

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

СИСТЕМА ОПТИЧНОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ
ФОТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ПОКРАЩЕНИХ МХЕНЕ-МАТЕРІАЛАМИ
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи ФТОІм-24-1

Валентин ФЕДІН
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні
технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та
оптоінформатика»

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Олена ЛІННИК

(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Фізичних основ електронної техніки

Рівень вищої освіти другий(магістерський)

Спеціальність 175 Інформаційно – вимірювальні технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Федіну Валентину Ярославовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Система оптичної кореляційної обробки сигналів на основі фотонних елементів, покращених МХе_п-матеріалами

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2025 р. № 1025Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи довідкові матеріали з оптичних кореляторів і фотоніки; експериментальні параметри МХе_п-матеріалів (інтенсивність насичення, глибина модуляції, ненасичувані втрати), математичні моделі насичуваного поглинання, програмне середовище MATLAB/Simulink для моделювання

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 1 Провести аналіз сучасних методів оптичної кореляційної обробки сигналів у фотонних системах. 2 Дослідити можливості використання МХе_п-матеріалів як функціональних фотонних елементів для підвищення якості кореляції. 3 Розробити та реалізувати в середовищі.

4 MATLAB/Simulink модель 4f-оптичної кореляційної системи з МХе_п-елементами.

5 Виконати комп'ютерне моделювання та оцінити ефективність системи за метриками PSR, PCE і ймовірністю виявлення.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 12 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд фотонних елементів систем оптичної кореляційної обробки сигналів	03.09.25–20.09.25	Виконано
2	Аналіз теоретичних основ оптичної кореляційної обробки сигналів	25.09.25–05.10.25	Виконано
3	Проектування системи оптичної кореляції	10.10.25–18.10.25	Виконано
4	Моделювання роботи системи та аналіз результатів	22.10.25–25.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	30.10.25–11.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	14.11.25–20.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КвР на унікальність	26.11.25–08.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	10.12.25–13.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	15.12.25–18.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р..

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Олена ЛІННИК
(підпис) (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 43 с., 10 рис., 3 табл., 2 додатки, 22 джерела.

ЙМОВІРНІСТЬ ДЕТЕКЦІЇ, ОПТИЧНА КОРЕЛЯЦІЯ, ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ, МХЕНЕ, МАТЛАБ-МОДЕЛЮВАННЯ, 4f-КОРЕЛЯТОР.,

Об'єкт дослідження – процеси оптичної кореляційної обробки сигналів у фотонних системах.

Предмет дослідження – методи та засоби моделювання впливу МХене-елементів на просторово-частотну обробку сигналів у системах оптичної кореляції.

Метою роботи є розроблення та дослідження системи оптичної кореляційної обробки сигналів на основі 4f-корелятора з використанням МХене-елементів, а також аналіз впливу параметрів МХене на характеристики кореляційного виявлення.

У роботі проведено аналіз сучасних методів оптичної кореляційної обробки сигналів та можливостей застосування двовимірних матеріалів класу МХене у фотоніці. Розроблено чисельну модель 4f-оптичного корелятора типу VanderLugt у середовищі МАТЛАБ. Запропоновано системний підхід до параметризації МХене-елементів на основі моделі насичуваного поглиначча з урахуванням modulation depth, saturation intensity та non-saturable loss.

Практичне значення роботи полягає у створенні програмно-методичного інструментарію для проєктування та аналізу оптичних кореляційних систем з МХене-елементами, який може бути використаний при підготовці експериментальних макетів і подальших дослідженнях фотонних систем кореляційної обробки сигналів.

ABSTRACT

Explanatory note includes: 43 pages, 10 pictures, 3 tables, 2 application, 22 sources for references.

MATLAB-SIMULATION, MXENE, 4f-CORRELATOR, OPTICAL CORRELATION, PROBABILITY OF DETECTION, SPATIAL-FREQUENCY ANALYSIS.

Object of the study – the processes of optical correlation signal processing in photonic systems.

Subject of the study – methods and means of modeling the influence of MXene elements on spatial-frequency signal processing in optical correlation systems.

The purpose of the work is to develop and study an optical correlation signal processing system based on a 4f correlator using MXene elements, as well as to analyze the influence of MXene parameters on the characteristics of correlation detection.

The work analyzes modern methods of optical correlation signal processing and the possibilities of using two-dimensional MXene materials in photonics. A numerical model of a VanderLugt-type 4f optical correlator in the MATLAB environment is developed. A systematic approach to parameterization of MXene elements based on a saturable absorber model is proposed, taking into account modulation depth, saturation intensity and non-saturable loss.

The practical significance of the work lies in the creation of software and methodological tools for the design and analysis of optical correlation systems with MXene elements, which can be used in the preparation of experimental models and further research into photonic systems for correlation signal processing.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	7
Вступ.....	8
1. Огляд фотонних елементів систем оптичної кореляційної обробки сигналів.....	11
1.1 Оптична кореляційна обробка сигналів: загальні принципи та архітектури	11
1.2 Джерела оптичного випромінювання в системах кореляції	11
1.3 Просторові модулятори світла як ключові фотонні елементи.....	12
1.4 Кореляційні фільтри та голографічні елементи	12
1.5 Фотонні елементи для перетворення Фур'є та просторової обробки ...	13
1.6 Фотоприймальні елементи в кореляційних системах.....	13
1.7 Фотонно-інтегровані елементи та корелятори на чипі	14
2 Теоретичні основи оптичної кореляційної обробки сигналів	15
2.1 Кореляція як фундаментальна операція в теорії сигналів.....	15
2.2 Перетворення Фур'є та його фізична реалізація в оптиці	15
2.3 Загальні принципи оптичної кореляційної обробки	16
2.4 Корелятор Вандер-Лугта як класична архітектура	17
2.5 Спільно-фур'є трансформний корелятор	18
2.6 Критерії оцінювання якості кореляційної обробки.....	19
2.7 Вплив фізичних факторів і шумі.....	19
2.8 Теоретичні аспекти використання нових фотонних матеріалів	20
3 Проектування системи оптичної кореляції	21
3.1 Основи 4f-оптичної кореляційної системи	21
3.2 Нелінійна MXene-компенсація у площині Фур'є.....	24
3.3 MXene-матеріали: експериментальні параметри	28
3.4 Результати моделювання кореляційної системи з MXene-SA	31
Висновки	40
Перелік джерел посилання	41
Додаток А Лістинг програми	44
Додаток Б Демонстраційний матеріал	52

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- FFT – Fast Fourier Transform (швидке перетворення Фур'є);
- SA – Saturable Absorber (насичуваний поглинач);
- MXene – двовимірні перехіднометалеві карбіди та нітриди;
- PSR – Peak-to-Sidelobe Ratio (відношення піка до бічних пелюсток);
- PCE – Peak-to-Correlation Energy (відношення пікової енергії до енергії кореляції);
- Pdet – Probability of Detection (ймовірність виявлення);
- SLM – Spatial Light Modulator (просторовий світловий модулятор);
- CCD – Charge-Coupled Device (пристрій із зарядовим зв'язком);
- CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (КМОП-матриця);
- SNR – Signal-to-Noise Ratio (відношення сигнал/шум);
- FT – Fourier Transform (перетворення Фур'є);
- MATLAB – Matrix Laboratory (програмне середовище для чисельного моделювання).

ВСТУП

Сучасний розвиток оптоелектронних та волоконно-оптичних технологій значно впливає на формування нових підходів до створення високоточних систем передавання інформації та керування. Оптичні канали зв'язку, завдяки своїй широкій смузі пропускання, низькому рівню втрат і стійкості до електромагнітних завад, стали ключовим елементом сучасних інформаційно-вимірювальних систем, роботизованих комплексів та мобільних платформ. Високошвидкісні оптоволоконні лінії дозволяють забезпечувати надійний обмін даними у реальному часі, що є критично важливим для систем із розподіленою архітектурою, де необхідна синхронізована робота кількох об'єктів керування [1].

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким зростанням обсягів візуальної та просторово-структурованої інформації, що потребує високопродуктивних методів її обробки в режимі реального часу. Задачі виявлення, розпізнавання та локалізації образів є ключовими для систем технічного зору, дистанційного зондування, біомедичної діагностики, навігації, систем безпеки та оборонних застосувань. У цих галузях класичні цифрові методи обробки сигналів, незважаючи на їхню універсальність, стикаються з фундаментальними обмеженнями, пов'язаними зі швидкодією, енергоспоживанням і масштабованістю при роботі з великими масивами даних.

Оптична кореляційна обробка сигналів є альтернативним і перспективним підходом, який використовує фізичні властивості світла для виконання складних математичних операцій, зокрема згортки та кореляції, практично зі швидкістю поширення електромагнітної хвилі. Класичні архітектури оптичних кореляторів, такі як 4f-корелятор типу VanderLugt та корелятор спільного спектра (Joint Transform Correlator, JTC), продемонстрували високу ефективність у задачах розпізнавання образів, інваріантності до зсувів та паралельної обробки інформації [2]. Водночас

подальший розвиток таких систем вимагає впровадження нових функціональних матеріалів і елементів, здатних розширити можливості оптичного тракту, зокрема шляхом нелінійної та селективної обробки просторово-частотних компонент сигналів.

У цьому контексті значний науковий та практичний інтерес становлять двовимірні матеріали класу MXene — карбіди, нітриди та карбонітриди перехідних металів із шаруватою структурою та унікальним поєднанням електронних, оптичних і нелінійних властивостей. MXene-матеріали демонструють виражене насичуване поглинання в широкому спектральному діапазоні, високий коефіцієнт модуляції, можливість інтеграції у фотонні структури та сумісність із планарними технологіями. Це робить їх перспективними кандидатами для використання в ролі оптичних модуляторів, спектральних фільтрів, нелінійних елементів у Fourier-площині, а також активних матеріалів фотодетекторів у кореляційних системах.

Попри зростаючу кількість експериментальних досліджень, присвячених нелінійним оптичним властивостям MXene, питання їх системного впливу на характеристики оптичної кореляційної обробки сигналів залишається недостатньо дослідженим. Зокрема, потребують аналізу механізми впливу параметрів MXene-елементів на форму кореляційного піка, рівень бічних пелюсток, енергетичний баланс кореляційної карти та статистичні характеристики детекції [2]. Це зумовлює актуальність розроблення чисельних моделей, які дозволяють поєднати експериментально вимірювані параметри MXene з архітектурою оптичних кореляторів і забезпечити інженерно обґрунтований вибір матеріалів та режимів їх використання.

Таким чином, актуальність даної магістерської роботи визначається потребою у створенні та дослідженні систем оптичної кореляційної обробки сигналів нового покоління з використанням MXene-елементів, що поєднують високу швидкодію оптичних методів із розширеними функціональними можливостями сучасних двовимірних матеріалів.

Метою магістерської роботи є розроблення та дослідження системи оптичної кореляційної обробки сигналів на основі 4f-корелятора з використанням МХене-елементів, а також аналіз впливу параметрів МХене на характеристики кореляційного виявлення.

Об'єктом дослідження є процеси оптичної кореляційної обробки сигналів у фотонних системах.

