

УДК 519.6

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-19

Новосад К. С.¹, Никируй Л. І.², Яремій І. П.², Федосов С. А.³¹Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна²Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна³Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна**АНАЛОГОВІ І ЦИФРОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ**

У сучасному світі оптичні технології відіграють важливу роль у забезпеченні високошвидкісного передавання, обробки і зберігання інформації. Оптичні аналого-цифрові (АЦП) і 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 швидкість і знижує втрати енергії.

Нелінійні оптичні ефекти дозволяють реалізувати пристрої, здатні реагувати на зміну інтенсивності сигналу, змінювати свою поведінку в реальному часі та виконувати функції логіки, обчислень і фільтрації. Одним з найбільш поширених ефектів є ефект Керра, при якому показник заломлення середовища змінюється пропорційно до інтенсивності світла.

Аналогові оптичні системи, що створені на фотонних кристалах і нелінійних ефектах, демонструють різку швидкість та здатність до обробки сигналів у реальному часі. Водночас цифрові системи забезпечують точність, масштабованість і стійкість до завад, що є критично важливим для складних обчислювальних завдань, телекомунікацій і систем штучного інтелекту. Дослідження з використанням глибокого навчання для проєктування оптичних пристроїв свідчать про новий рівень адаптивності та автоматизації в оптичній інженерії. Перспективи впровадження таких систем охоплюють не лише науку та промисловість, а й повсякденне життя: автономні транспортні засоби, медична діагностика, розумні міста, віртуальна реальність.

Ключові слова: оптична система, АЦП, ЦАП, сигнал, інформація, фотонний кристалах, нелінійний ефект.

Постановка проблеми. У сучасному світі оптичні технології відіграють важливу роль у забезпеченні високошвидкісного передавання, обробки і зберігання інформації. У контексті розвитку технологій оптичні системи, що працюють з фотонами замість електронів, відкривають нові можливості для створення енергоєфективних, 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.

Аналіз останніх досліджень. У дослідженні [1] розглядаються новітні підходи до реалізації оптичних аналогових і цифрових систем на основі огляду провідних наукових статей останніх років. Проведено оцінку сучасного стану та перспектив розвитку аналогових і цифрових оптичних інформаційних систем, також визначено їхні переваги, обмеження та потенціал практичного використання, зокрема, в оптичних обчисленнях, ШІ, промисловості й цифровому моделюванні.

Аналогові системи оптичного діапазону 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 публікації [2] запропоновано використання глибоких нейронних мереж для розробки багатопарових просторових оптичних диференціаторів. 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 й об'ємними даними в реальному часі [3].

Цифрові системи оптичного діапазону працюють на основі дискретних станів світлових хвиль (наприклад, двійкових 0 або 1), що дозволяє надійно кодувати, передавати і декодувати

інформацію. Ці системи особливо ефективні при інтеграції в цифрову інфраструктуру та комп'ютерні мережі [4].

Мета роботи. Вивчити і провести аналіз новітніх підходів до можливостей реалізації оптичних аналогових і цифрових систем, визначити їхні переваги та недоліки, обмеження та потенціал практичного застосування в інформаційних та автоматизованих системах.

Виклад основного матеріалу. У 2025 році було описано [5] 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 15×21 , 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 $1,42 \div 2,14$ 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 [5]. Рисунок 1 відображає результати моделювання, пов'язані із зонною структурою, і підтверджується, що обрана довжина хвилі правильно потрапляє в фотонну заборонену зону, тим самим запобігаючи її проходженню через структуру.

