمتها بشكل مستمر ومتواصل مع تغير الزمن، ومن الأمثلة الواضحة عليها أصوات الناس المختلفة والموسيقى بكل تنوعاتها والمشاهد المرئية المتحركة بالإضافة إلى قياسات درجة الحرارة والضغط المتغيرة باستمرار. أما النوع الثاني فهو المعلومات الرقمية وهي عبارة عن متغيرات ذات قيم منفصلة ومحددة تتغير بشكل متقطع وغير مستمر مع تغير الزمن، ومن أبرز الأمثلة عليها البيانات المكتوبة والأرقام والرموز وكذلك الثقوب الموجودة على

البطاقات المثقبة المستخدمة في الحواسيب القديمة والحديثة .

- المصادر الضوئية

يوجد مصدران رئيسيان ومهمان للضوء يتم استعمالهما بشكل واسع في نظم الاتصالات البصرية الحديثة وهما الثنائي الباعث للضوء الذي يعرف اختصارًا بال أي دي، والثنائي الليزري الذي يعرف اختصارًا بال أل دي، ويعتبر هذان المصدران من أهم الوسائل التي تعمل على تحويل الطاقة الكهربائية إلى شعاع بصري مشع، حيث توفر هذه المصادر حزمة من الإشعاع الكهرومغناطيسي البصري لغرض نقل وحمل المعلومات المختلفة في منظومات الاتصالات المتنوعة، هذا فضلًا عن الحجم الصغير جدًا ومتطلبات القدرة الكهربائية القليلة لهذه الثنائيات مما يجعلها مناسبة جدًا للاستخدامات الإلكترونية الاستهلاكية وتطبيقات الاتصالات المختلفة .

إن المواد شبه الموصلة هي الأساس العلمي والصناعي المستخدم في تصنيع هذه الوسائل الإلكترونية الدقيقة، ويعتبر مركب أرسينيد الكالسيوم الأول والأكثر استخدامًا على الإطلاق من بين المواد شبه الموصلة في صناعة مصادر الضوء الخاصة بنظم الاتصالات البصرية. ووفقًا لمفهوم نظرية الميكانيك الكمي، تشغل الإلكترونات في الحالة الصلبة مستويين واسعين من الطاقة، المستوى السفلي يدعى بحزمة التكافؤ والمستوى العلوي يدعى بحزمة التوصيل، ويفصل بين هاتين الحزمتين فسحة أو منطقة غير مسموح لوجود الإلكترونات فيها تسمى منطقة الوصلة. في الحالة المستقرة والمتزنة تتواجد الإلكترونات بشكل طبيعي في حزمة التكافؤ ولا يوجد أي إلكترون في حزمة التوصيل، وتحدث هذه الحالة المستقرة فقط عند درجات الحرارة الواطئة جدًا التي تقترب من الصفر المطلق [14]

أما في درجة حرارة الغرفة العادية وهي حوالي خمس وعشرين درجة مئوية فإن بعض الإلكترونات تنتقل وتكتسب طاقة كافية للصعود إلى حزمة التوصيل تاركة وراءها مواضع فارغة من الإلكترونات في حزمة التكافؤ يساوي عددها تمامًا عدد الإلكترونات التي انتقلت إلى حزمة التوصيل، وتعرف هذه المواضع الفارغة باسم الفجوات الموجبة. إذا قمنا بعملية زيادة الإلكترونات في منطقة التوصيل وزيادة عدد الفجوات في منطقة التكافؤ عن طريق تطعيم شبه الموصل بشوائب معينة ومدروسة، فقد تكون هذه الشوائب مانحة للإلكترونات وتقع مستويات الطاقة لها عمومًا قرب نطاق التوصيل، وإضافتها إلى شبه الموصل تنتج لنا شبه موصل سالب يدعى نوع إن، أو تكون هذه الشوائب قابلة لاستقبال الإلكترونات وتقع مستويات الطاقة لها قرب نطاق التكافؤ، وعند إضافتها إلى شبه الموصل

سينتج لنا شبه موصل موجب يدعى نوع بي

تتم في كثير من الحالات معالجة أشباه الموصلات بالشوائب من كلا النوعين معًا، حيث تنتشر الذرات المانحة في أحد أجزاء البلورة، وتنتشر الذرات القابلة في الجزء الآخر من البلورة نفسها، ويدعى الحد الفاصل بين هاتين المنطقتين بالملتقى أو الوصلة الثنائية بين النوعين الموجب والسالب. عند تسليط جهد كهربائي بالاتجاه الأمامي للملتقى، أي ربط الجزء الموجب بالقطب الموجب لمصدر الطاقة الكهربائية وربط الجزء السالب بالقطب السالب للمصدر، فإن حاملات التيار تتحرك وتندفع باتجاه الملتقى، أي تتحرك الإلكترونات السالبة من منطقة التوصيل باتجاه الملتقى مباشرة وفي نفس الوقت تتحرك الفجوات الإلكترونية الموجبة في الاتجاه المعاكس نحو الملتقى، ويتم الالتقاء والالتحام بينهما في منطقة الملتقى بالضبط وينتج عن ذلك انبعاث إشعاعي محفز يتمثل في انبعاث فوتونات ضوئية بطاقة

تساوي تقريبًا طاقة الفجوة الموجودة بين الحزمتين

إن كمية الضوء المنبعثة من هذه العملية تتناسب طرديًا وبشكل مباشر مع كمية التيار الكهربائي المار في الوصلة، وإذا وضع جهد كهربائي في الاتجاه الأمامي فإن كثافة الضوء المشع تزداد وتتناسب بشكل طردي مباشر مع زيادة الجهد المسلط، والهدف الأساسي من هذه الخاصية المهمة هو إمكانية تضمين شعاع الضوء بتغيرات الجهد المعطى لهذا الثنائي وبنفس معدل التضمين المطلوب، ويتم هذا الأمر بكل سهولة ويسر. يمكن السيطرة والتحكم الكامل بناتج هذه المصادر الضوئية بمجرد تغيير مقدار تيار الانحياز المسلط عليها، ولهذا السبب تعتبر هذه المصادر سهلة التضمين والتحكم بشكل كبير التضمين الضوئي.

يمكن تعريف عملية التضمين بشكل مبسط بأنها تغيير إحدى الخصائص الأساسية لموجة معينة، وقد تكون عملية تغيير في السعة أو في التردد أو في الطور بدلالة القيمة اللحظية لموجة أخرى مختلفة. تسمى الموجة الأولى التي يتم تغيير خصائصها بالموجة الحاملة، أما الموجة الثانية التي تحمل المعلومات المراد إرسالها فتعرف باسم موجة التضمين. وبناءً على ذلك يمكن تسمية الموجة الحاملة التي تحتوي على إشارة التضمين المضافة إليها باسم

الموجة المضمنة التي تنتقل عبر الأوساط الناقلة

إن الغرض الأساسي والأسمى من عملية التضمين هو نقل إشارة القياس والمعلومات عبر خطوط الاتصالات لمسافات كبيرة جدًا كي تستقبلها الأجهزة والمقاييس البعيدة، هذا بالإضافة إلى أن عملية التضمين تسمح بالإضافة إلى نقل إشارة المعلومات عبر