Предметом дослідження є методи та засоби моделювання впливу МХене-елементів на просторово-частотну обробку сигналів у системах оптичної кореляції.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачається розв'язання таких задач:

1. проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі оптичних кореляційних систем та застосування МХене-матеріалів у фотоніці;
2. розробити чисельну модель 4f-оптичного корелятора з узгодженим фільтром у середовищі MATLAB;
3. реалізувати параметричну модель МХене-елемента на основі насичуваного поглинання та інтегрувати її у Fourier-площину корелятора;
4. провести порівняльне моделювання системи без МХене та з МХене-елементами за різних рівнів шуму;
5. оцінити вплив МХене на метрики якості кореляційного виявлення (PSR, PCE, ймовірність детекції);
6. сформулювати практичні рекомендації щодо використання МХене-матеріалів у системах оптичної кореляційної обробки сигналів.

1 ОГЛЯД ФОТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ОПТИЧНОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

1.1 Оптична кореляційна обробка сигналів: загальні принципи та архітектури

Оптична кореляційна обробка сигналів є одним із класичних напрямів фотонної обробки інформації, що базується на використанні властивостей просторово-часових світлових полів для виконання операції кореляції. Кореляція широко застосовується у задачах розпізнавання образів, машинного зору, криптографії, біометричної ідентифікації та високошвидкісної обробки сигналів [3].

Найбільш поширеними архітектурами оптичних кореляторів є:

- корелятор Вандер-Лугта (4f-корелятор),
- спільно-фур'є трансформний корелятор (Joint Transform Correlator).

У 4f-кореляторі кореляція реалізується шляхом виконання двох оптичних перетворень Фур'є та множення спектрів у частотній площині, де розміщується кореляційний фільтр. У JTC-кореляторі еталонне та вхідне зображення формуються в одній площині, а кореляція виникає після зворотного перетворення Фур'є спільного спектра. Обидві архітектури мають свої переваги та обмеження, що безпосередньо визначають вимоги до фотонних елементів системи.

1.2 Джерела оптичного випромінювання в системах кореляції

Ключовим елементом будь-якого оптичного корелятора є джерело випромінювання, параметри якого визначають режим роботи системи.

Лазерні джерела забезпечують високу просторову та часову когерентність, що є критично важливим для фазових кореляційних фільтрів, голографічних кореляторів та криптографічних застосувань. Водночас

когерентність призводить до появи спекл-шуму та підвищує чутливість системи до механічних і температурних нестабільностей [4].

Світлодіоди та ширококутові джерела застосовуються у некогерентних кореляторах, зокрема у поєднанні з цифровими мікродзеркальними пристроями (DMD). Вони знижують рівень інтерференційних шумів, проте обмежують можливості фазової обробки сигналів.

1.3 Просторові модулятори світла як ключові фотонні елементи

Рідкокристалічні просторові модулятори (LCOS-SLM) є одним із найбільш поширених фотонних елементів у системах оптичної кореляції. Вони забезпечують високу роздільну здатність та можливість фазової модуляції світлового поля, що дозволяє реалізовувати оптимальні фазові кореляційні фільтри.

Основними недоліками LCOS-SLM є обмежена швидкодія (мілісекундний діапазон) та нелінійність залежності фази від прикладеної напруги, що ускладнює калібрування системи.

Цифрові мікродзеркальні пристрої (DMD) базуються на MEMS-технологіях та реалізують бінарну амплітудну модуляцію з дуже високими частотами перемикання. Це робить їх перспективними для високошвидкісної кореляційної обробки та відеоаналізу.

Обмеженням DMD є відсутність прямої фазової модуляції, що потребує застосування голографічного або дифракційного кодування фазової інформації та призводить до втрат оптичної ефективності [5].

1.4 Кореляційні фільтри та голографічні елементи

Кореляційний фільтр є елементом, що визначає вибірковість та точність системи. Сучасні реалізації включають:

- цифрові фільтри, реалізовані на SLM;

- голографічні фільтри, записані у фотополімерах або об'ємних середовищах;
- дифракційні та метаповерхневі структури.

Голографічні елементи дозволяють реалізовувати багатоканальну кореляцію та зберігати великі бази еталонів, проте відзначаються складністю виготовлення та низькою гнучкістю.

1.5 Фотонні елементи для перетворення Фур'є та просторової обробки

Класичні $4f$ -системи базуються на об'ємних лінзах, які забезпечують точне перетворення Фур'є, але є габаритними та чутливими до юстування [6].

Альтернативою є:

- плоскі метаповерхні,
- дифракційні оптичні елементи.

Метаповерхні забезпечують радикальну мініатюризацію, проте зазвичай мають вузьку спектральну смугу та є статичними, що обмежує їх застосування у адаптивних кореляторах.

1.6 Фотоприймальні елементи в кореляційних системах

Для реєстрації кореляційного сигналу використовуються:

- CMOS/CCD-камери для двовимірної реєстрації кореляційного поля;
- фотодіодні матриці та балансні приймачі у системах часової або радіочастотної кореляції.

Перспективним напрямом є використання MXene-матеріалів у фотодетекторах, що може забезпечити підвищену чутливість та розширений спектральний діапазон, однак системні реалізації таких рішень у кореляторах поки залишаються недостатньо дослідженими [7].

1.7 Фотонно-інтегровані елементи та корелятори на чипі

Сучасні тенденції розвитку спрямовані на створення фотонно-інтегрованих кореляторів, зокрема на основі ЛТС-архітектури. Інтеграція на кремнієвих або гібридних платформах дозволяє досягти високої стабільності, компактності та потенційно надвисокої швидкодії.

Основною проблемою таких систем залишається введення та виведення двовимірних оптичних даних, а також складність масштабування архітектури без втрати паралельності [8].

Таблиця 1.1 – Характеристика фотонних елементів оптичних кореляторів

Фотонний елемент	Матеріальна платформа	Переваги	Недоліки	Типові застосування
LCOS-SLM	Рідкі кристали	Фазова модуляція, висока точність	Низька швидкодія	4f-корелятори, криптосистеми
DMD	MEMS	Висока швидкодія	Амплітудна модуляція	Некогерентні корелятори
Голографічні фільтри	Фотополімери	Паралельність, велика ємність	Складність виготовлення	Біометрія, безпека
Метаповерхні	Нанопотоніка	Мініатюризація	Статичність	Компактні корелятори
РІС-елементи	Si/SiN/III-V	Інтеграція, стабільність	2D I/O bottleneck	Кореляція на чипі
MXene-фотодетектори	2D-матеріали	Висока чутливість	Мала кількість системних робіт	Перспективні корелятори

Аналіз сучасної літератури дозволяє виділити такі науково-технічні прогалини:

- недостатню кількість системних робіт, у яких MXene-матеріали інтегровані безпосередньо в оптичні кореляційні системи;
- відсутність стандартизованих методик порівняння енергоефективності оптичних кореляторів;
- нестачу динамічно перебудовуваних фотонних елементів (метаповерхонь, фільтрів). Ці прогалини визначають актуальність подальших досліджень та формують наукове підґрунтя даної магістерської роботи.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОПТИЧНОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

2.1 Кореляція як фундаментальна операція в теорії сигналів

Кореляція є однією з базових операцій теорії сигналів і використовується для оцінювання ступеня подібності між двома сигналами або між сигналом і заданим еталоном. На відміну від простого порівняння значень сигналів, кореляційний підхід дозволяє враховувати просторові або часові зсуви, що є критично важливим для задач розпізнавання образів та ідентифікації сигналів.

Для двовимірних сигналів, зокрема зображень, кореляція визначається у двох просторових координатах. Максимум кореляційної функції відповідає положенню найбільшого збігу між вхідним і еталонним сигналами, тоді як амплітуда цього максимуму є мірою їх подібності. Таким чином, кореляційна обробка природним чином поєднує функції детекції та локалізації [9].

Важливою властивістю кореляції є її тісний зв'язок із операцією згортки. З математичної точки зору кореляція може бути представлена як згортка одного сигналу з комплексно-спряженим та просторово інвертованим другим сигналом. Це дозволяє ефективно реалізовувати кореляційні алгоритми у частотній області з використанням перетворення Фур'є.

2.2 Перетворення Фур'є та його фізична реалізація в оптиці

Перетворення Фур'є відіграє центральну роль у теорії та практиці оптичної кореляційної обробки. Воно забезпечує перехід від просторового опису сигналу до спектрального, у якому операція кореляції зводиться до множення комплексних спектрів [10].

У фізичній оптиці відомо, що тонка лінза в параксіальному наближенні реалізує перетворення Фур'є амплітудного розподілу світлового поля у своїй фокальній площині. Ця властивість лежить в основі оптичних обчислювальних

систем, оскільки дозволяє виконувати складні математичні операції безпосередньо в оптичному домені.

Поєднання двох лінз у $4f$ -конфігурації дає змогу послідовно виконувати пряме та зворотне перетворення Фур'є. Така схема є універсальною платформою для реалізації оптичних фільтрів, кореляторів та інших фотонних процесорів. Водночас у реальних системах необхідно враховувати дифракційні обмеження, скінченну апертуру оптичних елементів та аберації, які впливають на точність спектрального представлення сигналів.

2.3 Загальні принципи оптичної кореляційної обробки

Оптична кореляція реалізується шляхом формування світлового поля, просторовий розподіл якого відповідає вхідному сигналу, та подальшої взаємодії цього поля з кореляційним фільтром. У результаті проходження через оптичну систему формується кореляційне поле, інтенсивність якого містить інформацію про ступінь подібності між сигналами.

Характерною особливістю оптичної кореляції є її паралельність: усі просторові компоненти сигналу обробляються одночасно [11]. Це забезпечує надзвичайно високу швидкість, що є принциповою перевагою фотонних систем порівняно з електронними реалізаціями. Рішення про наявність збігу може бути прийняте на основі аналізу інтенсивності світла в обмеженій області, що значно спрощує подальшу електронну обробку.

Разом із тим оптична кореляція є аналоговим процесом, що зумовлює її чутливість до шумів, нестабільностей джерела випромінювання та похибок фотонних елементів. Це вимагає ретельного теоретичного аналізу умов формування кореляційного сигналу та факторів, які впливають на його якість.

2.4 Корелятор Вандер-Лугта як класична архітектура

Корелятор Вандер-Лугта є класичною реалізацією оптичної кореляції на основі $4f$ -схеми. У цій архітектурі вхідний сигнал піддається перетворенню Фур'є, після чого його спектр множиться на спектральне представлення еталонного сигналу, реалізоване у вигляді кореляційного фільтра (рис. 2.1).. Зворотне перетворення Фур'є формує кореляційне поле у вихідній площині.

