Improving the Performance of Hybrid RoF-FSO Optical Communication Systems Using an Adaptive Optical Receiver

Karam Munir Ahmad*
Dr. Afif Sakkour**
Dr. Faek Arraj***

(Received 4 / 5 / 2026. Accepted 21 / 6 / 2026)

□ ABSTRACT □

All modern broadband services rely on optical fibers as a fundamental infrastructure, including mobile and satellite networks that benefit from integrating RoF signal transmission with FSO technology. This hybrid architecture faces key challenges arising from electronic thermal noise and atmospheric attenuation, which limit the range and efficiency of communication links. This research aims to address these challenges by proposing an adaptive optical receiver tailored for hybrid RoF-FSO communication systems. The proposed receiver operates by instantaneously estimating the signal-to-thermal noise ratio and injecting a dynamic compensation current that elevates the signal level above the detection threshold prior to the decision stage. A mathematical model of the proposed circuit was developed and evaluated using MATLAB simulations within a hybrid network employing WDM-PDM with a total capacity of 160 Gbps. Results demonstrate the proposed solution's effectiveness, achieving a transmission range of 26.5 km (96.3% improvement) under clear weather conditions, and 21 km (82.6% improvement) under hazy conditions, alongside enhancements ranging between 40% and 46% under other examined atmospheric scenarios.

Keywords: Hybrid RoF-FSO System, Adaptive Optical Receiver, WDM-PDM, Atmospheric Attenuation.

Copyright **:**Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Master's Student, Department of Telecommunication and Electronic Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. Email: karam.m.ahmad.97@gmail.com

** Associate Professor, Department of Telecommunication and Electronic Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. Email: afifsakkour@gmail.com

*** Associate Professor, Department of Telecommunication and Electronic Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. Email: faekarraj@gmail.com

تحسين أداء أنظمة الاتصالات الضوئية الهجينة RoF-FSO باستخدام مستقبل ضوئي متكيف

كرم منير احمد *

د. عفيف صقور **

د. فائق عراج ***

(تاريخ الإيداع 4 / 5 / 2026. قُبِل للنشر في 21/ 6 / 2026)

□ ملخّص □

تعتمد جميع خدمات النطاق العريض الحديثة على استخدام الألياف الضوئية كبنية تحتية أساسية، تشمل شبكات الهاتف النقال والاتصالات الفضائية التي تستفيد من دمج تقنية نقل الإشارات الراديوية عبر الألياف الضوئية (RoF) وتقنية الاتصالات الضوئية في الفضاء الحر (FSO). تواجه هذه البنية الهجينة تحديات رئيسية متمثلة في الضجيج الحراري الناتج عن المكوّنات الإلكترونية، والتخامد الجوي الذي يحد من مدى وكفاءة الربط في شبكات الاتصال. يهدف هذا البحث إلى معالجة هذه التحديات عبر اقتراح تصميم مستقبل ضوئي متكيف مخصص لأنظمة الاتصالات الهجينة (RoF- FSO). يعتمد المستقبل المقترح على تقدير نسبة الإشارة إلى الضجيج الحراري لحظياً، وحقن تيار تعويض ديناميكي يرفع سوية الإشارة فوق عتبة الكشف قبل مرحلة اتخاذ القرار. تم تطوير نموذج رياضي لدارة الاستقبال المقترحة واختبارها باستخدام محاكاة MATLAB ضمن شبكة هجينة تعتمد تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة والاستقطاب (WDM- PDM) بسعة إجمالية 160 Gbps. أظهرت النتائج فعالية الحل المقترح، حيث حقق مدى إرسال وصل إلى 26.5 Km (بنسبة تحسين 96.3%) في حالة الطقس الصافي، و 21 Km (بنسبة تحسين 82.6%) في حالة الطقس السديمي Haze، إلى جانب تحسينات تراوحت بين 40% و 46% في حالات جوية أخرى تمت دراستها.

الكلمات المفتاحية: نظام الاتصال الهجين RoF-FSO، المستقبل الضوئي المتكيف، التجميع بتقسيم طول الموجة والاستقطاب WDM-PDM، التخامد الجوي.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* **طالب ماجستير، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية. الايميل: karam.m.ahmad.97@gmail.com**

** **أستاذ مساعد، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية. الايميل: afifsakkour@gmail.com**

*** **أستاذ مساعد، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية. الايميل: faekarraj@gmail.com**

مقدمة:

شهد العقد الأخير تزايداً كبيراً في استخدام تطبيقات الإنترنت وزيادة تدفق المعطيات، مما أدى إلى نمو غير مسبوق في حركة الاتصالات. يفرض هذا النمو متطلبات مباشرة لزيادة سعة الشبكات وتحسين النطاق الترددي لتلبية الطلب المتزايد على نقل البيانات بكفاءة عالية. إن عدم الاستجابة لهذه المتطلبات، سيؤدي ذلك إلى ازدحام في طيف الترددات الراديوية، مما ينعكس سلباً على جودة الخدمة ويحد من سرعة الاتصال. لحل هذه التحديات، برز التوجه نحو التحول من الموجات الحاملة للترددات الراديوية إلى الموجات الحاملة الضوئية كحل عملي وفعال. تتميز الموجات الضوئية بسعة نطاق ترددي أكبر بكثير مقارنة بالموجات الراديوية، مما يجعلها خياراً مثالياً لتلبية متطلبات الاتصالات الحديثة. تُعرف تقنية نقل الإشارات الراديوية عبر الألياف الضوئية باسم تقنية Radio Over Fiber (RoF)، والتي تعتمد على تحويل الإشارات الراديوية إلى إشارات ضوئية ونقلها عبر الألياف الضوئية، حيث أثبتت الدراسات فعاليتها في توفير عرض نطاق ترددي كبير [1،2].

على الرغم من الميزات العديدة لتقنية RoF، إلا أنها تواجه تحديات لوجستية واقتصادية في المناطق التي تفتقر إلى البنية التحتية اللازمة لمد وتركيب كابلات الألياف الضوئية أو في المناطق ذات التضاريس الصعبة. هنا تبرز أهمية تقنية نقل الإشارات الراديوية ضوئياً باستخدام حزم الليزر عبر الفضاء الحر Radio Over Free Space Optics (RoFSO). تتيح هذه التقنية توسيع نطاق الاتصالات عالية السرعة إلى المناطق النائية أو التي يصعب توصيلها بالألياف الضوئية، كما توفر مرونة أكبر في التوصيل وسرعة في النشر دون الحاجة إلى بنية تحتية أرضية معقدة [3]. تشير الدراسات المرجعية الحديثة إلى أن أنظمة FSO تمثل حلاً واعداً لربط الشبكات وتأمين وصلات ذات سعة عالية، شريطة التغلب على تحديات القناة الجوية [4].

يحقق التكامل بين تقنيتي RoF وRoFSO بنية هجينة تضمن اتصال فعال وموثوق في مختلف السيناريوهات؛ ففي المناطق ذات الكثافة السكانية العالية، تُستخدم تقنية RoF مع الألياف أحادية النمط لنقل البيانات لمسافات طويلة، بينما تُستخدم تقنية RoFSO التي تعتمد على خط النظر Line of Sight (LoS) لربط المباني أو المواقع البعيدة في المناطق التي تفتقر إلى البنية التحتية، مما يضمن وصولاً سلساً للخدمات للمستخدمين النهائيين.

الدراسات السابقة:

حظي مجال تحسين أداء الأنظمة الضوئية الهجينة باهتمام بحثي واسع، حيث ركزت معظم الجهود على تطوير تقنيات التعديل والتجميع لزيادة السعة والتقليل من التخامد. نستعرض فيما يلي أبرز المساهمات البحثية الحديثة وتحليل الفجوات فيها:

تناولت الدراسة [5] تحسين أداء نظام الاتصالات الضوئية المعتمد على تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة WDM-RoFSO باستخدام تقنية القنوات المزدوجة. ركز البحث على معالجة قيود السعة الناتجة عن تداخل الترددات الراديوية مع الحامل الضوئي وتأثير الظروف الجوية، حيث تم اقتراح توزيع البيانات عبر 16 قناة لزيادة السعة الإجمالية إلى 160 Gbps، وعلى الرغم من أن النظام حقق تحسناً في مسافة الارسال إلى 1.9 Km في الطقس الصافي، إلا أنه عانى من تراجع حاد في مسافة الإرسال عند وجود الضباب الكثيف لتصل إلى 0.85 Km، مما يشير إلى محدودية الحلول المعتمدة على تعدد الإرسال وحده في مواجهة التخامد.

قدمت الدراسة [6] تحسين أداء أنظمة FSO عبر استخدام تقنيات تعديل متقدمة، حيث قارنت بين تعديلات 4-QAM وQPSK وDP-QPSK. تمت محاكاة تأثير الاضطرابات الجوية باستخدام نموذج غاما–غاما،

وأظهرت النتائج تفوق التعديل DP-QPSK محققاً مسافة إرسال تصل إلى 1.08 Km. ومع ذلك يبقى هذا المدى محدوداً للتطبيقات العملية التي تتطلب تغطية جغرافية أوسع في ظروف التخامد الشديد.