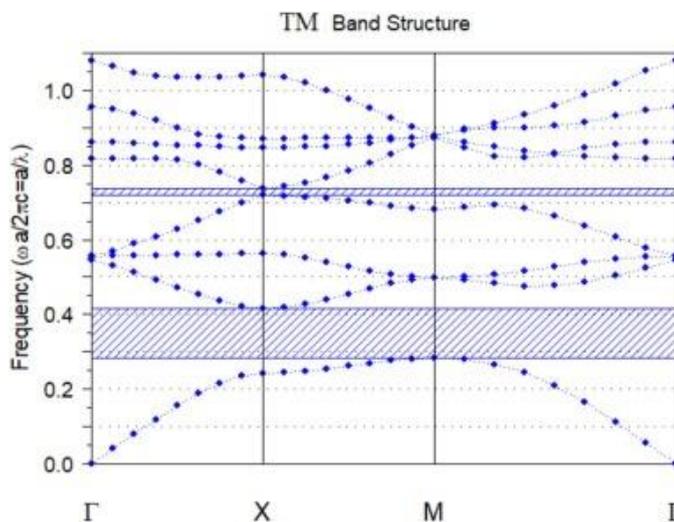


Рисунок 1 – Нормалізована діаграма фотонної забороненої зони

На рисунку 1 зображено нормалізовану діаграму фотонних зон для фотонного кристала в режимі ТМ. Кожна синя точка на графіку представляє фотонну смугу, що відповідає певному хвильовому вектору. Розташування цих смуг вказує на дозволені енергетичні стани. Затінені області на графіку представляють фотонні щілини, які є діапазонами частот, де фотонні стани заборонені. Ці щілини забороненої зони виділяють діапазони частот, які не можуть поширюватися всередині фотонного кристала. Іншими словами, діаграма підкреслює довжини хвиль, які блокуються фотонною смугою та перешкоджають передачі. Результати демонструють високу точність моделювання і значне зменшення габаритів пристрою, що є перспективним напрямом для фотоніки [5].

Оптичні аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі. Оптичні аналого-цифрові (АЦП) і 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 швидкість і знижує втрати енергії.

Оптичні аналого-цифрові перетворювачі	Оптичні цифро-аналогові перетворювачі
перетворює аналоговий світловий сигнал (наприклад, інтенсивність світла) в цифрову форму, представляючи його у вигляді послідовності бітів	виконує обернену операцію – перетворює цифровий код у аналоговий світловий сигнал

У 2003 році запропонована структура повністю оптичного АЦП [6], що базується на кільцевому резонаторі з нелінійністю типу Керра (див. рис. 2). Цей пристрій імітує метод послідовного наближення, де кожен біт кодується в окремому резонансному кільці, що реагує на інтенсивність вхідного сигналу. Ці схеми порівняно легко інтегруються в оптичні інтегральні схеми, забезпечуючи надвисоку щільність.

E_{in_1} – вхідний оптичний сигнал, який подається на верхній горизонтальний хвилевід. K_1 і K_2 – дві області зв'язку, через які оптичний сигнал частково передається в кільцеву резонаторну структуру. **Кільце** – основний елемент резонатора, який виконує резонансне накопичення та інтерференцію сигналів. E_t – переданий сигнал, який проходить через перший хвилевід (вихідний порт). E_r – відбитий сигнал (Reflected Signal), який виходить через другий горизонтальний хвилевід. E_{in_2} – допоміжний вхідний сигнал, який може бути введений через нижній порт (Add Port). E_1, E_1', E_2, E_2' – поля в різних точках схеми. У кільцевому резонаторі, якщо матеріал (наприклад, кремній або нанокристалічний кремній) має нелінійні властивості, то при збільшенні інтенсивності світла в кільці: змінюється ефективна довжина хвилі резонансу, відбувається «оптичне перемикавання» – тобто сигнал при певному рівні інтенсивності починає передаватися через інший порт, резонансна частота зсувається, що дозволяє реалізувати логіку, обробку сигналів або АЦП на основі принципу послідовного наближення.

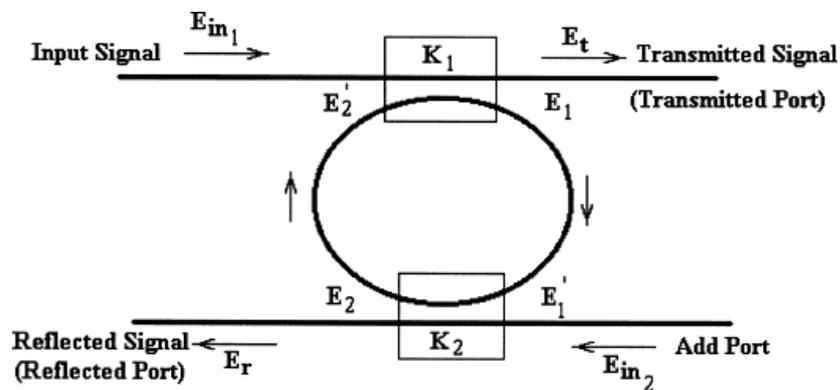


Рисунок 2 – Схема оптичного кільцевого резонатора з двома спряженими хвилеводами

У 2018 році було описано інноваційний підхід до створення 8-розрядного АЦП на основі фотонно-кристалічних кільцевих резонаторів восьмикутної форми (DR-ОСКР). Завдяки використанню фотонних кристалів з нанокристалічного кремнію як нелінійного середовища, вдалося досягти значної мініатюризації та високої енергоефективності [4].

