

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

ДЕРЖИПОЛЬСЬКИЙ АНДРІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ

УДК 535.42

**КОРЕЛЯЦІЙНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ ПОЛІВ ТА
ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ В САМОАСОЦІАТИВНІЙ СХЕМІ
ФУР'Є-ГОЛОГРАФІЇ**

01.04.05 – оптика, лазерна фізика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики НАН України

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук
Гнатовський Олександр Володимирович,
Інститут фізики НАН України
старший науковий співробітник

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
професор кафедри кореляційної оптики
Мохунь Ігор Іванович,
Інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету імені
Юрія Федьковича

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Лимаренко Руслан Анатолійович,
Міжнародний центр "Інститут прикладної
оптики" НАН України
вчений секретар

Захист відбудеться "04" березня 2021 року о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.159.01 при Інституті фізики НАН України за адресою: 03028, Київ, проспект Науки, 46.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту фізики НАН України

Автореферат розіслано "___" _____ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Чумак О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Новітній розвиток ідей і принципів голографії, які базуються на добре розвиненому описовому математичному апараті і можливості ефективної алгоритмізації процесів, виносить її за межі класичних оптичних схем. Такий підхід дозволяє перевести оптичну голографію в площину базових цифрових схем, які використовуються в сучасних системах обробки і шифрування даних, розпізнавання образів та зберігання інформації з можливістю асоціативного пошуку.

З іншого боку, попри стрімкий розвиток електроніки і алгоритмічної обробки інформації, зберігається стійкий інтерес і до реальних голографічних методів та схем. Це зумовлено миттєвою швидкістю і паралельною обробкою багатовимірних масивів даних в оптичних голографічних схемах у поєднанні з можливістю роботи з первинною (неоцифрованою) інформацією. Останній пункт є особливо важливим в задачах безпеки і захисту інформації, адже в оцифрованому вигляді дані стають найбільш вразливими.

Окремий аспект актуальності теми стосується голографічного формування складних розподілів енергії випромінювання в певному полі зору чи на мішені. Зокрема - це задачі оптичного пінцету і лазерної обробки матеріалів. Особливого значення ці методи набувають з огляду на розвиток технологій виготовлення просторових модуляторів світла (SLM – spatial light modulator), застосування яких додає голографічним методам безпрецедентної гнучкості і динамічності.

Всі згадані явища і процеси безпосередньо стосуються перетворення змінних світлових полів і кореляційної обробки інформації в голографічних схемах і таким чином об'єднуються темою даної роботи. А всебічне дослідження схем голографії і відповідних оптичних процесів відкриває нові можливості та підходи для створення сучасних систем захисту та зберігання інформації, зокрема формування і стабілізації складних розподілів оптичної енергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась у відділі лазерної спектроскопії Інституту фізики НАН України в межах наукових тем: ВЦ139/24 «Електронні, оптичні, нелінійно – оптичні і магнітні властивості актуальних матеріалів, електронної техніки та процесів взаємодії з ними лазерного випромінювання», 2007-2011рр., № держреєстрації 0107U002664; 1.4.1.В/137 «Фізика джерел високомонохроматичних лазерних полів та резонансної взаємодії лазерного світла з речовиною у різному агрегатному стані, біологічними структурами», 2007-2011рр., № держреєстрації 0107U002348; 3.5.1.24/10-Н24 «Розвиток нових методів діагностики наноматеріалів і наноструктур з використанням стаціонарних та імпульсних лазерних полів», 2010-2014рр., № держреєстрації 0110U006227; П/5-07-24

«Розробка та виготовлення лазерного мікроманіпулятора малими твердотільними частинками («лазерний пінцет»)), 2007 – 2008рр., № держреєстрації 0105U007772; №25/15-Н «Розвиток методичної бази та дослідження швидкоплинних процесів у наноструктурованих матеріалах для швидкодіючої оптоелектроніки», 2015-2019рр, № держ. реєст. 0114U005348; 1.4.В/185. «Розвиток фізичних основ лазерів з керованими параметрами та дослідження квантових і когерентних явищ при взаємодії їх випромінювання з речовиною у різному агрегатному стані», 2017-2021рр., № держ. реєст. 0117U002611; 1.4.ВЦ/188. «Фундаментальні процеси, що визначають властивості новітніх фізичних об'єктів та матеріалів для електроніки, оптоелектроніки, фотоніки та спінтроніки», 2017-2021рр., № держ. реєст. 0117U002612.

Мета роботи: дослідити взаємодії та перетворення світлових полів у кореляційних голографічних системах; розробити нові оптичні методи застосування таких систем в задачах зберігання, передачі та захисту інформації, а також для стабілізації просторового розподілу інтенсивності випромінювання.

Відповідно до поставленої мети сформульовані такі задачі:

1. дослідити роботу самоасоціативної схеми фур'є-голографії в режимі асоціативного відновлення зображення, визначити та проаналізувати фактори, що впливають на структуру та якість вихідного зображення;
2. сформулювати та проаналізувати концепцію оптичного шифрування на базі самоасоціативної схеми фур'є-голографії;
3. дослідити властивості віртуально-оптичного (ВО) варіанту самоасоціативної схеми, розглянути можливість узагальнення ВО-схеми із заміною перетворення Фур'є на перетворення Уолша-Адамара, провести порівняльний аналіз двох варіантів ВО-схеми;
4. обґрунтувати використання самоасоціативної схеми для стабілізації просторового розподілу інтенсивності, проаналізувати роль фазового дифузора для стабілізації, розробити метод зменшення спекл-шуму при використанні фазового дифузора;
5. розробити методику синтезу дифракційних оптичних елементів для задач стабілізації розподілу інтенсивності.

Об'єкт дослідження. Самоасоціативна схема фур'є-голографії з однаковими предметним і опорним пучками.

Предмет дослідження. Процеси кореляційної обробки інформації, взаємодія змінних світлових полів, перетворення когерентних пучків та зв'язок їх вхідних і вихідних характеристик при записі/зчитуванні голограм.

Методи дослідження. Теоретичні та експериментальні методи фур'є-оптики та фур'є-голографії; математичне та комп'ютерне моделювання; розрахунок синтезованих фур'є-голограм та дифракційних оптичних елементів; дискретні інтегральні перетворення і матричні обчислення.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Вперше побудовано узагальнений опис схеми фур'є-голографії з довільними опорним, предметним і відновлюючим джерелами, а також відновленням у будь-якому порядку дифракції.
- Запропоновано оригінальну самоасоціативну схему фур'є-голографії з однаковими предметним та опорним пучками. Досліджено її властивості як системи асоціативної пам'яті.
- Сформульовано та досліджено нову концепцію оптичного шифрування з асоціативним ключем, яка має ряд нових принципових властивостей, що раніше не розглядались.
- Вперше розглянуто віртуально-оптичну версію системи шифрування із заміною ядра шифрування на перетворення Волша-Адамара. Показано переваги такого підходу.
- На базі модифікованої самоасоціативної схеми фур'є-голографії запропоновано новий кореляційний метод формування заданого розподілу світлової енергії із застосуванням синтезованого дифракційного оптичного елемента.
- Вперше розглянуто проблему стійкості сформованого розподілу поля до аберацій в системі і запропоновані можливі шляхи її вирішення.
- Досліджено роль фазового дифузора у стабілізації розподілу світлової енергії, сформованого синтезованим дифракційним оптичним елементом. Запропоновано оригінальну методику зменшення спекл-шуму у сформованому розподілі.
- Вперше розглянуто ряд важливих теоретичних і практичних питань розрахунку синтезованих фур'є-голограм і дифракційних оптичних елементів. Розроблено оригінальні методи оптимізації основних типів дифракційних оптичних елементів, а саме: амплітудних, фазових і бінарних.

Практичне значення одержаних результатів.