طرحت الدراسة [7] دمجاً لثلاث تقنيات متقدمة هي الزخم الزاوي المداري (OAM) Orbital Angular Momentum والتجميع بتقسيم الاستقطاب Polarization Division Multiplexing (PDM) والوصول المتعدد بتقسيم الرمز الضوئي Optical Code Division Multiple Access (OCDMA). رغم السعة الكبيرة التي حققها النظام والتي تبلغ 320 Gbps، إلا أن أداءه في الضباب الكثيف والمطر الغزير انحصر في مسافات قصيرة جداً (أقل من 1 Km)، مما يؤكد أن زيادة تعقيد الإشارة المرسلة لا يكفي وحده للتغلب على محددات القناة الجوية.

استخدمت الدراسة [8] نظاماً يعتمد على تقنية التشفير الخطي المعدل Modified Duobinary Non Return to Zero (MDNRZ) بهدف تحسين أداء وصلات الاتصالات البصرية اللاسلكية تحت تأثير التخامد الجوي. حقق النظام مدى ارسال يصل إلى 65 km في الضباب الخفيف و 5 km في الضباب الكثيف مع الحفاظ على جودة إشارة جيدة، إلا أن اعتماد النظام على MDNRZ يضيف قدراً من التعقيد في التوليد والمعالجة.

ركزت الدراسة [9] على استخدام تقنية تعديل 16-QAM مزدوجة الاستقطاب مع التشفير التفاضلي Differential Encoding لنقل بيانات بسرعة 112 Gbps. اعتمدت الدراسة بشكل مكثف على خوارزميات معالجة الإشارة الرقمية Digital Signal Processing (DSP) لتحسين الأداء عند المستقبل. حقق النظام مسافة 2.3 Km في الأمطار الكثيفة، إلا أن الاعتماد الكبير على DSP يرفع من تكلفة النظام واستهلاكه للاستطاعة ويزيد من التعقيد.

أخيراً، دمجت الدراسة [10] بين تقنية الوصول المتعدد بتقسيم الرمز الضوئي بالتشفير الطيفي المطالي Spectral Amplitude Coding Optical Code Division Multiple Access (SAC-OCDMA) وتقنية PDM لتحقيق معدل ارسال 60 Gbps. استخدمت الدراسة ترميز الوزن المزدوج المحسن (EDW) Enhanced Double Weight وتقنية الكشف الأحادي الضوئي Single Photodiode Detection (SPD). أظهرت النتائج قدرة النظام على العمل في ظروف جوية مختلفة، لكن المدى الأقصى في الضباب الكثيف لم يتجاوز 0.68 Km

يتضح أن الغالبية العظمى من الدراسات السابقة ركزت على تحسينات في جانب الإرسال (تعديل، تجميع) أو في جانب المعالجة الرقمية اللاحقة للكشف. أظهرت النتائج أن هذه الحلول، رغم فعاليتها في زيادة معدل الارسال، تعاني من محدودية واضحة في مسافة الإرسال تحت الظروف الجوية القاسية. تكمن الفجوة البحثية التي يعالجها هذا البحث في غياب الاهتمام الكافي بتحسين الطبقة المادية للواجهة الأمامية للمستقبل، وتحديداً الكاشف الضوئي، ليكون قادراً على التعامل بشكل ديناميكي مع الإشارات الضعيفة قبل المعالجة الرقمية.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن الإشكالية العلمية التي يعالجها هذا البحث في القصور الذي تعاني منه كواشف الإشارة الضوئية التقليدية في الأنظمة الهجينة، حيث يؤدي التخامد التراكمي الناتج عن الفقد في الألياف الضوئية والعوامل الجوية في قناة الفضاء الحر إلى انخفاض حاد في استطاعة الإشارة الواصلة لتصبح مقاربة لعتبة الضجيج الحراري. في هذه الحالة، تفشل تقنيات المعالجة الرقمية اللاحقة في استعادة البيانات بدقة، مما يؤدي إلى انقطاع الوصلة.

تنبع أهمية هذا البحث من خلال تقديمه مقاربة فيزيائية لحل هذه المشكلة، لا تعتمد فقط على زيادة استطاعة الإرسال أو استخدام تقنيات تعديل او معالجة معقدة، بل تركز على تصميم كاشف ضوئي قادر على التكيف مع الظروف البيئة. تتمثل المساهمة الأصيلة لهذا البحث في اعتماد نموذج رياضي وداراتي لكاشف ضوئي متكيف مع تقدير الضجيج المسبق وحقن تيار التعويض الديناميكي (APNEDCI) Adaptive Pre-Noise Estimation Dynamic Current Injection الذي ينقل وظيفة المستقبل من مجرد التحويل الكهروضوئي السلبي إلى المشاركة الفعالة في تحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج قبل مرحلة اتخاذ القرار.

يهدف البحث إلى تحقيق النقاط التالية:

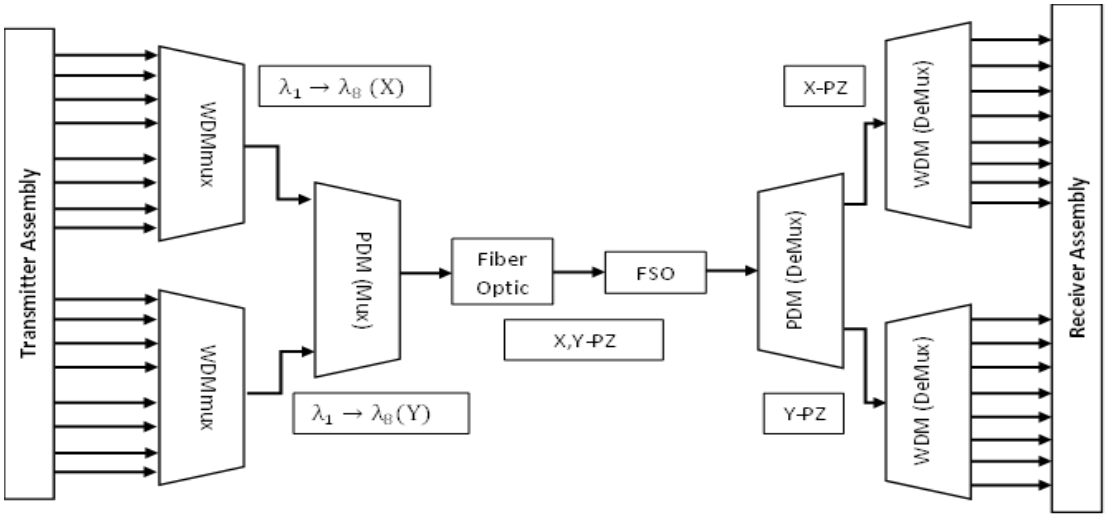
1. تصميم ونمذجة نظام اتصالات ضوئي هجين RoF-FSO يدمج بين تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة WDM لزيادة السعة (160 Gbps) وتقنية التجميع بتقسيم الاستقطاب PDM لتعزيز الكفاءة الطيفية.
2. بناء النموذج الرياضي والوظيفي للكاشف المقترح APNEDCI، وتوصيف خوارزمية العمل الخاصة بوحدة تقدير نسبة الإشارة إلى الضجيج الحراري Signal Strength and Thermal Noise Estimator (SSTNE) ووحدة حقن تيار التعويض الديناميكي (DCCI) Dynamic Compensation Current Injection.
3. تقييم أداء النظام المقترح من خلال محاكاة حاسوبية شاملة تغطي سيناريوهات جوية متعددة، وتحديد المدى الأقصى للإرسال عند معدل خطأ بت $BER \leq 10^{-9}$.
4. إجراء مقارنة مرجعية دقيقة بين أداء النظام باستخدام الكاشف الضوئي PIN التقليدي والكاشف المقترح APNEDCI لإثبات الجدوى الفنية للتحسين المقترح في ظروف التشغيل القاسية.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد هذا البحث منهجية النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية لبناء نظام اتصالات ضوئي هجين متكامل، يهدف إلى تحويل المفاهيم النظرية إلى نموذج عملي قابل للاختبار والتقييم. تم تحقيق النموذج باستخدام بيئة MATLAB لمحاكاة سلوك كل مكون من مكونات النظام، بدءاً من توليد الإشارة ومعالجتها في قسم الإرسال، مروراً بنمذجة القنوات الضوئية وتأثيراتها، وانتهاءً بقسم الاستقبال ومعالجة الإشارة.

1-البنية الهيكلية للنظام المقترح:

يوضح الشكل (1) المخطط الكتلي العام للنظام المدروس، حيث تتدفق الإشارة عبر مراحل متسلسلة تبدأ من المحطة المركزية Central Station (CS)، لتنتقل عبر الليف الضوئي ثم عبر الفضاء الحر وصولاً إلى وحدة الاستقبال.



الشكل 1. المخطط الكتلي العام لبنية النظام الهجين RoF-FSO المقترح.