قناة محدودة بالنقل الآني والمتزامن لإشارات معلومات عديدة ومختلفة عبر قناة اتصال واحدة وذلك باستعمال تقنيات التضمين المتعدد، حيث يمكن بوجود عدة محطات إرسال حتى وإن كانت جميعها تبث مواد برامج متشابهة في وسط الانتقال نفسه، اختيار وفصل أي محطة من بينها بالاعتماد على حقيقة أن كل إشارة يتم تحميلها على تردد حامل مختلف ومميز عن الآخر

تضمين الحامل البصري يختلف بشكل جوهري عن تضمين الناقل للتردد الراديوي التقليدي، وعلى الرغم من سهولة تضمين الموجات الراديوية المعروفة إلا أن تضمين الحامل البصري يعتبر أفضل بكثير وذلك بسبب أن الناقل للتردد الراديوي يعمل على ترددات منخفضة نسبياً، هذا فضلاً عن خصوصية ومحدودية الأجهزة المستعملة لأداء عملية التضمين الراديوي. إذ تعد بساطة الأجهزة البصرية المستخدمة في التضمين أمراً مهماً جداً حيث من الممكن نقل موجات صوتية محملة على شعاع ليزري بمنظومات بسيطة التكوين لا يزيد حجمها على بضعة سنتيمترات فقط، إذ أن التصميم الهندسي لجهاز الاستقبال يتحدد غالباً بما يتوفر لدينا من إمكانيات في بنائه وتصنيعه، لذلك فإننا نتحدد بصورة أو باخرى بكفاءة تلك المكونات و جودتها

2-4-2 المستقبلات الضوئية

المستقبل هو الجهة التي تستقبل الرسالة المرسله، وتقوم بفك رموزها وترجمتها ثم تحليلها وتفسيرها بشكل صحيح للوصول إلى ما يقصده المرسل بالضبط، ومن هنا فقد يكون المستقبل شخصية حقيقية أو اعتبارية، وفي حال استقبال الرسالة بنجاح يتبادل المستقبل الأدوار مع المرسل ليصبح مرسلًا في دورة اتصال جديدة. يقوم المستقبل الموجود في الطرف الآخر من قناة النقل باستخلاص إشارة الخرج المطلوبة من الإشارة المستقبلة الضعيفة، وتتم فيه بالإضافة إلى عمليات التكبير والتضخيم الضرورية للإشارة المستقبلة الضعيفة عملية كشف التعديل لاسترجاع الإشارة المنقولة لتأتي مطابقة قدر الإمكان للإشارة الأصلية التي أرسلت في البداية. وأخيراً يقوم محول طاقة الخرج مثل السماعه أو صمام الصورة وغيرها بتحويل إشارة الخرج الكهربائية إلى الشكل المناسب الذي تستفيد منه الجهه المقصوده مباشرة

تستخدم في هذه المستقبلات الضوئية خلايا ضوئية أو ثنائيات ضوئية متخصصة تقوم بالتعرف على الإشارات الضوئية المرسله وكشفها بدقة ثم تحل شفرتها وتحويلها إلى إشارات كهربائية نقيه تدير وتشغل الأجهزة المختلفة مثل التلفزيون والحاسوب والهاتف وغيرها من الأجهزة. إن المستقبل الضوئي بشكل عام يقوم بتحويل الإشارة البصرية المستلمة من نهاية الإخراج للألياف البصرية أو من الفضاء

الحر إلى الإشارة الكهربائية الأصلية، وبعبارة أخرى أوضح يتمثل دور جهاز المستقبل الضوئي بتحويل الإشارة الضوئية الواردة إلى الشكل الكهربائي المفهوم ومن ثم استعادة البيانات المرسله خلال منظومة الاتصال بكامل تفاصيلها [15]

إن المكون الرئيسي والأساسي لوحدة الاستقبال هو الكاشف الضوئي الذي يقوم بتحويل الضوء المستقبل إلى الشكل الكهربائي المناسب من خلال التأثير الكهروضوئي المعروف، إذ أن الكواشف الضوئية المستخدمة يجب أن تلبى متطلبات أداء معينة ودقيقة تكون مشابهة إلى حد كبير للمتطلبات الواجب توفرها في المصادر الضوئية المرسله. إن الإشارة الضوئية المنبعثة من نهاية الليف البصري أو المستقبله من الفضاء الحر تكون عمومًا ضعيفة جدًا ومشوهة أحيانًا بسبب الظروف الجوية وعوامل الإرسال، لذلك يجب أن تتوفر في الكاشف الضوئي مميزات دقيقة أهمها على الإطلاق: الحساسية العالية جدًا للضوء، والاستجابة السريعة للتغيرات، والضوضاء المنخفضة التي لا تشوش على الإشارة، والتكلفة الاقتصادية القليلة، والدقة العالية في الكشف والتحويل، وألا يكون حساسًا ومتأثرًا بالتغيرات في درجة الحرارة المحيطة، وأن تكون فترة حياته طويلة وممتدة، وأخيرًا يجب أن يكون الكاشف الضوئي ملائمًا و مناسبًا الى ابعاد الليف الضوئي المستخدم في الارسال

تمثل الكواشف الضوئية المصنوعة من أشباه الموصلات الأجهزة الرئيسية التي تحقق أغلب المتطلبات السابقة الذكر بنجاح كبير. هناك نوعان رئيسيان من الكواشف يتم استخدامها بشكل واسع في الألياف البصرية وأنظمة الفضاء الحر وهما الكواشف الضوئية الانهيارية المعروفة اختصارًا بأي بي دي والكواشف الضوئية من نوع بي آي إن. تصنع هذه الأجهزة المتطورة من عدد من المواد شبه الموصلة المختلفة استنادًا إلى الطول الموجي الذي تتحسس به تلك الأجهزة وتعمل ضمنه. بشكل عام وعملي، تستخدم الأجهزة المصنوعة من مادة السليكون للكشف عن الأطوال الموجية الواقعة ضمن المنطقة المرئية من الطيف الكهرومغناطيسي، بينما الكواشف المصنوعة من مادة أرسينيد الكاليوم إنديوم تستخدم للكشف عن الأطوال الموجية الواقعة في المنطقة تحت الحمراء القريبة من الطيف والتي تتراوح أطوالها الموجية بين سبعمائة إلى ألف نانومتر تقريبًا. أما بالنسبة للكواشف المصنوعة من مادة الجرمانيوم فتستخدم عادة للكشف عن الأطوال الموجية

الواقعة بين ثمانمائة إلى ألف وخمسمائة نانومتر

2-5 الأطوال الموجية العاملة في الاتصالات اللاسلكية البصرية

تعمل أنظمة الاتصالات اللاسلكية البصرية ضمن نطاق من الأطوال الموجية يقع بشكل أساسي في منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة من الطيف الكهرومغناطيسي، حيث يمتد هذا النطاق تقريبًا من سبعمائة وثمانين نانومتر إلى ألف وستمائة نانومتر ضمن هذا النطاق الواسع توجد نوافذ إرسال محددة تتميز بانخفاض التوهين الجوي، مما يجعلها مناسبة تمامًا لنقل الإشارات الضوئية لمسافات بعيدة عبر الغلاف الجوي. تقع هذه النوافذ حول عدة أطوال موجية مركزية تم اختيارها بعناية بناءً على خصائص انتشار الضوء وتوافر المكونات البصرية المناسبة