Запропонована та досліджена самоасоціативна схема Фур'є - голографії відкриває можливість зручного та ефективного керування оптичними полями, забезпечуючи спостереження відновленого зображення в потрібних дифракційних порядках, істотно зменшуючи вимоги до вигляду реєструючої функції середовища, а також відкриває нові можливості оперувати масивами оптичної інформації шляхом моделювання в межах суто голографічного підходу.

Застосування самоасоціативної схеми для оптичного шифрування дозволяє створити новий спосіб кодування зображення, який, використовуючи особливості роботи схеми, забезпечує значну стійкість захисту інформації і створює зручний та швидкий алгоритм пошуку інформації у великих масивах даних.

Метод асоціативного відновлення зображень як стабілізації або ж корекції контрольованого пучка в запропонованій у роботі схемі дає можливість створити універсальну когерентно-оптичну схему формування

заданого розподілу енергії випромінювання на оптичній мішені незалежно від наявних амплітудно-фазових спотворень в лазерному пучку.

Особистий внесок здобувача.

Результати дисертації опубліковано в статтях і в тезах міжнародних конференцій [1*, 2*, 3*, 4*, 5*, 6*, 7*, 8*, 9*, 10*, 11*].

В роботах [1* – 11*] дисертант брав участь в постановці задачі, виборі методів її розв’язання. Ним зроблені аналітичні розрахунки, одержані основні формули та основні експериментальні результати.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати роботи доповідались на наукових конференціях: The 6th Young Sci. Conf. Optics and High Technology Material Science (SPO), (23-26 October 2006, Kiev, Ukraine); International school and conference on optics and optical materials (3-7 September 2007, Belgrade, Serbia,); The 8 International Conference “Correlation Optics” (11-14) September, 2007, Chernivtsi, Ukraine); Ukrainian-German Symposium on physics and chemistry of nanostructures and on nanobiotechnology. (06-10 September 2010 Berezove, Crimea, Ukraine); The Twelfth International Conference on Correlation Optics (14-18 September, 2015, Chernivtsi, Ukraine); IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), (12-15 September 2016 Odesa, Ukraine); The Thirteenth International Conference on Correlation (11-15 September 2017 Chernivtsi, Ukraine); 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), (06-08 September 2019 Sozopol, Bulgaria); Підсумкова наукова конференція ІФ НАН України 2019

Публікації.

За матеріалами дисертації опубліковано 6 статей у фахових виданнях, 4 статті в журналах SPIE та IEEE та 1 публікація в книзі абстрактів на міжнародній конференції.

Структура дисертації.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури та додатку. Роботу викладено на 137 сторінках друкованого тексту, вона містить 2 таблиці і 56 рисунків. Бібліографія складає 132 джерела.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та визначено її наукову новизну.

В **першому розділі** відповідно до поставленої мети роботи було проведено огляд процесів перетворення світлових полів і кореляційної обробки даних в схемах фур’є-голографії в трьох основних напрямках: 1) асоціативне відновлення зображень; 2) оптичне шифрування; та 3) формування заданого розподілу поля/зображення в певній області чи на мішені.

У рамках першого напрямку, в оглядовому розділі роботи, розглядалися відомі голографічні кореляційні схеми, які демонструють всі можливі перетворення та аналізують процеси, які відбуваються із сигналом від входу до виходу на стадіях запису і відновлення. В цих роботах показано можливість отримання фантомного зображення [1-4], а також проаналізовано використання схем з асоціативним відгуком. Серед останніх переважають схеми зі складним опорним джерелом [5-8], які є потенційно багатшими на різні явища. Особливо цікавою в цьому відношенні є фур'є-голографія, оскільки її використання дає можливість легко побудувати математичну теорію, а отримані результати прості в інтерпретації.

На другому етапі огляду літератури приведені відомі алгоритми обробки та шифрування зображення, розглядаються їх базові властивості, переваги та недоліки [9-11]. Аналізується випадок, коли оптична схема може слугувати тільки для наочного пояснення роботи алгоритму, і існує лише як математична модель для опису всіх процесів, що відбуваються. В такому разі йдеться про реалізацію задачі в домені віртуальної оптики [12-14].

На останньому етапі розглядаються новітні досягнення щодо стабілізації зображення як ключової задачі для отримання заданого розподілу енергії на технологічній мішені. Важливою реалізацією в цій області стали роботи, в яких показана можливість формувати необхідне поле для маніпуляції з наночастинками – тобто для роботи оптичного пінцета [15-17].

Огляд представлених робіт продемонстрував наявні на сьогодні основні проблеми напрямку, які потребують вирішення. Підкреслено важливість та актуальність досліджень дисертаційної роботи, показано коректність поставлених задач.

У **другому розділі** досліджуються та описуються властивості узагальненої схеми фур'є-голографії. Такий опис дозволяє отримати і проаналізувати нову самоасоціативну схему з однаковим опорним та предметним джерелом. Для цього розглядається узагальнена схема фур'є-голограми з нелінійною реєстрацією (Рис.1)

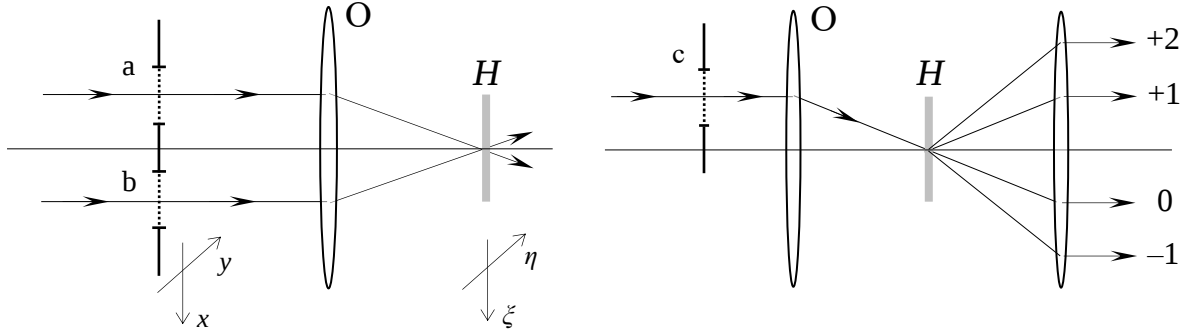


Рис.1. Узагальнена схема фур'є-голографії: запис та відновлення

У вхідній площині, де розташовано транспаранти a та b , оптичне поле задається у вигляді $a(x-\Delta, y) + b(x+\Delta, y)$, де a та b – просторові функції амплітудного пропускання відповідних транспарантів (комплексні за наявності фазової модуляції). Функція пропускання запишеться як:

$$t = \sum_{k=0}^{\infty} (\nu_k A^k B^{*k} e^{2k+} + \nu_{-k} A^{*k} B^k e^{2k-}) \quad (1)$$

При освітленні такої голограми за допомогою довільного транспаранта $c(x-\Delta, y)$ (Рис.1), безпосередньо за голограмою, отримаємо відновлене оптичне поле R :

$$\begin{aligned} R = Ce^+ t &= \sum_{k=0}^{\infty} (\nu_k CA^k B^{*k} e^{(2k+1)+} + \nu_{-k} CA^{*k} B^k e^{(2k-1)-}) = \begin{vmatrix} CA^k B^{*k} = R_{-k} \\ CA^{*k} B^k = R_{+k} \end{vmatrix} = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} (\nu_{+k} R_{-k} e^{(2k+1)+} + \nu_{-k} R_{+k} e^{(2k-1)-}) \end{aligned} \quad (2)$$

Тут і далі для скорочення записів використовуються позначення $e^{n\pm} = \exp(\pm i n \frac{2\pi\Delta}{\lambda f} \xi)$, де Δ – зміщення транспаранта від оптичної осі у вхідній площині фур'є-об'єктива з фокусною відстанню f при освітленні світлом з довжиною хвилі λ , а ξ – координата в площині голограми; $F\{\bullet\}$ – оператор перетворення Фур'є, $A=F\{a\}$, $B=F\{b\}$, $C=F\{c\}$. Отриманий вираз є загальним для всіх випадків тонких голограм, оскільки конкретний вигляд нелінійності задає лише конкретні значення коефіцієнтів $\nu_{\pm k}$.