2-نمذجة قسم الإرسال:

تم بناء نموذج المرسل ليحاكي بدقة عملية تحويل البيانات الرقمية إلى إشارة ضوئية معدلة جاهزة للإرسال، حيث تبدأ العملية في النطاق الأساسي Baseband بتوليد سلاسل بتات عشوائية لكل قناة وتمثيلها برموز باستخدام التعديل الرقمي QPSK. تخضع هذه الرموز لعملية تشكيل نبضات Pulse Shaping عبر مرشح (RRC) Root-Raised Cosine Filter بهدف تحديد عرض النطاق الطيفي للإشارة وتقليل التداخل بين الرموز ISI مما يمهد لاستخدام مرشح مطابق Matched Filter في طرف الاستقبال. يتم بعد ذلك نقل إشارة النطاق الأساسي العقدية بمركبتيها الحقيقية $I(t)$ والتخيلية $Q(t)$ إلى تردد راديوي أعلى fc لتوليد الإشارة الراديوية $S_{RF}(t)$ وفق المعادلة التالية:

$$S_{RF}(t) = I(t)\cos(2\pi f_c t) - Q(t)\sin(2\pi f_c t) \qquad (1)$$

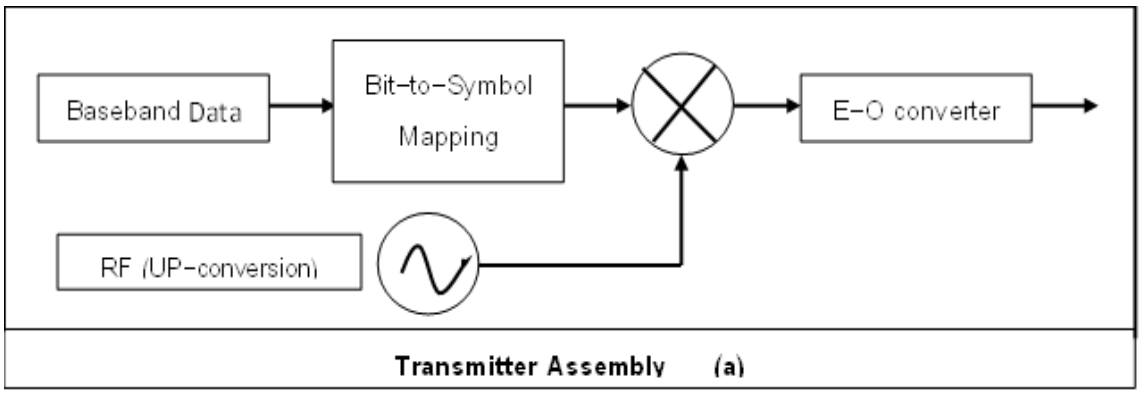
تنتقل الإشارة الراديوية الناتجة إلى مرحلة التعديل الضوئي الخارجي، حيث يتم استخدام مُعدِّل ضوئي خارجي Mach -Zehnder Modulator (MZM) الذي يُزود بمصدر ليزري ذي موجة متماسكة باستطاعة P_{in} على مدخله الأول، بينما تُطبق الإشارة الراديوية كجهد تعديل على المدخل الثاني. يتم نمذجة الاستطاعة الضوئية الخارجة من المُعدِّل P_{out} بناءً على منحني النقل الخاص به وجهد الانحياز V_{bias} والجهد اللازم لإحداث فرق طور مقداره π وذلك وفق العلاقة التالية [11]:

$$P_{out}(t) = P_{in}\left(1 + \cos\left(\frac{\pi(s_{RF}(t) + V_{bias})}{V_\pi}\right)\right) \qquad (2)$$

لزيادة سعة النظام الكلية وتحسين الكفاءة الطيفية، تم دمج تقنيتي تجميع ضمن بنية المرسل، حيث يتم تجميع الإشارات الضوئية من جميع قنوات WDM باستخدام مُجَمِّع WDM_{mux}. ثم يتم دمج الإشارتين المعدلتين على الاستقطابين X و Y باستخدام مُجَمِّع حزمة استقطابي PDM_{mux} بذلك، ينتج قسم الإرسال إشارة ضوئية واحدة مجمعة تحتوي على بيانات جميع القنوات والاستقطابات، جاهزة للإرسال عبر القناة الهجينة [12].

تجدر الإشارة الى إن استخدام مؤخرات بصرية (Optical Delay) بهدف إحداث فصل زمني (Temporal Walk-Off) بين القنوات، وبالتالي تقليل التراكب الزمني الفعال فيما بينها أثناء الانتشار ضمن

الليف، الامر الذي يحد بشكل كبير من نشوء التأثيرات غير الخطية نتيجة انخفاض زمن التفاعل غير الخطي بين القنوات [13].



الشكل 2. المخطط التفصيلي لمكونات قسم الإرسال في النظام الهجين.

3–نمذجة قناة الاتصال الهجينة:

تنتقل الإشارة الضوئية المعدلة من خرج المرسل لتعبر وسطين مختلفين تماماً، حيث تبدأ رحلتها عبر القناة الليفية، لتنتهي بالانتشار عبر الفضاء الحر. تتعرض الاشارة الضوئية المرسلة في كل مرحلة لظواهر فيزيائية تؤثر سلباً على جودة الإشارة. في المرحلة الأولى تم نمذجة قناة الاتصال الليفية باستخدام ليف ضوئي أحادي النمط (SMF) بطول 20 Km، حيث تخضع الإشارة لتأثيرين رئيسيين هما التخامد والتشتت اللوني. يُعبر التخامد عن الفقد في الاستطاعة الضوئية الناتج عن الامتصاص في المجال فوق البنفسجي وتحت الأحمر وشوارد الهدروكسيد وتبعثر رايلي داخل مادة السيليكا، ويتم حساب الاستطاعة الضوئية الخارجة P_{out} بدلالة الاستطاعة الداخلة P_{in} ومعامل التخامد النوعي $\alpha_{dB/Km}$ وطول الليف L_{Km} [11] وفق العلاقة:

$$P_{out} = P_{in} \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot L}{10}} \qquad (3)$$

تعاني الإشارة ايضاً من ظاهرة التشتت اللوني (Chromatic Dispersion) الناتجة عن اختلاف سرعة انتشار المكونات الطيفية للموجة الضوئية المنتشرة، مما يؤدي إلى اتساع عرض النبضة زمنياً، يتم وصف هذا التشتت زمنياً $\Delta\tau$ بالعلاقة التالية:

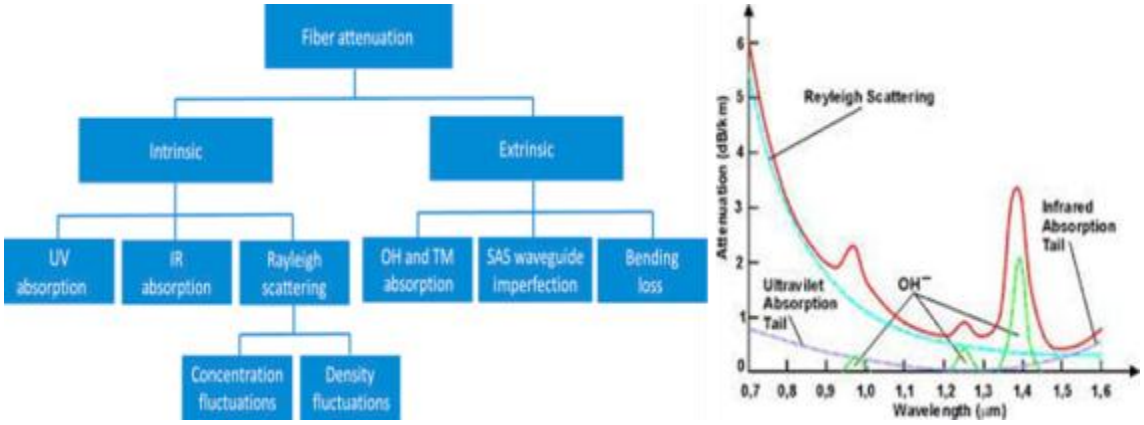
$$\Delta\tau = D \cdot \Delta\lambda \cdot L \qquad (4)$$

حيث D هو معامل التشتت (ps/nm.km) و$\Delta\lambda$ هو عرض طيف المصدر.

لأغراض المحاكاة الدقيقة، تم تمثيل تأثير التشتت اللوني في المجال الترددي عبر تابع نقل وفق العلاقة التالية:

$$H_{disp}(f) = \exp\left(-j\frac{\pi D\lambda^2}{c}Lf^2\right) \qquad (5)$$

إضافةً الى ذلك، وبسبب اعتماد النظام على تقنية التجميع بتقسيم الاستقطاب، فإن الإشارة تتعرض لتأثير تشتت نمط الاستقطاب (Polarization Mode Dispersion)، ونظراً لكون التأخير الزمني الناتج عنه يمثل 0.22 % من زمن الرمز الواحد T_S، مما يجعله تأثيراً غير ملحوظ على أداء النظام الكلي.



الشكل 3. أنواع التخامد المؤثرة على الإشارة ضمن الليف الضوئي.