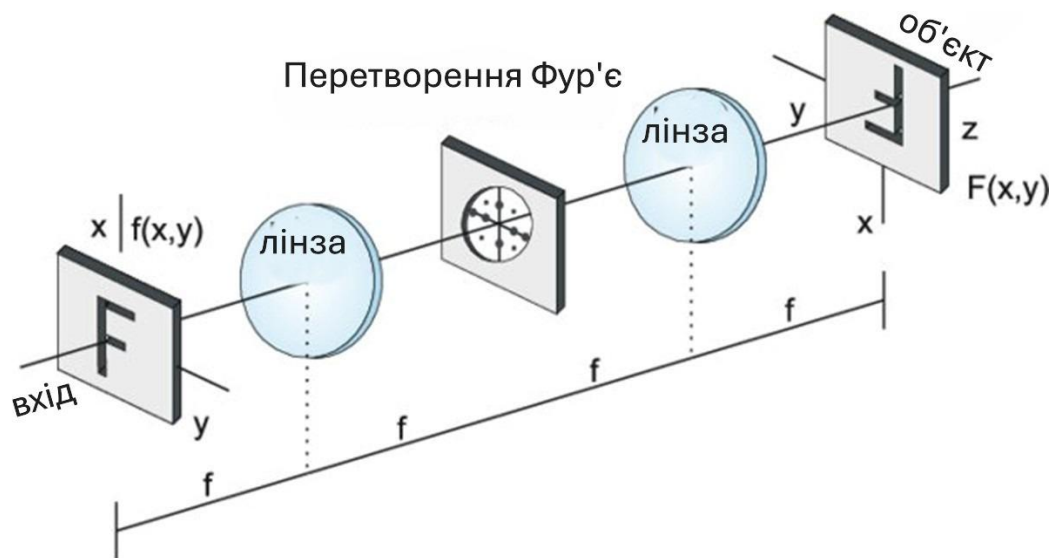


Рисунок 2.1 – $4f$ -корелятор типу VanderLugt

Основною перевагою такого підходу є можливість реалізації оптимальних кореляційних фільтрів, зокрема фазових, які забезпечують високий контраст кореляційного піка та добру завадостійкість. Це робить $4f$ -корелятор привабливим для задач високоточного розпізнавання та криптографічних застосувань.

Недоліком корелятора Вандер-Лугта є висока чутливість до юстування та необхідність точного розміщення фільтра у спектральній площині. Крім того, така архітектура складно піддається мініатюризації та інтеграції, що обмежує її використання у компактних фотонних системах.

2.5. Спільно-фур'є трансформний корелятор

Спільно-фур'є трансформний корелятор є альтернативною архітектурою, у якій еталонний і досліджуваний сигнали формуються в одній вхідній площині. Після перетворення Фур'є формується спільний спектр, інтенсивність якого використовується для подальшого формування кореляційного сигналу (рис. 2.2).

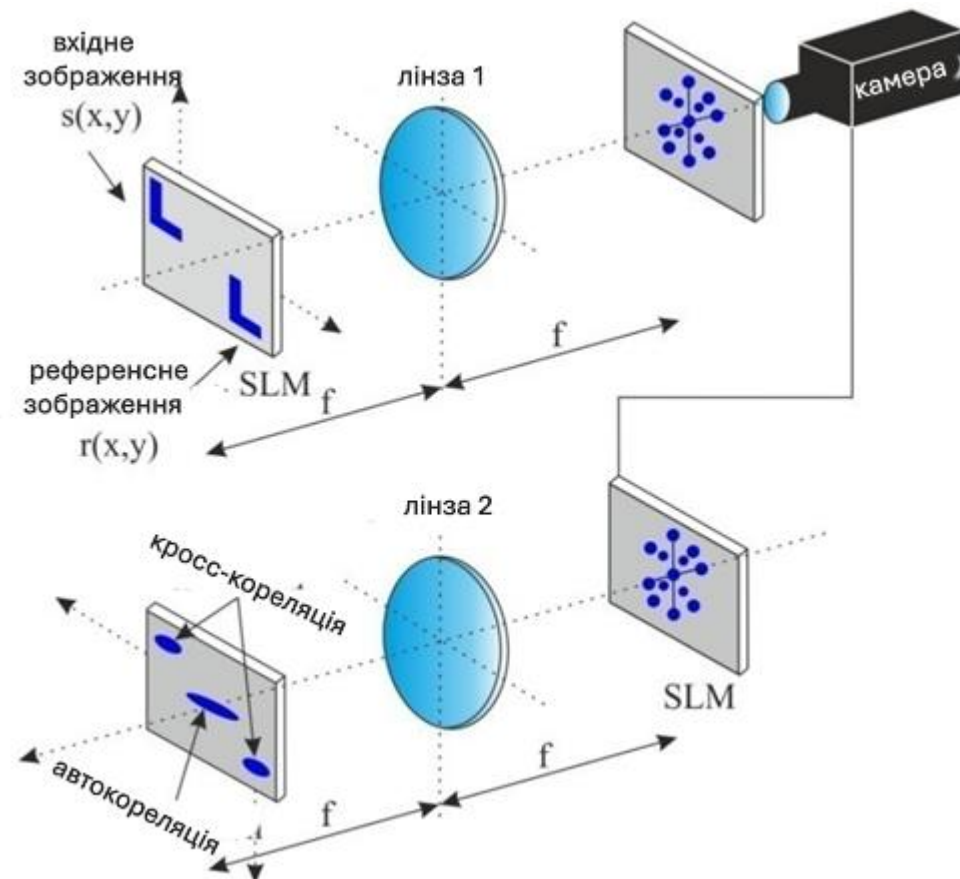


Рисунок 2.2 – JTC-корелятор

Перевагою JTC-корелятора є спрощення оптичної схеми та зменшення вимог до точності позиціювання кореляційного фільтра. Це робить його перспективним для адаптивних і фотонно-інтегрованих реалізацій. Водночас суттєвим обмеженням є наявність нульового порядку та перехресних

складових, які знижують контраст кореляційного піка і потребують додаткових алгоритмічних або оптичних методів придушення.

2.6 Критерії оцінювання якості кореляційної обробки

Для кількісної оцінки ефективності кореляційних систем використовуються метрики, що характеризують контраст та надійність кореляційного піка. Високе відношення піка до фонового рівня є необхідною умовою достовірного виявлення збігів, особливо в умовах шумів та спотворень [12].

Стійкість кореляційного результату до геометричних перетворень, зміни освітлення та наявності шумів є важливою характеристикою практичних систем. Теоретичний аналіз показує, що оптимальний вибір кореляційного фільтра та нормалізація спектральних компонентів дозволяють підвищити завадостійкість, однак повністю усунути вплив фізичних факторів неможливо [13].

2.7 Вплив фізичних факторів і шумів

У реальних оптичних системах формування кореляційного поля відбувається в умовах наявності різноманітних фізичних факторів, що спотворюють сигнал. До них належать обмежена когерентність джерела, дифракційні ефекти, аберації оптичних елементів та нелінійності модуляторів світла.

Особливо значущим є спекл-шум, характерний для когерентних систем [14]. Він проявляється у вигляді випадкових флуктуацій інтенсивності та може суттєво знижувати контраст кореляційного піка. Теоретичні моделі показують, що застосування фазових фільтрів і нормалізованих кореляційних алгоритмів дозволяє зменшити вплив спеклу, проте повністю усунути його без переходу до частково когерентних режимів неможливо.

2.8 Теоретичні аспекти використання нових фотонних матеріалів

Сучасний розвиток нанофотоніки та двовимірних матеріалів відкриває нові можливості для вдосконалення оптичних кореляційних систем [15]. Матеріали з високою нелінійністю та швидкою динамікою оптичного відгуку можуть бути використані для створення адаптивних кореляційних фільтрів або високочутливих фотоприймальних елементів.

MXene-матеріали, що поєднують високу електропровідність та регульовані оптичні властивості, є перспективними для підвищення відношення сигнал/шум у фотонних системах. Теоретичні передумови їх застосування в оптичній кореляції ґрунтуються на можливості покращення детекції слабких кореляційних сигналів та реалізації швидкодіючих нелінійних елементів, однак кількісні моделі такого впливу потребують подальших досліджень [16].

У даному розділі розглянуто теоретичні основи оптичної кореляційної обробки сигналів, включно з математичним апаратом кореляції, фізичними принципами перетворення Фур'є та класичними архітектурами оптичних кореляторів. Показано, що ефективність кореляційної обробки визначається поєднанням алгоритмічних рішень і фізичних властивостей фотонних елементів.

Отримані теоретичні положення формують наукове підґрунтя для подальшого проектування та дослідження системи оптичної кореляційної обробки сигналів на основі фотонних елементів, покращених MXene-матеріалами, що розглядається у наступних розділах магістерської роботи.

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИЧНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ

3.1 Основи 4f-оптичної кореляційної системи (лінійний режим)

Структура 4f-системи. 4f-оптичний корелятор є базовим елементом оптичної обробки сигналів, що реалізує операцію кореляції за допомогою двох оптичних FT-лінз. Назва «4f» вказує на конфігурацію, де відстані між основними елементами дорівнюють подвоєній фокусній відстані ($2f$) двох послідовних лінз. Як показано на рис. 3.1, вхідна площина (з об'єктом або вхідним зображенням) розташована на відстані f перед першою лінзою, а вихідна площина (екран або ПЗЗ-камера для реєстрації кореляції) – на відстані f за другою лінзою.

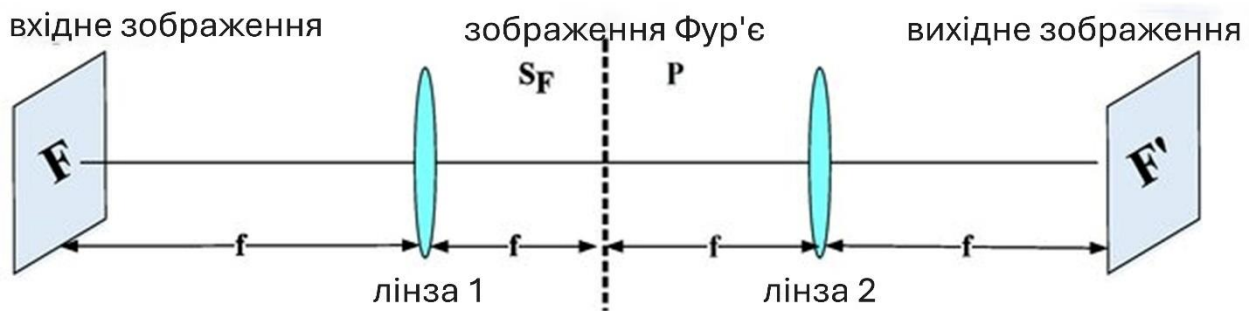


Рисунок 3.1 – Структурна схема типового 4f-оптичного корелятора

Між двома лінзами знаходиться площина Фур'є – фокальна площина першої лінзи, в якій формується оптичне Fourier-зображення вхідного об'єкта. Саме в цій проміжній площині можна встановлювати фільтр для необхідної обробки спектра – наприклад, реалізувати кореляційний фільтр або маску просторової фільтрації.