Результат відновлення фур'є-голограми спостерігаємо у фокусній площині другого фур'є-об'єктива, розташованого за голограмою:

$$r = F^{-1}\{R\} = \sum_k (\nu_{+k} r_{-k} + \nu_{-k} r_{+k}), \quad r_{\pm k} = F^{-1}\{R_{\pm k}\} \quad (3)$$

Розглянемо схему у якій опорне і предметне зображення будуть однаковими ($b=a$); тоді зображення a є асоціативно зв'язаним лише саме з собою і у випадку збігу відновлюючого зображення із записаним, утвориться відгук у вигляді такого ж зображення в $+1$ та в -1 дифракційних

порядках (розглянемо лиш +1 порядок, оскільки -1 буде таким же): $b = a$, $c = a_p$

$$r_{+1} = F^{-1}\{A^* A_p A\} = (a_p \otimes a) * a \equiv (a \otimes a) * a_p \quad (4)$$

$$(a_p \otimes a) * a \sim a; (a \otimes a) * a_p \sim a_p \quad (5)$$

Внаслідок кореляції відновлюється одночасно і ціле зображення і частина зображення, що використовується при відновленні. Відгук формується подібно до фантомного зображення, тобто накладені більш яскрава відновлююча частина зображення і менш яскраве ціле зображення.

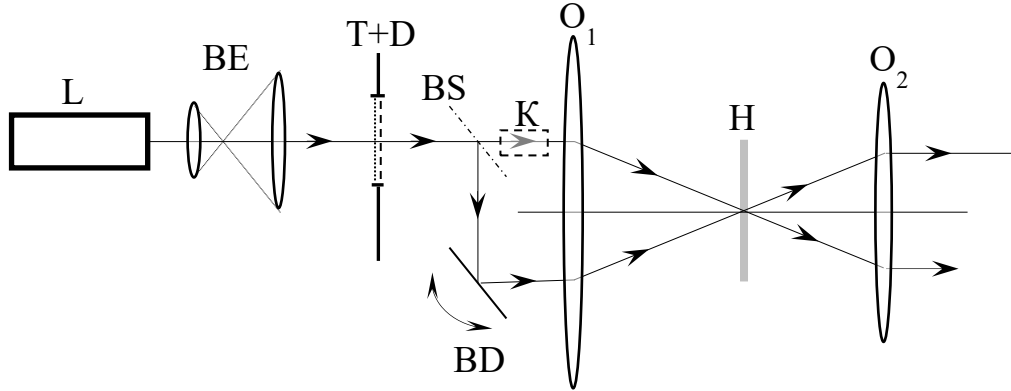


Рис.2 Самоасоціативна схема фур'є-голографії з однаковими предметним і опорним пучками (запис та відновлення).

L – лазер, BE – телескоп; T+D – транспарант зображення, спряжений з фазовим дифузором; BS – світлоподільник; BD – поворотне дзеркало; K – компенсатор оптичної різниці ходу; O1, O2 – фур'є-об'єктиви; H – голограма;

Експериментально така схема (Рис.2) реалізується отриманням двох ідентичних пучків з одного поділом його на два (по амплітуді). Схема вимагає юстування за допомогою поворотного дзеркала BD для точного зведення пучків у площині голограми Н. Юстування схеми визначає, яке саме зображення має відновитися – асоціативне чи фантомне. Для аналізу цього явища досліджуються умови фокусування нашої схеми. Тож перепишемо вираз (4) в такому вигляді:

$$r_{+1} = m a_s + N_{a_s} = n a_p + N_{a_p} \Rightarrow r_{+1} = m a_s + n a_p + N \quad (6)$$

$$m \sim \int |b|^2 dx dy = \langle b \rangle^2; n \sim \int |a|^2 e^{-i(xs_x + ys_y)} dx dy = F_{\vec{s}}\{|a|^2\} \quad (7)$$

де m – середня інтенсивність зображення відновлюючого дифузора, а n – Фур'є образ інтенсивності зображення в точці юстування. N – шум, який загалом впливає на якість зображення, проте, в контексті визначення фантомного чи асоціативного зображення, він не вносить змін. n та m – це коефіцієнти, які визначають структуру відновленого зображення, а саме співвідношення n/m дозволяє визначити можливість отримати при відновленні голограми фантомне зображення чи асоціативне.

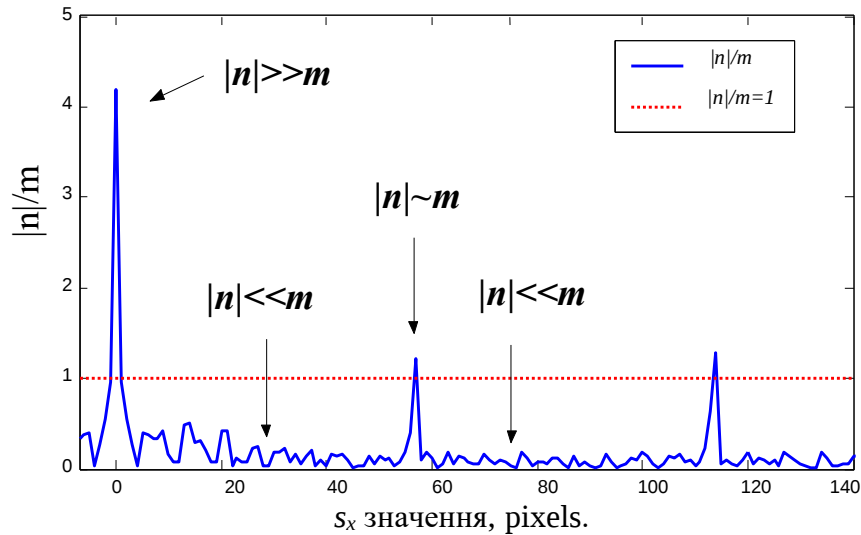


Рис.3 Графік залежності відношення коефіцієнтів $|n|/m$ від зсуву S_x ($S_y=0$).

На Рис.3 представлений графік залежності співвідношення $|n|/m$ від значень вектора зсуву. Цей графік розрахований для спеціального зображення, Рис. 4а. Таке зображення має містити періодичні компоненти (тобто фур'є-спектр енергетичного пропускання транспаранта), побічні максимуми (крім центрального) та інформаційну складову зображення, не пов'язаної з періодичністю в його структурі.