عند وصول الإشارة إلى نهاية المسار الليفي تنتقل إلى قناة الاتصال الليزرية التي تمثل التحدي الأكبر في النظام نتيجة تعرضها للعوامل الجوية المختلفة. تم نمذجة هذه القناة كوسط غير مثالي تتأثر فيه الإشارة بالتخامد الهندسي الناتج عن تباعد الحزمة الضوئية، بالإضافة للتخامد الجوي الناتج عن الامتصاص وتبعثر الفوتونات بواسطة الجزيئات العالقة في الجو. يعتمد حساب التخامد الجوي النوعي $\beta_{dB/Km}$ على نماذج تقريبية تختلف باختلاف الحالة الجوية السائدة، ففي حالات الضباب والطقس السديمي Haze، حيث يكون حجم الجزيئات مقارباً لطول الموجة (تبعثر Mie). تم اعتماد نموذج Kim الذي يربط التخامد النوعي β_{fog} بمدى الرؤية V_{Km} وطول الموجة λ_{nm} وفق العلاقة التالية [14]:

$$\beta_{fog} = \frac{3.912}{V}\left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q} \qquad (6)$$

حيث q معامل يتعلق بتوزع حجم الجزيئات ويحسب بدلالة مدى الرؤية V_{Km}. أما في حالات هطول الأمطار، حيث يكون نصف قطر القطرات أكبر بكثير من طول الموجة (تبعثر هندسي)، فقد تم استخدام نموذج تقريبي يربط التخامد النوعي للمطر بمعدل هطول الامطار $R_{mm/h}$ عبر العلاقة التالية [14]:

$$\beta_{rain} = 1.067 \cdot R^{0.67} \qquad (7)$$

ولحساب التخامد النوعي الناتج عن الثلوج تم استخدام علاقة تقريبية مشابهة للمطر ولكن ببارامترات خاصة تعتمد على معدل هطول الثلوج $S_{mm/h}$ ومعاملات تختلف قيمها حسب نوع الثلج رطب Wet أو جاف Dry وفق العلاقة التالية [14]:

$$\beta_{snow} = a \cdot S^{b} \qquad (8)$$

حيث تعطى قيم هذه المعاملات a و b وفق الجدول التالي:

الجدول 1. قيم الثوابت a,b من أجل الثلج الرطب والجاف.

	α	b
Wet snow	0.000102λ + 3.79	0.72
Dry snow	0.0000542λ + 5.50	1.38

أخيراً في البيئات التي تتعرض للعواصف الغبارية تم نمذجة هذا النوع من التخامد بناءً على مدى الرؤية V_{Km}، حيث يزداد التخامد النوعي بشكل حاد مع انخفاض مدى الرؤية V_{Km} وفق العلاقة التقريبية التالية [15]:

$$\beta_{dust} = 52 \cdot V^{-1.05} \qquad (9)$$

يتم حساب الخسارة الكلية في قناة FSO من خلال جمع التخامد الجوي النوعي (مضروباً في مسافة الوصلة) مع الخسارة الهندسية، مما يوفر محاكاة واقعية لأداء النظام في مختلف الظروف المناخية.

4–نمذجة المستقبل الضوئي المتكيف:

للتغلب على التحديات التي تفرضها بيئة القناة الهجينة وانخفاض سوية الإشارة إلى مستويات مقاربة للضجيج الحراري، تم تصميم نموذج تحليلي لمستقبل ضوئي متكيف APNEDCI يعمل في الواجهة الأمامية للمستقبل. يستند هذا التصميم إلى مبدأ حقن التيار الديناميكي، وهي تقنية أثبتت فعاليتها مسبقاً في تطبيقات الترددات الراديوية لتحسين خطية المازجات الترددية [16]، وتقليل الضجيج في الدارات المتكاملة [17]، وتعزيز عرض النطاق الطيفي في الواجهات الأمامية الضوئية [18]. يعيد هذا البحث توظيف هذا المبدأ ضمن بنية جديدة تتألف من وحدتين وظيفيتين مترابطتين:

الأولى هي وحدة SSTNE التي تقوم بتقييم جودة الإشارة آنياً من خلال حساب القيمة المتوسطة للتيار الفعلي I_{actual} الناتج عن استجابة الكاشف الضوئي R وفق العلاقة التالية:

$$I_{actual} = R \cdot P_{in-actual} \qquad (10)$$

ثم يُحسب الانحراف المعياري للتيار الناتج عن الضجيج الحراري ضمن مقاومة الحمل R_L، وعرض نطاق ترددي كهربائي B_{elec} ودرجة الحرارة T، وفق العلاقة المعيارية التالية [11]:

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{4K_B T B_{elec}}{R_L}} \qquad (11)$$

يتم حساب مؤشر جودة الإشارة المتمثل بنسبة الإشارة إلى الضجيج الحراري $STNR_{rms}$ عبر قسمة تيار الإشارة على الانحراف المعياري للضجيج الحراري. وبناءً على هذه القيمة يتم تحديد معامل مستوى الضجيج Noise Level Factor (NLF) الذي تم تصميمه باستخدام تابع خطي متدرج Piecewise Linear Function حيث يأخذ هذا المعامل قيمته العظمى عندما تكون الإشارة ضعيفة جداً ودون العتبة الدنيا المحددة، ويتناقص خطياً مع تحسن جودة الإشارة وفق العلاقة التالية:

$$NLF = NLF_{max}\left(1 - \frac{STNR_{rms} - STNR_{low}}{STNR_{high} - STNR_{low}}\right) \qquad (12)$$

وينعدم تماماً عندما تتجاوز جودة الاشارة حداً آمناً، مما يضمن تفعيل التقنية المقترحة عند الحاجة فقط.

تنتقل قيمة المعامل NLF إلى الوحدة الثانية وهي وحدة حقن تيار التعويض الديناميكي DCCI، التي تعمل كمصدر تيار يتحكم فيه الجهد VCCS، وتقوم بتوليد تيار تعويض I_{comp} يتناسب طردياً مع مستوى الضجيج الحراري وفق النموذج الرياضي التالي:

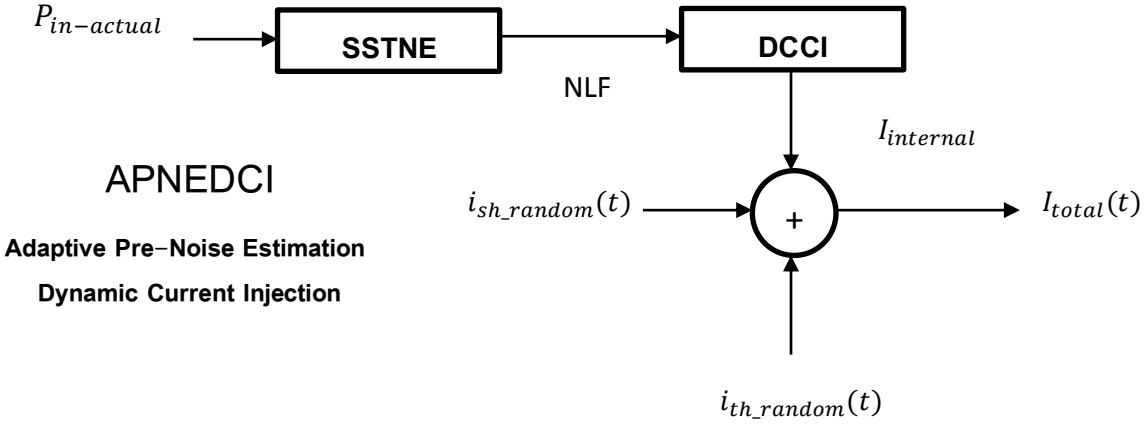
$$I_{comp} = NLF \cdot K_{comp_frac} \cdot \sigma_{th} \qquad (13)$$

حيث K_{comp_frac} معامل يحدد نسبة التعويض، ثم يُحقن تيار التعويض ويُجمع مع تيار الإشارة الأصلي I_{actual} وتيار الظلام I_{dark} لينتج لدينا التيار الداخلي $I_{internal}$.

باستخدام قيمة كثافة ضجيج تيار التعويض $2\ pA/\sqrt{Hz}$ [19]، ينتج عن ذلك زيادة فعلية في مستوى الضجيج بنسبة 1.96 %، عندها يمكن إهمال المركبة الضجيجية لتيار التعويض مقارنة بالضجيج الحراري المسيطر في المستقبل، وبالتالي يعطى التيار الكلي I_{total} الذي يراعي الطبيعة العشوائية للضجيج بالعلاقة التالية:

$$I_{total}(t) = I_{internal} + i_{sh_random}(t) + i_{th_random}(t) \qquad (14)$$

حيث يمثل الحدّان الأخيران المركبات العشوائية للضجيج الطلقي والحراري على التوالي.