Свою чергою, оптичний ЦАП був експериментально реалізований у 2019 році з використанням багатохвильового мультиплексування. Вхідні цифрові сигнали модулювалися на різних довжинах хвиль і дискретизували з використанням ультракоротких імпульсів. Це дозволило відтворювати аналоговий вихід із високою точністю та швидкістю понад 8 GS/s, що значно перевершує традиційні електронні рішення [7].

Нелінійні ефекти та фотонні кристали в оптичних ІС. Нелінійні оптичні ефекти дозволяють реалізувати пристрої, здатні реагувати на зміну інтенсивності сигналу, змінювати свою поведінку в реальному часі та виконувати функції логіки, обчислень і фільтрації.

Одним з найбільш поширених ефектів є ефект Керра, при якому показник заломлення середовища змінюється пропорційно до інтенсивності світла. Саме цей ефект активно використовується в кільцевих резонаторах, що є основою для багатьох оптичних АЦП. У 2018 році описали повністю оптичний АЦП з фотонного кристала, що функціонує при довжині хвилі 1550 нм – стандартній для телекомунікацій [4].

Фотонні кристали – це багатовимірні структури, що складаються з багаточислових діелектричних матеріалів з періодично низьким і високим індексом перелому. В результаті періодичної структури може бути створена фотонна заборонена зона. Завдяки їхній здатності контролювати поширення світла, фотонні кристали є базою для побудови оптичних логічних елементів, хвилеводів і фільтрів [8]. У 2020 році було запропоновано оптичний АЦП на основі нелінійних фотонно-кристалічних резонаторів, що демонстрував час наростання сигналу близько 1,5 пс, що є надзвичайно швидким результатом [9].

Порівняльний аналіз аналогових і цифрових систем. Аналогові та цифрові інформаційні системи в оптичному діапазоні мають як спільні риси, так і суттєві відмінності, що визначають їхню доцільність у конкретних сферах застосування:

Критерій	Аналогові системи	Цифрові системи
Принцип дії	Передача безперервних змін світлового сигналу: амплітуди, фази або частоти	Використання дискретних станів (0 і 1), імпульсів, модуляції або інтерференції
Точність і надійність	Вразливі до шумів, навіть малі спотворення можуть впливати на точність	Висока завадостійкість завдяки пороговій обробці та здатності до відновлення сигналу
Швидкодія	Надзвичайно швидкі, працюють без затримок у режимі реального часу	Досягають високих швидкостей (до Тбіт/с) у фотонних інтегральних схемах
Гнучкість і масштабованість	Обмежені, складно адаптуються до нових задач	Легко програмуються, масштабуються, сумісні з цифровими мережами і ШІ
Енергоспоживання	Дуже енергоефективні, особливо в обчисленнях без перетворення сигналів	Вищі витрати через необхідність перетворення, але поступово знижуються завдяки фотоніці

Обидва підходи мають свої переваги. Аналогові системи – надзвичайно швидкі й природні для реального середовища, але менш точні. Цифрові – більш надійні та універсальні, але потребують складної обробки сигналів. Саме тому новітні дослідження активно вивчають гібридні системи, які поєднують кращі риси обох підходів. Наприклад:

- аналогова обробка з цифровим керуванням;
- цифрова обробка з аналоговим захопленням сигналу (через оптичні АЦП).

Такі гібриди можуть стати основою майбутніх обчислювальних платформ: швидких, енергоефективних і універсальних.

Перспективи розвитку та застосування. Розвиток оптичних інформаційних систем є одним із ключових напрямів у сфері сучасних технологій. Завдяки своїм унікальним властивостям, оптичні аналогові та цифрові системи вже зараз знаходять застосування у критично важливих галузях.

