

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувачка кафедри

_____ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 171 Електроніка освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»
на тему: Оптичні нейронні мережі в інформаційних системах

Здобувача групи ЕП.м-22 Ковтуна Сергія Олексійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Сергій КОВТУН

Керівник , ст. викладач кафедри ЕЗПФ,
канд. фіз.-мат. наук

_____ Олександр ПИЛИПЕНКО

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

«06» листопада 2023 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Ковтуна Сергія Олексійовича

1. Тема роботи: Оптичні нейронні мережі в інформаційних системах затверджена наказом по університету від «15» листопада 2023 р., № 1260-VI
2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 15 грудня 2023 року
3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)
Основними принципами, що лежать в основі обчислень та обробки інформації в оптичних нейронних мережах, є принципи матричного множення. Правильний вибір фізичних компонентів нейронних систем, зокрема оптичних елементів, суттєво впливає на функціонування системи. Перспективним є дослідження можливостей застосування розвитку цієї технології. Мета магістерської кваліфікаційної роботи полягає у глибокому дослідженні оптичних нейронних мереж, включаючи їх принципи функціонування, структуру, аналіз переваг та недоліків цієї технології, а також визначення можливих перспектив для подальшого розвитку.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)
 1. Опис структури штучної нейронної мережі. Лінійні операції. Матричне множення. Аналіз переваг та недоліків.
 2. Перелік головних оптичних компонентів та їх функцій.
 3. Формування перспектив розвитку технології оптичних нейронних систем у різних сферах застосування
 4. Аналіз роботи типового штучного нейрона на прикладі роботи існуючого фотонного аналогу.
 5. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1-2 – Загальна інформація

Слайди № 3-5 – Структура штучної нейронної мережі та матричне множення, як основа лінійних операцій.

Слайди № 6-8 – Оптичні компоненти та їх функції. Перспективи розвитку та застосування оптичних нейронних мереж.

Слайди № 9-11 – Макет штучного активуючого пристрою та поведінка сигналу.

Слайд № 12 – Висновки.

6. Дата видачі завдання 06.11.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 13.11.2023 р.	
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 27.11.2023 р.	
3.	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 12.12.2023 р.	
4.	Попередній захист роботи	13.12.2023 р., 13 ⁰⁰ (онлайн)	
5.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	19.12.2023 р. – 20.12.2023 р., 11 ³⁰ (онлайн)	

Здобувач вищої освіти

С.О. Ковтун

Керівник роботи

О.В. Пилипенко

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 39 сторінках, зокрема, містить 25 рисунків, список використаних джерел із 17 найменувань.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає в глибокому вивченні оптичних нейронних мереж, а саме принципів їх роботи, будови, аналізу переваг та недоліків технології та можливих перспектив для розвитку.

У першому розділі здійснено аналіз предметної області досліджуваної теми, а саме ознайомлення з історією виникнення та розвитку концепції оптичних нейронних мереж, принципи матричного множення, що виступають основою обчислень та обробки інформації. Також представлені переваги та недоліки технології.

У другому розділі більш детально розглянуто фізичні складові нейронних систем такого типу – оптичні компоненти та їх роль, а також можливі аспекти застосування та перспективи розвитку технології.

У третьому розділі демонструється технологія мультиплексування з поділом по довжині хвилі, як один із існуючих фотонних аналогів, які імітують описану функціональність типового оптичного нейрона. Розглядається експериментальний стенд на базі пристрою SOA-MZI та поведінка сигналів, що подаються на його входи для обробки підсилювачами.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, матриця, просторовий модулятор світла, матричний перемножувач, оптичний зв'язок, навчання нейронної мережі, хвилевід, нелінійність, оптичні компоненти, мультиплексування, типовий оптичний нейрон.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	6
1.1 Історія виникнення та початок розвитку концепції	6
1.2 Принцип роботи технології	9
1.2.1 Загальна структура штучної нейронної мережі	9
1.2.2 Матрично-векторне та матрично-матричне множення	11
1.2.3 Принцип реалізації оптичної системи.....	13
1.3 Аналіз переваг та недоліків	15
РОЗДІЛ 2. ОПТИЧНІ КОМПОНЕНТИ ТА ЇХ ФУНКЦІЇ. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ...	17
2.1 Основні процеси та етапи роботи оптичної нейронної мережі	17
2.2 Оптичні компоненти та їх роль	19
2.3 Сфери застосування та перспективи розвитку	27
РОЗДІЛ 3. ТИПОВИЙ ОПТИЧНИЙ НЕЙРОН.....	30
3.1 Мультиплексування з поділом по довжині хвилі	30
3.2 Макет активуючого пристрою	31
ВИСНОВКИ.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37

ВСТУП

В сучасному інформаційному суспільстві, що постійно розвивається, виникає безперервна потреба в удосконаленні та оптимізації інформаційних систем. Однією з перспективних галузей для досягнення цієї мети є використання оптичних нейронних мереж. Ця технологія поєднує у собі потужний аналітичний потенціал нейронних мереж із високою швидкістю оптичних технологій.

У даній кваліфікаційній роботі розглядається застосування оптичних нейронних мереж в інформаційних системах, вивчаються їхні переваги та можливості в порівнянні з традиційними методами обробки інформації. Окрім позитивних аспектів використання технології, відзначаються також її недоліки та складнощі реалізації. Акцент роботи робиться на практичних аспектах впровадження цієї технології для оптимізації роботи сучасних інформаційних систем та вирішення актуальних завдань в цій області.

Актуальність оптичних нейронних мереж визначається необхідністю вдосконалення обчислювальних та інформаційних систем у зоні швидкозростаючого обсягу даних. Здатність обробки інформації з використанням оптичних технологій дозволяє покращити ефективність аналізу в порівнянні з традиційними електронними системами. Оптичні нейронні мережі стають ключовим інструментом у вирішенні перерахованих задач.

Головна мета проекту – глибокий аналіз та розуміння оптичних нейронних мереж в контексті їхнього впливу на інформаційні системи. Об'єктом дослідження є оптична нейронна мережа, її структура, принципи роботи та потенційні можливості в різних сферах використання. Робота також передбачає аналіз сучасного стану досліджень в галузі оптичних нейронних мереж та визначення перспектив розвитку цієї технології.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Історія виникнення та початок розвитку концепції

У 1943 році з'явилася концепція штучних нейронних мереж (ШНМ), коли Уолтер Піттс розробив першу модель, що базувалася на математиці та алгоритмах, які імітували принципи та процеси біологічних нервових клітин. Вона представлена на рисунку 1.1. Ця модель виявилася здатною виконувати логічні функції, відкривши новий етап у дослідженнях ШНМ [1]. Протягом понад півстоліття розвитку, нейронні мережі досягли чималого прогресу та широкого використання, завдяки їхнім можливостям самонавчання, асоціативної пам'яті, швидкого пошуку оптимальних рішень та високої нелінійної адаптації, що дозволяє відтворювати складні нелінійні залежності у різноманітних сферах.

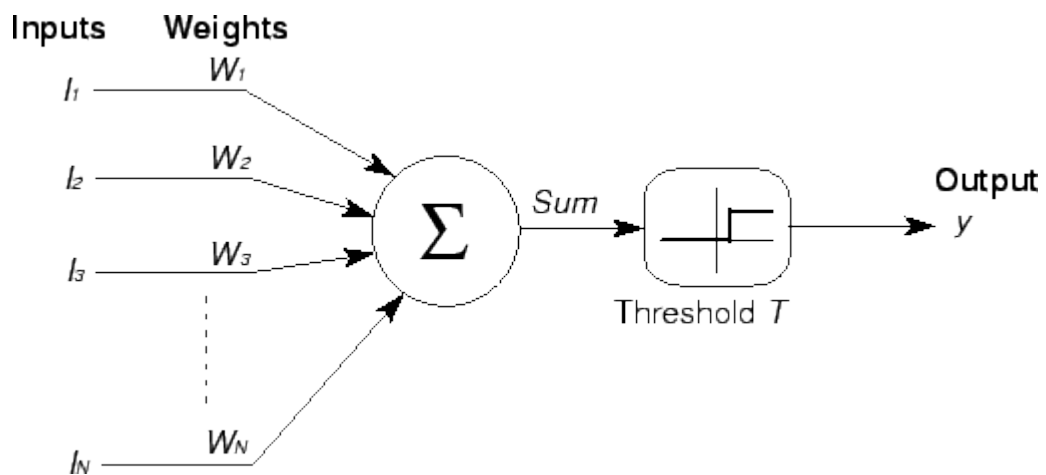


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення моделі ШНМ [1]

Проте як обчислювальна мережа, що взята за зразок обробки сигналів у мозку, оптичні нейронні мережі оперують на архітектурі фон-нейманівського типу і реалізовані у формі електроніки, що має свої недоліки. Наприклад, електронні сигнали легко взаємодіють один з одним, що створює перешкоди

для нейронних мереж, які вимагають високої щільності зв'язків. Крім того, значне енергоспоживання призводить до значних обчислювальних витрат. Такі обмеження електроніки призвели до зміщення уваги від комп'ютерів на так звані "світлові мізки", що використовують світло для обробки великих обсягів інформації на високих швидкостях, замінюючи традиційні електронні схеми. Основним компонентом таких систем є просторовий модулятор світла (SLM), який показано на рисунку 1.2 [2]. Він може перетворювати некогерентне світло в когерентне, що полегшує оптичну обробку зображень.