2-5-1 الطول الموجي 850 نانومتر

يعتبر هذا الطول الموجي نافذة مناسبة جدًا للعمل مع أنظمة الاتصالات اللاسلكية البصرية، وذلك لأنه يتميز بانخفاض ملحوظ في قيمة التوهين الجوي إضافة إلى ذلك، تتوفر لهذا الطول الموجي مكونات إرسال واستقبال تجارية وبأسعار معقولة، حيث تستخدم فيه ثنائيات الليزر الباعثة من السطح بشكل واسع هذا التوفر الكبير للمكونات جعل من هذا الطول خيارًا شائعًا في العديدة من التطبيقات قصيرة قصيرة ومتوسطة المدى

2-5-2 الطول الموجي 1060 نانومتر

ضمن نطاق هذا الطول الموجي تكون قيم التوهين الجوي منخفضة للغاية بشكل يجعلها جذابة نظريًا لأنظمة الاتصالات البصرية إلا أن المشكلة الرئيسية هنا تكمن في أن مكونات الإرسال المستخدمة في بناء منظومات الفضاء الحر ضمن مدى هذا الطول الموجي تكون عادة ضخمة الحجم ومحدودة التوفر بشكل كبير، فعلى سبيل المثال المصدر الضوئي المستخدم غالبًا هو ليزر الحالة الصلبة وليس ليزر أشباه الموصلات في عدد من الدراسات والتجارب تم استخدام ليزر أشباه الموصلات المتوفر تجاريًا للحصول على طول موجي قريب وهو 980 نانومتر، لكن النتائج أظهرت أن نطاق هذا الطول الموجي يتعرض إلى توهين جوي بمقدار عدة ديسيبل خلال كل كيلومتر واحد وتحت ظروف جوية صافية، مما يحد من كفاءته في التطبيقات العملية

3-5-2 الطول الموجي 1250 نانومتر

تظهر نافذة الإرسال هذه توهينًا منخفضًا أيضًا مما يجعلها مرشحة جيدًا لأنظمة الاتصالات البصرية إلا أن المشكلة الأساسية التي تعيق استخدام هذا الطول الموجي على نطاق واسع هي ندرة المرسلات والمكونات البصرية المصممة خصيصًا للعمل ضمن مدى 1250 نانومتر، حيث تكون هذه المكونات غير متوفرة تجاريًا أو نادرة الوجود مقارنة مع النوافذ الأخرى الأكثر شيوعًا هذا النقص في المكونات الجاهزة يحد من إمكانية الاعتماد على هذا الطول في التطبيقات العلمية رغم جاذبيته من

حيث التوهين المنخفض

4-5-2 الطول الموجي 1550 نانومتر

يعتبر نطاق هذا الطول الموجي مناسبًا تمامًا وأمثلة للإرسال اللاسلكي البصري لعدة أسباب مجتمعة، فهو يتميز أولاً بالتوهين المنخفض جدًا عبر الغلاف الجوي مما يسمح بمدى إرسال أبعد وجودة إشارة أفضل ثانيًا، هناك انتشار واسع للمرسلات عالية الجودة والمكونات البصرية والكاشفات الضوئية المصممة للعمل على هذا الطول الموجي، وذلك بفضل استخدامه المكثف في تطبيقات الألياف الضوئية البعيدة المدى ثالثًا، يتمتع هذا الطول الموجي بميزة أمان إضافية للعين البشرية، حيث أن الطاقة القصوى المسموح بها للإرسال عند 1550 نانومتر أعلى بخمسين مرة تقريبًا من تلك المسموح بها عند 850 نانومتر مما يتيح استخدام قدره

قدرة إرسال أعلى وبالتالي تحسين أداء النظام ومداه [16]

3-6 الضوء والطيف الكهرومغناطيسي وضوء الليزر

الضوء هو شكل من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي تستطيع العين البشرية رؤيته وإدراكه، وهو المسؤول الأول والأساسي عن حاسة الإبصار التي تتميز بها الإنسان والكائنات الحية الأخرى. يتراوح الطول الموجي للضوء المرئي بشكل تقريبي ما بين أربعمئة نانومتر إلى سبعمائة نانومتر، حيث يقع هذا النطاق في المنتصف تمامًا بين منطقتين رئيسيتين هما منطقة الأشعة تحت الحمراء ذات الموجات الطويلة ومنطقة الأشعة فوق البنفسجية ذات الموجات القصيرة. ولا تمثل هذه الأرقام المذكورة الحدود المطلقة والصارمة لرؤية الإنسان، وإنما تمثل النطاق التقريبي الذي يستطيع معظم الناس الرؤية من خلاله بشكل جيد وواضح في معظم الظروف الطبيعية تقدر الأطوال الموجية للمصادر المختلفة للضوء المرئي وفقًا لعدة تقديرات علمية، فبعضها يحدد النطاق بشكل ضيق يتراوح بين أربعمئة وعشرين نانومتر وستمئة وثمانين نانومتر، في حين يمتد النطاق الأوسع ليشمل ما

بين ثلاثمائة وثمانين نانومتر وثمانمائة نانومتر. ومن المثير للاهتمام أن الإنسان تحت الظروف المثالية وبوجود قدرة بصرية عالية يستطيع أحياناً رؤية الأشعة تحت الحمراء التي يصل الطول الموجي الى الف و خمسين نانومتر على الأقل في بعض

الحالات الاستثنائية

أما الخصائص الأساسية التي تميز الضوء المرئي وتحدد طبيعته فهي متعددة وأهمها على الإطلاق شدة الضوء وكميته، واتجاه انتشاره في الفراغ، والتردد الخاص به أو ما يقابله من طول موجي، بالإضافة إلى الطيف الذي يحتويه الضوء من مكونات مختلفة، وأخيراً خاصية الاستقطاب التي تميز بعض أنواع الضوء عن غيره

1-6-2 الطيف الكهرومغناطيسي ومكوناته

الطيف الكهرومغناطيسي هو مصطلح علمي جامع وشامل يشمل جميع الترددات الممكنة والمتوقعة من الإشعاعات الكهرومغناطيسية الموجودة في الكون، ويمكن تعريف الطيف الكهرومغناطيسي بشكل أبسط على أنه خطوط الإشعاع المختلفة المنبعثة من الجسم الأسود المثالي عند درجة حرارة معينة، حيث يتميز كل خط من هذه الخطوط بطول موجي محدد وتردد معين يميزه عن غيره من الخطوط الأخرى

يمتد الطيف الكهرومغناطيسي عبر نطاق واسع جداً يبدأ من الترددات المنخفضة للغاية والتي تقابلها أطوال موجية عالية وكبيرة مثل الترددات المستخدمة في موجات الراديو الطويلة، ثم ينتقل بعد ذلك إلى الترددات المتوسطة مثل ترددات أشعة الضوء المرئي التي تقع في منتصف الطيف تقريباً، وصولاً في النهاية إلى الترددات العالية للغاية والتي تقابلها أطوال موجية صغيرة ودقيقة مثل الأشعة السينية وأشعة جاما التي تمتلك أعلى ترددات و أقصر اطوال موجية

يتكون الطيف الكهرومغناطيسي بشكل أساسي من سبع مجموعات رئيسية من الموجات التي تشترك جميعها في نفس الخصائص الفيزيائية الأساسية إلا أنها تختلف فيما بينها بشكل كبير في أطوالها الموجية وفي تردداتها، وهذه المجموعات مرتبة من الأطول موجياً إلى الأقصر هي:

أولاً: الموجات الراديوية وهي الأطول على الإطلاق وتستخدم في البث الإذاعي والتلفزيوني و الاتصال بعيد المدى

ثانياً: الموجات المايكروية أو الموجات الدقيقة وهي أقصر من الراديوية وتستخدم في الاتصالات الفضائية وأفران المايكرويف والرادار

ثالثًا: الأشعة تحت الحمراء وهي المنطقة التي تلي المايكرويف مباشرة وتشعر بها على شكل حرارة وتستخدم في التحكم عن بعد والتصوير الحراري

رابعًا: موجات الطيف المرئي وهي المنطقة الصغيرة التي تستطيع العين البشرية رؤيتها كما ذكرنا سابقًا

خامسًا: موجات الأشعة فوق البنفسجية وهي أقصر من المرئي وتسبب اسمرار البشرة وحروق الشمس عند التعرض المفرط لها

سادسًا: موجات الأشعة السينية وهي قصيرة جدًا وتستخدم في التصوير الطبي للعظام والأسنان

سابعًا: موجات أشعة جاما وهي الأقصر على الإطلاق والأعلى طاقة، وتنبعث من التفاعلات النووية والمصادر الإشعاعية

2-7 العوامل المسببة للتوهي ن الجوي في منظومة الاتصال اللاسلكية البصرية

تتعرض أنظمة الاتصالات اللاسلكية البصرية العاملة في الفضاء الحر إلى العديد من المؤثرات والعوامل التي تؤدي إلى توهين الإشارة الضوئية وضعفها قبل وصولها إلى جهاز الاستقبال، ويمكن تصنيف هذه العوامل إلى نوعين رئيسيين هما الظروف الجوية المختلفة والظواهر الفيزيائية التي تحدث أثناء انتشار الشعاع الضوئي في الغلاف الجوي

2-7-1 الظروف الجوية

يقصد بالظروف الجوية مجمل الأحداث والظواهر الجوية الملاحظة في الغلاف الجوي والتي تم تفسيرها ودراستها بشكل علمي عن طريق علم الأرصاد الجوية، وهذه الأحداث والظواهر تتوقف بشكل أساسي على وجود مجموعة من المتغيرات والعناصر الجوية في الغلاف الجوي والتي تشمل درجة الحرارة والضغط الجوي وكمية بخار الماء ومعدلات تواجدتها وتفاعل كل عنصر مع الآخر والتغيرات المستمرة التي تطرأ عليها بمرور الزمن. إن أغلب الأحداث الجوية التي نشهدها على سطح الأرض تقع في الطبقة السفلى من الغلاف الجوي والتي تعرف بطبقة التروبوسفير، وتدرس النطاقات المختلفة لهذه الطبقة لتحديد الكيفية التي تؤثر بها النظم المحلية والإقليمية والعالمية على الطقس والمناخ بشكل عام

تعد الأرصاد الجوية وعلم المناخ وفيزياء الغلاف الجوي وكيمياء الغلاف الجوي تخصصات فرعية مهمة ضمن علوم الغلاف الجوي الأوسع، كما أن الأرصاد

الجوية وعلم المياه يؤلفان معًا علم الظواهر الجوية المائية، والتفاعلات المعقدة بين الغلاف الجوي للأرض والمسطحات المائية المختلفة هي جزء أساسي من دراسات المحيطات والغلاف الجوي المشتركة. تتعدد تطبيقات الأرصاد الجوية بشكل كبير وتستخدم في ميادين متنوعة ومتعددة مثل المجال العسكري وإنتاج الطاقة والنقل بمختلف أنواعه والزراعة والبناء والتخطيط العمراني [17]

الغلاف الجوي بشكل عام هو عبارة عن طبقة من الغازات المتنوعة التي تحيط بجسم مادي ذي كتلة كافية بفعل قوة الجاذبية، ويتم الاحتفاظ بهذه الغازات لمدة أطول إذا كانت الجاذبية عالية ودرجة حرارة الغلاف الجوي منخفضة، وبعض الكواكب تتكون أساسًا من غازات مختلفة ولكن فقط الطبقة الخارجية منها تعتبر غلافها الجوي وحاميتها من الإشعاعات الفضائية. وهناك أيضًا ما يعرف بالغلاف الجوي النجمي وهو مصطلح يصف المنطقة الخارجية للنجم وعادة ما يتضمن الجزء الممتد من الغلاف الضوئي نحو الخارج، والنجوم ذات درجة الحرارة المنخفضة نسبيًا قد تشكل جزيئات مركبة في غلافها الجوي الخارجي

أما الغلاف الجوي للأرض فهو الوسط الذي تحدث فيه عملية توهين الإشعاع الضوئي الكهرومغناطيسي، حيث تمتص طبقات الجو المختلفة جزءًا من الأشعة القادمة من الشمس، ويحتوي الغلاف الجوي أيضًا على الأوكسجين الذي تستخدمه معظم الكائنات الحية في عملية التنفس، وثاني أكسيد الكربون الذي تستخدمه النباتات والطحالب والبكتيريا الزرقاء في عملية التمثيل الضوئي، كما أنه يحمي الكائنات الحية من الضرر الجيني الذي قد ينجم عن أشعة الشمس فوق البنفسجية الخطيرة، وتركيبته الحالية هي نتاج بلايين السنين من التعديلات البيوكيميائية التي أجرتها الكائنات الحية على الغلاف الجوي القديم

وبصورة عامة تنقسم الظروف الجوية المسببة للتوهين في أنظمة الاتصالات البصرية إلى عدة عناصر رئيسية هي:

وهو ظاهرة طبيعية عبارة عن سحب منخفض جدًا وقريب من سطح: الضباب وهو ظاهرة طبيعية عبارة عن: الأرض، وغالبًا ما تكون هذه السحب من الضباب سحب منخفض جدًا وقريب من سطح الأرض، وغالبًا ما تكون هذه السحب من نوع الرطب، ويتكون الضباب من قطرات مائية عالية الكثافة معلقة في الهواء، ويحدث نتيجة عملية تكاثف بخار الماء بالقرب من سطح الأرض، ويساعد على تكوينه وتكاثفه وجود الغبار والدخان والشوائب المختلفة في الجو حيث يعلق عليها البخار وتختلف درجة البخار باختلاف كثافته فكلما زادت كثافة البخار كان

الضباب أشد كثافة. يعرف الضباب علميًا بأنه سحابة تقلل من مدى الرؤية الأفقية إلى أقل من كيلومتر واحد، ويقسم إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

- **ضباب اليباسة:** ويحدث فوق المناطق اليباسة نتيجة فقدان سطح الأرض لحرارته بسرعة خلال الليل مع وجود الرطوبة الكافية في الجو

- **ضباب الوديان:** ويحدث في المناطق المنخفضة والوديان نتيجة هبوب الرياح الباردة من أعلى الجبال إلى أسفل الوديان حيث تتكاثف الرطوبة

- **ضباب البحار:** ويتشكل فوق المسطحات المائية نتيجة هبوب تيارات بحرية الممكن أن ينتقل هذا الضباب إلى اليباسة دافئة إلى مناطق باردة نسبيًا، ومن لمسافات كبيرة جدًا. يشكل الضباب خطرًا حقيقيًا على السلامة العامة بشكل عام حيث يزيد بشكل كبير من معدل الحوادث المرورية نتيجة انخفاض مدى الرؤية أثناء حدوثه وخاصة الأنواع الكثيفة منه.