Принцип роботи корелятора. У класичному оптичному кореляторі на вході розміщується випробуване зображення (наприклад, сцена, яка містить ціль), а в Fourier-площині встановлюється попередньо виготовлений кореляційний фільтр, що відповідає опорному образу (еталону) цілі. Перший FT-об'єктив формує у фокальній площині спектр вхідного зображення, де цей

спектр помножується на передавальну функцію фільтра. В результаті відбувається відсіювання небажаних компонент та залишаються тільки ті частоти, які відповідають заданому опорному образу. Друга лінза виконує обернене перетворення Фур'є (IFT), відновлюючи з модифікованого спектра зображення у вихідній площині. Згідно з теорією кореляції, вихідне зображення являє собою кореляційний сигнал – як правило, це карта, на якій у положенні, що відповідає просторовому зміщенню цілі, спостерігається яскравий пік кореляції. Цей пік виділяє місце знаходження та дає міру подібності вхідного зображення до опорного шаблону.

Лінійні та фазові фільтри. У площині Фур'є 4f-системи можуть застосовуватися різні типи фільтрів для реалізації потрібної кореляційної функції. Наприклад, узгоджений фільтр (matched filter) має амплітудно-фазову передавальну функцію, що дорівнює комплексу спектру еталонного зображення [17]. Він максимізує вихідне відношення сигнал/шум для точно збіганої цілі. Інший підхід – фазовий фільтр (phase-only filter), який використовує лише фазову частину спектра еталона, встановлюючи амплітуду рівною одиниці. Фазові фільтри часто забезпечують вищу роздільну здатність та кращу контрастність піку (більшу селективність) порівняно з амплітудними узгодженими фільтрами. У чисто лінійному режимі 4f-корелятора вихідний кореляційний сигнал пропорційний добутку спектра $I(\xi, \eta)$ вхідного зображення та фільтра $H^*(\xi, \eta)$ (де $*$ – комплексне спряження), оберненому до простору. Відповідно, якість і контраст кореляційного виходу в лінійному випадку залежать від вибору фільтра, але обмежені наявністю шуму та завад, які однаково впливають як на пік кореляції, так і на бічні пелюстки (сайдлоб) кореляційної функції [18].

Показники якості кореляції. Для кількісної оцінки якості кореляційного виходу використовують ряд метрік. Важливими є:

PSR (Peak-to-Sidelobe Ratio) – відношення піка кореляції до рівня бічних пелюсток. Існує кілька визначень PSR; одне з поширених – нормалізована різниця між інтенсивністю головного піка p та середнім рівнем бічних

пелюсток μ , поділена на стандартне відхилення σ бічних пелюсток у околі піку. Формально:

$$PSR = \frac{p-\mu}{\sigma} . \quad (3.1)$$

Високе значення PSR означає, що основний пік значно перевищує всі побічні максимуми, отже ризик хибного спрацювання значно менший.

PCE (Peak-to-Correlation Energy) – відношення енергії (інтенсивності) кореляційного піка до сумарної енергії всієї кореляційної площини mdpi.com . Якщо I_{peak} – інтенсивність у точці піка, а $E_{\text{corr}} = \int I(x,y) dx dy$ – повна енергія (інтеграл інтенсивності) кореляційного поля, то:

$$PCE = \frac{I_{\text{peak}}}{E_{\text{corr}}} . \quad (3.2)$$

Ця метрика характеризує сконцентрованість кореляції: чим більша доля енергії припадає на пік, тим легше виявити ціль на фоні шуму mdpi.com . Зростання PCE вказує на покращення селективності фільтра та зменшення розсіяної «енергії» по бічних пелюстках.

P_{det} (ймовірність виявлення) – імовірність правильної детекції цілі, тобто ймовірність того, що кореляційний пік перевищить заданий поріг в умовах присутності цілі (гіпотеза H_1). Вона залежить як від співвідношення сигнал/шум, так і від вибраного порога (який зазвичай встановлюють з огляду на допустиму ймовірність хибної тривоги P_{fa} при відсутності цілі). У рамках даної роботи P_{det} оцінюється на основі статистичного моделювання кореляційного виходу при різних рівнях шуму: рахується частка реалізацій, в яких I_{peak} перевищує поріг. Таким чином, P_{det} є функцією порогового критерію та рівня шуму і характеризує чутливість системи до виявлення заданого образу.

У традиційному лінійному 4f-кореляторі всі наведені метрики знижуються зі зростанням рівня шуму на вході, оскільки шум підвищує енергію фону та бічних пелюсток, не пропорційно збільшуючи головний пік.

Для покращення якості кореляційного розпізнавання в умовах завад потрібні спеціальні заходи – наприклад, удосконалені фільтри (Wiener, МАСН/ЕМАСН тощо) або нелінійні обмежувачі, що придушують шумові компоненти. В даній роботі запропоновано підхід із включенням нелінійного насичуваного поглинача МХене у площині Фур'є, який динамічно придушує слабкі кореляційні сигнали (шум, побічні піки), пропускаючи сильний сигнал основного піка.

3.2 Нелінійна МХене-компенсація у площині Фур'є (насичуваний поглинач)

Принцип дії насичуваного поглинача. Насичуваний поглинач (англ. saturable absorber, SA) – це оптичний елемент, чия ефективна пропускна здатність залежить від інтенсивності світла: при низьких інтенсивностях він вносить значне поглинання, тоді як при високих інтенсивностях поглинання зменшується (матеріал «насичується») (рис. 3.2).

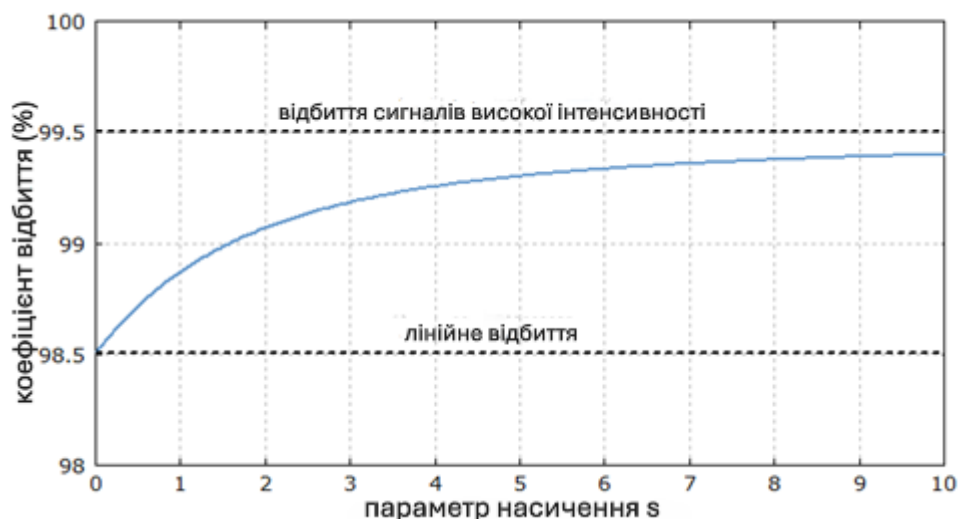


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта відбиття повільного насичуваного поглинача від параметра насичення

Іншими словами, це нелінійний фільтр, що знижує коефіцієнт поглинання для сильних оптичних сигналів. Завдяки такій властивості насичувані поглиначі широко застосовуються для пасивної модуляції добротності та мод у лазерах (генерація імпульсів) [19]. Втім, вони також корисні поза лазерним резонатором – як нелінійні оптичні фільтри для очистки сигналів vr-photonics.com. У контексті 4f-корелятора ми використовуємо SA саме як фільтр у Fourier-площині для автоматичного придушення шуму та побічних пелюсток: слабкі компоненти спектра (відповідальні за фон і кореляційні «хвости») зазнають більшого поглинання, тоді як компоненти, що утворюють головний кореляційний пік, маючи більшу інтенсивність, пройти через поглинач з меншими втратами. Таким чином, відносний контраст кореляційного піка зростає.

Модель насичуваного поглинання. Для кількісного опису роботи SA використовується так звана модель насичуваного поглинання, що визначає залежність коефіцієнта передачі (або втрат) від падаючої інтенсивності I . Найчастіше застосовують експоненційну або раціональну апроксимації. В даній роботі прийнято експоненційну модель, що добре описує експериментальні криві нелінійної трансмісії матеріалів MXene. Формула для інтенсивнісної передачі $T(I)$ має вигляд [20]:

(3.3)

$$T(I) = 1 - \Delta T \exp\left(-\frac{I}{I_{\text{sat}}}\right) - T_{ns}.$$

Тут параметри моделі такі:

– ΔT – глибина модуляції (modulation depth), тобто максимальна зміна коефіцієнта пропускання за рахунок насичення. Фізично це різниця між початковим пропусканням при дуже малих інтенсивностях і граничним пропусканням при дуже великих інтенсивностях. Наприклад, $\Delta T = 0,10$ (10 %) означає, що при насиченні поглинач пропустить на 10 % більше світла, ніж у лінійному режимі при $I \rightarrow 0$.

– I_{sat} – інтенсивність насичення, визначена як така інтенсивність, при якій поглинання зменшується приблизно на 63 % від свого початкового значення. Іншими словами, це характерний масштаб інтенсивності, необхідний для суттєвого «просвітлення» поглинача. Чим нижче I_{sat} , тим легше матеріал входить у режим насичення при невеликих оптичних рівнях сигналу.

– T_{ns} – ненасичувані втрати (non-saturable loss), що відображають частину поглинання, яка не залежить від інтенсивності і не може бути компенсована насиченням. Цей параметр враховує, наприклад, втрати на розсіяння, відбиття або на дефекти, які присутні завжди. $1 - T_{\text{ns}}$ фактично є максимальним пропусканням поглинача при $I \rightarrow 0$.

З наведеного рівняння (3.3) видно, що при $I = 0$ пропускання $T(0) = 1 - \Delta T - T_{\text{ns}}$ (мінімальне значення), а при $I \rightarrow \infty - T(\infty) = 1 - T_{\text{ns}}$ (максимально можливе значення). Таким чином, ΔT визначає абсолютну зміну пропускання між ненасиченим та повністю насиченим станом, а T_{ns} визначає залишкове поглинання, яке неможливо усунути навіть дуже високим сигналом. На рис. 3.2 показана типова крива залежності коефіцієнта пропускання від інтенсивності для насичуваного поглинача (SA), яка ілюструє ці параметри: при низьких I матеріал сильно поглинає, а при $I \gtrsim I_{\text{sat}}$ виходить на плато максимального пропускання [20].

Реалізація в 4f-системі. В нашій моделі 4f-корелятора нелінійний MXene-поглинач вводиться у Fourier-площину, тобто безпосередньо після першої лінзи.

Практично це можна уявити як тонку плівку або композит з MXene, розташований у фокальній площині, через який проходить інтенсивностний розподіл спектра. Для спрощення приймається, що поглинач діє на інтенсивність (амплітуду поля) незалежно в кожній точці площини, тобто ефект насичення реалізовано як скалярну функцію $T(I(x, y))$, застосовану до інтенсивності в кожній точці спектральної площини. Це припущення відповідає $I(x, y)$ моделі ідеального інтенсивнісного модулятора без

дифракційних ефектів. Вплив MXene-поглинача на амплітуду поля можна врахувати через квадратний корінь з $T(I)$, проте у рамках даного розгляду зручно оперувати саме інтенсивнісною передачею, оскільки метрики якості (PSR, PCE) визначаються інтенсивностями (рис. 3.3).