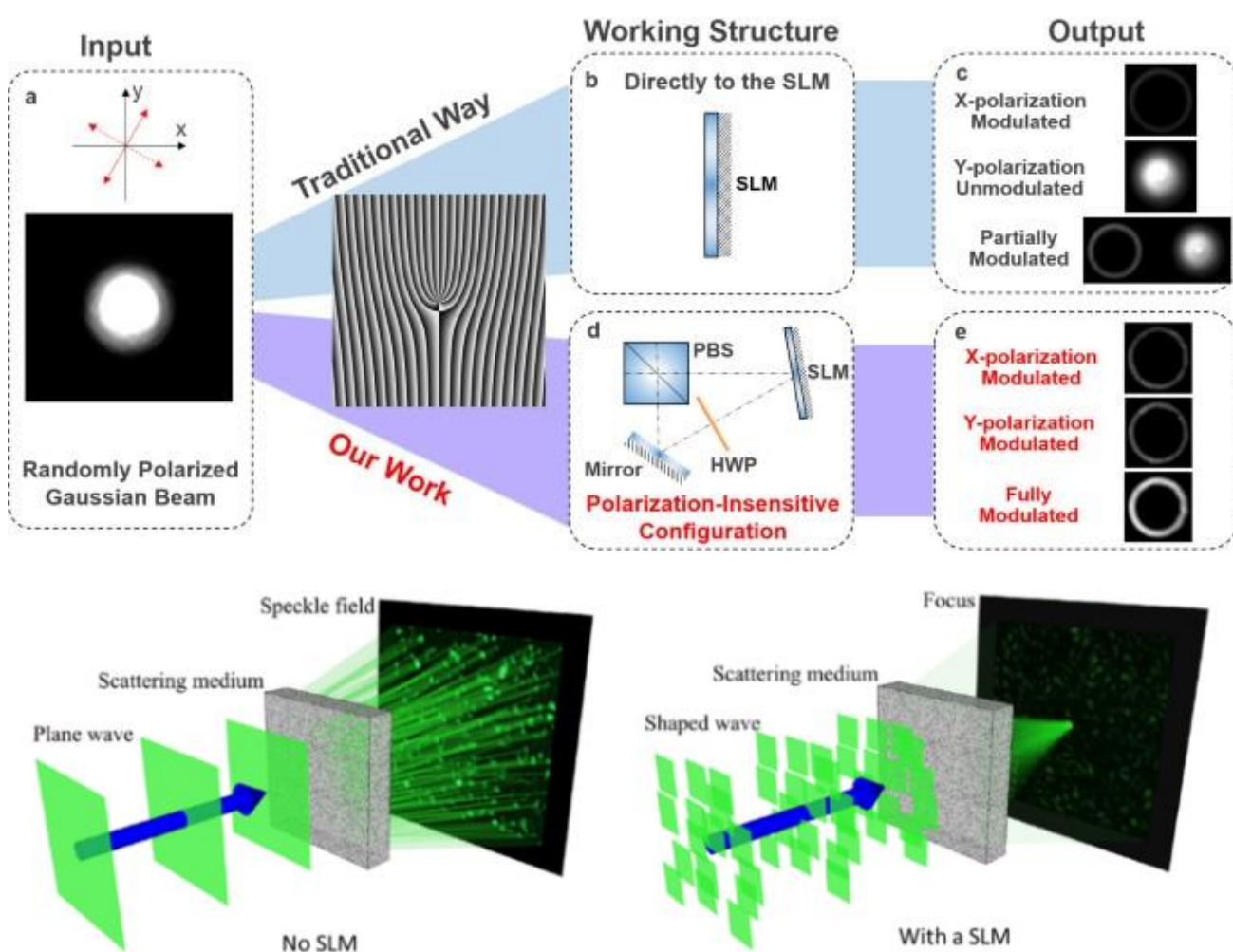


Рисунок 1.2 – Принцип роботи просторового модулятора світла [2]

Безперечно, оптичний комп'ютер використовує технологію оптичного з'єднання, яка об'єднує розділи обчислень та зберігання даних, порушуючи

традиційну архітектуру, яка включає арифметичний блок, пам'ять, пристрої введення та виведення через шину. Оптична нейронна мережа має велику кількість лінійних шарів, що взаємодіють між собою. Оптичний зв'язок відзначається високою паралельністю, оскільки промінь може безперешкодно перетинатися в просторі, а швидкість поширення світла дуже велика, що призводить до незначної затримки в часі та дисперсії. У 1978 році Джозеф Гудман зі Стенфордського університету в США вперше висунув теоретичну модель оптичного векторно-матричного помножувача (рисунок 1.3), що стало ключовим кроком у розвитку оптичних обчислень. Це сприяло вивченню оптичного матричного перемножувача (ОМП) та прогресу в галузі фотонних нейронних мереж [2]. Зі стрімким розвитком інтегрованих фотонних технологій та реалізацією нанофотонічних процесорів будівництва нейронних мереж на основі інтегрованої фотонної платформи стає все більш популярним.

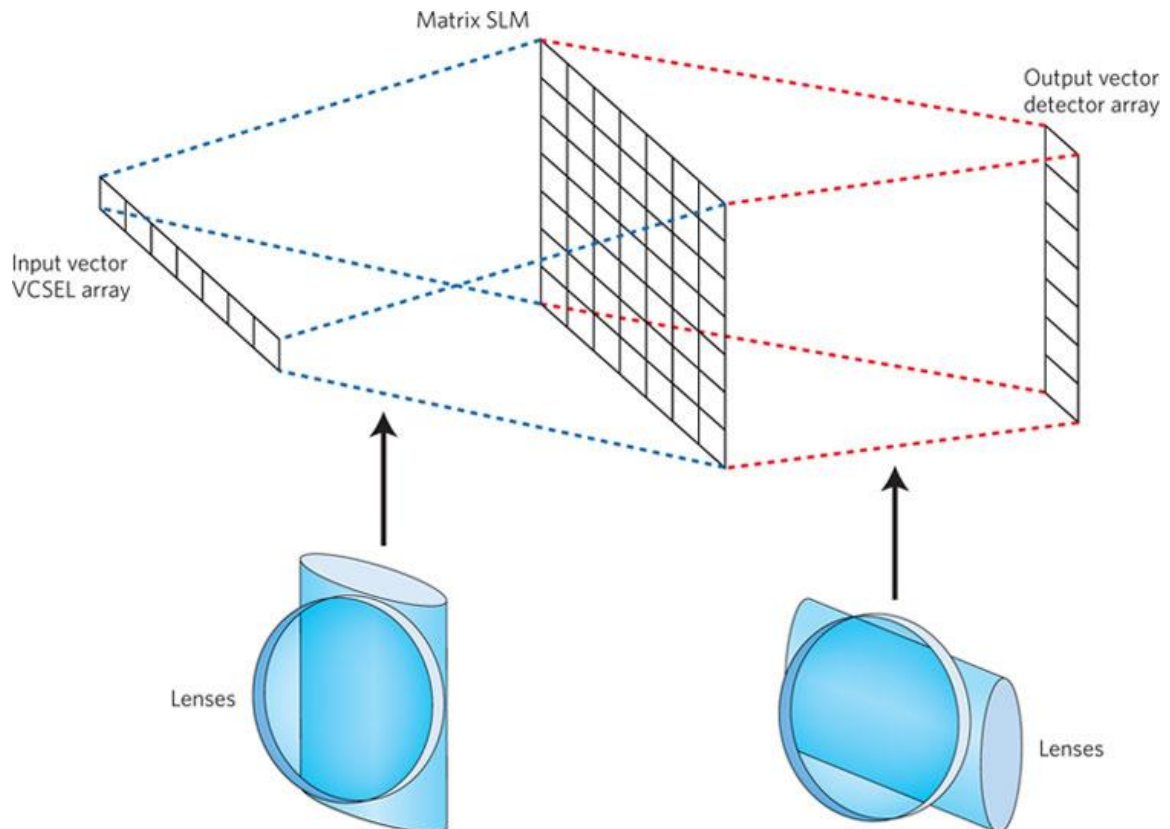


Рисунок 1.3 – Принцип роботи Стенфордського оптичного векторно-матричного помножувача [2]

1.2 Принцип роботи технології

1.2.1 Загальна структура штучної нейронної мережі

Штучні нейронні мережі (ШНМ) побудовані за принципом біологічних нейронних мереж [3]. Біологічні нейрони мають чотири основні одиниці: дендрити, аксони, клітинні тіла та синапси, як показано на рисунку 1.4;

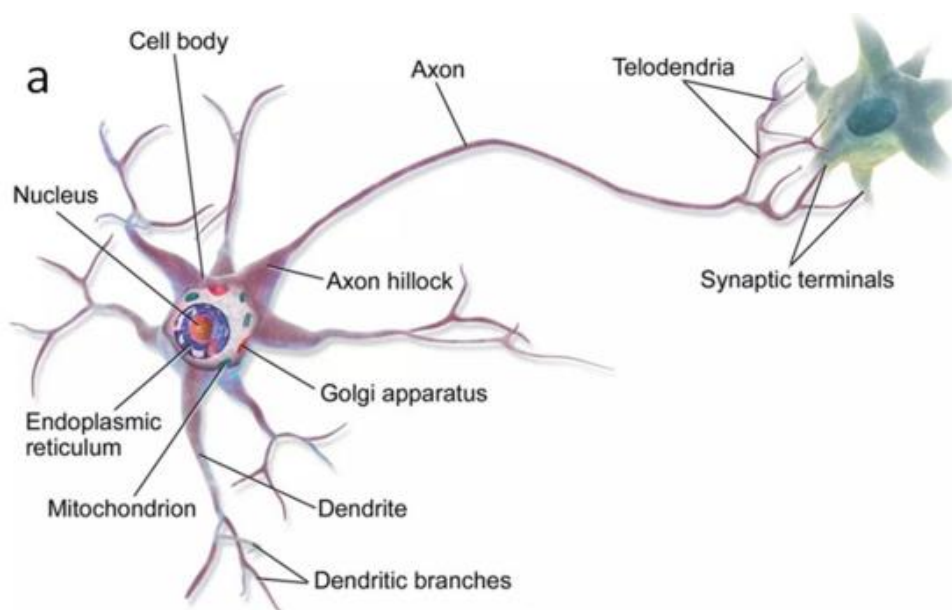


Рисунок 1.4 – Структура біологічної нейронної мережі [3]

Нейрон зазвичай має кілька дендритів, які отримують вхідну інформацію, коли він приймає стимул. Аксони передають інформацію від цього нейрона до інших. Існує лише один аксон з кількома терміналами на кінці, який може передавати інформацію до кількох інших нейронів. Аксон з'єднуються з дендритами інших нейронів, і потім передає сигнали. Як продемонстровано на рисунку 1.5, подібно до біологічних нейронів, штучні нейрони є одиницями обробки інформації, які складаються з вхідних сигналів, вагів W_i , зсуву b , лінійного підсумовування та порогової функції F [4].

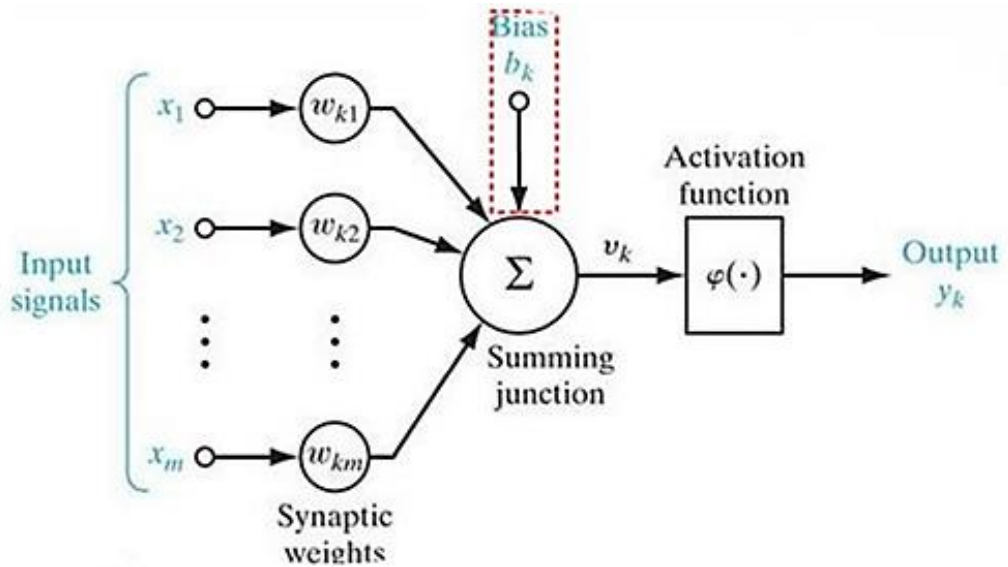


Рисунок 1.5 – Схема передачі та обробки інформації у штучному нейроні [4]

Взаємозв'язок сигналів представляють аксони та дендрити (вхід - дендрит, вихід - аксон), поріг та лінійна сума дорівнюють активації тіла клітини, ваги та пам'ять відповідають синапсам. Як зображено на рисунку 1.6, у нейронній мережі прямого поширення вхідні дані x_i надсилаються на штучні нейрони, кожному з яких відповідає своя вага, потім ми зважуємо та підсумовуємо вхідні дані, виконуємо нелінійну активацію, нарешті отримуємо вихід S_i .