- **الدخان:** وهو عبارة عن جزيئات صغيرة جدًا تنتقل عبر الهواء وتكون إما صلبة أو سائلة أو غازية، وتخرج هذه الجزيئات عند تعرض المواد المختلفة لعملية احتراق أو تبخر غير كامل، ويكون لون الدخان في الغالب رماديًا أو أبيض أو أسود أو في بعض الحالات بلا لون، وأحيانًا قد يسبب استنشاق الدخان حالات اختناق خطيرة خاصة في الأماكن المغلقة

- **المطر:** وهو شكل من أشكال قطرات الماء المتساقطة من السحاب في السماء، وأنواع الأمطار ثلاثة رئيسية هي أمطار تصاعدية وتحدث بسبب تقلص الهواء الرطب القريب من سطح الأرض وصعوده إلى طبقات الجو العليا، والأمطار التضاريسية وتحدث بسبب التقاء الرياح الرطبة القادمة من البحر بمناطق مرتفعة مما يضطرها للصعود والتكاثف، والأمطار الإعصارية وتكون بسبب التقاء رياح مختلفة في درجة حرارتها ورطوبتها. يعد المطر من أهم أساسيات الحياة على الأرض فبدون المطر تموت الأرض وتهلك جميع الكائنات الحية التي تعيش عليها

- **العواصف الترابية:** وهي عواصف قوية تحمل فيها الرياح كميات كبيرة من الرمل والغبار في الهواء، وتشكل الرمال المحمولة في الرياح سحابة كثيفة فوق سطح الأرض، ولا ترتفع معظم الرمال إلى أعلى من خمسين سنتيمترًا، ولكن بعض حبات الرمل الخفيفة قد تصعد إلى ارتفاع مترين أو أكثر. ويتراوح متوسط قطر الحبات التي تحملها الرياح في هذه العواصف ما بين خمسة عشر جزء من مائة ملليمتر إلى ثلاثين جزء من مائة ملليمتر، وخلال العواصف الرملية القوية تصل سرعة الرياح إلى ستة عشر كيلومترًا في الساعة وأكثر في بعض الأحيان، كما يستمر هبوب

العواصف عادة من ثلاث ساعات إلى خمس ساعات متواصلة 2-7-2 الظواهر الفيزيائية المسببة لظاهرة التوهين الجوي

إن الوسط الذي تنتقل فيه حزمة الليزر أو الإشارة الضوئية يعد ذا أهمية قصوى في أنظمة الاتصالات البصرية، وعند استخدام الهواء الجوي كوسط ناقل للإشارة، فإن حزمة الليزر تتعرض إلى عدة ظواهر فيزيائية طبيعية تتسبب في توهين الحزمة وتؤثر بشكل كبير في طبيعتها وخصائصها وبالتالي على كفاءة الإرسال وجودة الاتصال بشكل عام، ويمكن إجمال [18]

2-7-2-1 أهم العوامل الناتجة عن التوهين الجوي على النحو التالي:

- **الاستطارة أو التشتت:** وتتسبب بها الأجسام الصلبة والسائلة العالقة في الجو من غبار ودخان وقطرات مائية، ويعتمد مقدار الاستطارة الذي تسببه الجسيمات الصلبة على العلاقة الفيزيائية بين الطول الموجي للطاقة الضوئية المنبعثة وحجم تلك الجسيمات، وتنقسم الاستطارة إلى نوعين رئيسيين:

- **استطارة ماي:** وهي تحدث نتيجة لوجود جسيمات عالقة في الجو ذات حجم كبير نسبيًا أي أكبر من الطول الموجي للضوء المرسل، كما هو الحال في الضباب حيث يحدث التشتت بسبب قطرات الماء التي تبلغ أقطارها ما بين واحد ميكرومتر إلى مائة ميكرومتر تقريبًا

- **استطارة رايلي:** وتحدث نتيجة وجود جزيئات أو جسيمات دقيقة يكون حجمها مساويًا أو أقل من الطول الموجي للضوء المرسل، فإذا كان الطول الموجي للإشعاعات أقصر من حجم الجسيمات فسوف يكون التشتت غير معتمد على الطول الموجي بشكل كبير، كما في حالة الأجواء المغبرة حيث يكون السبب الرئيسي هو وجود ذرات الغبار الناعم التي تكون أبعادها في حدود جزء صغير جدًا من الميكرون، وبذلك تعد صغيرة جدًا مقارنة مع الطول الموجي للضوء

- **الامتصاص:** إن العناصر المختلفة التي يتألف منها الغلاف الجوي كالأكسجين وبخار الماء وثنائي أكسيد الكربون والأوزون والميثان وغيرها، كل هذه العناصر تمتص الموجات الكهرومغناطيسية التي تمر عبرها ولكن بدرجات متفاوتة، وتختلف درجة امتصاصية هذه العناصر حسب طول الموجة المستخدمة، وأكثر هذه المواد إزعاجًا وتأثيرًا على الإشارات الضوئية في الفضاء الأرضي هو بخار الماء وثنائي أكسيد الكربون، حيث أن لهاتين المادتين نطاقات ترددية متعددة أي أطوال موجية محددة يكون فيها الامتصاص كبيرًا نسبيًا، لذلك يجب اختيار شعاع ليزر بطول موجي مناسب ومنفذ يجعل فقدان الأشعة أقل ما يمكن لضمان وصول الإشارة إلى وجهتها بأقل

خسارة ممكنة. وقد حاول العلماء جاهدين التخلص من هذه المشكلة بعدة طرق منها استعمال نوع معين من الغيوم يدعى السحاب الركامي وهو سحاب مؤلف من أكداس مدورة ذات قاعدة مسطحة لعكس أشعة الليزر وإعادة توجيهها، لكن ما زال استعمال هذه الطريقة محدودًا جدًا ضمن المجال الجوي العملي

- **تباين درجات الجو :** ويحدث هذا التأثير عند مرور الشعاع الضوئي بين طبقتين مختلفتين في درجة الحرارة، مثل تغيرات حرارة الجو المفاجئة وتعرض الشعاع إلى مصادر ضوئية وحرارية أخرى، وكذلك الاختلاف في الكثافة ومعامل الانكسار بين الطبقات المختلفة، مما يؤدي إلى توهين إضافي في الضوء المستلم حيث يحدث توسع وانفراج في الحزمة الضوئية وانحراف في مسارها الأصلي، وهذا الأمر تحديًا هو ما يجعل عملية توجيه الشعاع الضيق والحفاظ على استقامته صعبة جدًا في الظروف الجوية غير المستقرة

2-8 الضوضاء

يقصد بمصطلح الضوضاء في عالم الاتصالات والإلكترونيات كل الإشارات الكهربائية غير المرغوب فيها أو التغيرات العشوائية التي توجد بشكل دائم ومستمر في الدوائر الإلكترونية أو أي جزء منها وخاصة دوائر المضخمات الإلكترونية، وهي ظاهرة طبيعية لا يكون لمصمم الدائرة سيطرة مباشرة عليها في كثير من الأحيان، كما تنشأ الضوضاء أحيانًا نتيجة سوء التصميم أو الربط الضعيف للمكونات المختلفة بسبب رداءة اللحام أو وجود الشوائب على نقاط التلامس والمفاتيح الكهربائية، أو قد تكون عبارة عن إشارات دخيلة تلتقطها الدائرة من مصادر خارجية عندما يكون هناك أكثر من مصدر إشارة ترددية في نفس المنطقة تتراكب هذه الضوضاء مع الإشارة المفيدة التي تعالج بواسطة الدائرة الإلكترونية وقد تطغى عليها في بعض الحالات، أو تؤدي إلى تشويه الإشارة المطلوبة بشكل يمنع أو يحد من قابلية جهاز المستقبل على كشف الإشارة المرسله كشفًا صحيحًا وسليمًا، ويمكن القول بثقة أن الضوضاء تعتبر المعيار الحاسم والأساسي في تعيين إمكانية كشف الإشارات الضعيفة، فحتى لو كانت الإشارة المقاسة ليست ضعيفة في الأصل فإن وجود الضوضاء سيؤدي حتمًا إلى انخفاض في دقة القياس ووضوح الإشارة المستلمة.