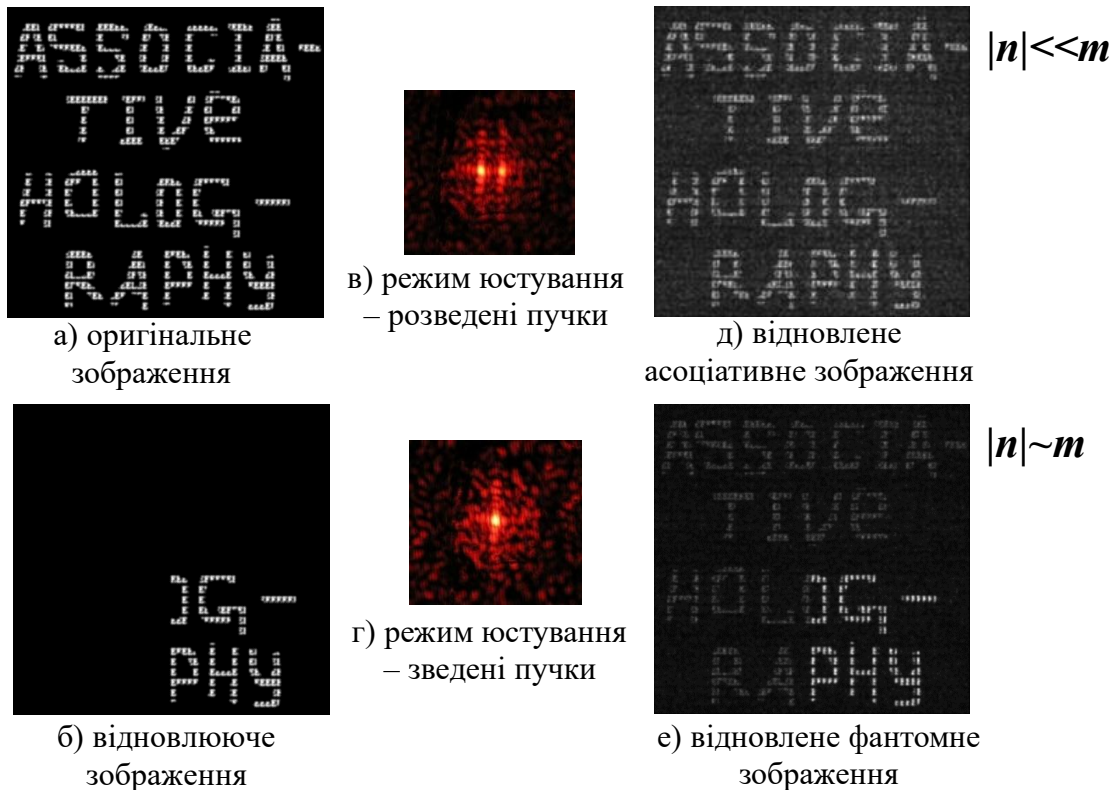


Рис.4. Експериментальні результати роботи самоасоціативної схеми за різних режимів юстування

З Рис.3 отримуємо три умови, що описують роботу схеми. При першій - $|n| \gg m$ - відновлюється лише фантомне зображення, при другій - $|n| \sim m$ - при відновленні маємо зображення з неповною фантомністю і неповною асоціативністю, при третій - $|n| \ll m$ - відновлюється тільки асоціативне зображення. Останні два режими роботи схеми в залежності від умов юстування наведені на Рис.4. Бачимо, що асоціативне зображення Рис.4.д спостерігається при відновленні голограми за наявності зсуву (Рис.4.в) між опорним та предметним пучком при записі голограми. Фантомне відновлення спостерігаємо (Рис.4.е) у випадку ретельно з'юстованих опорного та предметного пучків (Рис.4.г).

Якість відновленого зображення (тобто середній контраст картини) визначається загальним виразом:

$$\bar{V} = \frac{\bar{I}_{\max} - \bar{I}_{\min}}{\bar{I}_{\max} + \bar{I}_{\min}} \quad (8)$$

де $I_{\max}$ та $I_{\min}$ – відповідні середні значення інтенсивностей яскравих та темних ділянок зображення. Формула (8) визначається двома параметрами: розміром (відносною площею) частини зображення на етапі відновлення та щільністю оригінального зображення (середньою інтенсивністю зображення).

Застосувавши певні обмеження: зображення бінарне (тільки два значення інтенсивності 1 і 0); зображення квазіоднорідне (середні інтенсивності різних довільних ділянок приблизно однакові); зображення (з дифузоров) має δ -подібну автокореляційну функцію, запишемо напівемпіричну формулу:

$$\bar{V} = \frac{p + \alpha\sigma}{p + \beta\sigma} \quad (9)$$

де σ – середня інтенсивність (щільність зображення); p – розмір (відносна площа) фрагмента при відновленні; α , β – емпіричні коефіцієнти, які знаходимо мінімізуючи середньоквадратичну похибку визначення контрасту при порівнянні з результатами моделювання. Вираз (9) не відображає особливостей конкретного зображення, а лише щільність його заповнення (мірою якої є середнє значення інтенсивності σ) та загальні закономірності асоціативного відновлення зображень у схемі фур'є-голографії з однаковим предметним і опорним пучками.

З Рис.5 видно, що зображення з меншим заповненням (меншою середньою інтенсивністю) мають більший контраст. Це пов'язано з тим, що середній рівень сигналу визначається тільки в області його існування, а середній рівень шуму, залежить від середнього рівня сигналу по всій площі зображення. Отже, при меншому заповненні зображення зменшується середнє значення шуму при незмінному середньому рівні сигналу і тому контраст зростає.

Додатково проаналізовано співвідношення сигнал/шум і отримано наступний вираз:

$$SNR = 2(p/\sigma + 0,21) \quad (10)$$

З виразу (10) видно, що співвідношення сигнал/шум очікувано зменшується зі зменшенням розміру фрагмента при відновленні p та зі збільшенням щільності зображення σ .

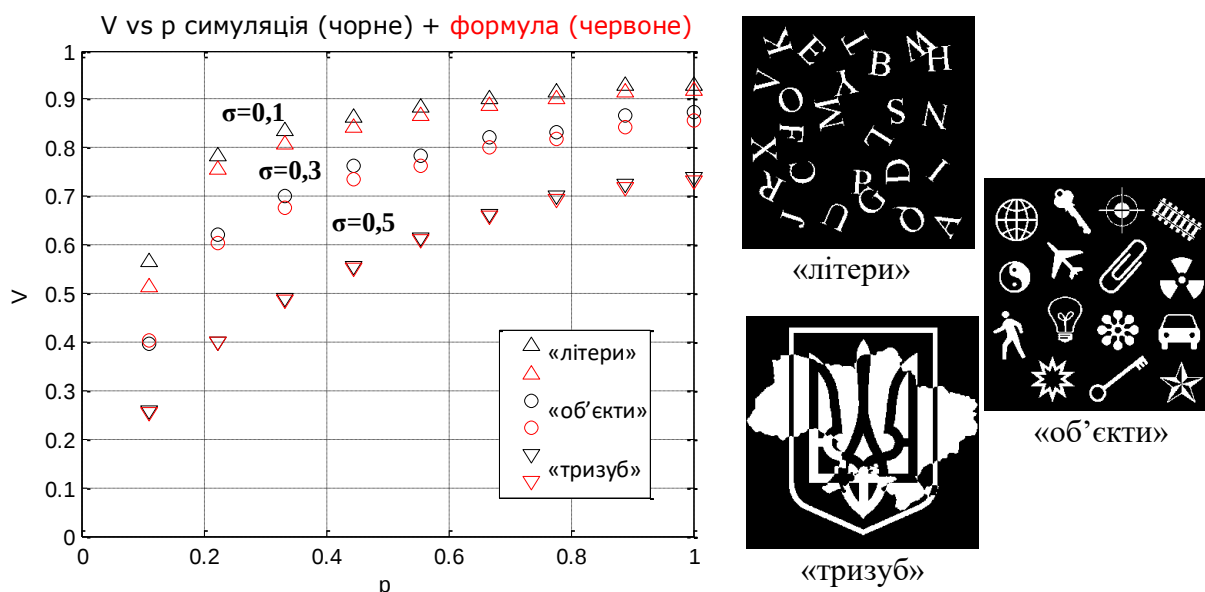


Рис. 5. Залежність контрасту у відновленому зображенні від площі відновлюючого зображення і середньої інтенсивності.

У третьому розділі розглядається застосування самоасоціативної схеми фур'є-голографії в оптичному шифруванні. Оптичне шифрування – це перетворення зображення (чи будь-якої інформації, представленої у вигляді зображення) на шумоподібну форму шляхом маніпуляцій з амплітудою, фазою, поляризацією світла та його проходженням через оптичну систему. Використання самоасоціативної схеми в алгоритмах шифрування зумовлене пошуком нових схем, які забезпечують кращі результати при шифруванні та високу стійкість шифрувальної системи.