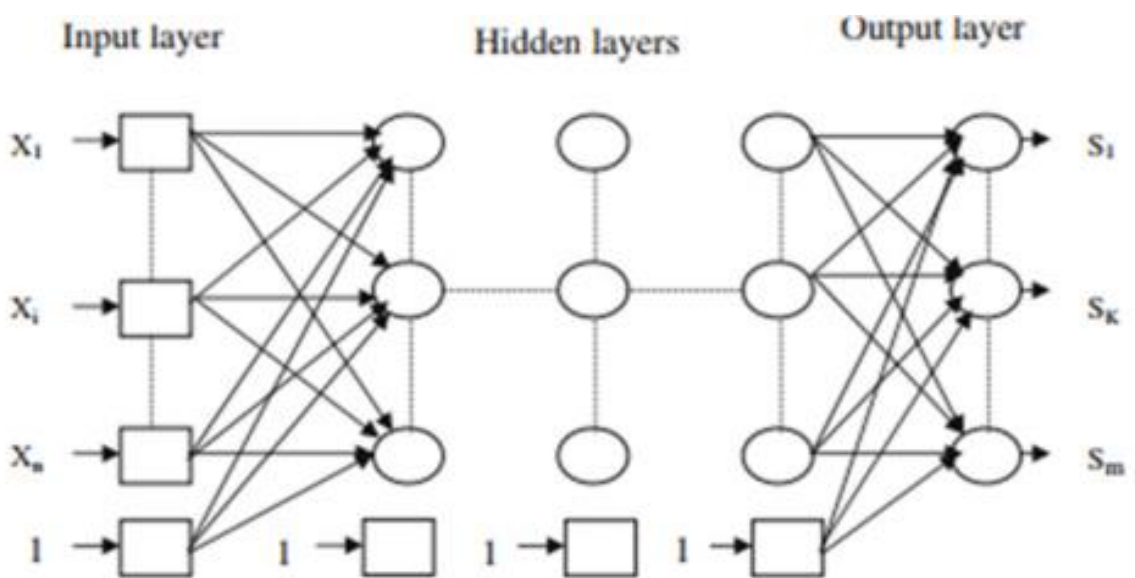


Рисунок 1.6 – Модель нейронної мережі прямого поширення [4]

Мета навчання полягає в тому, щоб отримати вихід, близький до істинного. Він постійно оновлюється для оптимізації W і b в процесі навчання до тих пір, поки мережа не стане збіжною. У наведеному вище твердженні формула S має наступний вигляд:

$$S = F \left(\sum_{i=1}^n W_i * x_i + b_i \right). \quad (1.1)$$

1.2.2 Матрично-векторне та матрично-матричне множення

Лінійні операції у нейронних мережах включають в себе значну кількість матричних множень. При розробці оптичних нейронних мереж важливо враховувати можливість використання оптичних методів для виконання цих складних лінійних операцій. Оптично-матричні методи (ОММ) можуть ефективно реалізувати оптичний зв'язок, і далі ми розглянемо саме принципи матрично-векторного та матрично-матричного множення.

На рисунку 1.7 представлений оптичний векторно-матричний помножувач [5], що складається із масиву світлодіодного джерела світла, коліаторної лінзи L, колонкової лінзи CL1, просторового модулятора світла (ПМС), колонкової лінзи CL2 та CCD. Його робота базується на такому принципі: припустимо, що вектор $b=(1,0,2)$, а матриця $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$.

Регулюючи інтенсивність світла світлодіодного джерела для кодування вектора b , матриця A передається на ПМС. Промені проходять через коліаторну лінзу L та паралельно світять на CL1, після чого направляються на ПМС для виконання повного множення з матрицею A. Після цього, через лінзу CL2, вони знову фокусуються на CDD-зонд, розташований вертикально. Інтенсивність на CDD можна виміряти для визначення, чи отриманий вектор відповідає (3,2,3).

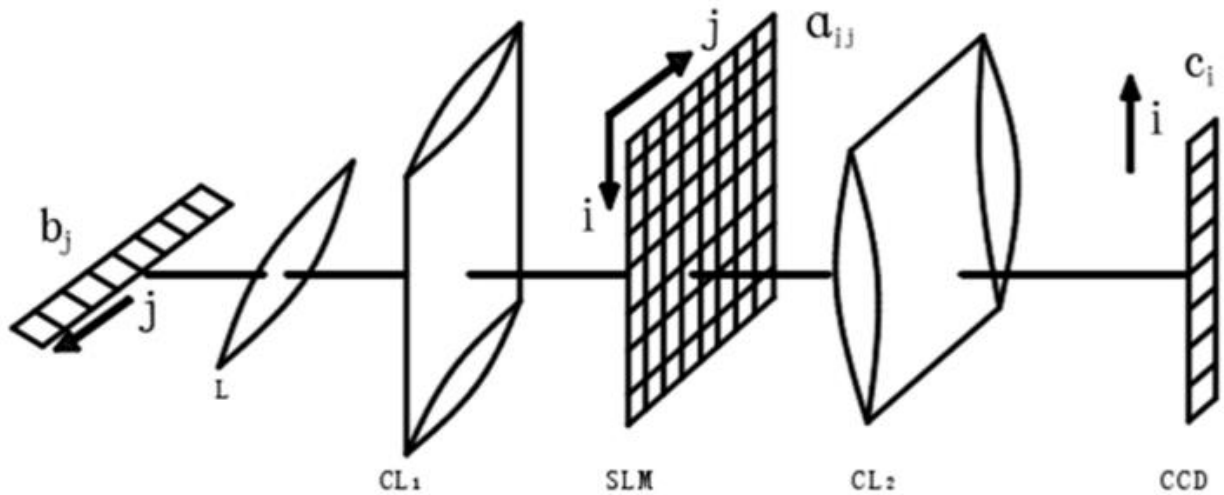


Рисунок 1.7 – Оптичний векторно-матричний помножувач [5]

Основний принцип в матрично-матричному множенні полягає у наступному: якщо матриця A має розмірність m на p , а матриця B має розмірність p на n , тоді їхні розмірності дозволяють перемножити їх, утворюючи при цьому нову матрицю C розмірністю m на n .

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mp} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{p1} & \dots & b_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & \dots & c_{mn} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Суть операції множення матриць A та B полягає у тому, щоб взяти внутрішній добуток усіх векторів-рядків A та усіх векторів-стовпців B . Відповідно до теореми про згортку, при розгляді окремих згорток між альфа та бета можна сприймати процес обчислення як згортку вектора альфа, спрямованого вертикально та повернутого на 180 градусів, який потім послідовно рухається в напрямку вектора бета. За кожен крок переміщення ми виконуємо множення та додавання елементів векторів до тих пір, поки два вектори не перестануть перетинатися. У контексті множення матриці на матрицю процес полягає в перестановці та інвертуванні всіх векторів однієї матриці, а потім їх згортанні з іншою матрицею. Результат згортки і представляє собою математичний результат множення матриць. Наприклад,

можемо взяти довільний вектор-рядок a_i з матриці A , транспонувати й інвертувати його, а потім згорнути з матрицею B , отримуючи матрицю D .

$$\begin{pmatrix} a_{ip} \\ \vdots \\ a_{i1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{p1} & \dots & b_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{p1} & \dots & d_{pn} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{(2p-1)1} & \dots & d_{(2p-1)n} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

Матрицю A можна розглядати як сукупність m векторів-рядків, які переставлені та не впорядковані належним чином. При цьому до кожного з цих векторів додається відповідна кількість нулів, а потім підсумовується достатня кількість стовпців, щоб утворити m підматриць. Кожна з цих підматриць матиме таку форму, що визначається множителем B у

відповідному стовпці: $\begin{pmatrix} a_{ip} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$. Підматриця m послідовно

розташовується горизонтально, утворюючи нову матрицю для згортки з B , після чого отримуємо $(2p-1)$ рядків і $(mn+n-1)$ стовпчиків у результаті. Виберемо попередні mn елементів середнього стовпця результуючої матриці, розташовані по черзі, і переставимо їх для створення матриці $S_{m \times n}$. Отримана матриця S є математичним результатом перемноження матриць A та B .

1.2.3 Принцип реалізації оптичної системи

Згідно з описаним принципом, можливо побудувати оптичну систему $4f$ для реалізації матричного множника (рисунок 1.8). Матриця B наноситься на поверхню об'єкта у вигляді вхідного зображення, а матриця A перетворюється на оптичний матричний перемножувач – фільтр $h(x, y)$. Цей фільтр перетворюється в частотну область за допомогою перетворення Фур'є, утворюючи $H(u, v)$. $H(u, v)$, розташовується на площині частотного спектру,

де зображення на площині об'єкта множиться на матрицю A . Після проходження через лінзу перетворення Фур'є $L1$ результат згортки матриці можна отримати шляхом інвертування перетворення Фур'є [6]. Математичний результат множення матриць можна отримати шляхом віднімання частини елементів у середньому рядку.

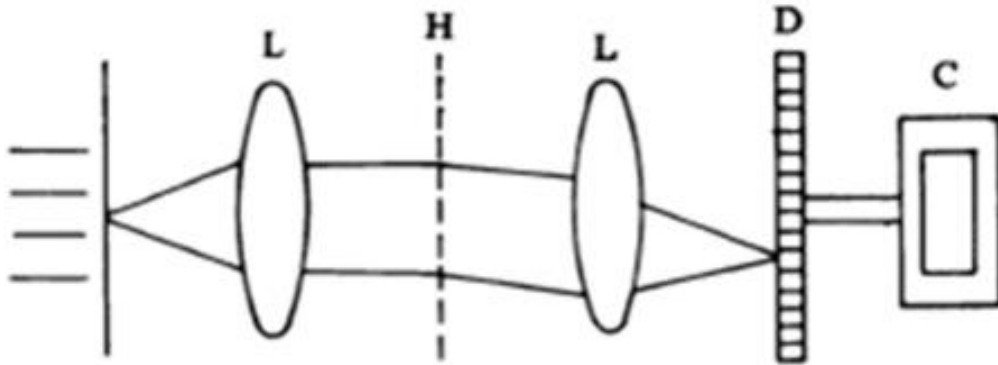


Рисунок 1.8 – Оптична система $4f$ [6]

Реалізація глибокої нейронної мережі включає в себе додавання прихованих шарів. Важливо зазначити, що без наявності нелінійної активації в глибоких нейронних мережах приховані шари стають еквівалентними лінійному шару. Такий підхід обмежує можливість вивчення та ідентифікації нелінійних моделей, тому важливо, щоб у нейронних мережах була присутня нелінійність. Відсутність прямої та ефективної нелінійності в оптиці серйозно обмежує її роль в обчисленнях при глибокому навчанні нейронної мережі.