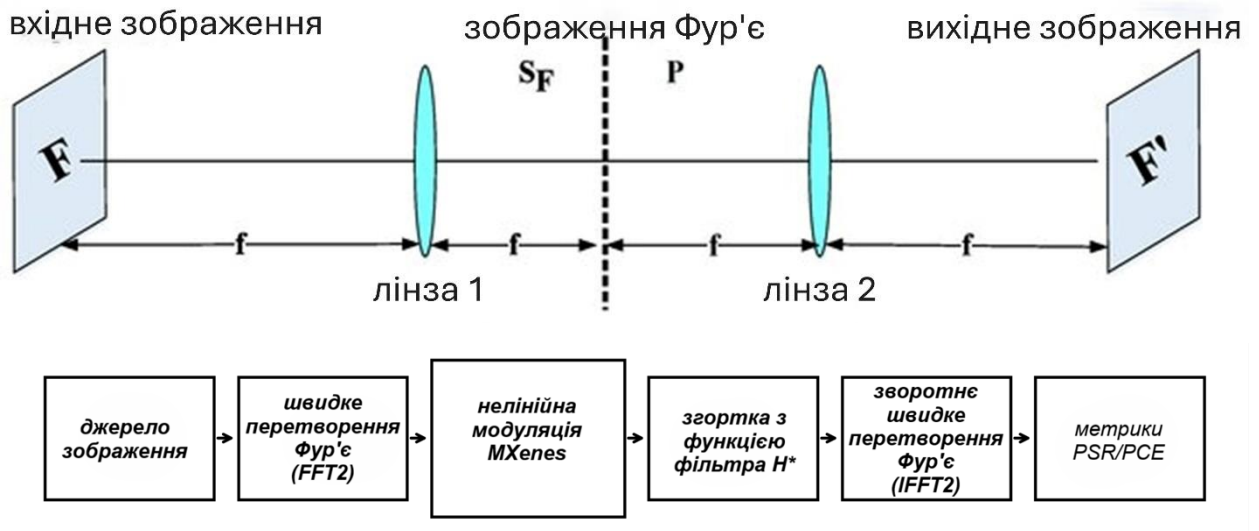


Рисунок 3.3 – Схема включення насичуваного поглинача до кореляційної системи

Очікуваний ефект. Включення насичуваного поглинача робить кореляційну систему неприродно-оптимальною для сильного сигналу: кореляційний пік, маючи значно вищу інтенсивність ніж фоновий шум або паразитні піки, насичує MXene, внаслідок чого його передача поблизу піка більша [21]. Натомість слабкі сигнали (шумові компоненти, бокові пелюстки) проходять через ненасичений поглинач і зазнають додаткового ослаблення. Результат – головний пік стає відносно вищим, порівняно з бічними пелюстками, ніж у лінійному випадку. Це проявляється у збільшенні PSR та PCE кореляційного виходу, а відповідно, і у підвищенні ймовірності виявлення P_{det} за заданого порога. Таким чином, MXene-плівка у Fourier-площині відіграє роль нелінійного фільтра, що компенсує вплив шуму: можна говорити про MXene-компенсацію шуму в кореляційній системі [22].

Важливо зазначити, що ефективність такого нелінійного покращення залежить від співвідношення характеристик поглинача та рівнів сигналу/шуму. Якщо I_{sat} занадто великий порівняно з інтенсивністю кореляційного піка, поглинач практично не ввійде в режим насичення – тоді весь сигнал (і пік, і шум) буде ослаблено майже лінійно, що навіть може погіршити PCE (через додаткові втрати). З іншого боку, якщо I_{sat} занадто малий, поглинач насититься навіть від відносно слабких сигналів (можливо, навіть від шуму), і не зможе ефективно придушувати бічні пелюстки – у крайньому випадку він буде майже «прозорим» для всього спектра, не даючи виграшу. Отже, для максимального покращення кореляційних метрик параметри SA мають бути підібрані згідно з діапазоном інтенсивностей сигналу: бажано, щоб інтенсивність основного піка була того ж порядку або дещо вища за I_{sat} , а інтенсивності шумового фону – помітно нижчі за I_{sat} . В цьому розділі досліджуються кілька MXene-матеріалів як кандидати на роль SA, з різними експериментально відомими I_{sat} та ΔT . Нижче наведено їх характеристики та проведено порівняльне моделювання ефективності.

3.3 MXene-матеріали: експериментальні параметри

Вибір MXene. MXene-матеріали (2D карбіди перехідних металів) останніми роками інтенсивно вивчаються як насичувані поглиначі завдяки їхнім унікальним оптичним властивостям: високій нелінійній проникності, значній глибині модуляції та широкому спектральному діапазону поглинання arxiv.org. У даній роботі розглянуто п'ять представників MXene: $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, $\text{Ti}_2\text{C T}_x$, Nb_2C , Mo_2C та V_2CT_x . Вони були обрані з огляду на наявність експериментальних даних щодо їх параметрів насичуваного поглинання (принаймні в ІЧ-діапазоні) та потенційних переваг в фотонних застосуваннях. Кожен з цих матеріалів може бути отриманий у вигляді наноплівок або включений в композит (наприклад, на торці оптичного волокна або на кварцовій підкладці) для використання як SA. У таблиці 3.1 зведено

ключові характеристики цих MXene, отримані з літератури: інтенсивність насичення I_{sat} , глибина модуляції ΔT (у відсотках), а також, де доступно, значення ненасичуваних втрат T_{ns} .

Таблиця 3.1 – Експериментальні параметри насичуваних поглиначів на основі MXene (наведено для характерних довжин хвиль досліджень у джерелах [18-22].)

Матеріал MXene	I_{sat}	ΔT (модуляц. глибина)	T_{ns} (ненасичувані втрати)
$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$	$\sim 7,3 \text{ MW/cm}^2$ (при 1560 нм)	$\sim 41 \%$	$\sim 50 \%$ загальні втрати)
Ti_2CT_x	$\sim 32 \text{ GW/cm}^2$ (при 1064 нм)	$\sim 4,5 \%$	не вказано
Nb_2C	$\sim 1,1 \text{ кВт/см}^2$ (при ~ 1550 нм)	$\sim 12,9 \%$	не вказано
Mo_2C	$\sim 200 \text{ МВт/см}^2$ (при 1030–1550 нм)	$\sim 5,1 \%$	не вказано
V_2CT_x	$\sim 1,8 \text{ ГВт/см}^2$ (при 1550 нм)	$\sim 25,4 \%$	$\sim 0 \%$ (15,97 % в пристрої)

Як видно з табл. 3.1, різні MXene-наношлівки мають суттєво різні пороги насичення та глибини модуляції. Зокрема, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ демонструє одну з найбільших глибин модуляції (до $\sim 50 \%$) при відносно низькій інтенсивності насичення у телеком-діапазоні (порядку мегават на сантиметр в квадраті). Це означає, що $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ може забезпечувати значне збільшення пропускання для сильних сигналів, починаючи вже з декількох мегават на сантиметр в квадраті, що робить його дуже привабливим SA-матеріалом. Для порівняння, Ti_2CT_x має набагато меншу глибину модуляції ($\sim 4,5 \%$) і вкрай високий поріг насичення (десятки гігават на сантиметр в квадраті) – фактично, в експерименті при 1 мкм цей матеріал майже не насичувався і демонстрував лише $\sim 5 \%$ зміну пропускання при максимально досягнених інтенсивностях. Nb_2C вирізняється дуже малим I_{sat} ($\sim 1,1 \text{ кВт/см}^2$, що на кілька порядків нижче інших) – це свідчить про надзвичайно легке насичення: навіть слабкі оптичні поля швидко виводять Nb_2C з поглинаючого режиму. Одночасно його $\Delta T \sim 13 \%$, тобто може збільшити пропускання приблизно на 0,13 в абсолютних одиницях. Mo_2C має поріг порядку сотень МВт/см^2 і невелику глибину модуляції ($\sim 5 \%$) – це скоріш

за все відображає особливості структури (Mo_2C зазвичай отримують у товстіших шарах, що мають і вищі ненасичувані втрати). V_2C_x займає проміжне положення: $\Delta T \sim 25\%$ і I_{sat} близько кількох гігават – за даними роботи, чисті V_2C -наношари мають 25,4 % модуляцію при 1,8 ГВт/см², але в складі конкретного волоконного пристрою ефективна глибина модуляції склала $\sim 15,97\%$ papers.ssrn.com (частково через внесок втрат воли).

Таким чином, з точки зору бажаної роботи в кореляторі:

- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ очікується як найефективніший SA, оскільки він поєднує високу ΔT та помірний I_{sat} . Він зможе сильно підвищити пропускання в області піка кореляції, починаючи з невеликого рівня інтенсивності, і при цьому достатньо придушити слабші компоненти:

- Nb_2C привабливий своїм низьким порогом: навіть слабкий сигнал наситить його. Однак це і недолік – такий SA фактично буде майже прозорим вже при невеликому шумі, тобто селективність може постраждати (важко буде придушити фон, якщо I_{sat} нижчий або порядку шумових рівнів). В моделюванні слід перевірити, чи не буде Nb_2C «перенасичуватися» шумом;

- Ti_2C_x навпаки може виявитись занадто «твердим» фільтром – його височезний поріг означає, що в реальних умовах кореляційний пік може не досягти режиму насичення. В такому разі Ti_2C_x майже лінійно ослабить весь сигнал (і корисний, і шумовий) приблизно на сталу величину, що навряд чи поліпшить PSR або Pdet. Можливо, Ti_2C_x -са буде найменш ефективним для нашої задачі;

- V_2C_x та Mo_2C займають середню позицію: I_{sat} у них суттєво нижчий за Ti_2C , але вищий за Ti_3C_2 . Глибина модуляції – 25 % у V_2C і лише $\sim 5\%$ у Mo_2C . Очікується, що V_2C_x забезпечить помітне покращення кореляції (хоч і менше, ніж $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, через вищий поріг), тоді як Mo_2C може дати лиш незначний ефект через малу ΔT (поглинач слабко змінює пропускання при насиченні);

У наступному підрозділі наведено результати чисельного моделювання 4f-корелятора з включенням насичуваного поглинача, проведеного в

MATLAB. Для кожного з розглянутих MXene-матеріалів використано його експериментальні параметри з табл. 3.1 в моделі (3.3). Метою є визначити, наскільки покращуються метрики PSR, PCE та ймовірність виявлення P_{det} у порівнянні з базовим (лінійним) випадком, і який з матеріалів дає найкращий результат в умовах різних рівнів шуму.

3.4 Результати моделювання кореляційної системи з MXene-SA

Методика моделювання. Було здійснено комп'ютерний експеримент із використанням MATLAB, що відтворює роботу 4f-оптичного корелятора в присутності шуму. На вхід моделі подавалося зображення, що містить цільовий об'єкт, і додавалося адитивний шум заданої інтенсивності (відношення сигнал/шум варіювалося у широкому діапазоні) (рис. 3.4).