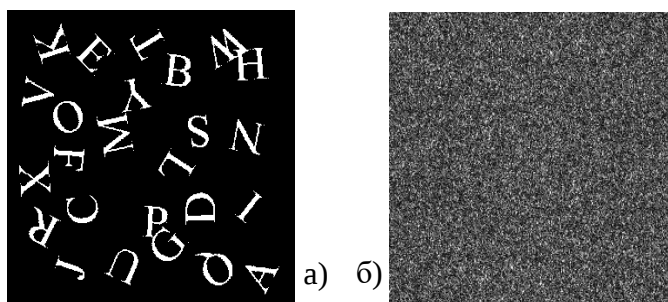


Рис.6. Ілюстрація алгоритму шифрування
а) оригінальне зображення, б) зашифроване зображення

Тож для шифрування первинного інформативного сигнал (Рис.6а) в шумоподібний (Рис.6б) за самоасоціативною схемою (Рис.2) виконуються певні оптичні операції, що в схемі (Рис.2) відповідають процесу запису голограми. Наприклад, відбувається спряження інформативного транспаранта

Т з випадковим дифуззором D, завдяки світлоподільнику BS сигнал ділиться навпіл, а перший фур'є-об'єктив отримані сигнали фокусує в площині голограми Н, де вже формується шумоподібний транспарант (зашифрований результат), який відповідно до (Рис.2) є голограмою Н.

Щоб відновити оригінальний сигнал із шумоподібного, використовується алгоритм дешифрування. Схеми (Рис.2) демонструє

процес відновлення голограми Н. Зашифрований результат (голограма Н (Рис.2)) освітлюється пучком світла, який пройшов через ключ дешифрування - транспарант спряжений з дифузоре, що містить частину первинної інформації (частина транспаранту Т). Результатом дешифрування (Рис. 7в) є відновлене світлове поле, яке фіксується в площині другого фур'є-об'єктива в +1 порядку дифракції.

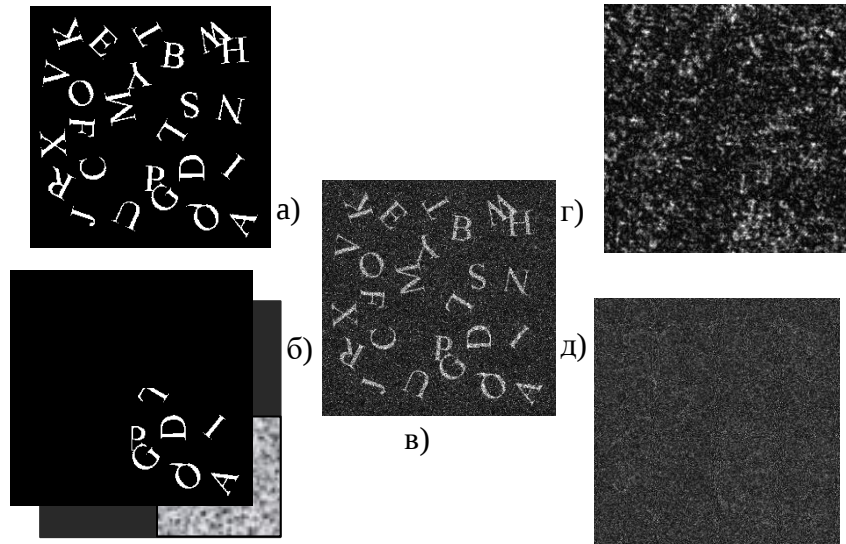


Рис.7. Ілюстрація роботи самоасоціативної схеми з різними ключами.

- а) оригінальне зображення; б) цілий ключ (амплітудна і фазова частини); в) дешифроване зображення цілим ключем
г) дешифроване зображення лише за фазовою частиною ключа;
д) дешифроване зображення лише з амплітудної частини ключа.

У відновлене зображення входить комплексна амплітуда пучка, яка використовується при дешифруванні інформації і описується виразом:

$$b = |b|e^{-i\varphi_d} \quad (11)$$

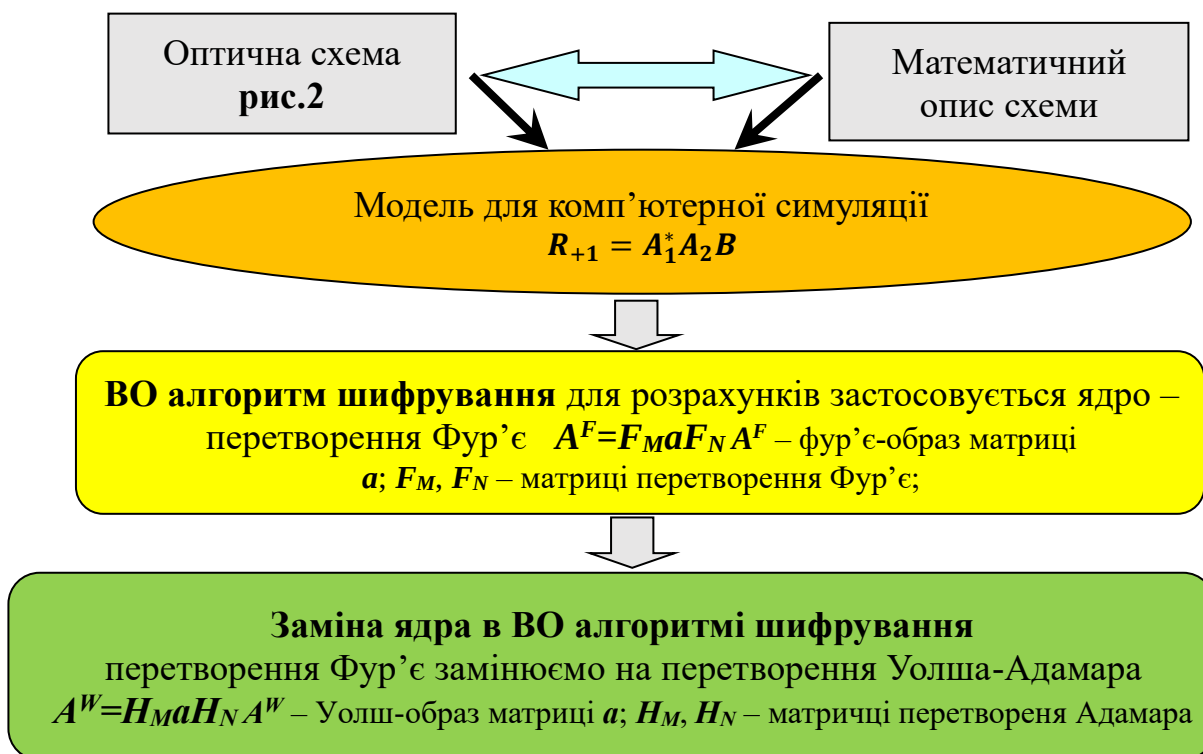
де $|b|$ – амплітудна компонента, яка є носієм інформації про первинне зображення, а φ_d – позначає фазову шумову компоненту, яку створює випадковий фазовий модулятор. Така двокомпонентність ключа забезпечує вищу стійкість системи дешифрування, оскільки за відсутності хоча б одної з частин ключа (фазової чи амплітудної) дешифрування не відбудеться. На Рис. 7 можемо спостерігати результат дешифрування при неповному ключі - неуспішний (7г,д), та при повному ключі – успішний (7в).

Для дешифрування можна використати будь-яку частину зображення різних розмірів. Важливо, щоб це була частина саме первинного зображення, спряжена з відповідною частиною дифузора. Такий підхід дозволяє говорити про стійкість системи до пошкодження ключа. Адже якщо частину ключа буде втрачено, то непошкодженій частини все ще може бути достатньо для успішного дешифрування. І чим більший ключ, тим більш стійкий він до пошкоджень. Вирази (8) та (9) для опису якості відновленого зображення від розміру ключа показують, що можна використовувати ключ із заданою стійкістю до пошкоджень. Аналіз випадку

гарантованого дешифрування з необхідним рівнем контрасту V_{min} та мінімальним розміром ключа p_{min} дозволяє отримати параметр надлишковості ключа $R(V_{min})$ (redundancy). Він показує у відсотках кількість надлишкової інформації в ключі, втрата якої не є критичною для роботи схеми.