من المهم معرفة أن هناك بعض أشكال الضوضاء لا يمكن تفاديها نهائيًا لأنها ظواهر فيزيائية طبيعية، ولكن بالتصميم الهندسي الجيد والدقيق يمكن وضع أجزاء الدائرة بصورة محكمة والاهتمام بعمليات الربط ونقاط الاتصال مما يؤدي إلى حذف بعض أنواع الضوضاء أو التقليل من تأثيراتها بشكل كبير، كما يمكن استخدام عمليات الترشيح الإلكتروني لإزالة الترددات غير المرغوب فيها، أو استخدام عملية الحجب

الكهربائي لحماية الأجزاء المتعرضة للتأثيرات الخارجية، أو اختيار نوع تضمين مناسب للإشارة، أو استعمال مستقبليات مثالية عالية الجودة مصممة خصيصًا لمقاومة الضوضاء .

1-8-2 أنواع الضوضاء الرئيسية في الكواشف الضوئية

من أبرز أنواع الضوضاء المعروفة والمؤثرة في أنظمة الاتصالات البصرية هي الضوضاء المتولدة داخل الكاشف الضوئي نفسه، وأهم هذه الأنواع:

1-8-1-1 الضوضاء الحرارية:

ويطلق على هذا النوع أحيانًا اسم ضوضاء جونسون نسبة إلى العالم الذي درسها، وهي ضوضاء طبيعية غير قابلة للحذف نهائيًا وتحدث نتيجة للحركة الدورية والعشوائية المستمرة للإلكترونات عند انتشار حوامل الشحنة داخل المواد الموصلة وأشباه الموصلات، كما هو الحال في المقاومات الكهربائية والتمتعات والكواشف الضوئية والعناصر المقاومة الموجودة في الأجهزة الإلكترونية والأسلاك الناقلة. من الخصائص المهمة للضوضاء الحرارية أنها تحدث حتى في غياب التيار الكهربائي في العنصر المقاوم، أي أنها موجودة بمجرد وجود درجة حرارة فوق الصفر المطلق، ويمثل تأثير الضوضاء الحرارية الحد الأدنى الأساسي والأدنى للضوضاء التي يمكن الوصول إليها في أي كاشف أو مصدر إشارة أو مضخم إلكتروني .

وجد طريقتان رئيسيتان متوفرتان للتقليل من تأثير الضوضاء الحرارية في الأنظمة الإلكترونية، الأولى تعتمد على تضيق عرض حزمة الترددات المستخدمة في النظام، والثانية تعتمد على تخفيض درجة حرارة تشغيل المكونات الإلكترونية. النوع الأول غالبًا ما يتم تطبيقه في المضخمات الإلكترونية وباقي المكونات الأخرى، حيث تستطيع المرشحات الإلكترونية أن توفر لنا مجالًا ذا عرض حزمة ضيق يسمح بمرور الإشارة المفيدة فقط ويمنع الضوضاء ذات الترددات البعيدة. أما بالنسبة للضوضاء الحرارية الموجودة في الكواشف الضوئية بأنواعها المختلفة وخاصة كواشف المضاعفات الضوئية، فيمكننا أن نخفضها بشكل كبير بوساطة التبريد، فعلى سبيل المثال تخفيض درجة حرارة الكاشف من درجة حرارة الغرفة العادية إلى درجة حرارة النيتروجين السائل المنخفضة جدًا سوف يؤدي إلى انشطار قيمة الضوضاء الحرارية إلى النصف تقريبًا.

2-8-1-2 ضوضاء الطلقة :

ينشأ هذا النوع من الضوضاء نتيجة لطبيعة التيار الكهربائي نفسه، فالتيار الكهربائي في الحقيقة عبارة عن تدفق لشحنات كهربائية منفصلة ومتقطعة وليست مستمرة بشكل تام كما قد يتبادر إلى الذهن، وهذه الطبيعة المتقطعة تتسبب في وصول عشوائي ومتغير للإلكترونات أو الفجوات أو الجسيمات المشحونة وغير المشحونة عبر منطقة التلامس أو الوصلة في المكونات الإلكترونية. هذا الوصول العشوائي وغير المنتظم لحوامل الشحنة يولد تذبذبات عشوائية صغيرة في التيار الكهربائي تظهر على شكل ضوضاء إضافية تسمى ضوضاء الطلقة، وهي موجودة في جميع الأجهزة التي تعتمد على تدفق الشحنات الكهربائية المنفصلة مثل الثنائيات والترانزستورات والكواشف الضوئية [19]

2-9 تطبيقات الاتصالات اللاسلكية البصرية

تعدد تطبيقات الاتصالات اللاسلكية البصرية وتتنوع بشكل كبير لتشمل مجالات حيوية عديدة، حيث أثبتت هذه التقنية قدرتها على توفير حلول اتصالية مبتكرة في الظروف والتحديات المختلفة. يمكن تصنيف هذه التطبيقات إلى عدة مجالات رئيسية:

1-9-2 التطبيقات الفضائية والأقمار الاصطناعية

تعد التطبيقات الفضائية من أبرز المجالات التي تستفيد من تقنية الاتصال البصري في الفضاء الحر، حيث يمكن استخدام هذه الأنظمة في الاتصالات بين الأقمار الاصطناعية نفسها، وكذلك في الاتصالات بين الأقمار الاصطناعية والمحطات الأرضية. تتميز هذه التقنية بقدرتها على توفير معدلات نقل بيانات عالية جدًا تصل إلى مئات الجيجابايت في الثانية، مع استهلاك أقل للطاقة مقارنة بأنظمة الترددات الراديوية التقليدية .