При реалізації ШНМ важливо враховувати як оптичну лінійну роботу, так і нелінійну активацію. Оптична лінійна операція може бути виконана за допомогою FSOI – оптичного зв'язку у вільному просторі та WOI – хвилеводного оптичного зв'язку, з вагою оптичного з'єднання, реалізованою за допомогою ПМС, голографічного елемента, системи $4f$, фазозмінного матеріалу і т.д. Нелінійна оптична активація є обов'язковою і може бути

досягнута через насичений поглинач, середовище Керра та нелінійний оптичний тепловий ефект.

1.3 Аналіз переваг та недоліків

Оптичні нейронні мережі, як і кожний новий напрямок в галузі обчислень, обробки та передачі інформації, мають свої унікальні переваги та недоліки. Детальніше розглянемо позитивні та негативні аспекти використання цієї нової технології.

До основних переваг оптичних нейронних мереж відносяться:

- велика пропускна здатність – одна з ключових переваг концепції. Оптичні сигнали можуть передаватися на великих швидкостях, що дозволяє обробляти великі об'єми даних в реальному часі.
- ефективність енергоспоживання – оптичні системи показують себе як більш енергоефективні у порівнянні з традиційними електронними системами. Вони можуть працювати при низькому рівні енергії, що дозволяє знижувати фінансові витрати на електроенергію.
- масштабованість – оптичні нейронні мережі можна ефективно масштабувати, розширюючи обчислювальні ресурси за потребою. Це важливо для задач, які вимагають обробки великих об'ємів даних, таких як штучний інтелект та глибоке навчання мережі.
- стійкість до електромагнітних перешкод – оптичні сигнали є менш вразливими до електромагнітних перешкод, що дозволяє забезпечити стабільність та стійкість системи до електромагнітних перетворень та перешкод.

Головними недоліками оптичних нейронних мереж є:

- складність реалізації: - розробка та виготовлення оптичних нейронних мереж та їх компонентів може бути витратною і трудомісткою задачею. Фізична реалізація технології вимагає високих технологічних стандартів і спеціалізованого обладнання.

- обмежена гнучкість програмування – оптичні системи можуть бути менш гнучкими у програмуванні порівняно з електронними системами. Зміна функціональності може бути більш складною та обмеженою, ніж в традиційних системах.

- витрати на обладнання – оптичне обладнання та компоненти, такі як світловоди і фотодетектори, можуть бути дуже дорогими, що ускладнює впровадження та масове використання оптичних нейронних мереж.

- сприйнятливність до фізичних перешкод – оптичні сигнали є досить стійкими до електромагнітних коливань, але можуть бути дуже чутливими до фізичних перешкод, таких як згини або перешкоди на шляху світла, що може призвести до втрат сигналу.

- обмежена інтеграція з існуючими системами – інтеграція такої технології з існуючими електронними системами може бути дуже непростю, що сильно ускладнює, або унеможлиблює їх впровадження в реальних умовах.

Усі перераховані фактори повинні бути обов'язково враховані при плануванні фізичної реалізації та проектуванні реальної мережі в залежності від конкретних вимог до системи та наявних ресурсів для її побудови.

РОЗДІЛ 2. ОПТИЧНІ КОМПОНЕНТИ ТА ЇХ ФУНКЦІЇ. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

2.1 Основні процеси та етапи роботи оптичної нейронної мережі

Функціонування оптичної нейронної мережі включає в себе декілька послідовних етапів, кожен з яких робить свій внесок у результат загальних обчислень та обробки інформації. Процеси та послідовні етапи роботи оптичної нейронної мережі:

- кодування вхідних даних – перетворення зовнішньої інформації у формат, яким можна маніпулювати та обробляти оптичними компонентами мережі. На даному першому етапі здійснюється модуляція існуючих світлових сигналів для їх правильного представлення та формування вхідних значень;
- поширення хвилеводом – оптичні сигнали, закодовані на першому етапі, передаються через хвилевід, який може бути виготовлений у формі оптичних волокон чи планарних хвилеводів. Сигнали передаються вздовж структури хвилевода, використовуючи принципи тотального внутрішнього відбиття в оптичних волокнах для забезпечення ефективної передачі інформації;
- зважене підсумовування – процес множення переданих оптичних сигналів на відповідні синаптичні ваги у кожному нейроні мережі. Ваги, які визначають внесок кожного сигналу, можуть контролюватися оптичними модуляторами, які регулюють амплітуду чи фазу сигналу;
- нелінійна активація – на наступному етапі нелінійні функції активації застосовуються до вже зважених сум на кожному нейроні. Це вносить нелінійність в мережу та визначає стан активації нейронів;

- зв'язок між нейронами – після попереднього процесу оптичні сигнали передаються між активованими нейронами, забезпечуючи міжнейронну комунікацію. Оптичні хвилеводи та інші оптичні компоненти здійснюють передачу сигналів між нейронами та шарами мережі;
- паралельна обробка – одночасне обчислення певної операції чи обробка поданої інформації декількома нейронами, що сприяє підвищенню загальної ефективності мережі;
- оптична інтерференція та суперпозиція – ці два принципи використовуються для об'єднання оптичних сигналів і досягнення певних обчислювальних ефектів під час обробки нейронами;
- генерація вихідного сигналу – один з останніх рівнів генерує вихідні дані на основі оброблених оптичних сигналів, що і представляють результат обчислень;
- зворотний зв'язок і навчання – на цьому етапі нейронна мережа може коригувати свої синаптичні ваги на основі прорахованої похибки між прогнозованими та отриманими цільовими результатами. Можуть бути використані алгоритми навчання, можливо, адаптовані з методів навчання електронних нейронних мереж;
- декодування оптичного виходу – кінцеві результати обробки інформації та обчислень мережею представляють собою оптичні сигнали, які потребують зворотного декодування в електронний формат, який буде зрозумілий програмі або користувачу.

Важливо зазначити, що фактичні деталі реалізації реальної системи відрізняються в залежності від конкретної архітектури оптичної нейронної мережі, а також типів використовуваних оптичних елементів та передбачуваного застосування мережі.

В наступному підрозділі детально розписано про основні види та функціонал оптичних пристроїв та складових, що використовуються при побудові таких нейронних систем.

2.2 Оптичні компоненти та їх роль

Як вже було сказано, оптичні нейронні мережі являють собою інноваційну технологію та представляють новий рівень розвитку в галузі обчислювальних операцій, використовуючи при цьому саме унікальні властивості оптичних компонентів для обробки та передачі інформації. Отже, ретельно розглянемо основні складові елементи оптичної нейронної мережі, їх функції та роль у структурі оптичної нейронної системи.

Оптичні джерела світла виступають як початкові елементи оптичної нейронної мережі [7]. Вони представляють собою пристрої, які генерують світлові хвилі для подальшого створення та передачі світлових сигналів через оптичні канали системи. Основними типами таких джерел є лазери та світлодіоди (рисунок 2.1).

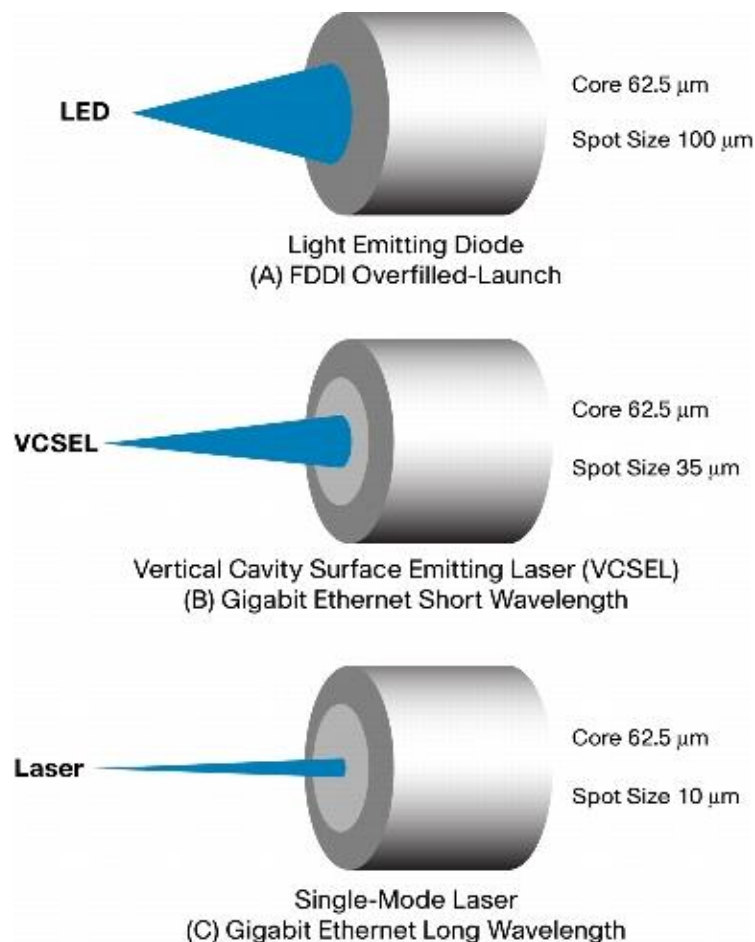


Рисунок 2.1 – Оптичні джерела генерації світлових сигналів [7]

До основних функцій оптичних джерел світла в нейронних мережах такого типу відносяться:

- генерація світлового сигналу – хвилі, які передають інформацію через оптичні канали;
- емісія когерентного світла – генерація світла з однаковою фазою, яке направлене в одному напрямку для поліпшення ефективності передачі сигналу;
- модуляція світла – джерело може бути модульованим та змінювати свою інтенсивність чи інші характеристики відповідно до інформації, що передається, це дозволяє кодувати оптичні сигнали.

У контексті оптичних нейронних систем, де використовуються оптичні сигнали для передачі та обробки інформації, ефективні та надійні оптичні джерела світла є ключовими компонентами для забезпечення стабільної та швидкої роботи системи.

Оптичні модулятори — це пристрої, які змінюють характеристики світлового сигналу, такі як інтенсивність, фаза, частота або поляризація, зазвичай відповідно до вхідного електричного сигналу [8]. В концепції оптичних нейронних систем, такі модулятори використовуються для обробки та маніпулювання світловими сигналами, що має важливе значення для передачі та обробки інформації. Зовнішній вигляд та внутрішню будову такого пристрою зображено на рисунках 2.2 – 2.3.