Аналізується особливість самоасоціативної схеми, яка дозволяє отримувати асоціативне або ж фантомне відновлення зображення в залежності від умов юстування схеми (Рис.2), тобто на етапі шифрування інформації. Якщо перевести це на терміни оптичного шифрування, то спостереження фантомного зображення відповідає випадку, коли при дешифруванні у відновленому зображенні можна спостерігати підсвічений ключ дешифрування, а при асоціативному відновленні маємо рівномірне засвічення всього первинного зображення. Отже, частина первинної інформації є і ключем для дешифрування, і міткою, по якій можна проводити асоціативний пошук у масиві даних.

Використання оптичних схем шифрування не потребує переходу від моделювання до реального експерименту, а для їх опису використовується зручний математичний апарат. Тут працює концепція віртуальної оптики (ВО) [15,16]. Цей термін означає впровадження алгоритмів обробки, зокрема шифрування інформації, ґрунтуючись на певній оптичній схемі із залученням відповідних перетворень. Майже завжди ядром згаданих перетворень є перетворення Фур'є. Проте, ядром може бути будь-яке інше інтегральне перетворення, якщо воно задовольняє певним вимогам подібності до перетворення Фур'є. Таким чином побудується більш загальна ВО схема.



Таблиця.1. Перехід від класичної до віртуальної оптики

На схемі 1 продемонстровані всі етапи, які відбуваються при переході від класичної оптики до віртуальної в алгоритмах шифрування та дешифрування. Математичний опис, який приведено в Таблиці 1, відповідає використанню для шифрування самоасоціативної схеми Фур'є голографії. Використовуючи ВО, проводились дослід з двома типами зображень, що представляють візуальну та цифрову інформацію. В обох випадках досліджувалась якість дешифрованого зображення, отриманого за ВО-алгоритмом по самоасоціативній схемі, в залежності від розміру ключа дешифрування. При розрахунках використовувались ядра на основі перетворення Фур'є та на основі перетворення Волша-Адамара.

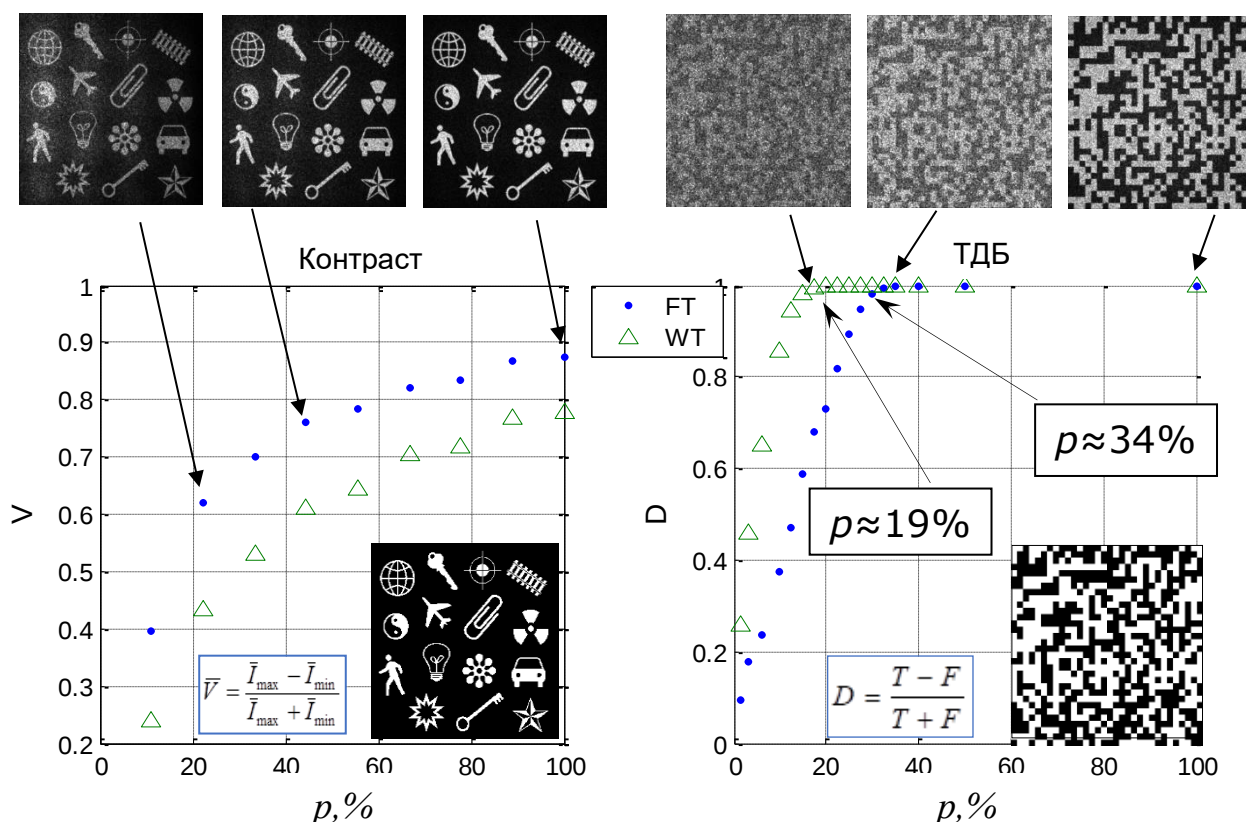


Рис.8. Аналіз роботи ВО алгоритмів по самоасоціативній схемі

На Рис. 8 наведені графіки, що демонструють залежності середнього контрасту ($\bar{V}$ - ліворуч) та точності детектування бітів (D - праворуч) від площі ключа шифрування p , вираженої у відсотках. На кожному з графіків відображені по дві залежності, що відповідають ВО-схемі з перетворенням Фур'є (FT) та з перетворенням Волша-Адамара (WT). У верхній частині Рис.8 наведено приклади дешифрованих зображень обох типів для різних розмірів ключа. З Рис.8 випливає, що ВО-алгоритм самоасоціативної схеми з ядром – перетворення Волша-Адамара забезпечує більшу стійкість системи шифрування та дешифрування для цифрової інформації (межа безпомилкового дешифрування 19% проти 34%).

У четвертому розділі досліджено можливість створення універсальної когерентно-оптичної схеми на базі самоасоціативної схеми фур'є-голографії, яка дозволяє формувати заданий розподіл енергії

випромінювання на оптичній мішені незалежно від наявності амплітудно-фазових спотворень у лазерному пучку. В цьому випадку часткове маскування зчитуючого пучка розглядається як певний тип спотворення. Ця особливість дозволяє використовувати асоціативне відновлення зображень як стабілізацію або ж корекцію контрольованого пучка. Таким чином, переходимо від асоціативного відновлення зображень до стабілізації розподілу інтенсивності при розгляді самоасоціативної схеми (рис.2) додатково внівши деякі модифікації. 1).Замість запису голограми в певному

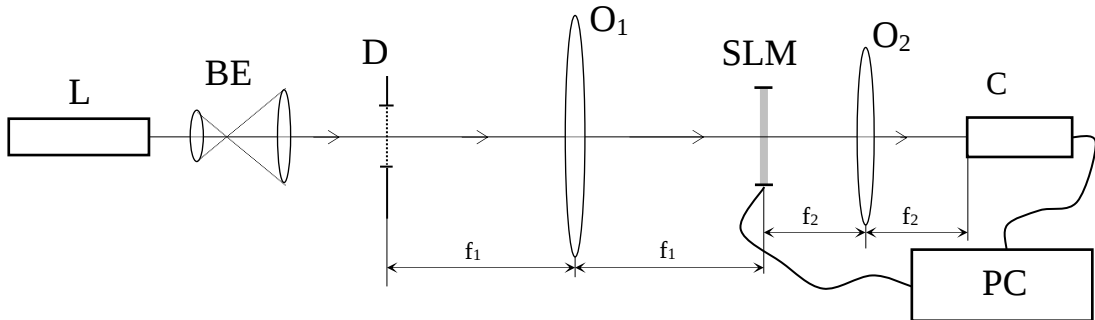


Рис.9. Модифікована схема асоціативного процесора

L – лазер; BE – розширювач пучка; D – дифузор; SLM – просторовий модулятор світла; O₁, O₂ – Фур'є - об'єктиви; C – CCD-камера; PC – робочий комп'ютер.