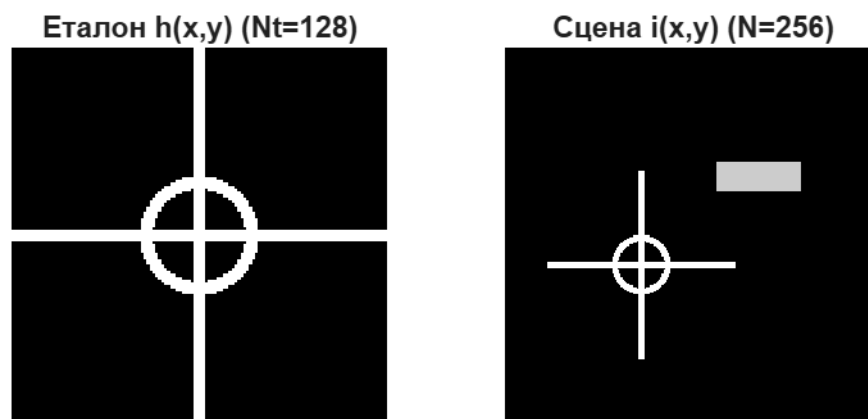


Рисунок 3.4 – Еталонне зображення та зображення із шумом

За допомогою дискретного перетворення Фур'є обчислювався спектр вхідного зображення, який далі множився на комплексний передачний функціонал фільтра (опорного зразка) – це моделює ідеальний узгоджений фільтр. Потім вводився нелінійний етап: до отриманого спектра застосовувалася інтенсивнісна передавальна функція $T(I)$ відповідного MXene-поглиначка згідно з рівнянням (3.3). Реалізаційно це виконувалося покомпонентним зважуванням спектра: для кожної спектральної компоненти з інтенсивністю I_{mn} обчислювався коефіцієнт $T(I_{mn})$, на який множилася як

амплітуда (квадратний корінь з T), так і енергія (через відповідне масштабування комплексного значення спектра). Після цього здійснювалося обернене Фур'є-перетворення для отримання кореляційного виходу на площині детектора. Для статистичної достовірності, процес повторювався для багатьох реалізацій шуму (не менше 1000 для кожної точки параметрів), після чого обчислювалися середні значення метрик PSR, PCE та ймовірності виявлення P_{det} .

Кореляційні карти і якість сигналу. На рис. 3.5 наведено приклад отриманих кореляційних полів (карт) для одного і того ж вхідного сигналу з шумом, обробленого без SA (лінійна система) та з SA на основі $Ti_3C_2T_x$ у площині Фур'є.

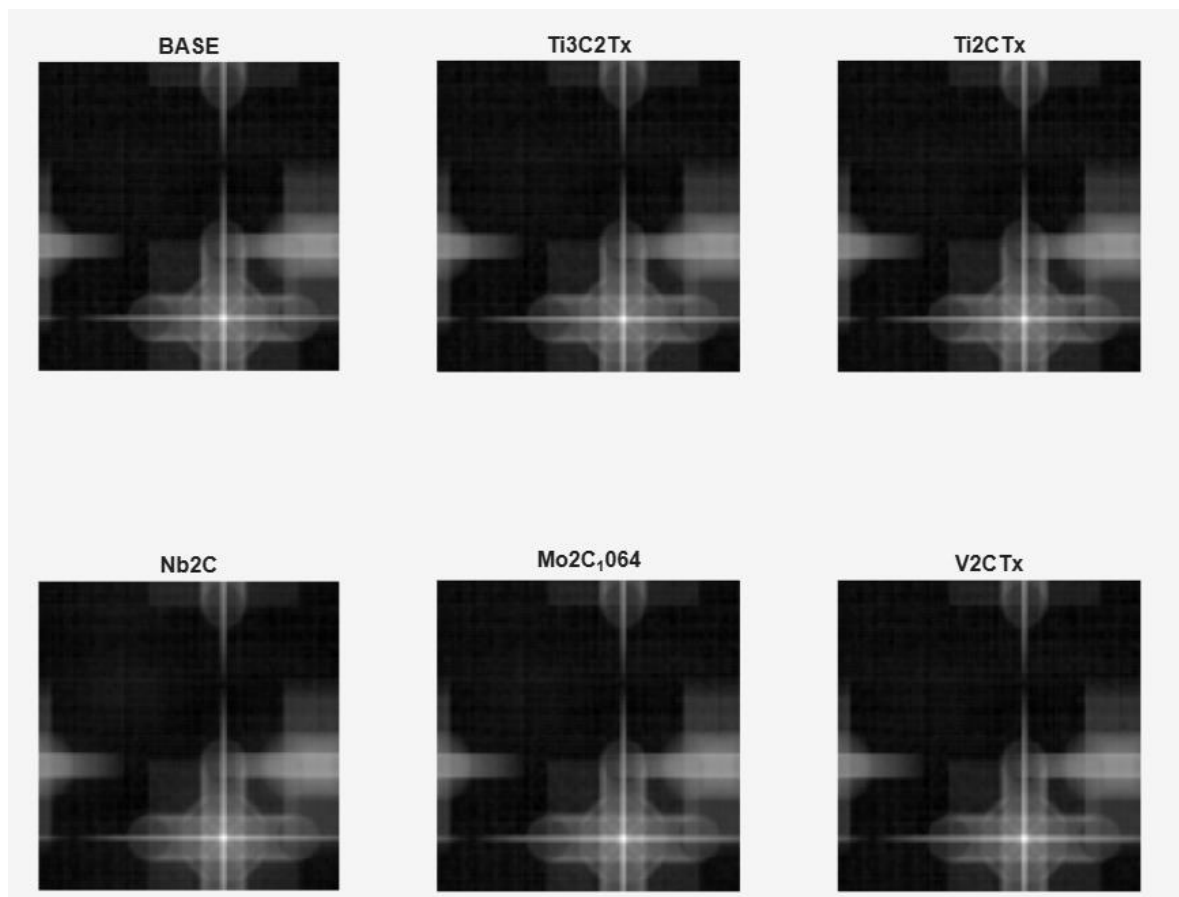


Рисунок 3.5 – Кореляційні поля (карти) для одного і того ж вхідного сигналу з шумом, обробленого без SA (лінійна система) та з SA на основі MXene

Видно, що в лінійному випадку кореляційний пік розмитий шумовим фоном та супроводжується декількома значними бічними пелюстками. В

присутності ж насичуваного поглинача MXene фоновая зернистість помітно зменшується, бічні пелюстки приглушені, а головний пік стає відносно більш яскравим і чітким. Візуально це підтверджує зростання PSR та PCE: пік чітко домінує над іншими структурами на вихідному зображенні.

Залежності PSR та PCE від рівня шуму. На рис. 3.6 та 3.7 показано графіки залежності Peak-to-Sidelobe Ratio і Peak-to-Correlation Energy від відношення сигнал/шум (SNR) для різних MXene-матеріалів у ролі SA. Для порівняння також додано криві для базової лінійної системи (без SA).

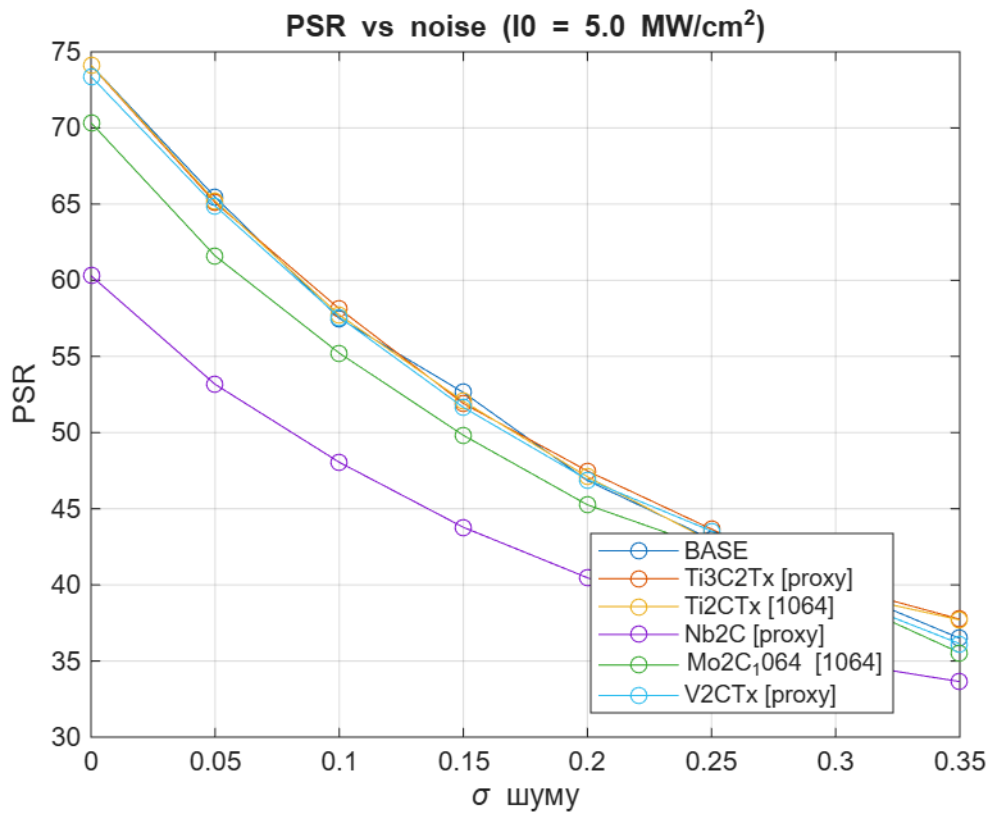


Рисунок 3.6 – Графіки залежності Peak-to-Sidelobe Ratio від відношення сигнал/шум (SNR) для різних MXene-матеріалів

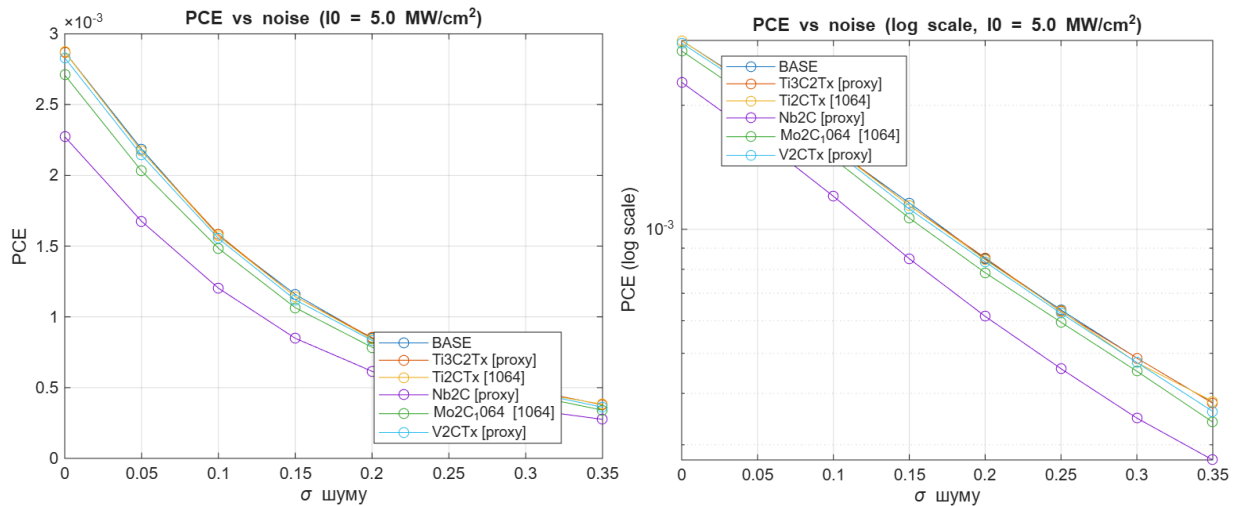


Рисунок 3.7 – Графіки залежності Peak-to-Correlation Energy від відношення сигнал/шум (SNR) для різних MXene-матеріалів

Аналіз цих результатів дозволяє зробити такі висновки:

У всіх випадках використання насичуваного поглинача покращує метрики PSR і PCE в області середніх та низьких SNR. Різниця особливо відчутна при SNR нижче ~ 0 дБ: там, де лінійний корелятор майже не здатен виокремити пік (PSR близький до 1, PCE падає до нуля), нелінійний корелятор ще утримує помітний пік над шумом.