Основними функціями оптичних модуляторів в оптичних нейронних системах є:

- фазова модуляція – зміна фази світла, яка ж важливою для деяких оптичних застосувань, таких як інтерферометрія тощо;
- поляризаційна модуляція – зміна поляризації світла, що може бути використано для передачі додаткової інформації, а також для контролю напрямку світлового сигналу;

- керування фазою та амплітудою – ефективна зміна амплітуди оптичного сигналу, що може бути корисним для швидкої передачі та обробки великих об'ємів інформації;

Електрооптичні модулятори являють собою ефективний спосіб зовнішнього впливу на властивості світла. Їх використання в оптичних нейронних системах дозволяє активно маніпулювати світловими сигналами, змінювати та контролювати їх властивості.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд оптичного модулятора [8]

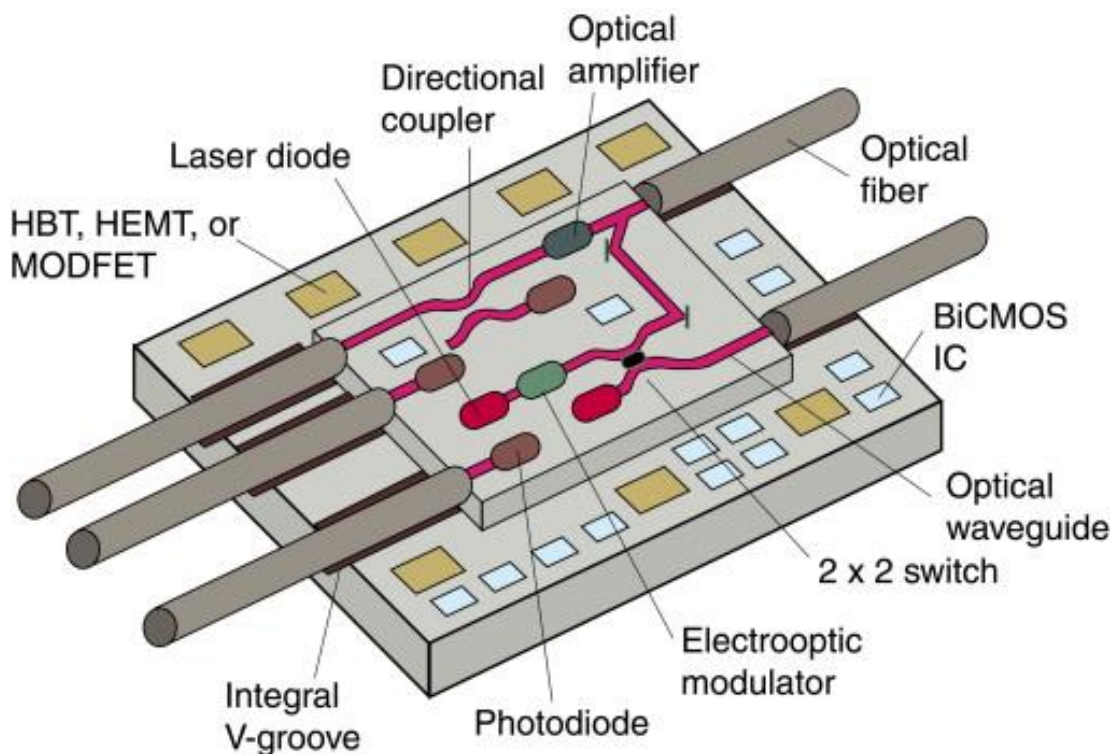


Рисунок 2.3 – Будова оптичного модулятора [8]

Оптичні фотодетектори - це пристрої, які використовуються для виявлення світла та вимірювання його інтенсивності, після чого перетворення світлового сигналу на електричний. В технології оптичних нейронних систем, фотодетектори використовуються для отримання інформації зі світлових сигналів та конвертації її в електричні сигнали, які можуть бути подані на входи нейронних елементів [8]. Ці компоненти є ключовими для отримання оброблених даних з оптичних сигналів та подальшого використання їх у нейронних обчисленнях. Зовнішній вигляд та схема роботи представлені на рисунках 2.5 – 2.6.

До основних функцій оптичних фотодетекторів відносяться:

- детекція світлового сигналу – вимір інтенсивності світла, що на них падає, для подальшої конвертації сигналу;
- конвертація світлового сигналу – перетворення отриманого світлового сигналу в електричний за допомогою фотоелектричного ефекту або інших фізичних явищ для подальшої обробки в оптичній нейронній системі;
- високошвидкісна детекція – робота на високих частотах, що дозволяє миттєво виявляти світлові сигнали, які швидко змінюються, що є важливим для реакції на швидкозмінні зовнішні стимули в реальному часі;
- високий рівень чутливості – велика чутливість до слабких світлових сигналів, що дозволяє системі виявляти та обробляти навіть слабкі джерела.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд фотодетектора [8]

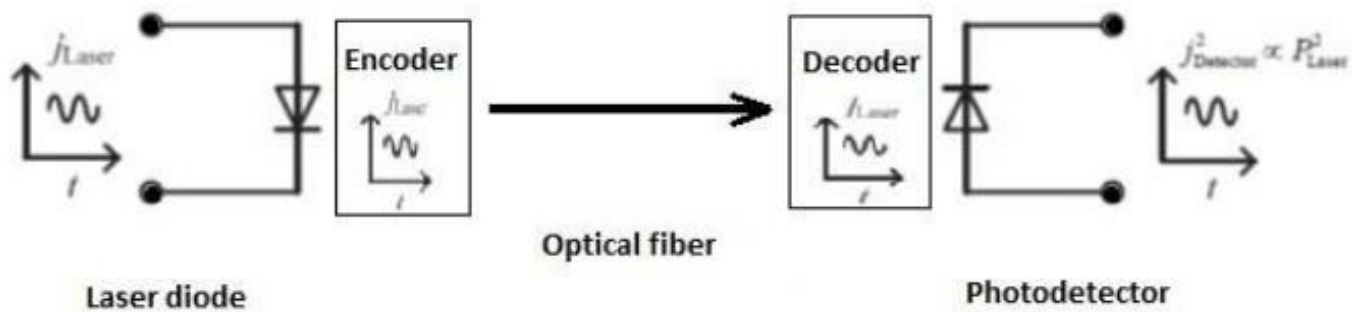


Рисунок 2.5 – Схема роботи оптичного фотодетектора [8]

Оптичні хвилеводи використовуються для направлення світла вздовж певного шляху. Інтегровані на чіпі волоконно-оптичні та діелектричні хвилеводи з пластику та скла дозволяють ефективно направляти оптичні сигнали між різними компонентами оптичної нейронної мережі, забезпечуючи компактність та ефективність системи [9].

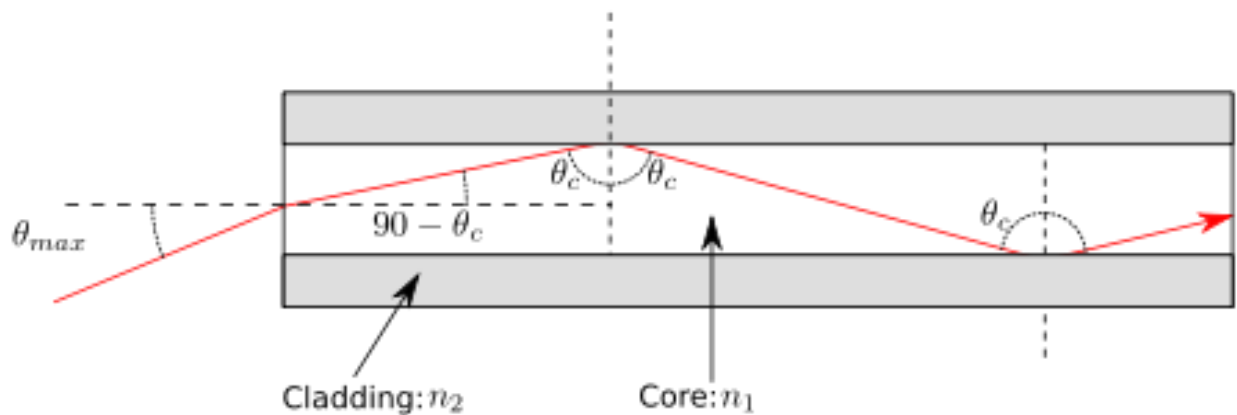


Рисунок 2.6 – Направлення світлового сигналу у хвилеводі [9]

Нелінійні оптичні елементи - це елементи, що виявляють нелінійний відгук на інтенсивність світлового випромінювання, що проходить через них. Вони можуть використовуватися для здійснення оптичного перемикання та конвертації частот, що розширює можливості обчислення оптичної нейронної мережі. Найважливішою характеристикою нелінійних оптичних елементів є їхній нелінійний відгук на інтенсивність світла.

До переліку основних функцій таких елементів в контексті оптичних нейронних мереж входять наступні:

- оптичні перемикачі – нелінійні елементи можуть використовуватися у якості оптичних перемикачів, які дозволяють включати або виключати світлові шляхи в оптичній системі за допомогою вимірної величини вхідного світлового сигналу;
- оптичні модулятори – нелінійні елементи слугують для змін характеристик світлового сигналу – фази чи амплітуди, залежно від інтенсивності вхідного світла;
- оптичні логічні елементи – реалізація оптичних логічних вентилів, що дозволяє виконувати операції логіки на основі світлового сигналу;
- оптичні зв'язки між нейронами – дозволяють передавати та обробляти інформацію за допомогою світлового потоку.

Використання нелінійних оптичних елементів дозволяє створювати більш потужні та ефективні оптичні системи для обробки інформації в оптичних нейронних мережах.

Інтерферометри дозволяють комбінувати кілька оптичних сигналів, створюючи інтерференційні зразки. Ці елементи слугують для виконання операцій, таких як розділення та об'єднання пучків світла [9]. Вони також використовуються для вимірювання фази, амплітуди та інших характеристик світлових хвиль за принципом інтерференції світла (рисунок 2.7). Основні функції інтерферометра в роботі оптичної нейронної мережі:

- обчислення фази та амплітуди світла;
- створення хвильових фронтів – формують та модифікують хвильові фронти світла для створення складних оптичних структур;
- оптичні перемикачі та модулятори – інтерференція також використовується при створенні оптичних перемикачів та модуляторів, які, в

свою чергу, дозволяють здійснювати управління світловим потоком та оптичну обробку сигналів;

- створення оптичних варіантів ваг в нейронній мережі – емуляція вагових коефіцієнтів у ваговій матриці при обчисленнях;
- оптичні зв'язки та інтеграція нейронів – можуть бути використані для створення оптичних зв'язків між елементами нейронної мережі, дозволяючи інтегрувати оптичні сигнали.