середовищі застосуємо синтезовані голограми, що відтворюватимуться на пристрої SLM. 2).Голограму розраховуємо для відновлення поля, що відповідає +1 порядку дифракції самоасоціативної схеми (Рис.2). 3).Для ефективнішого використання лазерного пучка, а також для подальшого динамічного керування схемою розраховуємо голограму для відновлення зчитуючим транспарантом без амплітудної модуляції (фазовий дифузор).

При синтезі голограми окрема увага зверталась на роль випадкового фазового модулятора (дифузора). В попередньому розділі він розглядався як частина ключа в алгоритмі шифрування, а в цьому розділі дифузор зменшує чутливість до пошкоджень голограми. При записі фур'є-голограми вплив дифузора зводиться до розподілу інформації при записі зображення і енергії лазерного випромінювання по спектру просторових частот. Завдяки цьому голограма стає менш чутливою до пошкоджень; також зменшується динамічний діапазон записаних інтенсивностей.

В роботі отримані: розподіл інтенсивності у відновленому зображенні за відсутності дифузора та розподіл інтенсивності у відновленому зображенні з використанням дифузора

$$I_c = |a * h|^2 \text{ та } I_c = |a|^2 * |h|^2 \quad (12)$$

Перший вираз описується когерентною згорткою, зі значним перерозподілом інтенсивності внаслідок інтерференції; а другий - некогерентною згорткою з незначним перерозподілом інтенсивності через відсутність інтерференції. Для кількісної характеристики деградації зображення і стабілізуючого ефекту дифузора зі збільшенням масштабу аберації, було розраховано кореляцію між розподілами інтенсивності відновленого і оригінального зображень за виразом:

$$c_{ab} = \frac{\sum a_{ij} b_{ij}}{\sqrt{\sum a_{ij}^2 \sum b_{ij}^2}} \quad (13)$$

де a_{ij} та b_{ij} – елементи матриць, що відповідають двом зображенням, суми беруться по усіх індексах.

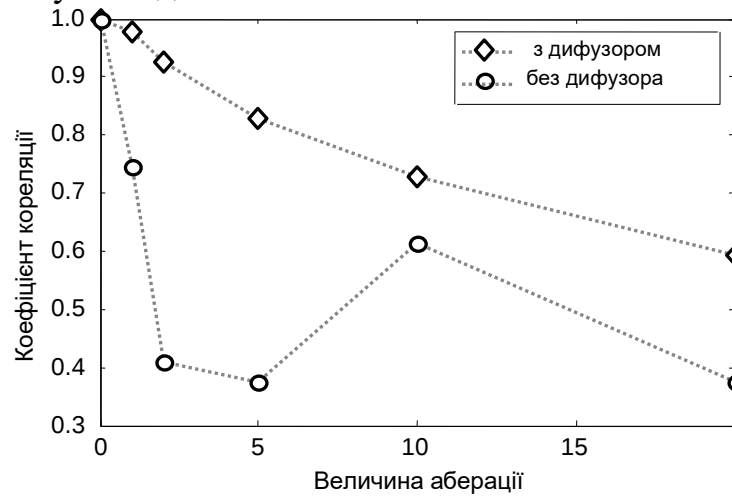


Рис. 10 Графіки кореляції між відновленим і оригінальним зображеннями в залежності від масштабу аберації.

Наведені графіки демонструють посилення стабілізуючого ефекту від застосування дифузора. Отже, можна очікувати успішне використання фур'є-голограм, синтезованих з дифуззором, в задачах стабілізації розподілу енергії випромінювання на різного роду мішенях.

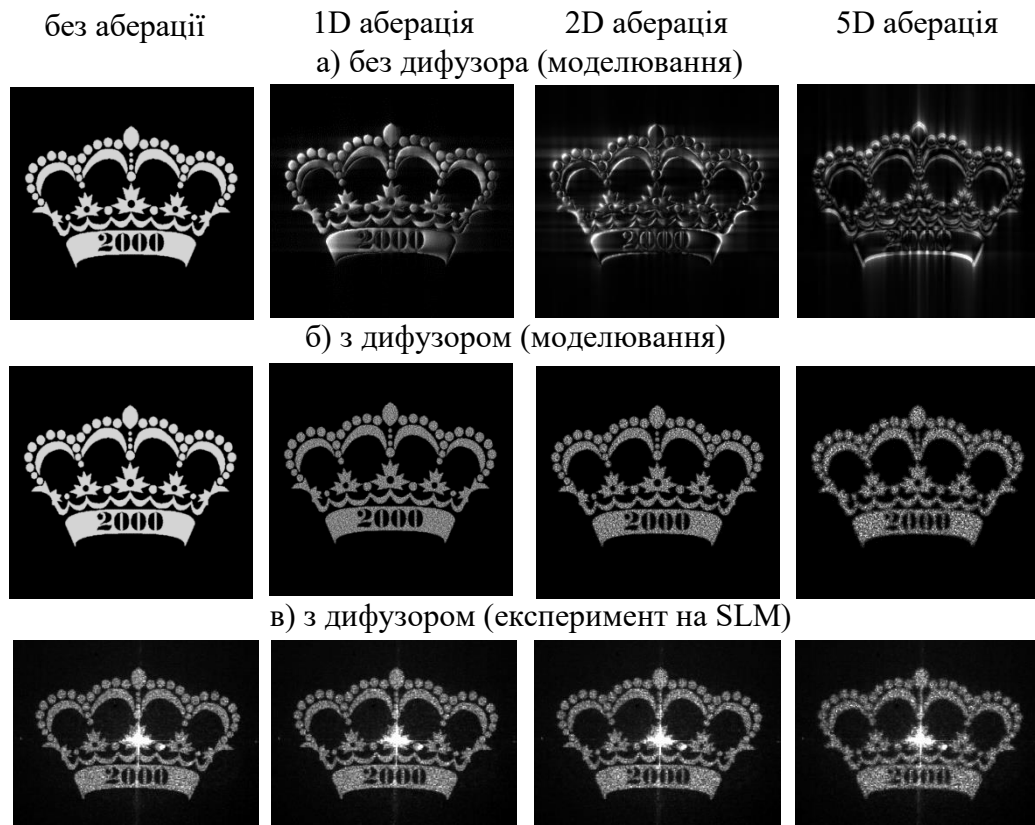


Рис. 11. Стабілізація зображення при використанні випадкового фазового дифузора (модельовання та експеримент).

Для підтвердження отриманих теоретичних висновків стабілізуючого ефекту фазового дифузора та спостереження ефекту стабілізації було зроблено серію комп'ютерних та реальних експериментів щодо відновлення зображення з фур'є-голограми при абераціях у хвильовому фронті відновлюючої хвилі. На Рис.11а,б показі результати комп'ютерного моделювання відновлення фур'є-голограми відповідно без та з дифузором за наявності аберацій різної величини (величина аберацій зростає зліва направо) та Рис.11в - експериментальний результат.

Однак, є одна важлива проблема застосування для стабілізації випадкового фазового дифузора. Незважаючи на те, що на виході отримуємо стабілізоване зображення, проте воно вкрите плямами (розвиненою спекл-картиною), які з'являються від використання в схемі саме дифузора. Тож наступним кроком роботи була апробація методу некогерентного усереднення, який дає можливість позбутися небажаного шуму. Пропонується проводити усереднення значення декількох вибірок сигналу. У випадку незалежного та випадкового шуму у кожному відібраному сигналі очікуване зниження рівня шуму пропорційне квадратному кореню кількості вибірок. У цьому випадку шум (спекл-картина) в сигналі (зображенні) визначається із умов використання випадкового фазового дифузора. Отже, щоб досягти зниження шуму, ми повинні генерувати кожне нове зображення, створене за допомогою іншого незалежного дифузора.