الشكل 4. البنية المقترحة للكاشف الضوئي المتكيف APNEDCI

5-معايير تقييم الأداء وإعدادات المحاكاة:

لضمان دقة النتائج، تم اعتماد منهجية معينة لتقييم أداء النظام المقترح استناداً إلى مجموعة من المؤشرات. يُعد معدل خطأ البت BER المقياس الرئيسي لجودة الإشارة، ويُحسب كنسبة عدد البتات المستقبلة بشكل خاطئ إلى إجمالي عدد البتات المرسلة وفق العلاقة التالية [20]:

$$BER = \frac{N_{Error}}{N_{Total}} \qquad (15)$$

ونظراً لأن حساب BER من خلال عد الأخطاء قد يستغرق وقتاً طويلاً في المحاكاة، تم الاعتماد على عامل الجودة Q-Factor الذي يرتبط عكسياً مع BER ويعبر عن جودة الإشارة بشكل خطي حيث يحسب بدلالة متوسط الاشارة $\mu_{1,0}$ والانحراف المعياري $\sigma_{1,0}$ لمستويات الإشارة عند الحالتين المنطقيتين (0 و1) وفق العلاقة التالية [20]:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \qquad (16)$$

ويرتبط عامل الجودة Q-Factor بمعدل خطأ البت BER وفق العلاقة التقريبية التالية التي تفترض توزيعاً غاوسياً للضجيج [20]:

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right) \qquad (17)$$

إضافة إلى ذلك، تم استخدام مخطط العين Eye Diagram ومخطط فضاء الإشارة Constellation Diagram لتقييم استقرار الإشارة وقياس تأثير التداخل والضجيج، حيث تُظهر هذه المخططات هامش أداء واسع يسمح عملياً بوصول معدل خطأ البت الى $BER \leq 10^{-9}$. ، وذلك بفضل وضوح فتحة العين وتمركز الرموز في مواقعها.

تم تنفيذ نموذج النظام ومحاكاته باستخدام بيئة MATLAB وفق سيناريوهات متعددة. يبين الجدول (2) القيم المعتمدة لكافة بارامترات النظام المقترح، والتي تم اختيارها لتطابق المعايير القياسية لشبكات الألياف والشبكات اللاسلكية الضوئية.

الجدول 2. البارامترات الرئيسية المعتمدة في محاكاة النظام الهجين.

الفئة	البارامتر	القيمة المعتمدة	ملاحظات
الإعدادات العامة	معدل النقل الكلي للنظام	160 Gbps	ثابت لجميع السيناريوهات
	WDM	16	تباعد طيفي بين القنوات 0.8 nm
	PDM	Enabled	قناتا استقطاب (X،Y)
إعدادات المرسل	التعديل الرقمي	QPSK	2 bit/symbol
	معدل الرموز لكل استقطاب ولكل قناة	2.5 Gsps	(160Gbps/(16ch*2pol*2bit/symbol))
	تردد الحامل الراديوي	10 GHz	ثابت لجميع السيناريوهات
	المعدّل الضوئي	Mach-Zehnder Modulator	
	استطاعة الحامل الضوئي	0.1 W	
	جهد $V\pi$ للـ MZM	3 V	
	نقطة انحياز الـ MZM	Quadrature	
إعدادات القناة الهجينة	طول الليف الضوئي	20 Km	ثابت لجميع السيناريوهات
	معامل تخامد الليف الضوئي	0.2 dB/km	
	التشتت اللوني لليف الضوئي	17 ps/(nm.km)	
	معامل تشتت نمط الاستقطاب	$0.2\ ps/\sqrt{km}$	
	طول وصلة FSO	Sweep	متغيرة حسب كل حالة جوية
	قطر فتحة المرسل	$T_X = 10\ cm$	ثابت لجميع السيناريوهات
	قطر فتحة المستقبل	$R_X = 20\ cm$	
	تباعد الحزمة Beam (Divergence)	0.3 mrad	
	نموذج تخامد قناة FSO	نموذج Kim + نماذج تقريبية اخرى	
إعدادات المستقبل	الكاشف الضوئي	PIN	ثابتة للسيناريو الأول (قبل التحسين)
	استجابة الكاشف الضوئي	0.9 A/W	
	تيار الظلام	1 nA	
	عرض حزمة المستقبل	2 GHz	
	كثافة ضجيج مضخم TIA	$10\ pA/\sqrt{Hz}$	
إعدادات تقنية APNEDCI	$STNR_{low}$	2	ثابتة للسيناريو الثاني (بعد التحسين)
	$STNR_{high}$	8	
	K_{comp_frac}	0.75	

النتائج والمناقشة:

يعرض هذا القسم النتائج العملية التي تم التوصل إليها من خلال نموذج المحاكاة المتكامل، حيث تم تقييم أداء نظام الهجين المقترح في ظل عوامل جوية متعددة، والتحقق من فعالية التحسين الإلكتروني للكاشف الضوئي المقترح في التغلب على التحديات البيئية.

1-تحليل أداء النظام وتأثير التحسين الإلكتروني:

تمت دراسة أداء النظام عبر مقارنة منهجية دقيقة بين السيناريو التقليدي المعتمد على كاشف PIN التقليدي والسيناريو المحسن المعتمد على الكاشف المتكيف APNEDCI. يلخص الجدول (3) النتائج النهائية لجميع الحالات الجوية المدروسة، موضحاً القيم الدقيقة لمعاملات التخامد المستخدمة في المحاكاة، ومقارنة المدى الأعظمي في طول وصلة FSO الذي تم تحقيقه في كلتا الحالتين عند عتبة معدل خطأ بت $BER \leq 10^{-9}$.

الجدول 3. ملخص شامل لنتائج أداء النظام ومقارنة المدى الأقصى ونسب التحسين في مختلف الظروف الجوية.

الحالة الجوية	معامل التخامد النوعي (dB/km)	أقصى مدى FSO قبل التحسين (Km)	أقصى مدى FSO بعد التحسين (Km)	الزيادة (Km)	نسبة التحسين (%)
الطقس الصافي	0.14	13.5	26.5	13	96.3 %
الطقس السديمي	0.43	11.5	21	9.5	82.6 %
الضباب الخفيف	0.98	6.6	9.8	3.2	48.5 %
الضباب المعتدل	3.72	3.2	4.4	1.2	37.5 %
الضباب الكثيف	13.04	1.1	1.6	0.5	45.5 %
المطر الخفيف	1.99	4.6	6.2	1.6	34.8 %
المطر المعتدل	4.34	3	3.8	0.8	26.7 %
المطر الكثيف	6.60	2.2	2.8	0.6	27.3 %
الثلج الرطب الخفيف	3.95	3.2	4.2	1	31.3 %
الثلج الرطب المعتدل	8.84	1.6	2.4	0.8	50 %
الثلج الرطب الكثيف	13.74	1	1.4	0.4	40 %
الثلج الجاف الخفيف	5.58	2.55	3.33	0.78	30.6 %
الثلج الجاف المعتدل	20.35	0.57	0.81	0.24	42.1 %
الثلج الجاف الكثيف	62.70	0.21	0.3	0.09	42.9 %
الغبار الخفيف	32.86	0.44	0.62	0.18	40.9 %
الغبار المتوسط	76.77	0.18	0.28	0.1	55.6 %
الغبار الكثيف	188.58	0	0.1	0.1	إتاحة الاتصال

تشير البيانات الواردة في الجدول (3) إلى أن استخدام APNEDCI أدى إلى تحسن ملحوظ في ميزانية الوصلة Link Budget للنظام مما انعكس إيجاباً على مسافة الإرسال في كافة السيناريوهات:

1. في الظروف المثالية (الطقس الصافي) وشبه المثالية (الطقس السديمي Haze): حقق النظام تحسن كبير في الأداء حيث تضاعف مدى الارسال تقريباً في حالة الطقس الصافي (من 13.5 Km إلى 26.5 Km)، مما يتيح ربطاً بعيد المدى يغطي مناطق جغرافية واسعة.
2. في ظروف الضباب: أظهر الكاشف المتكيف قدرة عالية على التعامل مع التخامد الشديد ففي الضباب الكثيف نجح النظام في زيادة مسافة الارسال من 1.1 Km إلى 1.6 Km، وهي زيادة حيوية في تخطيط الشبكات تعادل نسبة تحسين 45.5 %.
3. في ظروف الهطول (المطر والثلج): نلاحظ أن النظام أبدى مرونة أكبر تجاه المطر مقارنة بالضباب (نظراً لطبيعة التبعثر الهندسي لقطرات المطر عند طول الموجة 1550 nm)، محققاً مدى إرسال 2.8 Km في المطر الكثيف. أما في حالات الثلج فقد حافظ النظام على استمرارية الخدمة حتى مسافة 1.4 Km في الثلج الرطب الكثيف و0.3 Km في الثلج الجاف الكثيف.

4. في الظروف الأكثر قساوة كالعواصف الغبارية: يُعد النجاح في تحقيق اتصال لمسافة 0.1 Km في حالة الغبار الكثيف إنجازاً نوعياً إذ يمثل الفارق بين انقطاع الخدمة الكلي في النظام التقليدي وبين وجود وصلة فعالة.

وللتحقق من جودة الإشارة عند هذه المسافات والتأكد من سلامة المعطيات، تم رسم مخطط العين وفضاء الإشارة للحالة المحسنة.