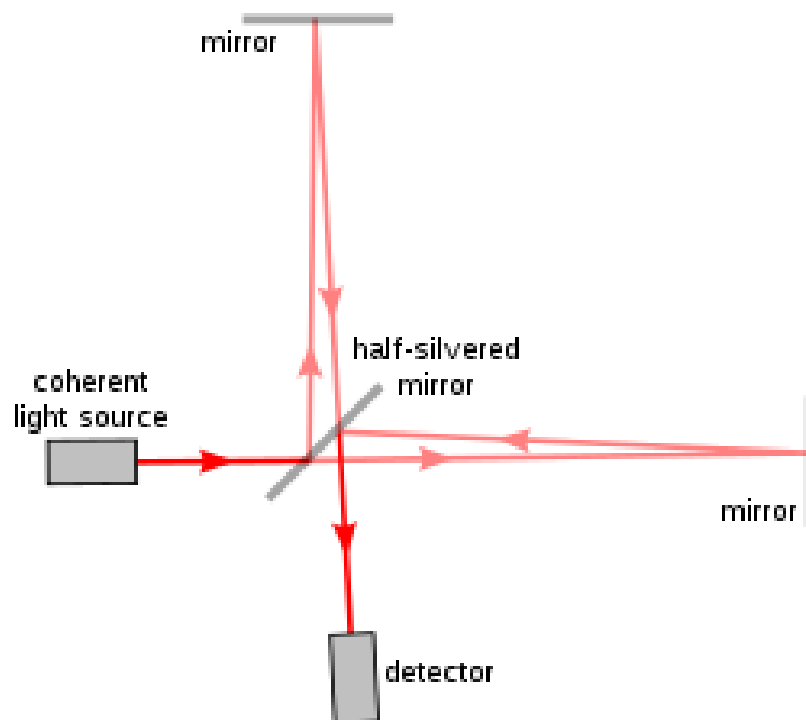


Рисунок 2.7 – Принцип явища інтерферометрії [9]

Просторові світлові модулятори (SLM) використовуються для модифікації просторового розподілу оптичних сигналів. Це важливо для завдань, таких як керування пучками світла, що дозволяє оптичній нейронній мережі здійснювати паралельну обробку та регулювання з'єднаності [10]. Зовнішній вигляд та принцип роботи пристрою показано на рисунках 2.8 – 2.9. Основні функції, які SLM виконує в оптичних нейронних мережах:

- виконання матричних операцій – використовується для впливу на світлові хвилі, відповідно до вагових коефіцієнтів, які відповідають вагам у матриці нейронної мережі;
- імітація ваг та входів нейронів – може бути використаний для емуляції ваг та входів нейронів у оптичній нейронній мережі, тобто виступати ключовим елементом при оптичній обробці інформації;
- здійснення оптичного зв'язку між шарами – може застосовуватися для зміни властивостей світлового поля для забезпечення оптичного зв'язку між різними шарами оптичної нейронної мережі.

Функціонал цього пристрою значно спрощує реалізацію оптичних нейронних мереж, де світлові сигнали передаються та обробляються оптичним способом для виконання операцій штучного інтелекту та обробки інформації.

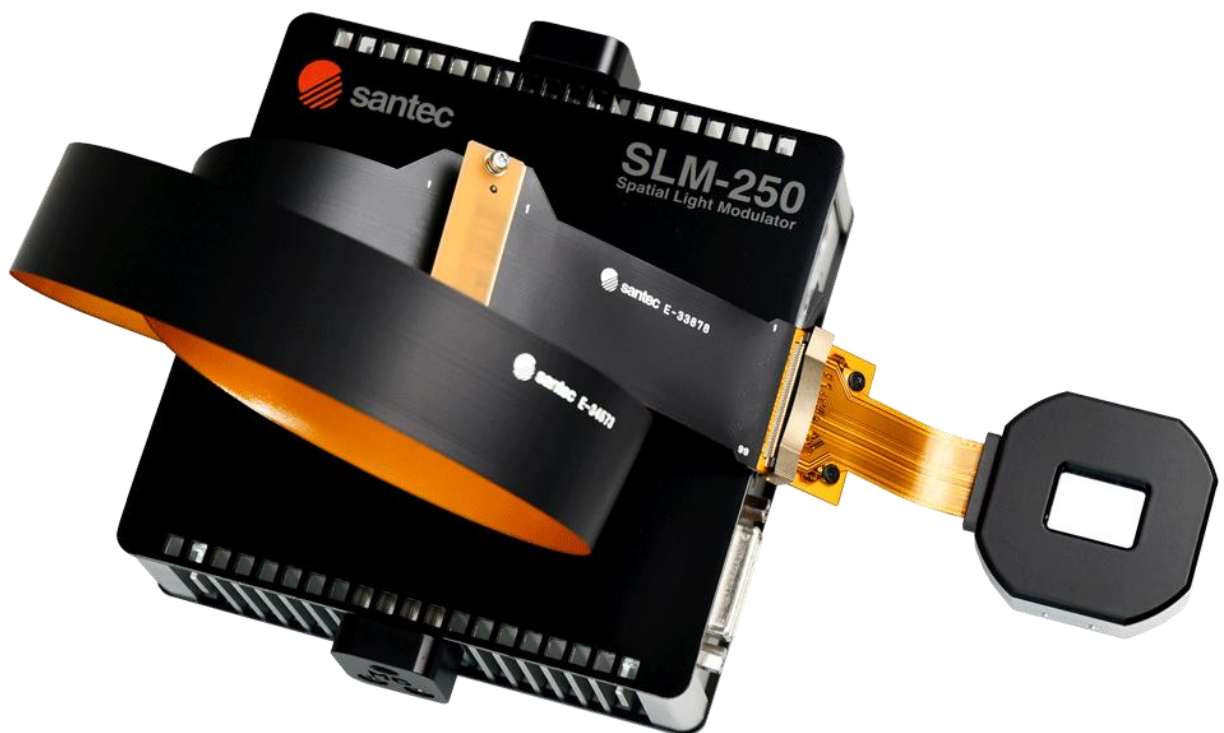


Рисунок 2.8 – Просторовий світловий модулятор (SLM) [10]

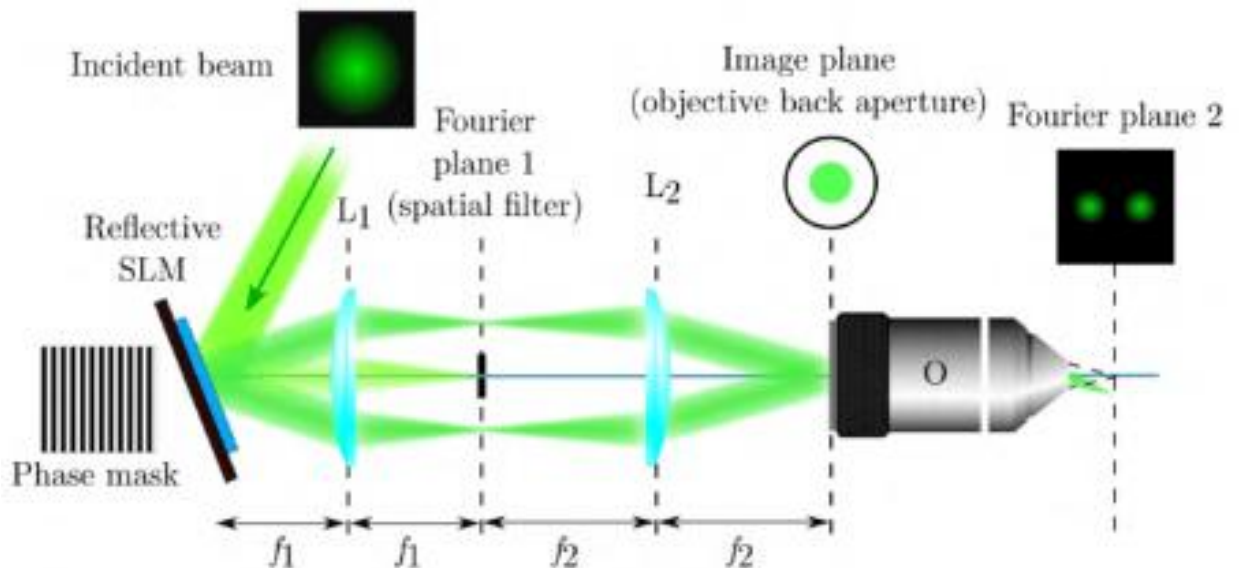


Рисунок 2.9 – Принцип роботи SLM [10]

2.3 Сфери застосування та перспективи розвитку

Незважаючи на новизну технології, оптичні системи вже набули широкого застосування в різноманітних сферах та мають значний потенціал для подальшого розвитку в багатьох інших галузях, які потребують швидкості при передачі та обробці інформації, а також збільшення рівня автоматизації [11]. Детально розглянемо деякі з найважливіших сфер, де оптичні нейронні мережі використовуються вже сьогодні:

- комп'ютерне зорове виявлення та розпізнавання образів – застосування оптичних систем при відеоспостереженні та виявленні об'єктів з метою автоматизації аналізу та виділення образів для поліпшення систем безпеки;
- медична діагностика – аналіз медичних зображень та відео, отриманих в результаті томографії, рентгенологічних досліджень тощо з метою автоматизації та швидкої обробки даних та показників для полегшення завдань клінічної діагностики;
- оптичне сортування та визначення – використання світлових сигналів для розділення об'єктів за їхніми оптичними властивостями, такими

як розсіювання та пропускання світла тощо. Використовується в промисловості, наприклад, для ефективного сортування об'єктів за розміром, кольором, формою або іншими характеристиками за допомогою оптичних даних;

- системи штучного інтелекту в реальному часі – реалізація передових рішень, які поєднують в собі потужність нейронних мереж із властивостями оптичної обробки інформації. Подібні системи ШІ в реальному часі розв'язують завдання аналізу, забезпечуючи оперативність та швидкість відповіді. Вони можуть адаптуватися до змінних умов оптичного середовища, що робить їх потужним інструментом для ефективного та швидкого аналізу даних у різних застосуваннях виробництва, безпеки, логістики, медицини, медіа тощо;

- віртуальна та доповнена реальність – оптичні нейронні мережі використовуються для оптимізації візуальних ефектів та реалістичності віртуального оточення, наприклад, для відтворення реалістичних текстур, освітлення та обробки зображень. Вони можуть виявляти та розпізнавати об'єкти в реальному часі для більш реалістичної взаємодії користувача з віртуальним світом. Також оптичні нейронні системи можуть бути використані для генерації реалістичних віртуальних сцен, ландшафтів тощо.

Оптичні мережі мають велику кількість очевидних переваг у порівнянні з традиційними електронними системами, а особливо, якщо ми говоримо про швидкість передачі та обробки даних. Проте, як і будь яка інноваційна технологія в інформаційних системах, оптичні системи потребують постійного розвитку та вдосконалення, так як на даному етапі мають досить високий рівень складності реалізації через великі витрати на обладнання та дуже обмежену інтегрованість з існуючими традиційними електронними рішеннями [12]. Виділимо та розглянемо перелік основних проблем та перспектив розвитку оптичних нейронних мереж:

- оптимізація витрат та виробничих процесів – розробка оптимізованих технологій та методів реалізації оптичних нейронних систем

для зменшення витрат на їх впровадження. На даний момент оптичні компоненти для потужних та ефективних нейронних систем є дуже дороговартісними;

- інтеграція з іншими технологіями – створення робочих комплексних рішень шляхом поєднання з існуючими традиційними електронними технологіями. Як вже було сказано під час розгляду недоліків концепції оптичних мереж – на сьогодні все ще досить складно та дуже недешево інтегрувати їх в готові електронні системи, які скрізь широко застосовуються;

- комерціалізація та масове впровадження – перехід від досліджень до масового практичного впровадження оптичних нейронних мереж у процеси найрізноманітніших галузей. Це є можливим у тому випадку, коли вже будуть знижені витрати на реалізацію таких систем, а процес інтеграції стане спрощеним;

- покращення точності та ефективності – дослідження та розвиток оптичних компонентів нових поколінь для забезпечення ще більшої швидкості та точності обробки інформації;

- розширення застосувань у нових галузях – дослідження можливостей оптичних нейронних мереж у нових галузях, таких як енергетика, екологія, архітектура тощо..