Оптичні АЦП/ЦАП нового покоління. Завдяки фотонним кристалам та резонаторам з ефектом Керра вже зараз створюються надшвидкі аналого-цифрові перетворювачі. Майбутні версії зможуть:

- працювати на швидкостях до 10 Тбіт/с;
- бути інтегрованими у мікрочипи для смартфонів, лазерних радарів, медичних приладів;
- забезпечувати точну та швидку передачу сигналів у реальному часі.

Нові матеріали і метаструктури. Діелектричні метаповерхні, фотонні кристали з топологічним захистом і наноструктури дозволять створювати компактні й адаптивні оптичні пристрої. Їх можна буде налаштовувати під конкретні задачі без механічного втручання – лише зміною інтенсивності чи частоти світла.

Висновки. Аналогові оптичні системи, зокрема ті, що сформовані на фотонних кристалах і нелінійних ефектах, демонструють різочу швидкодію та здатність до обробки сигналів у реальному часі. Водночас цифрові системи забезпечують точність, масштабованість і стійкість до завад, що є критично важливим для складних обчислювальних завдань, телекомунікацій і систем штучного інтелекту. Дослідження з використанням глибокого навчання для проектування оптичних пристроїв свідчать про новий рівень адаптивності та автоматизації в оптичній інженерії. 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, і в найближчі роки вони, без сумніву, змінять спосіб, яким людство генерує, передає та обробляє інформацію.

Інформаційні джерела

1. Новосад К., Никируй Л., Яремій І., Федосов С. Аналогові та цифрові інформаційні системи оптичного діапазону. *Problems of Computer Science, Software Modeling and Security of*

Digital Systems : Proc. II Inter. Sci. Pract. Conf., June 09–11, 2025, Lutsk–Svityaz', Ukraine. Lutsk : Lesya Ukrainka Volyn Nat. Univ., 2025. P. 229-230.
<https://apcssm.vnu.edu.ua/index.php/conf/article/view/266>

2. Zhou Y., Chen R., Chen W. [et al.]. Optical analog computing devices designed by deep neural network. *Optics Communications*. 2020. Vol. 458. P. 124674.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124674>

3. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129839>

4. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.007>

5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100802>

6. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2003.09.085>

7. Zhang T., Qiu Q., Su J., Fan Z., Xu M. Optical assisted digital-to-analog conversion using dispersion-based wavelength multiplexing. *Optics Communications*. 2019. Vol. 432. P. 44-48.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.09.025>

8. Khosroabadi S., Shokouhmand A., Marjani S. Full optical 2-bit analog to digital convertor based on nonlinear material and ring resonators in photonic crystal structure. *Optik*. 2020. Vol. 200. P. 163393. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163393>

9. Geng X., Zhao L. All-optical analog to digital converter based on nonlinear photonic crystal ring resonators. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*. 2020. Vol. 41. P. 100817. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2020.100817>

Novosad K.¹, Nykyruy L.², Yaremiy I.², Fedosov S.³

¹Lesia Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine

²Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

³Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

ANALOG AND DIGITAL OPTICAL RANGE INFORMATION SYSTEMS

In today's world, optical technologies play an important role in enabling high-speed transmission, processing, and storage of information. Optical analog-to-digital (ADC) and digital-to-analog (DAC) converters play a central role in hybrid systems that combine continuous analog signals with digital representation of information. Instead of the traditional electronic approach, optical ADCs/DACs use light waves to convert signals, which significantly increases speed and reduces energy loss. Nonlinear optical effects allow the implementation of devices that can respond to changes in signal intensity, change their behavior in real time, and perform logic, calculation, and filtering functions. One of the most common effects is the Kerr effect, in which the refractive index of a medium changes proportionally to the intensity of light. Analog optical systems based on photonic crystals and nonlinear effects demonstrate impressive speed and the ability to process signals in real time. At the same time, digital systems provide accuracy, scalability and immunity to interference, which is critically important for complex computing tasks, telecommunications and artificial intelligence systems. Research using deep learning to design optical devices indicates a new level of adaptability and automation in optical engineering. The prospects for the implementation of such systems cover not only science and industry, but also everyday life: autonomous vehicles, medical diagnostics, smart cities, virtual reality.

Keywords: optical system, ADC, DAC, signal, information, photonic crystal, nonlinear effect.

Дата першого надходження
статті до видання
04.10.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
05.10.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.