

АНАЛОГОВІ ТА ЦИФРОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ

Катерина Новосад¹, Любомир Никируй², Іван Яремій², Сергій Федосов^{1,3}

ANALOG AND DIGITAL OPTICAL RANGE INFORMATION SYSTEMS

Kateryna Novosad¹, Lubomyr Nykyruy², Ivan Yaremiy², Serhii Fedosov^{1,3}

¹Волинський національний університет імені Лесі Українки,
просп. Волі, 13, Луцьк, 43025, Україна

²Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76018, Україна

³Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна

Abstract. *This study examines the latest approaches to the implementation of optical analog and digital systems based on a review of leading scientific articles of recent years. The current state and prospects for the development of analog and digital optical information systems were analyzed, their advantages, limitations and potential for practical applications, in particular, in optical computing, AI, industry and digital modeling, were identified.*

У сучасному світі оптичні технології відіграють ключову роль у забезпеченні високошвидкісного передавання, обробки та зберігання інформації. Інформаційні системи, що працюють в оптичному діапазоні, охоплюють як аналогові, так і цифрові методи обробки сигналів. Завдяки використанню фотонів замість електронів, оптичні системи забезпечують вищу пропускну здатність, енергоефективність та меншу затримку, що особливо важливо для сучасних телекомунікацій, суперкомп'ютерів, штучного інтелекту та систем керування.

У контексті розвитку технологій оптичні системи, що працюють з фотонами замість електронів, відкривають нові можливості для створення енергоефективних, високошвидкісних і адаптивних інформаційних технологій. Особливе значення має розвиток аналогових і цифрових оптичних систем, які формують основу сучасних телекомунікацій, обчислень, сенсорних мереж і систем штучного інтелекту.

Аналогові оптичні системи використовують безперервні зміни амплітуди, фази або частоти світлових хвиль для передавання інформації. Такі системи мають менше кроків обробки сигналів і зазвичай забезпечують нижчу затримку. У 2020 році запропоновано використання глибоких нейронних мереж для розробки багатопарових просторових оптичних диференціаторів [1]. Завдяки використанню машинного навчання вдалося досягти точного моделювання оптичних пристроїв, здатних до аналогових обчислень, таких як операції диференціювання. Це відкриває нові перспективи для створення аналогових процесорів, які працюють із зображеннями, сигналами чи навіть об'ємними даними в реальному часі [2].

Цифрові оптичні системи працюють на основі дискретних станів світлових хвиль, наприклад, двійкових (0 або 1), що дозволяє надійно кодувати, передавати й декодувати інформацію. Такі системи особливо ефективні при інтеграції в цифрову інфраструктуру та комп'ютерні мережі [3]. Цього року було описано використання нейронних мереж для проектування 2-бітного повністю оптичного цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) на основі фотонних кристалів. Для створення 2-бітного оптичного ЦАП використовується фотонно-кристалічна структура з квадратними ґратками 15x21, що складається з кремнієвих стрижнів у повітряному середовищі. Ця структура спеціально розроблена для створення фотонної забороненої зони в режимі ТМ, розташованої в діапазоні довжин хвиль від 1,42 мкм

до 2,14 мкм. Іншими словами, всі довжини хвиль у цьому діапазоні не пройдуть через структуру. Для лазера, який зазвичай використовується у волоконно-оптичних телекомунікаціях, було обрано довжину хвилі 1,55 мкм. Оскільки ця довжина хвилі потрапляє в фотонну заборонену зону, вона не може поширюватися через структуру і тому може бути спрямована через хвилеводи [4].

Оптичні аналого-цифрові (АЦП) та цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі відіграють центральну роль у гібридних системах, де необхідно поєднувати безперервні аналогові сигнали з цифровим представленням інформації. Замість традиційного електронного підходу, оптичні АЦП/ЦАП використовують світлові хвилі для перетворення сигналів, що значно підвищує швидкодію та знижує втрати енергії. У 2003 році була запропонована [5] структура повністю оптичного АЦП, що базується на кільцевому резонаторі з нелінійністю типу Керра. Цей пристрій імітує метод послідовного наближення, де кожен біт кодується в окремому резонансному кільці, що реагує на інтенсивність вхідного сигналу. Такі схеми легко інтегруються в оптичні інтегральні схеми, забезпечуючи надвисоку щільність.

Зі зростанням обсягів оброблюваних даних і популярністю штучного інтелекту, виникає потреба в нових архітектурах, які б поєднували високу швидкість, низьке енергоспоживання та масштабованість. Оптичні обчислення – це один із перспективних напрямів, що може забезпечити прорив у реалізації нейромереж та інших моделей ШІ. Порівняно з електронною реалізацією штучних нейронних мереж, оптична реалізація може підтримувати внутрішні паралельні обчислення зі швидкістю світла з меншими витратами енергії [6]. Спайкові нейронні мережі імітують біологічну поведінку мозку з допомогою світлових імпульсів. Спайкові нейромережі покращують здатність обробляти просторово-часові дані. З одного боку, нейрони в спайковій нейромережі з'єднані лише з сусідніми нейронами та обробляються окремо для покращення здатності обробляти просторову інформацію. З іншого боку, оскільки навчання залежить від інтервалу спайків, інформацію, втрачену у двійковому коді, можна отримати з часової інформації спайку, тим самим збільшуючи здатність обробляти часову інформацію. Факти показали, що спайкові нейрони є кращими обчислювальними одиницями, ніж традиційні штучні нейрони. Однак, через труднощі в навчанні та фізичній реалізації спайкові нейромережі ще не отримали широкого використання.

Було розглянуто основи, сучасні досягнення та перспективи розвитку аналогових цифрових інформаційних систем в оптичному діапазоні. Обидва підходи мають свої переваги та обмеження, однак їхнє поєднання у вигляді гібридних систем відкриває нові горизонти у швидкісній та енергоефективній обробці інформації. Перспективи впровадження таких систем охоплюють не лише науку та промисловість, а й повсякденне життя: автономні транспортні засоби, медична діагностика, розумні міста, віртуальна реальність. Оптичні системи вже сьогодні є компонентом цифрової трансформації, в найближчі роки вони, без сумніву, змінять спосіб, яким людство генерує, передає та обробляє інформацію.

Бібліографія

1. Zhou Y., Chen R., Chen W. [et al.]. Optical analog computing devices designed by deep neural network. *Optics Communications*. 2020. Vol. 458. P. 124674.
2. Yang X., Wang D., Ren H. [et al.]. Optical analog computing for salient object detection in complex scenes via dielectric metasurface. *Physics Letters A*. 2024. Vol. 525. P. 129839.
3. Jafari D., Nurmohammadi T., Asadi M.-J., Abbasian K. All-optical analog-to-digital converter based on Kerr effect in photonic crystal. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 101. P. 138–143.
4. Karami P., Yahya S. I., Chaudhary M.-A. [et al.]. Design of a compact all-optical digital-to-analog converter based on photonic crystals using neural networks. *Results in Optics*. 2025. Vol. 19. P. 100802.
5. Rostami A., Rostami G. Full optical analog to digital (A/D) converter based on Kerr-like nonlinear ring resonator. *Optics Communications*. 2003. Vol. 228, № 1-3. P. 39–48.
6. Wu J., Lin X., Guo Y. [et al.]. Analog Optical Computing for Artificial Intelligence. *Engineering*. 2021. Vol. 10. P. 133–145.