- стандартизація та безпека – розробка стандартів для використання оптичних нейронних систем та підвищення рівня безпеки при їхній експлуатації.

РОЗДІЛ 3. ТИПОВИЙ ОПТИЧНИЙ НЕЙРОН

3.1 Мультиплексування з поділом по довжині хвилі

Алгоритм функціонування типового оптичного нейрона умовно можна поділити на такі етапи:

- належне зважування кожного вхідного сигналу на певну вагу;
- перехід всіх зважених сигналів на стадію підсумовування;
- надходження зваженої суми сигналів до блоку активації, де за допомогою порогової функції формується вихідний сигнал нейрона.

Одним з існуючих фотонних аналогів, які імітують описану функціональність є схема WDM [13]. Мультиплексування з поділом по довжині хвилі (WDM) - це волоконно-оптична технологія передачі, яка дозволяє використовувати кілька довжин або кольорів світлових хвиль для передачі даних по одному і тому ж середовищу.

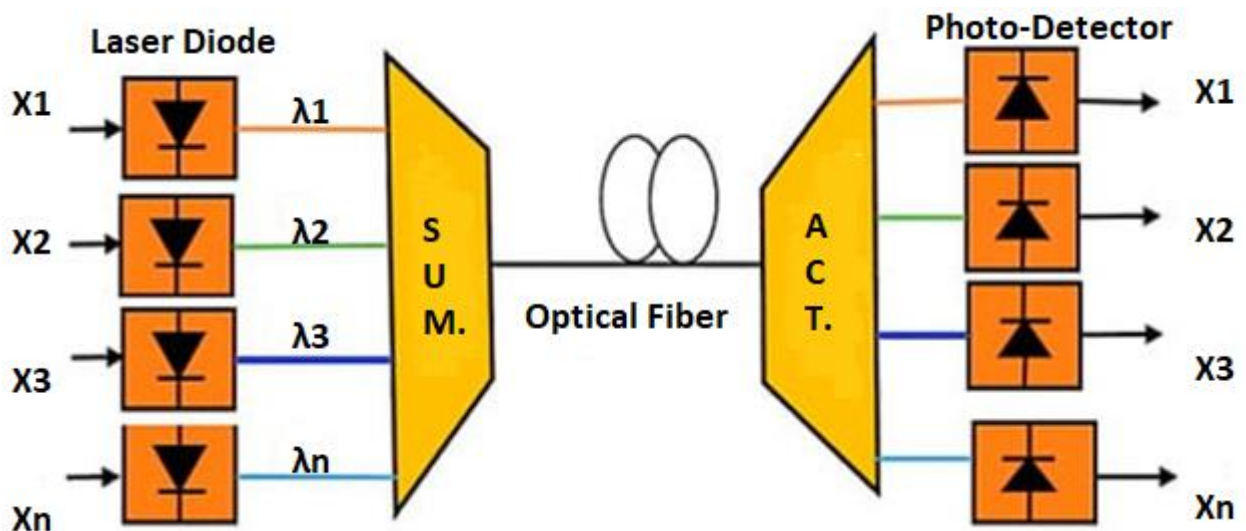


Рисунок 3.1 – Конфігурація мультиплексування з поділом по довжині хвилі (WDM) [13]

Всі вхідні сигнали $X1 - Xn$ записуються на певну довжину хвилі $\lambda1 - \lambda_n$ за допомогою аналогової амплітудної модуляції, а ваги реалізуються за

допомогою змінних оптичних атенюаторів (VOA) – пристроїв, які використовуються для регулювання затухання сигналів та підходять для оптичної потужності, яка потребує суворого контролю в мережі. Після цього всі зважені входи мультиплексуються в одну оптичну гілку, при цьому рівень потужності результуючого WDM-сигналу відповідає зваженому підсумку відповідних рівнів потужності оптичних вхідних сигналів і використовується для запуску оптичної активаційної функції, яка завершує роботу оптичного нейрона [14].

3.2 Макет активуючого пристрою

Макет запропонованого фотонного сигмоїдного активуючого пристрою відображено на рисунку 3.2. Інтерферометр SOA-MZI, який функціонує в режимі глибокого насичення, сконфігурований за диференційно-зсувною схемою [15]. Послідовно за ним розташований напівпровідниковий оптичний підсилювач SOA, що працює в режимі малого підсилення сигналу. Обидва пристрої виступають як конвертери довжини хвилі.

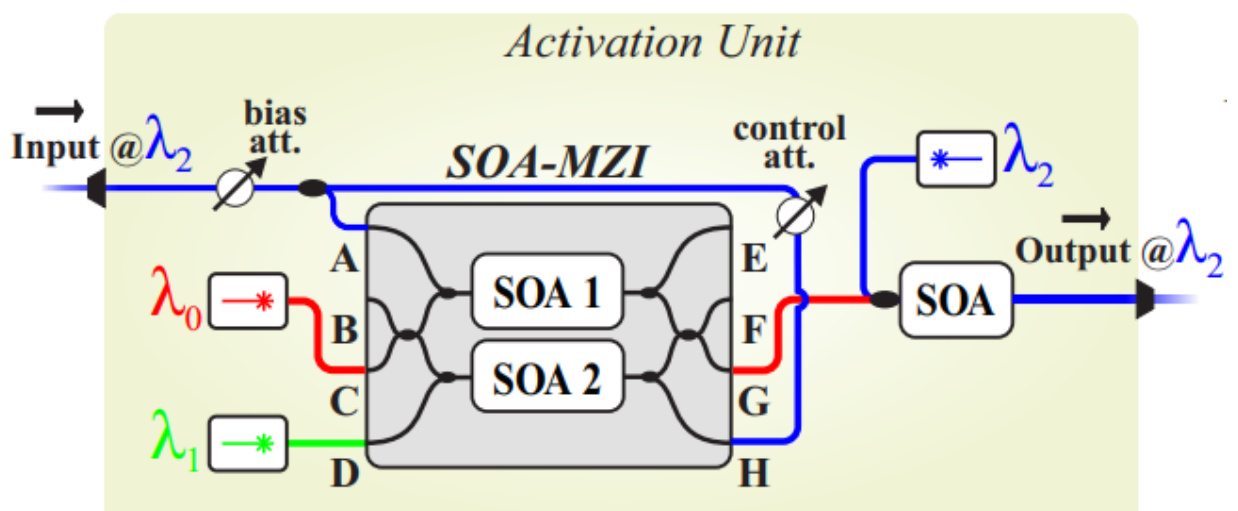


Рисунок 3.2 – Макет сигмоїдного активуючого пристрою SOA-MZI [15]

На вхід "C" SOA-MZI надходить одна неперервна хвиля з довжиною λ_0 , а інша хвиля з λ_1 передається на SOA2 через важіль управління "D" для реалізації диференційно-зсувної схеми. Обидві неперервні хвилі мають високі рівні оптичної потужності, змушуючи обидва підсилювачі SOA1 та SOA2 працювати в глибоко насиченому режимі. Додатковий імпульсний сигнал керування на λ_2 послаблюється атенюатором зсуву для досягнення необхідного зсуву функції активації. Після цього сигнал розділяється на два ідентичні потоки, які подаються на порти гілок "A" і "H" активуючого пристрою як спів- і зустрічно розповсюджені пучки керування.

Отже, інверсна копія керуючого сигналу, відбитого на λ_0 , з'являється на комутованому вихідному порті "G" диференційно-зміщеного SOA-MZI. Цей сигнал подається як керуючий на наступний підсилювач SOA, який відновлює як довжину хвилі, так і логіку початкового сигналу, використовуючи додатковий оптичний промінь з довжиною хвилі λ_2 як вхідний сигнал.

Сигмоїдна передавальна функція фотонного блоку активації впливає з властивостей вирівнювання потужності глибоко насиченого диференційно зміщеного SOA-MZI разом з нелінійною передавальною функцією роботи SOA XGM-WC. Інжекція відповідної кількості пучка λ_1 в підсилювачі SOA2 призводить до того, що коефіцієнт підсилення SOA2 наближається до його унітарної кінцевої точки в області прозорості. У той же час, вхідний сигнал при λ_0 змушує підсилювач SOA1 працювати з іншим коефіцієнтом підсилення дещо вище області прозорості, так що диференціальний коефіцієнт підсилення між двома SOA відповідає фазовому зсуву між двома гілками пристрою SOA-MZI. Використовуючи цю схему зсуву, введення послідовності керуючих імпульсів з інтенсивною зміною пікової потужності імпульсу призведе до інвертованої копії цього сигналу на виході SOA-MZI, але з майже вирівняними за потужністю імпульсами, як це видно з прикладу, описаного на рисунках 3.3 – 3.7 [16].

На рисунку 3.3 зображено два керуючі імпульси з різними рівнями інтенсивності, які надходять на SOA-MZI.

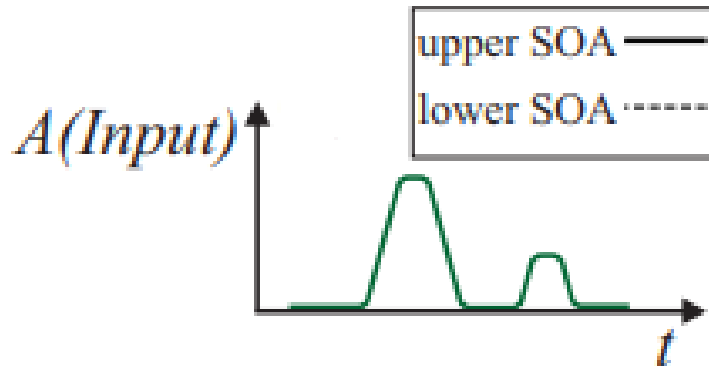


Рисунок 3.3 – Два імпульси, що надходять на пристрій SOA-MZI [16]

Рисунок 3.4 ілюструє приріст як верхнього, так і нижнього модулів підсилювача SOA в описаній послідовності керування. Видно, що кожен імпульс керування приводить обидва коефіцієнти підсилення SOA до єдиної кінцевої точки.