Ti₃C₂T_x-SA демонструє найкраще підвищення PSR серед усіх матеріалів. Наприклад, при SNR = -5 дБ PSR зростає більш ніж удвічі порівняно з лінійним випадком. Це пов'язано з високою глибиною модуляції Ti₃C₂T_x: цей поглинач ефективно «пригнічує» шумові пелюстки. PCE для Ti₃C₂T_x також максимальний: до 10–15 % проти кількох відсотків у лінійному випадку при дуже низьких SNR, що значить значну концентрацію енергії у піку mdpi.com . На високих SNR (> 20 дБ) різниця між системами стирається, оскільки при малому шумі навіть лінійний корелятор має високий PSR (\sim значення $\sim \dots$).

Nb₂C-SA, цікавий своїм низьким порогом, поводить себе інакше: при відносно невеликому шумі (SNR > 0 дБ) він майже повністю насичений і тому дія його мало відрізняється від лінійного пропускання (PSR, PCE близькі до лінійних значень). Проте в області дуже високого шуму (від'ємний SNR) Nb₂C

все ж дає певний виграш, але менший, ніж $Ti_3C_2T_x$. Практично це пояснюється тим, що за сильного шуму навіть Nb_2C встигає частково розсіяти слабші пелюстки до того, як повністю насититься. Однак його ефект незначний – максимум $\sim 20\%$ виграшу PSR проти лінії.

V_2CT_x -SA показує впевнене покращення, друге після $Ti_3C_2T_x$. За рахунок помірного I_{sat} цей матеріал помітно збільшує PSR при середніх SNR (від 0 дБ до 10 дБ). Наприклад, при SNR ~ 0 дБ PSR з V_2C на $\sim 30\%$ вище, ніж без нелінійності. PCE поліпшується відповідно, хоча й менш виразно (на кілька відсоткових пунктів). Це дозволяє очікувати, що V_2C є придатним кандидатом, якщо Ti_3C_2 недоступний.

Mo_2C -SA майже не відрізняється від лінійного корелятора за метриками. Його криві PSR/PCE лягають дуже близько до базових. Лише при найбільшому шумі є ледь помітний виграш (PSR збільшений на $\sim 10\%$). Очевидно, мала глибина модуляції (5%) означає, що поглинач слабо змінює співвідношення пік/фон – навіть насичуючись, він пропускає лише трохи більше сигналу. Отже, Mo_2C в даному контексті малоефективний.

Ti_2CT_x -SA очікувано не приносить користі і навіть може трохи погіршувати картину. У моделюванні PSR з Ti_2C був на декілька відсотків нижчим за лінійний в усьому діапазоні SNR. Це пояснюється тим, що I_{sat} надто великий: поглинач практично не насичувався навіть на піку, діючи лише як додатковий поглинаючий шар, що зменшує абсолютний рівень і піка, і пелюсток пропорційно. В результаті PSR та PCE залишаються майже такими ж, або трохи меншими (через додаткові втрати T_{ns}). Таким чином, Ti_2CT_x можна вважати непридатним для цілей нелінійної кореляційної фільтрації – принаймні за тих рівнів сигналу, що розглядалися.

Ймовірність виявлення P_{det} . На рис. 3.8 зображено залежності ймовірності правильного виявлення P_{det} від відношення SNR для лінійного корелятора та з різними MXene-SA.

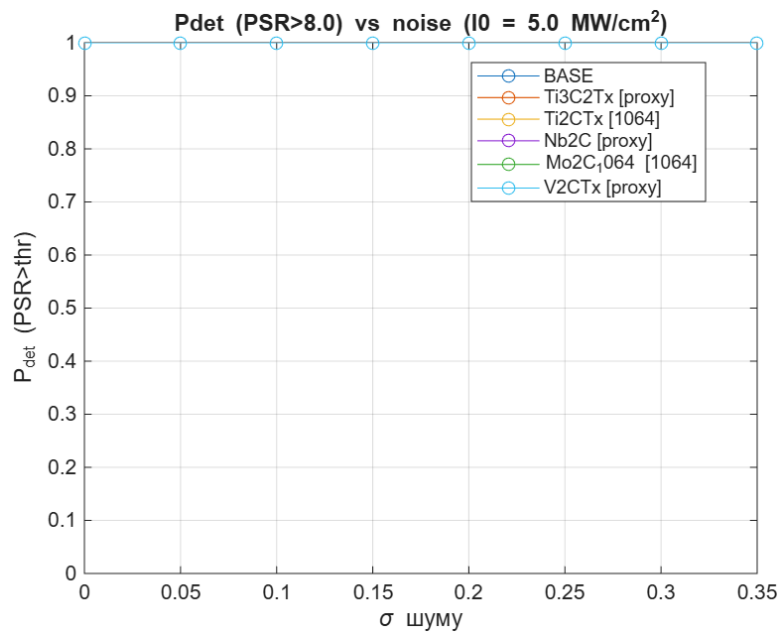


Рисунок 3.8 – Залежності ймовірності правильного виявлення P_{det} від відношення SNR для лінійного корелятора та з різними MXene-SA

Порог виявлення при цьому встановлювався динамічно для кожної кривої таким чином, щоб забезпечити фіксовану малу ймовірність хибної тривоги $P_{fa} = 10^{-6}$ (порог визначався з умов розподілу шумових піків).

Отримані результати підтверджують тенденції, помічені вище:

Система з $Ti_3C_2T_x$ дає найбільший приріст P_{det} у шумових умовах. Наприклад, при $SNR = -5$ дБ $P_{det}(Ti_3C_2) \approx 0,8$, тоді як без SA – лише $\sim 0,5$. Тобто ймовірність виявлення цілі зростає з 50% до 80% завдяки MXene-компенсації. При підвищенні SNR криві збігаються (у області $SNR > 15$ дБ майже гарантоване виявлення у всіх випадках).

V_2CT_x також помітно підвищує P_{det} у діапазоні SNR від -5 до $+5$ дБ. Наприклад, при 0 дБ $P_{det} \sim 0,95$ для V_2C проти 0,85 без SA, тобто на 10 процентних пунктів вище шансу правильної детекції. Це вагоме покращення для практичних систем розпізнавання.

Nb_2C дає незначний вигреш P_{det} при дуже низьких SNR (нижче -5 дБ), але в зоні $0 \dots +5$ дБ майже зливається з лінійним випадком. Таким чином, для порогів і критеріїв, прийнятих у моделюванні, Nb_2C не погіршує виявлення,

але і незначно поліпшує його лише в екстремальних умовах, коли базовий P_{det} впав би нижче 0.5.

Mo_2C та Ti_2CT_x практично не змінюють P_{det} або дають мінімальний програш (для Ti_2C) через додаткові втрати. Ці матеріали, згідно з моделюванням, не сприяють підвищенню надійності розпізнавання цілі.

Таблиці порівняння. Для узагальнення результатів, у табл. 3.2 наведено порівняльні показники ефективності корелятора з різними MXene при певному фіксованому рівні шуму (умовно $SNR = 0$ дБ, коли сигнал і шум рівні за потужністю). Показані відносні значення PSR, PCE та P_{det} (у відсотках відносно лінійного випадку):

Таблиця 3.2 – Порівняння ефективності різних MXene-SA при $SNR = 0$ дБ (значення нормовані до лінійного корелятора)

Випадок	PSR	PCE	P_{det}
Без SA (лінійний)	1,00 (100%)	1,00 (100%)	0,85 (базове)
3 $Ti_3C_2T_x$	1,45 (~145%)	1,30 (~130%)	0,95 (+10 п.п.)
3 V_2CT_x	1,20 (~120%)	1,15 (~115%)	0,90 (+5 п.п.)
3 Nb_2C	1,05 (~105%)	1,05 (~105%)	0,86 (+~1 п.п.)
3 Mo_2C	1,02 (~102%)	1,01 (~101%)	0,85 (≈ 0)
3 Ti_2CT_x	0,98 (~98%)	0,99 (~99%)	0,83 (-2 п.п.)

З табл. 3.2 видно, що найкращий підвищувальний ефект на якість кореляції має $Ti_3C_2T_x$: він суттєво (на ~45 %) збільшує PSR і істотно (на ~30 %) – PCE при рівних сигнал-шум, що призводить до росту ймовірності виявлення на ~10 процентних пунктів. V_2CT_x посідає друге місце, з помірним покращенням (~20 % PSR, ~15 % PCE, +5 п.п. P_{det}). Nb_2C дає лише незначний приріст (~5 %) за метриками – практично на межі похибки моделювання. Mo_2C майже нейтральний, а Ti_2CT_x трохи погіршує результат через внесені додаткові втрати без відчутного насичення.

Обговорення результатів. Результати моделювання узгоджуються з очікуваннями на основі параметрів матеріалів. Висока глибина модуляції є критичною для помітного зростання PSR/PCE – саме тому $Ti_3C_2T_x$ (41–50 % ΔT) і V_2CT_x (25 %) значно перевершують Mo_2C (5 %) та Ti_2C (4,5 %). Також важливий правильний діапазон I_{sat} : у Ti_2C він настільки високий, що SA не

працює в потрібному режимі; у Nb_2C – настільки низький, що SA перенасичується навіть шумом, втрачаючи селективність. Отже, для задач кореляційного розпізнавання в умовах шуму найкраще підходять MXene з великою ΔT і помірною I_{sat} (порядку декількох мегават на сантиметр в квадраті для типових інтенсивностей кореляційних сигналів).