من التطبيقات المهمة في هذا المجال استخدام أنظمة الاتصال بصري المصغرة في الأقمار الاصطناعية الصغيرة المعروفة باسم كيوب سات، حيث تمكن هذه التقنية هذه الأقمار من التواصل مع المحطات الأرضية دون الحاجة إلى التنافس على نطاقات التردد الراديوي المزدحمة. كما يمكن استخدام وصلات التتابع البصري بين الأقمار الاصطناعية في المدار الأرضي المنخفض والمدار الأرضي الجغرافي الثابت لتخفيف تأثير الظروف الجوية وتوفير تغطية مكانية متعددة للوصلات الأرضية

2-9-2 تطبيقات الاتصالات الأرضية والشبكات الحضرية

في المجال الأرضي، تستخدم تقنية الاتصال البصري في الفضاء الحر لتوفير اتصال عالي السرعة بين المباني والمنشآت في المناطق الحضرية، خاصة في الحالات التي يصعب فيها مد كابلات الألياف الضوئية بسبب التكلفة العالية أو المعوقات الجغرافية أو التراخيص البيروقراطية. يمكن لهذه الأنظمة أن توفر سرعات متعددة الجيجابت في الثانية عبر مسافات تصل إلى عدة كيلومترات في الظروف الجوية المناسبة. كما تستخدم هذه التقنية في توفير الاتصال العريض النطاق للمجتمعات الريفية والمناطق النائية التي تعاني من نقص في البنية التحتية للاتصالات، حيث يمكن نشر أجهزة الإرسال والاستقبال بسرعة وبتكلفة أقل مقارنة بمد الكابلات الأرضية

2-9-3 شبكات الجيل الخامس وما بعده

تلعب تقنية الاتصال بصري دورًا مهمًا في دعم شبكات الجيل الخامس والأجيال القادمة، حيث يمكن استخدامها في وصلات الإرجاع الخلوي لنقل حركة البيانات الكثيفة بين أبراج الاتصالات الخلوية والشبكة الأساسية، خاصة في المناطق الحضرية المزدهمة حيث يكون مد الألياف الضوئية مكلفًا أو غير عملي. كما يمكن دمج أنظمة الاتصال بصري مع تقنيات الترددات الراديوية لتوفير حلول هجينة تعزز موثوقية الاتصال وتوسع نطاق التغطية، مما يساهم في تلبية المتطلبات المتزايدة لشبكات الاتصالات من حيث السعة وسرعة البيانات وقلة زمن الاستجابة

2-9-4 شبكات الاتصالات المؤقتة وحالات الطوارئ

تعتبر أنظمة الاتصال بصري مثالية لنشر شبكات اتصال مؤقتة في حالات الكوارث الطبيعية والطوارئ، حيث يمكن إنشاء وصلات اتصال بسرعة فائقة دون الحاجة إلى بنية تحتية مسبقة. تستخدم هذه الأنظمة في دعم عمليات الإغاثة والإنقاذ، وتوفير الاتصال لفرق الإطفاء والشرطة وخدمات الطوارئ في المناطق المنكوبة. كما تستخدم هذه التقنية في تغطية الأحداث الكبرى والتجمعات الجماهيرية المؤقتة، حيث يمكن نشر وحدات اتصال متنقلة توفر سعة عالية لحركة البيانات للمستخدمين في الملاعب والقاعات الكبيرة دون الحاجة إلى تركيب كابلات دائمة.

2-9-5 تطبيقات الطائرات بدون طيار والمنصات العالية الارتفاع

يمكن استخدام أنظمة الاتصال البصري في توفير وصلات اتصال عالية السرعة بين الطائرات بدون طيار والمحطات الأرضية، وكذلك بين الطائرات نفسها في تشكيلات جوية. كما تستخدم في المنصات العالية الارتفاع مثل البالونات والمناطيد التي تعمل كمراحل اتصال في طبقات الجو العليا. تتميز هذه التطبيقات بقدرتها على توفير معدلات بيانات عالية مع استهلاك منخفض للطاقة، مما يطيل عمر تشغيل الطائرات بدون طيار ويزيد من كفاءة مهامها.

2-9-6 الاتصالات تحت الماء

تمثل الاتصالات تحت الماء أحد التطبيقات الواعدة للاتصالات اللاسلكية البصرية، خاصة في المجالات البحرية والبحث العلمي. تتميز الموجات الضوئية بقدرتها على الانتشار في الماء بتوهين أقل مقارنة بالموجات الراديوية، مما يمكنها من توفير معدلات نقل بيانات عالية تصل إلى مئات الميغابت في الثانية عبر مسافات قصيرة إلى متوسطة. تستخدم هذه التقنية في تمكين الاتصال عالي السرعة للغواصات الآلية والروبوتات تحت الماء المستخدمة في أبحاث المحيطات وفحص البنية التحتية البحرية، وكذلك في أنظمة الاستزراع السمكي الذكي التي تتطلب نقل كميات كبيرة من بيانات الاستشعار والمراقبة كما تساهم في تطوير شبكات استشعار تحت الماء تدعم إنترنت الأشياء في البيئات البحرية.

2-9-7 تطبيقات الاستشعار والتتبع البشري

أظهرت الأبحاث الحديثة إمكانية استخدام أنظمة الاتصال البصري في تطبيقات متقدمة تجمع بين الاتصال والاستشعار في نفس الوقت. يمكن لهذه الأنظمة تحليل أنماط الإشارات المستقبلية لتحديد الأنشطة البشرية والتعرف على الحركات المختلفة، مع تحقيق دقة عالية تصل إلى أكثر من تسعة وتسعين بالمئة في التعرف على الأنشطة البشرية يتميز هذا التطبيق بقدرته على توفير خدمة الاتصال اللاسلكي وفي نفس الوقت جمع معلومات عن البيئة المحيطة والمستخدمين دون الحاجة إلى أجهزة استشعار إضافية، مما يفتح آفاقاً جديدة في تطبيقات المنازل الذكية والمرافق الصحية والمراقبة غير المتطفلة

2-9-8 تطبيقات الأمن والاتصالات الآمنة

نظرًا لطبيعة شعاع الليزر المركز وصعوبة اعتراضه أو اكتشافه، تستخدم أنظمة الاتصال البصري في التطبيقات الأمنية والعسكرية التي تتطلب سرية عالية في نقل المعلومات. تتميز هذه الأنظمة بانخفاض احتمالية اعتراض الإشارة أو اكتشافها، مما يجعلها مناسبة لاتصالات القوات الخاصة والعمليات الخاصة. كما يمكن استخدامها في إنشاء شبكات كمبيوتر آمنة عالية السعة بشكل مؤقت في المواقع الحساسة دون ترك أي أثر مادي يمكن اكتشافه

2-10 محاسن ومساوئ الاتصالات اللاسلكية البصرية

2-10-1 المحاسن

1- سرعة نقل بيانات فائقة وعرض نطاق ترددي واسع: توفر أنظمة الاتصال البصري معدلات نقل بيانات عالية جدًا تصل إلى عدة جيجابت في الثانية، مع عرض نطاق ترددي واسع لا يحتاج إلى تراخيص حكومية مكلفة

2- أمان عالي للاتصالات ومناعة ضد التداخل الكهرومغناطيسي: تتميز الإشارة الضوئية بصعوبة اعتراضها أو اكتشافها، كما أنها لا تتأثر بالتداخلات الكهرومغناطيسية الناتجة عن الأجهزة الكهربائية أو أنظمة الاتصالات الأخرى

3- سهولة وسرعة النشر وانخفاض التكلفة التشغيلية: يمكن تركيب الأنظمة بسرعة دون حفر أو مد كابلات، ولا توجد رسوم دورية لاستخدام الطيف الضوئي، مما يقلل التكاليف التشغيلية على المدى الطويل

4- مناسبة للمناطق الحساسة وأمنة على الصحة: يمكن استخدامها في المستشفيات والمطارات والمنشآت النفطية حيث يحظر استخدام الترددات الراديوية، كما أن الأشعة تحت الحمراء المستخدمة لا تسبب أضرارًا صحية معروفة ضمن الحدود المسموح بها

2-10-2 المساوي

1-تأثر شديد بالظروف الجوية:تعتبر أنظمة الاتصال بصري حساسة جدًا للضباب الكثيف والأمطار الغزيرة والعواصف الترابية، حيث تؤدي هذه الظروف إلى توهين الإشارة وضعفها بشكل كبير يصل أحيانًا إلى انقطاع الاتصال

2- الحاجة إلى خط رؤية مباشر ودقة توجيه عالية:تتطلب هذه الأنظمة وجود خط رؤية واضح بين المرسل والمستقبل دون أي عوائق، كما تحتاج إلى دقة عالية جدًا في التوجيه، وأي انحراف بسيط قد يؤدي إلى فقدان الإشارة بالكامل .