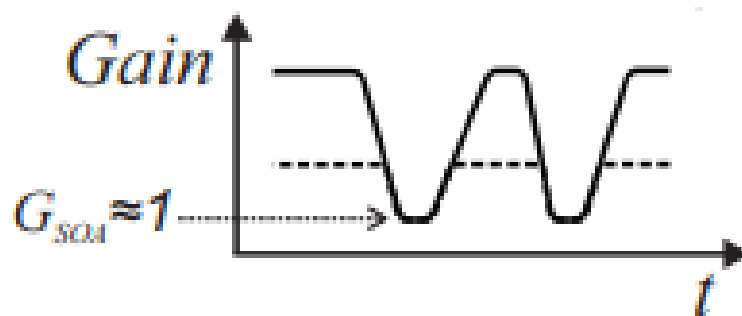


Рисунок 3.4 – Приріст верхнього та нижнього модулів підсилювача [16]

На рисунку 3.5 показано відповідну фазову характеристику, яка спостерігається в обох гілках пристрою SOA-MZI, показуючи що початкова різниця фаз стає нульовою під час подачі керуючого імпульсу. Припускаючи, що найнижчий оптичний керуючий імпульс має достатню потужність, щоб довести коефіцієнт підсилення SOA до прозорості, то, очевидно, що будь-

який оптичний керуючий імпульс також дасть змогу досягти унітарних значень коефіцієнта підсилення SOA.

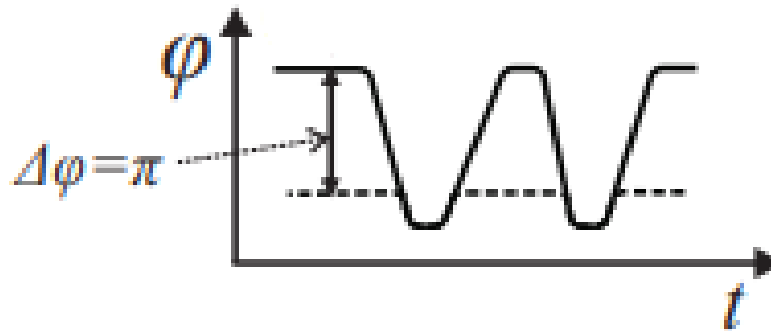


Рисунок 3.5 – Фазова характеристика обох модулів підсилювача [16]

Це свідчить про те, що оптичні керуючі імпульси з різними рівнями інтенсивності даватимуть однакову різницю фаз $\Delta\varphi = 0$ між двома плечима пристрою SOA-MZI. Такий наслідок призводить до ідеального "нульового" рівня на комутованому вихідному порту "G" SOA-MZI, з відповідною вихідної послідовності порту "G", як показано на рисунку 3.6.

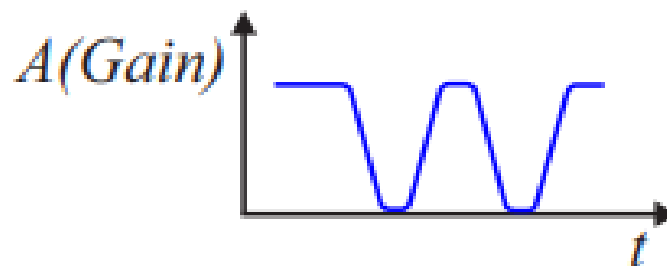


Рисунок 3.6 – Однакова різниця фаз між двома плечима підсилювача [16]

Як видно, вихідна послідовність порту "G" є інвертованою, але вирівняною за потужністю копією вихідної послідовності керуючих імпульсів, яка, однак, мала сильно модульовані за інтенсивністю імпульси. Введення цієї послідовності в наступний підсилювач SOA призводить до того, що сигнал повертається до своєї початкової логіки, зберігаючи свою

інтенсивність та вирівнюючи характеристики, як можна побачити на рисунку 3.7.

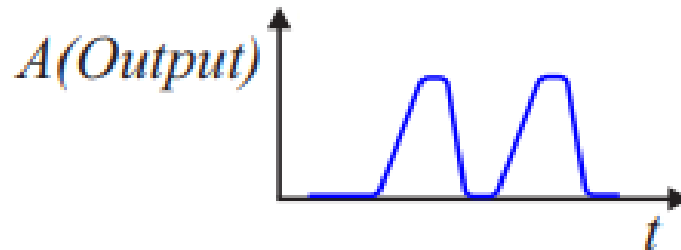


Рисунок 3.7 – Повернення сигналу до початкової логіки [16]

Експериментальна установка, що використовувалася для оцінки характеристик передавальної функції цієї схеми продемонстрована на рисунку 3.8 [17]. Сигнал з довжиною хвилі $\lambda_2 = 1550,12$ амплітудний модулятор, що керується генератором сигналів для отримання синусоїдального електричного сигналу з частотою 200 МГц. Модульований сигнал передається в наступний модулятор, який керується програмованим генератором імпульсів, що реалізує періодичний сигнал з 3 біт та послідовністю 100 імпульсів.

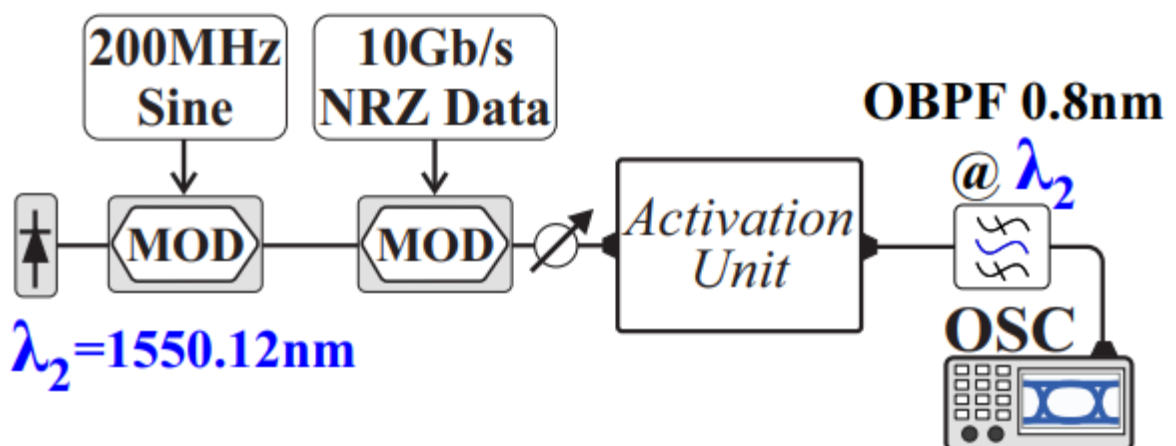


Рисунок 3.8 – Експериментальна установка для вимірювання передавальної функції [17]

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи основна увага була приділена вивченню структури оптичної нейронної мережі та основних принципів її роботи для подальшого глибокого аналізу обчислювального та аналітичного потенціалу цієї технології. Показано, що існуючі моделі ґрунтуються на математичних принципах та алгоритмах, що наслідують процеси обробки інформації та функції біологічних нервових клітин. Ці моделі спрямовані на збереження біологічного реалізму, враховуючи кілька ключових аспектів обробки інформації однією нейронною одиницею, при цьому дотримуючись низької обчислювальної складності.

Після виділення переваг та недоліків застосування оптичних нейронних мереж, можна сказати, що технологія має величезний потенціал для розвитку в багатьох галузях інформаційних систем, оскільки з подальшим її розвитком будуть усунені основні недоліки, такі, як висока вартість реалізації та складний процес інтеграції з існуючими рішеннями.

Описано оптичні компоненти та їх функціонал. Зроблено висновок, що для подальшого розвитку технології оптичних нейронних мереж необхідно надавати основну увагу дослідженню та удосконаленню оптичних компонентів і розробці нових елементів. Це сприятиме спрощенню та зниженню вартості широкомасштабного впровадження оптичних нейронних систем.

Заключним етапом роботи став огляд однієї з найбільш простих та вдалих існуючих оптичних систем - була показана та пояснена структура роботи волоконно-оптичної технології мультиплексування з поділом по довжині хвилі. Розглядався фотонний сигмоїдний блок активації на базі експериментального стенду інтерферометра SOA-MZI, а також поведінка сигналів, що подаються на входи цього пристрою та обробляються його підсилювачами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. X. Lin, R. Yair, Y. N. T., V. Muhammed, L. Yi, J. Mona, and O. Aydogan, “All-optical machine learning using diffractive deep neural networks,” *Science*, 2018, c. 1004 – 1008.
2. Y. Li, D. Liu, H. Li, L. Li, Z. Li, and F. Wu, “Learning a Convolutional Neural Network for Image Compact-Resolution,” *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019.
3. R. F. Thompson, “The neurobiology of learning and memory,” *Science*, 1986, c. 944-947.
4. R. E. Uhrig, “Introduction to artificial neural networks,” *IEEE Industrial Electronics*, 1995, c. 33 – 37.
5. M. Li, “Research on optical vector matrix multiplication,” *Computer technology and development*, 2012, c. 198 – 201.
6. Chen and Yansong, “4f-type optical system for matrix multiplication,” *Optical Engineering*, 1993, c. 77 – 79.
7. Tait, A. N., & Nahmias, M. A., “Photonic Reservoir Computing: A Practical Approach for Optical Information Processing,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021.
8. T. Kavanishi, “Electro-optic Modulation for Photonic Networks. Precise and high-speed control of lightwaves,” *Book*, 2022, c. 238.
9. M.L.Calvo, V. Lakshminarayanan, “Optical Waveguides. From Theory to Applied Technologies,” *Book*, 2007, c. 424.
10. C. Rosales-Guzman, A. Forbes, “How to Shape Light with Spatial Light Modulators,” *Book*, 2017.
11. J. Bueno, S. Maktoobi, L. Froehly, I. Fischer, D. Brunner, “Reinforcement learning in a large scale photonic recurrent neural network,” *Optica*, 2018.

- 12.S. Maktoobi, L. Froehly, L. Andreoli, X. Porte, M. Jacquot, L. Larger, D. Brunner, “Diffractive coupling for photonic networks: How big can we go?” *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2020.
- 13.A. N. Tait, J. Chang, B. J. Shastri, M. A. Nahmias, and P. R. Prucnal, “Demonstration of WDM weighted addition for principal component analysis,” *Optical Express* 23, 2015.
- 14.I. Chakraborty, G. Saha, A. Sengupta, and K. Roy, “Toward Fast Neural Computing using All-Photonic Phase Change Spiking Neurons,” *Sci. Reports* 8, 2018, c. 2 – 9.
- 15.M. Spyropoulou, N. Pleros, K. Vyrsoinos, D. Apostolopoulos, M. Bougioukos, D. Petrantonakis, A. Miliou, and H. Avramopoulos, “40 Gb/s NRZ wavelength conversion using a differentially-biased SOA-MZI: Theory and experiment,” *J. Light. Technol.*, 2011, c. 1491 – 1497.
- 16.M. Miscuglio, A. Mehrabian, Z. Hu, S. I. Azzam, J. George, A. V. Kildishev, M. Pelton, and V. J. Sorger, “All-optical nonlinear activation function for photonic neural networks,” *Opt. Mater. Express* 8, 2018, c. 41-49.
- 17.G. Mourgias-alexandris, A. Tsakyridis, T. Alexoudi, K. Vyrsoinos, and N. Pleros, “Optical thresholding device with a sigmoidal transfer function,” *Proceedings Of Photonics in Switching and Computing*, 2018.