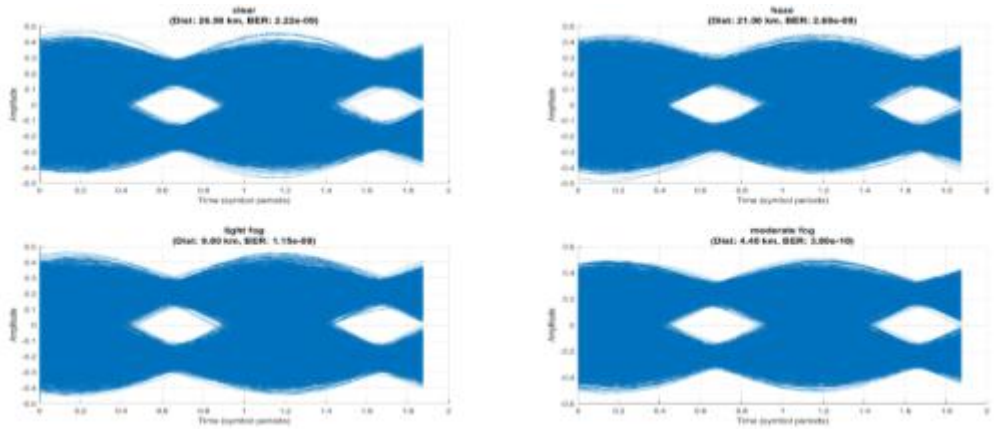
2–تحليل الأداء وجودة الإشارة:

أولاً: الأداء في ظروف الطقس الصافي والضباب الخفيف:

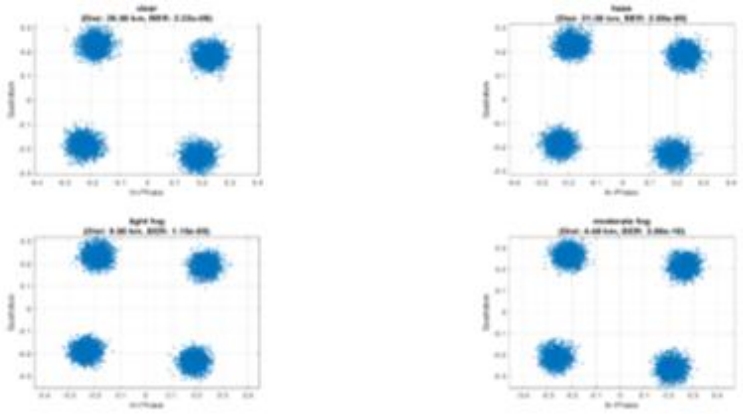
تشمل هذه المجموعة حالات: الطقس الصافي، الطقس السديمي Haze، الضباب الخفيف، والضباب المعتدل. أثبت الكاشف المتكيف فعالية عالية جداً في هذه الظروف، حيث حقق النظام مدى ارسال وصل إلى Km 26.5 في الطقس الصافي.

يوضح الشكل (5) مخطط العين للإشارة المستقبلة لهذه الحالات، حيث نلاحظ فتحة عين واسعة جداً خاصة في حالتي الطقس الصافي والسديمي Haze، مما يدل على هامش ضجيج كبير يسمح بتمييز مستويات الإشارة بسهولة، كما يشير غياب أي انغلاق في فتحة العين إلى عدم ظهور تداخل بين الرموز ضمن ظروف التشغيل الحالية. حتى مع زيادة التخامد في حالة الضباب المعتدل 3.72 dB/km حافظ النظام على فتحة عين واضحة عند مسافة 4.4 Km.

يُظهر الشكل (6) مخطط فضاء الإشارة لنفس الحالات حيث تتمركز رموز QPSK الأربعة في نقاطها المثالية بكثافة عالية وانحراف محدود جداً مما يدل على استقرار عالٍ للإشارة يؤكد قدرة المستقبل على فك التعديل بدقة عالية.



الشكل 5. مخطط العين للإشارة المستقبلة لحالات: الطقس الصافي، السديمي Haze، الضباب الخفيف، والضباب المعتدل.

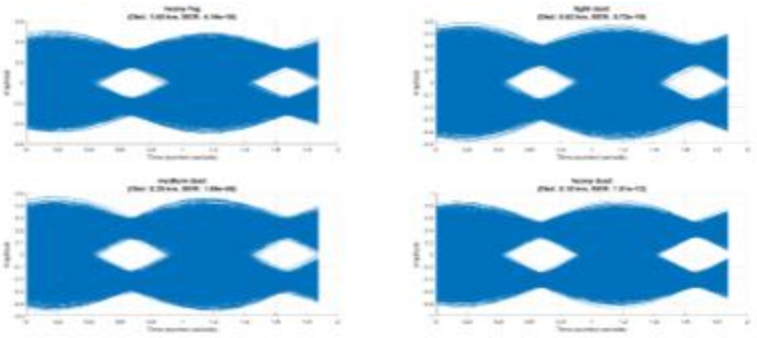


الشكل 6. مخطط فضاء الإشارة لحالات: الطقس الصافي، السديمي Haze، الضباب الخفيف، والضباب المعتدل.

ثانياً: الأداء في ظروف الضباب الكثيف والغبار:

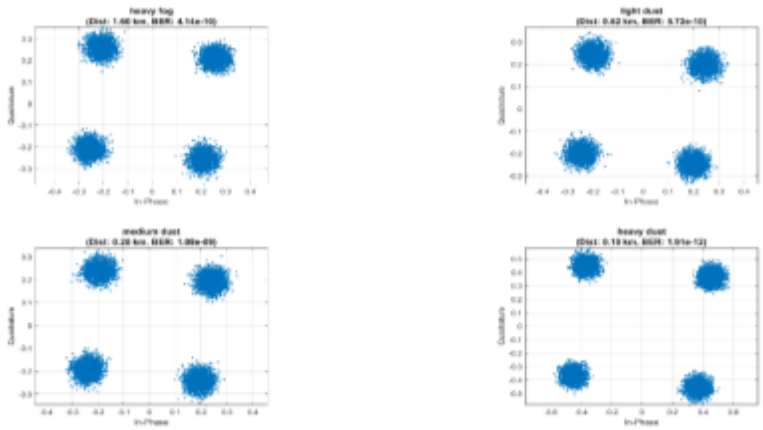
تغطي هذه المجموعة التحديات الأصعب المتمثلة بالضباب الكثيف، الغبار الخفيف، الغبار المتوسط، والغبار الكثيف.

في حالة الضباب الكثيف ورغم التخامد الشديد، نجح النظام في تأمين اتصال لمسافة 1.6 Km. أما في حالة الغبار، فقد أظهر الكاشف المتكيف مرونة استثنائية؛ حيث تمكن من استخلاص البيانات في بيئة الغبار الكثيف لمسافة 0.1 Km



.

الشكل 7. مخطط العين للإشارة المستقبلة في الظروف القاسية: الضباب الكثيف وحالات الغبار (الخفيف، المتوسط، الكثيف).

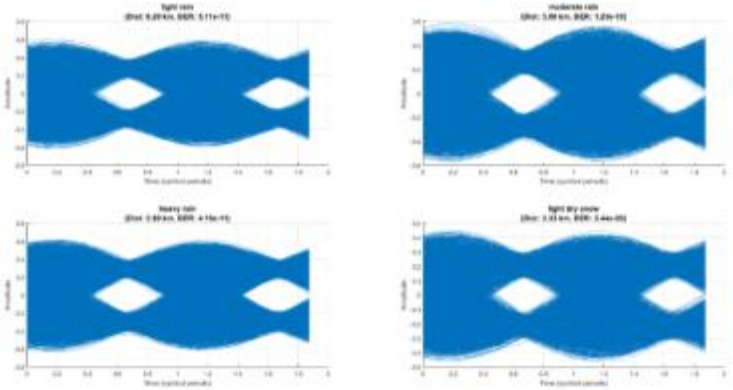


الشكل 8. مخطط فضاء الإشارة في الظروف القاسية: الضباب الكثيف وحالات الغبار (الخفيف، المتوسط، الكثيف).

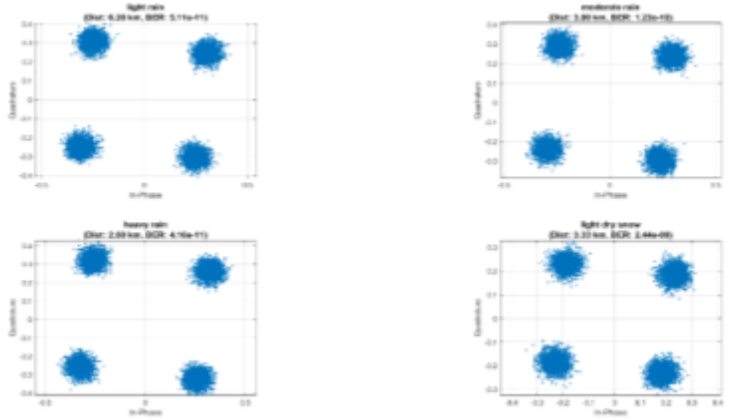
يوضح الشكل (7) أن مخطط العين في حالة الغبار الكثيف يعاني من انغلاق جزئي، وهو أمر متوقع في هذه الظروف القاسية، إلا أن الفتحة لا تزال موجودة بفضل تيار التعويض الديناميكي الذي رفع الإشارة فوق مستوى الضجيج الحراري. يؤكد الشكل (8) هذه النتيجة، حيث تظهر فضاء الإشارة أكثر انتشاراً مقارنة بالطقس الصافي، لكنها لا تزال قابلة للفصل ضمن الأرباع الأربعة للمستوى العقدي.