3-مدى إرسال محدود:يقتصر مدى الإرسال الفعال على بضعة كيلومترات فقط في أفضل الظروف الجوية، مقارنة بالألياف الضوئية التي تنقل الإشارات لمئات الكيلومترات دون تضخيم

الفصل الثالث

مناقشة البحث

كأحد الحلول الواعدة لنقل البيانات بسرعات عالية، مع التركيز كأحد الحلول الواعدة لنقل البيانات بسرعات عالية، مع التركيز على مشكلة التوهين التي تعد أبرز التحديات التي تواجه هذه التقنية. استعرض البحث التطور التاريخي للاتصالات وصولاً إلى هذه التقنية، ثم شرح المكونات الأساسية للنظام والتي تشمل المرسل البصري (بمصادره الليزرية أو الثنائيات الباعثة للضوء)، وقناة الإرسال المتمثلة بالفضاء الحر، والمستقبل البصري بأنواعه المختلفة اظهر البحث أن اختيار الطول الموجي المناسب يلعب دورًا حاسمًا في أداء النظام، حيث تبين أن الطول الموجي 1550 نانومتر هو الأفضل نظرًا لانخفاض توهينه الجوي وتوفر مكوناته التجارية وأمانه العالي للعين البشرية. كما تم تحليل العوامل المسببة للتوهين والتي تنقسم إلى قسمين رئيسيين: الظروف الجوية كالضباب (الأكثر تأثيرًا) والمطر والغبار، والظواهر الفيزيائية كالامتصاص والتشتت (ماي ورايلي) وتباين درجات الحرارة ناقش البحث أيضًا التطبيقات المتعددة لهذه التقنية في المجالات الفضائية والأرضية وشبكات الجيل الخامس وحالات الطوارئ والاتصالات تحت الماء، مع الموازنة بين محاسنها المتمثلة بالسرعة الفائقة والأمان العالي وسهولة النشر، ومساوئها المتمثلة بالتأثر الشديد بالظروف الجوية والحاجة لخط رؤية مباشر والمدى المحدود

الاستنتاجات

1- تمثل تقنية البث اللاسلكي الضوئي حلاً متطوراً لتلبية الطلب المتزايد على نقل البيانات بسرعات عالية، خاصة في الأماكن التي يصعب فيها مد الكابلات أو توصيل الأسلاك التقليدية

2- يُعد التوهين الناتج عن الظروف الجوية المختلفة العامل الأكثر تأثيراً في أداء هذه الأنظمة، حيث يؤدي إلى تدهور جودة الإشارة الضوئية وزيادة نسبة الخطأ فيها، وقد يتسبب في انقطاع الاتصال بشكل كامل أثناء الظروف الجوية القاسية.

3- يتفوق الطول الموجي 1550 نانومتر على غيره من الأطوال الموجية المستخدمة في أنظمة البث اللاسلكي الضوئي، وذلك لأنه يتميز بانخفاض نسبة التوهين الجوي، وتوفر القطع والمكونات البصرية المناسبة له، بالإضافة إلى إمكانية استخدام قدرة إرسال أعلى كونه أكثر أماناً للعين البشرية.

4- يُعتبر الضباب العامل الجوي الأكثر تأثيراً على الإشارات الضوئية مقارنة بالمطر أو الغبار، حيث يتسبب في تشتت شديد للأشعة الضوئية يعيق وصول الإشارة إلى جهاز الاستقبال، مما يحد بشكل كبير من مسافة الإرسال الفعالة في الأجواء الضبابية.

5- تمثل الأنظمة الهجينة التي تدمج بين تقنية البث اللاسلكي الضوئي وتقنيات البث الراديوي الحل الأمثل لضمان اتصال موثوق ومستمر، حيث تعوض الإشارات الراديوية ضعف الإشارة البصرية أثناء الظروف الجوية السيئة، بينما توفر الإشارة الضوئية سرعات عالية في الظروف المناسبة.

6- على الرغم من التحديات الكبيرة التي تواجهها، تبقى أنظمة البث اللاسلكي الضوئي تقنية أساسية لا غنى عنها للعديد من تطبيقات المستقبل كشبكات الجيل الخامس والاتصالات الفضائية وإنترنت الأشياء والاتصالات تحت الماء، مما يستدعي استمرار البحث العلمي والتطوير التقني لتحسين أدائها والتقليل من تأثير التوهين الجوي عليها.

المصادر

- 1- Andrews, L. C., & Phillips, R. L. (2005). *Laser Beam Propagation through Random Media* (2nd ed.). SPIE Press
- 2- Kedar, D., & Arnon, S. (2004). *Urban Optical Wireless Communication Networks: The Main Challenges and Possible Solutions*. IEEE Communications Magazine.
- 3- Bloom, S., Korevaar, E., Schuster, J., & Willebrand, H. (2003). Understanding the Performance of Free-Space Optics. *Journal of Optical Networking*.
- 4- Willner, A. E., et al. (2014). Optical Communications in the Free Space. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*.
- 5- Agrawal, G. P. (2012). *Fiber-Optic Communication Systems* (4th ed.). Wiley.
- 6- ITU-R Recommendation P.1814 (2015). Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Free-Space Optical Links. International Telecommunication Union (ITU).
- 7- Majumdar, A. K., & Ricklin, J. C. (2008). *Free-Space Laser Communications: Principles and Advances*. Springer.
8. Agrawal, G. P. (2021). *Fiber-Optic Communication Systems* (الطبعة الخامسة). وايلي.
9. Andrews, L. C., & Phillips, R. L. (2005). *Laser Beam Propagation through Random Media* (الطبعة الثانية). SPIE Press.
10. Arnon, S. (Ed.). (2015). *Advanced Optical Wireless Communication Systems*. مطبعة جامعة كامبريدج.

11. Bloom, S., & Korevaar, E. (2003). Understanding the performance of free-space optics. Journal of Optical Networking, 6 العدد 2، المجلد 6.
12. Forouzan, B. A. (2012). Data Communications and Networking (الطبعة الخامسة). ماكجرو هيل.
13. Ghassemlooy, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2019). Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB® (الطبعة الثانية). مطبعة جامعة سي آر سي.
14. Hecht, E. (2017). Optics (الطبعة الخامسة). بيرسون.
15. Killinger, D. (2002). Free space optics for laser communication through the air. Optics and Photonics News, المجلد 13، العدد 10.
16. Majumdar, A. K. (2015). Advanced Free Space Optics (FSO): A Systems Approach. شبرينغر.
17. Rappaport, T. S. (2009). Wireless Communications: Principles and Practice (الطبعة الثانية). برنتيس هول.
18. Willebrand, H., & Ghuman, B. S. (2001). Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. SAMS Publishing.
19. موقع ناسا الإلكتروني. (2010). Visible Light. وكالة ناسا للعلوم.