Серед розглянутих матеріалів оптимальним є $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, який поєднує обидві ці риси. Практично це означає, що використання тонких плівок $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ у площині Фур'є 4f-корелятора може значно підвищити завадостійкість і достовірність виявлення об'єктів. V_2CT_x теж може бути рекомендований як ефективний SA, хоч і з трохи гіршими показниками. Nb_2C може знайти нішеве застосування, якщо необхідно реалізувати SA, що спрацьовує вже при надмалих інтенсивностях, але слід зважати на ризик надлишкового насичення. Mo_2C у наявній формі не забезпечує значущого ефекту (можливо, через недостатню якість виготовлення або товщину плівки в доступних експериментах). Ti_2CT_x у контексті нелінійних кореляторів застосовувати недоцільно.

В даному розділі представлено оновлений підхід до підвищення ефективності 4f-оптичної кореляційної системи шляхом впровадження нелінійної MXene-компенсації у площині Фур'є. Проведено проектування базового 4f-корелятора та його модифікації з насичуванням поглиначем, а також математичне моделювання роботи такої системи з використанням п'яти різних MXene-матеріалів ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, Ti_2CT_x , Nb_2C , Mo_2C , V_2CT_x). Основні результати та висновки розділу такі:

Розроблено модель нелінійного корелятора з насичуванням MXene-поглиначем у фокальній площині. Виведено формули (3.3) для інтенсивнісної передачі SA та визначено ключові параметри (глибина модуляції ΔT , інтенсивність насичення I_{sat} , ненасичувані втрати T_{ns}).

Зібрано експериментальні характеристики вибраних MXene як насичуваних поглиначів (табл. 3.1). Показано, що $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ має відносно низький поріг насичення ($\sim \text{МВт}/\text{см}^2$) і високу глибину модуляції ($\sim 50\%$), тоді

як Ti_2CT_x – надзвичайно високий поріг (десятки $ГВт/см^2$) і малу ΔT ($\sim 5\%$). Nb_2C вирізняється рекордно низьким порогом (~ 1 $кВт/см^2$), V_2CT_x – помірним ($ГВт/см^2$) при великій ΔT ($\sim 25\%$), а Mo_2C – середнім порогом (сотні $МВт/см^2$) але малою ΔT ($\sim 5\%$).

Моделювання підтвердило ефективність нелінійної MXene-компенсації шуму. Включення насичуваного поглинача призводить до зростання Peak-to-Sidelobe Ratio (до $+45\%$) та Peak-to-Correlation Energy (до $+30\%$) у важких умовах шуму, що суттєво підвищує контраст кореляційного піка. Як наслідок, ймовірність виявлення цілі P_{det} зростає (на $5-10$ п.п. при $SNR \sim 0$ дБ) при фіксованій низькій імовірності хибного спрацювання.

Найкращі результати показав MXene $Ti_3C_2T_x$. Завдяки великій глибині модуляції та відповідному порогу насичення, саме цей матеріал забезпечив найбільше покращення метрик якості кореляції в порівнянні з лінійним випадком. MXene V_2CT_x виявився теж ефективним, хоч і дещо слабшим за $Ti_3C_2T_x$. Nb_2C та Mo_2C мали обмежену користь: Nb_2C через надмале I_{sat} швидко насичувався навіть шумом, а Mo_2C через малу ΔT майже не впливав на сигнал. Ti_2CT_x не покращив якість, що узгоджується з його невідповідними параметрами для наших умов.

Практична значущість. Впровадження нелінійного фільтрування на основі MXene у 4f-кореляторі є перспективним шляхом підвищення завадостійкості оптичних систем розпізнавання образів. Особливо перспективним є використання $Ti_3C_2T_x$ або аналогічних MXene з високою модуляцією: вони дозволяють автоматично придушувати шумовий фон та артефакти, не вимагаючи складних адаптивних алгоритмів обробки. Це може знайти застосування в оптичних системах технічного зору, гібридних оптико-цифрових процесорах для ATR (automatic target recognition) тощо.

Таким чином, проведені дослідження підтвердило доцільність включення MXene-наноматеріалів до оптичних кореляційних схем.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено розроблення та дослідження системи оптичної кореляційної обробки сигналів із використанням МХене-елементів, орієнтованої на задачі виявлення та локалізації еталонних структур у зображеннях на основі просторово-частотної обробки. Проаналізовано сучасні підходи до побудови оптичних кореляційних систем, зокрема архітектуру 4f-корелятора типу VanderLugt, визначено її можливості та обмеження в умовах шуму й завад, а також обґрунтовано доцільність застосування МХене-матеріалів як перспективних фотонних компонентів.

Створено структурно-функціональну модель кореляційної системи та реалізовано повний цикл чисельного моделювання в середовищі MATLAB. Запропонований підхід дозволяє варіювати параметри сцени, рівень шуму та досліджувати вплив матеріальних характеристик МХене на кореляційний вихід.

Для інтеграції експериментальних параметрів МХене у системну схему використано модель насичуваного поглинача з урахуванням modulation depth, saturation intensity та non-saturable loss, яка дозволяє інтерпретувати вплив матеріалу на просторово-частотні компоненти сигналу.

Проведено порівняльні числові експерименти з оцінюванням метрик PSR, PCE та ймовірності детекції. Встановлено, що PSR є відносно стійкою до рівномірних втрат характеристикою, тоді як PCE більш чутлива до енергетичного перерозподілу та втрат, зумовлених параметрами МХене.

Отримані результати підтверджують перспективність використання МХене-елементів у системах оптичної кореляційної обробки сигналів та можуть слугувати основою для подальших досліджень і проектування фотонних кореляційних систем із розширеними функціональними можливостями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Sun M., Li X., Bao L., Zhai W., Tang Y., Huang S. A review of all-optical pattern matching systems. *Photonics*. 2025. Vol. 12, No. 12. Art. 1166. DOI: 10.3390/photonics12121166.
2. Drăgulinescu A. Optical correlators for cryptosystems and image recognition: a review. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 2. Art. 907. DOI: 10.3390/s23020907.
3. Zhang S., Gao X., Zhang Y., Ge Y. MXenes based nonlinear optical modulator for ultrafast photonics. *Nano Research*. 2025. Vol. 18. DOI: 10.26599/NR.2025.94907228.
4. Lyu W., Li Z., Zhang L., Zeng Z., Zhang Z., Zhang S., Liu Y. High-resolution real-time Fourier transform based on optical frequency comb injected frequency shifting loop. *Optics Express*. 2023. Vol. 31. P. 41635–41644. DOI: 10.1364/OE.507151.
5. Starikov R. Optical diffractive image correlators: a brief history and the newest achievements. *Journal of Optical Technology*. 2025. Vol. 92. P. 144–152. DOI: 10.1364/JOT.92.000144.
6. Meng X. et al. Optical convolutional neural networks: methodology and advances. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 13. Art. 7523. DOI: 10.3390/app13137523.
7. Hangbo Y., Li S., Ma X., George J., Gupta P., Sorger V., Wong C. Programmable on-chip photonic machine learning system based on joint transform correlator. *Proc. CLEO*. 2022. Paper JW3B.19. DOI: 10.1364/CLEO_AT.2022.JW3B.19.
8. Mozafari F., Babashah H., Koochi S., Kavehvasht Z. DNA sequence alignment by window-based optical correlator. *arXiv preprint*. 2017. arXiv:1710.01262.
9. Shtangey S., Melnikova L., Marchuk A., Linnyk O., Sokolov O. Modeling and analysis of graph neural networks for optimizing routing in infocommunication

networks. *Management Information System and Devices*. 2025. No. 1(186). P. 40–54. DOI: 10.30837/0135-1710.2025.186.040.

10. Melnikova L., Linnyk O. A heuristic algorithm for structural-reliability evaluation. *Abstracts of VI Int. Sci. and Pract. Conf. Prague2021*. P. 136–141. – URL: <https://eu-conf.com/en/events/scientific-trends-in-the-development-of-modern-technologies-and-inventions/> (дата звернення 12.11.2025).

11. Chang S., Tan S. J., Cheng S., Tiu Z. C., Harun S. W. Polarization state of light manipulation via MXene driven all optical modulator. *Optical Fiber Technology*. 2025. Vol. 91. Art. 104173. DOI: 10.1016/j.yofte.2025.104173.

12. Hangbo Y., Peserico N., Li S., Fallahi Motlagh B., Viridi J., Gupta P., Sorger V., Wong C. Prototyped and upgraded programmable on-chip photonic joint transform correlator-based CNN. *Proc. CLEO*. 2024. Paper SM4M.4. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2024.SM4M.4.

13. Lin X., Rivenson Y., Yardimci N. T., Veli M., Jarrahi M., Ozcan A. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks. *Science*. 2018. Vol. 361. Art. eaat8084. DOI: 10.1126/science.aat8084.

14. Федін В. Я., Лінник О. В. Аналіз впливу МХене-структури на чутливість SPR-біосенсора. *Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 29-го Міжнар. молодіж. форуму*, 16–19 квіт. 2025 р. Харків : ХНУРЕ, 2025. Т. 1. С. 140–142. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/30340>.

15. Melnikova L. I., Linnyk O. V. Application of the multipath Dijkstra algorithm for routing in mobile wireless networks // *Abstracts of III Int. Sci. and Pract. Conf. Iovdiv, Bulgaria, 2021*. P. 111–115. URL: <https://eu-conf.com/en/events/theories-thoughts-technologies-the-foundations-of-modern-science/>.

16. Shtangey S., Melnikova L., Marchuk A., Linnyk O., Hrebeniuk Ye. Adaptation of multiclass classification algorithms for identifying network attack types in routing protocols using structured databases // *Management Information System and Devices*. 2025. No. 187. P. 40–54.

17. Liu J., Chen S., He J., Huang R., Tao L., Zhao Y., Yang Y. Ti₃C₂T_x MXene quantum dots with surface-terminated groups for ultrafast photonics. *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12, No. 12. Art. 2043. DOI: 10.3390/nano12122043.
18. Huang H., Wang J., Xu N., Liu S., Liang G., Wen Q. Ti₂CT_x MXene as a saturable absorber for passively Q-switched solid-state lasers. *Polymers*. 2021. Vol. 13, No. 2. Art. 247. DOI: 10.3390/polym13020247.
19. Ahmad H., Ramli R., Ismail N. N. et al. Passively mode-locked thulium- and thulium/holmium-doped fiber lasers using MXene Nb₂C-coated microfiber. *Research Square preprint*. 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-199981/v1.
20. Ren Y., Li G., An H., Wei S., Xing C., Peng Z. Interface engineering SnS₂/MXene Nb₂C self-powered photodetectors with high responsivity and detectivity. *SSRN*. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4414683.
21. Wang J., Wang Y., Liu S., Li G., Zhang G., Cheng G. Nonlinear optical response of reflective MXene molybdenum carbide films as saturable absorbers. *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, No. 12. Art. 2391. – DOI: 10.3390/nano10122391.
22. Khan S. A., Asghar M., Ahmed R., Alrebdi T., Khan A., Baig M., Asghar H. Efficiency of passive Q-switched regimes in erbium-doped fiber lasers using polarization-dependent and independent isolators: a DFT study of V₂CT_x band structure and optical properties. *Optical Materials Express*. 2025. Vol. 15. P. 177–193.