ثالثاً: الأداء في ظروف الأمطار والثلج الجاف الخفيف:

تضم هذه المجموعة: المطر الخفيف، المطر المعتدل، المطر الكثيف، والثلج الجاف الخفيف. أظهرت النتائج أن تأثير المطر على الإشارة الضوئية أقل حدة من الضباب، حيث حقق النظام في المطر الكثيف مدى ارسال 2.8 Km. يبين الشكل (9) مخطط العين بفتحات ممتازة وواضحة لجميع حالات المطر، مما يعكس استقرار القناة الضوئية. كما يوضح الشكل (10) تجمعات الرموز محددة بدقة، مما يشير إلى أن تقنية APNEDCI عملت بكفاءة عالية لتعويض التخامد الناتج عن المطر، والحفاظ على نسبة إشارة إلى ضجيج مرتفعة.



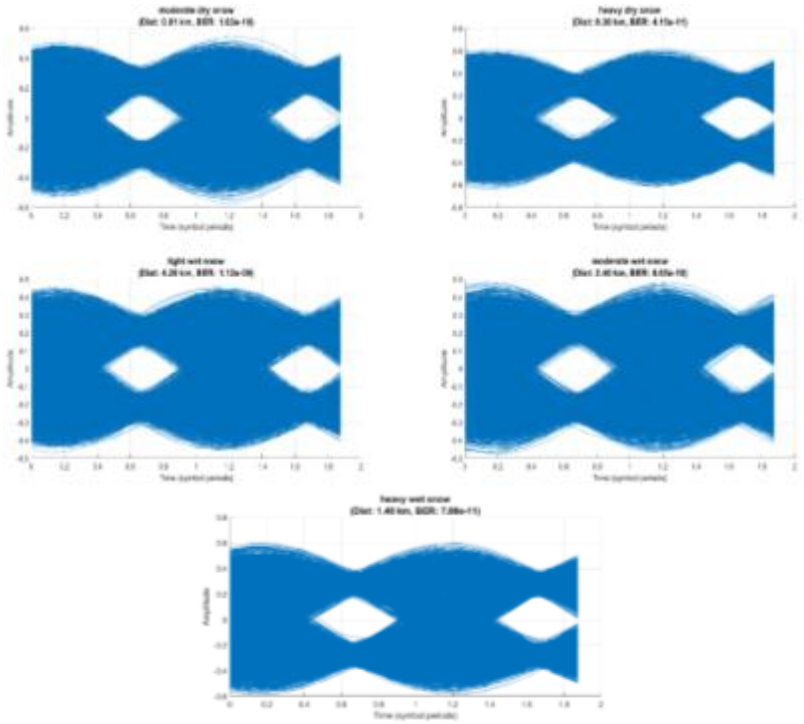
الشكل 9. مخطط العين للإشارة المستقبلة لحالات المطر (الخفيف، المعتدل، الكثيف) والثلج الجاف الخفيف.



الشكل 10. مخطط فضاء الإشارة لحالات المطر (الخفيف، المعتدل، الكثيف) والثلج الجاف الخفيف.

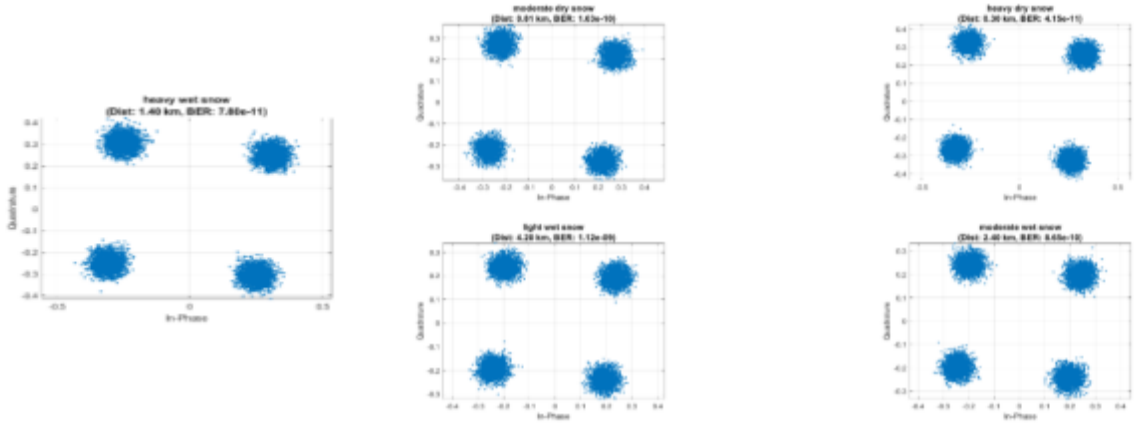
رابعاً: الأداء في ظروف الثلوج المختلفة:

تتناول هذه المجموعة تأثيرات الثلوج: الثلج الجاف (المعتدل والكثيف) والثلج الرطب (الخفيف، المعتدل، والكثيف). تعد هذه الحالات من أصعب العوامل التي تم تجاهلها في معظم الدراسات السابقة. أثبت النظام قدرته على التعامل مع الامتصاص العالي للثلج الرطب، محققاً مدى ارسال 1.4 Km في حالة الثلج الرطب الكثيف.



الشكل 11. مخطط العين للإشارة المستقبلة لسيناريوهات الثلوج (الجافة والرطبة) بدرجات شدة مختلفة.

يظهر الشكل (11) والشكل (12) جودة الإشارة لهذه الحالات؛ حيث نلاحظ في حالة الثلج الجاف الكثيف انضغاطاً في مخطط العين وانتشاراً في نقاط فضاء الإشارة نتيجة التخامد العالي، إلا أن النظام حافظ على استمرارية الخدمة بنجاح. هذه النتائج تؤكد أن الكاشف المقترح يوفر حلاً موثوقاً للمناطق ذات المناخ الثلجي.



الشكل 12. مخطط فضاء الإشارة لسيناريوهات الثلوج (الجافة والرطبة) بدرجات شدة مختلفة.

3-مقارنة النتائج مع الأعمال السابقة:

تم إجراء مقارنة معيارية مع مجموعة مختارة من أحدث الدراسات المرجعية. يلخص الجدول (4) أوجه المقارنة من حيث التقنية المقترحة، ومدى الأقصى للإرسال المحقق في الظروف المختلفة.

الجدول 4. مقارنة شاملة بين أداء النظام المقترح والدراسات المرجعية الحديثة.

ملاحظات المقارنة	شمولية البيئة (ثلوج/غبار)	أداء الطقس السيئ (أقصى مدى)	أقصى مدى (الطقس الصافي)	التقنية المستخدمة	الدراسة المرجعية
تضيف تعقيداً وتكلفة إضافية في البنية المادية للمستقبل مقارنة بالكاشف التقليدي PIN	شاملة جداً (الثلوج –الامطار –الضباب – الغبار)	ضباب كثيف 1.6 Km مطر كثيف: 2.8 Km غبار كثيف: 0.1 Km	26.5 km	Adaptive Rx (APNEDCI)	الدراسة الحالية
عانت من تراجع حاد في المدى. بينما تفوق نظامنا المقترح بمسافة إرسال أكبر وشمولية أوسع.	لا تشمل الثلوج والغبار	ضباب كثيف: 0.85 Km مطر: 1.1 Km	1.9 km	Dual Channel WDM	[5]
اقتصرت على الطقس الصافي. بينما يتميز نظامنا المقترح بتغطية شاملة ومقاومة لجميع ظروف التخامد الجوي.	غير شاملة	لم تذكر الظروف القاسية	1.08 km	DP-QPSK	[6]
مسافة الإرسال لديها قصيرة وأهملت الثلوج. بينما يتفوق نموذجنا بمدى الارسال ويشمل بيئات أكثر تعقيداً.	لا تشمل الثلوج	ضباب كثيف: 0.78 Km مطر كثيف: 1 Km غبار كثيف: 0.1 Km	9 km	OAM + PDM + OCDMA	[7]
اعتمدت نموذجاً مثالياً يتجاهل الخسائر الهندسية. بينما دراستنا الحالية تعتمد نموذجاً فيزيائياً أكثر واقعية وموثوقية.	غير شاملة	ضباب كثيف: 5 Km	لم تدرس	MDNRZ	[8]
تعاني من تعقيد داراتي وتكلفة عالية (DSP). بينما حقق نظامنا نتائج تنافسية جداً في الظروف القاسية ببنية أبسط وأرخص.	لا تشمل الغبار	ضباب كثيف: 1.9 Km مطر كثيف: 2.3 Km	85 km	DP 16-QAM + DSP	[9]
تعاني من مدى إرسال محدود جداً. بينما ضاعف نظامنا المقترح المسافة بفضل الكاشف المتكيف.	لا تشمل الغبار	ضباب كثيف: 0.68 Km مطر كثيف: 0.76 Km	4 km	SAC-OCDMA + PDM	[10]

تحليل المقارنة:

تظهر البيانات الواردة في الجدول (4) أن المنهجية المقترحة لتحسين الواجهة الأمامية للمستقبل تحقق أداءً تنافسياً مقارنةً بالمنهجيات المعتمدة في الدراسات السابقة. تهدف هذه المقارنة الى وضع التقنية المقترحة ضمن سياق الأبحاث المرجعية الحديثة، وإبراز مساهمتها العلمية بالنسبة للأعمال المنشورة ذات الصلة. ونظراً لصعوبة توحيد بارامترات التصميم عملياً لتباينها بين تلك الدراسات، فقد تم التركيز على تقييم الأداء العام، ويبرز ذلك في عدة نقاط جوهرية:

1. التحسن في مدى الارسال: تُظهر الدراسات المرجعية [5، 6، 7، 10] تركيزاً على زيادة معدل النقل عبر تقنيات التجميع أو التعديل المتقدم، إلا أن مدى الإرسال في الضباب الكثيف بقي محدوداً جداً لديها أقل من 1 Km في المقابل، نجح الكاشف المتكيف APNEDCI في كسر حاجز الكيلومتر ونصف في الضباب الكثيف 1.6 Km، محققاً تحسناً يتجاوز % 100 مقارنة بالدراستين [5] و[10]، ومؤكداً فعاليته في البيئات ذات التخامد العالي.
2. الكفاءة مقابل التعقيد: تعتمد الدراسة [9] على مستقبل متماسك DP 16-QAM مدعوم بوحدة بمعالجة رقميةDSP متقدمة، مما يمنحها حساسية عالية في الطقس الصافي 85 Km، لكنه يرفع التعقيد الحسابي والهندسي بشكل كبير. أما الدراسة [8]، فرغم تحقيقها مدى ارسال كبير في الضباب، فقد اعتمدت على نموذج محاكاة شبه مثالي يتجاهل الخسائر الهندسية، مما يجعل نتائجها أقل واقعية. في المقابل، يقدم النظام المقترح بديلاً أكثر كفاءة من حيث استهلاك الطاقة والتعقيد الداراتي، معتمداً على تعديلQPSK بسيط وتحسين في آلية الكشف، محققاً مدى ارسال 2.8 Km في المطر الكثيف، وهو أداء واقعي ومنافس للنظام المعتمد على DSP في الدراسة [9] الذي حقق 2.3 Km
3. الشمولية البيئية: تنفرد هذه الدراسة بكونها الوحيدة بين الدراسات المقارنة التي قدمت تحليلاً شاملاً لتأثير مختلف الظروف الجوية، بما في ذلك الثلوج الجافة والرطبة والغبار بمستوياته المتعددة. يكشف النظام المقترح عن قدرة واضحة على العمل بمدى يصل إلى 1.4 Km في الثلج الرطب الكثيف، مما يملأ فجوة بحثية مهمة في تصميم شبكات FSO في المناطق الثلجية.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

قدم هذا البحث حلاً جديداً لتحديات الربط في أنظمة الاتصالات الهجينة من خلال تصميم ونمذجة كاشف ضوئي متكيف يعمل في الواجهة الأمامية للمستقبل. بناءً على النتائج والتحليلات، تم التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

1. أثبتت تقنية الحقن الديناميكي لتيار التعويض جدواها في التغلب على قيود الضجيج الحراري، حيث مكنت النظام من تحقيق تحسن في مدى الإرسال وصل إلى % 96.3 في ظروف الطقس الصافي (26.5 Km مقابل 13.5 Km للنظام التقليدي).
2. أظهر النظام المقترح موثوقية جيدة في ظروف التخامد الشديد، حيث نجح في تأمين استمرارية الخدمة لمسافة 1.6 Km في الضباب الكثيف و2.8 Km في المطر الكثيف، متفوقاً بذلك على الحلول المعتمدة على تعدد الإرسال والترميز المعقد التي عانت من انقطاع الوصلة عند مسافات أقصر (دون 1 Km) في دراسات مرجعية حديثة.
3. قدم البحث تحليلاً شاملاً ونادراً لتأثيرات الثلوج والغبار، وأثبتت النتائج قدرة تقنية التكيف المقترحة على استخلاص الإشارة في بيئة الغبار الكثيف (لمسافة 0.1 Km) والثلج الرطب الكثيف (1.4 Km) والثلج الجاف الكثيف (0.3 Km)، مما يجعل النظام مرشحاً للعمل في البيئات الجغرافية ذات المناخ القاسي.

4. يؤكد البحث أن تحسين الطبقة المادية للمستقبل (Physical Layer Enhancement) يمثل نهجاً أكثر فاعلية وكفاءة من حيث استهلاك الاستطاعة والتعقيد الحسابي مقارنة بالاعتماد على خوارزميات المعالجة الرقمية المتقدمة.

التوصيات:

بناءً على النتائج المحققة، يوصي البحث بالآتي:

1. العمل على التنفيذ المادي لدارة الكاشف المقترح (APNEDCI) باستخدام تقنيات الدارات المتكاملة (CMOS) أو مصفوفات البوابات المنطقية القابلة للبرمجة (FPGA) للتحقق من الأداء في بيئة تجريبية حقيقية.
2. توسيع نطاق الدراسة ليشمل تأثير الاضطرابات الجوية (Atmospheric Turbulence/Scintillation)، وتطوير التقنية المقترحة للتعامل مع التغيرات السريعة جداً في قرينة انكسار الهواء.
3. دراسة إمكانية دمج المستقبل الضوئي المتكيف مع أنظمة تعديل عالية الرتبة (مثل 16-QAM و-64 QAM) لزيادة السعة.

References:

[1] W. Jiang, C. Lin, P. Shih, J. J. Chen, P. Peng, and S. Chi, "A full duplex radio-over-fiber link with multi-level OFDM signal via a single electrode MZM and wavelength reuse with a RSOA," Optics Express. Vol. 18, pp. 2710-2718, 2010.

[2] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," IEEE Communications Surveys & Tutorials. Vol. PP, pp. 1-1, 2016.

[3] J. Zhang and G. De la Roche, Femtocells: technologies and deployment, Wiley, Chichester, 2010.

[4] S. A. Al-Gailani et al., "A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks," IEEE Access. Vol. 9, pp. 7353-7373, 2021.

[5] M. A. Saleh, A. K. Abass, and M. H. Ali, "Enhancing performance of WDM-RoFSO communication system utilizing dual channel technique for 5G applications," Optical and Quantum Electronics. Vol. 54(8), p. 497, 2022.

[6] S. Pradhan, B. Patnaik, and R. K. Panigrahy, "DP-QPSK technique for ultra-high bit-rate DWDM FSO system," Journal of Optical Communications. Vol. 44(2), pp. 251-260, 2023.

[7] M. Singh, M. H. Aly, and S. A. Abd El-Mottaleb, "6G enabling FSO communication system employing integrated PDM-OAM-OCDMA transmission: impact of weather conditions in India," Applied Optics. Vol. 62(1), pp. 142-152, 2023.

[8] A. Gopalan et al., "Efficient employment of optical sources integrated with both light detectors and free space communication modulated channel under ambient conditions effects," Journal of Optical Communications. 2023.

[9] S. Singh, N. S. Grewal, and B. Kaur, "Performance investigation and development of 112 gbit/s dual polarization 16 QAM transmission system using differential encoding," Optical and Quantum Electronics. Vol. 55(1), p. 70, 2023.

[10] M. Singh, M. H. Aly, and S. A. Abd El-Mottaleb, "Performance analysis of 6× 10 Gbps PDM-SAC-OCDMA-based FSO transmission using EDW codes with SPD detection," Optik. Vol. 264, p. 169415, 2022.

[11] G. Keiser, "Optical communications essentials," McGraw-Hill, New York, (2003).
[12] K. D. Achyut, K. D. Niloy, and F. Masahiko, "WDM Technologies: Optical Networks," 1st ed., Academic Press Inc, USA, 2004.

[13] L. Li, P. G. Patki, Y. B. Kwon, V. Stelmakh, B. D. Campbell, M. Annamalai, T. I. Lakoba, and M. Vasilyev, "All-optical regenerator of multi-channel signals," Nature Communications, vol. 8, Art. no. 884, Oct. 2017.

[14] H. Kaushal, V. K. Jain, and S. Kar, "Free Space Optical Communication," Springer Pvt. Ltd, pp. 44-86, 2017.

[15] Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links, Recommendation ITU-R P.1814-1, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2025.

[16] M. M. Mohsenpour and C. E. Saavedra, "Method to Improve the Linearity of Active Commutating Mixers Using Dynamic Current Injection," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 64(12), pp. 4624-4631, 2016.

[17] H. Darabi and A. A. Abidi, A 4.5-mW 900-MHz CMOS receiver for wireless paging, IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 35(8), pp. 1085-1096, 2000.

[18] W. Z. Chen and C. H. Lu, "Design and analysis of a 2.5-Gb/s optical receiver analog front-end in a 0.35-μm digital CMOS technology," IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 36(5), pp. 753-760, 2001.

[19] Y. Yang, D. Li, N. Qi, and B. Wang**,** "A 2 pA/√Hz Input-Referred Noise TIA in 180-nm CMOS With 2.5 GHz Bandwidth for Optical Receiver**,**" IEEE Solid-State Circuits Letters, vol. 8, pp. 189–192, Jul. 2025.

[20] D. Mitić, "Estimation of the bit error rate and quality factor in optical systems," Proc. UNITECH Int. Scientific Conf., Gabrovo, Bulgaria, 2019.