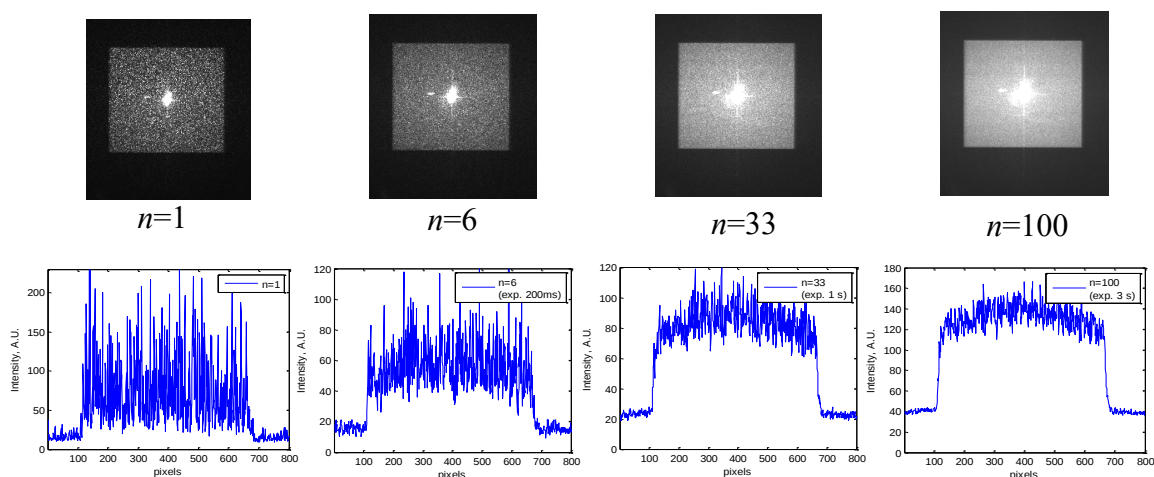


Рис.12. Ілюстрація застосування некогерентного усереднення для стабілізації зображення

Для апробації методу некогерентного усереднення проводились модельні та реальні експерименти. В середовищі MatLab за допомогою ітераційного алгоритму синтезувалися 100 бінарних фур'є-голограм квадратної плоскої сходинки інтенсивності з незалежними випадковими дифузорами. На Рис.12 приведені експериментальні результати разом з графіками інтенсивності. Графіки інтенсивності обраховуються з периферійної області (не враховуючи центр) відповідного зображення, щоб уникнути піку центральної інтенсивності (наслідок обмеження роботи даної

моделі SLM). Результати отримані для усереднення з 1, 10, 20, 50 та 100 зразками (синтезованими голограмами). Значне зниження шуму видно як на картинках зображень, так і на графіках інтенсивності.

На наступному етапі роботи проводились експерименти щодо моделювання спірального оптичного пінцета з урахуванням всіх напрацьованих в цьому розділі методик для покращення якості зображення. Застосовувалася модифікована самоасоціативна схема (Рис.9) за наявності аберацій різної величини в лазерному промені.

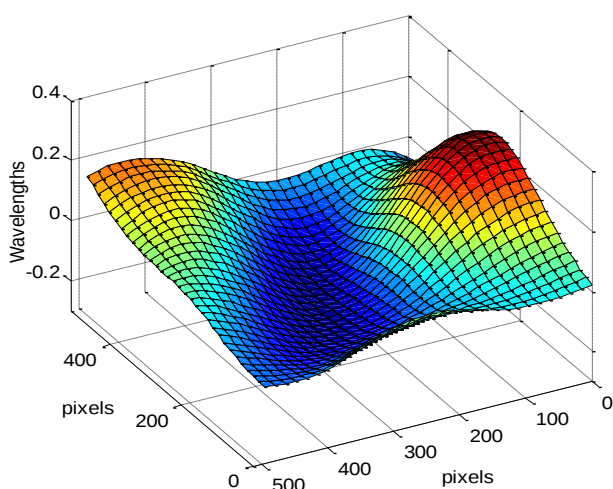


Рис.13. Форма спотворення хвильового фронту в лазерному промені

Величина збурення регулюється масштабуванням його фази застосування масштабного множника, позначено як k . У випадку відсутності аберацій у лазерному промені $k=0$. А для базової аберації (Рис.13), яка використовується для експерименту він дорівнює 1. Збурення у випадку k відмінного від 1 отримується розтягуванням базового збурення по осі z в k разів.

Модельний експеримент проводився для аберацій величиною до $k=3$ (при цьому середній контраст падає до величини, меншої, ніж 0,5, а таке зображення уже непридатне для виконання функції оптичного пінцета без додаткової стабілізації). Для візуальної ілюстрації впливу аберацій на якість отриманого зображення на Рис.14 приведено кілька зображень для $k=1$, $k=2$ та $k=3$. Як видно з отриманих результатів, стабілізуючі показники схеми покращуються при переході з амплітудно-фазової на фазову модуляцію.

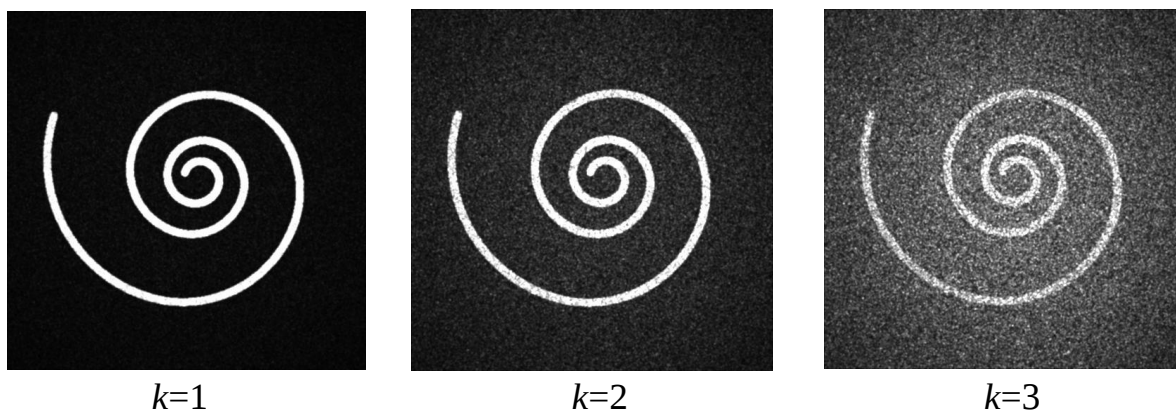


Рис.14. Демонстрація впливу аберацій на якості зображення.

Запропонована схема може створювати задовільну якість зображення для спотворень з діапазоном фаз до $1,2\lambda$.

ВИСНОВКИ

В роботі проведено дослідження кореляційних перетворень світлових полів в оригінальній самоасоціативній схемі фур'є-голографії. У процесі досліджень отримані нові результати, які доповнюють та розширюють актуальні напрямки фур'є-голографії та стали основою для формулювання наступних висновків.

1. Вперше побудовано узагальнений опис схеми фур'є-голографії з довільними опорним, предметним і відновлюючим пучками, а також відновленням у будь-якому порядку дифракції, незалежно від способу реєстрації голограми. Такий узагальнений опис дозволяє розглядати процеси і перетворення у будь-якій схемі фур'є-голографії.

2. Запропоновано оригінальну самоасоціативну схему фур'є-голографії та досліджено її роботу. Детально описано механізм формування асоціативного відгуку у схемі. Зокрема встановлено зв'язок структури зображення і параметрів юстування схеми з вибором режиму роботи схеми. Отримано залежність якості асоціативно відновленого зображення від розміру відновлюючого фрагмента.

3. Сформульовано і проаналізовано концепцію оптичного шифрування на базі оригінальної самоасоціативної схеми. Запропонована концепція має ряд принципово нових якостей, притаманних даній схемі, в порівнянні з відомими аналогами, а саме: стійкість та надлишковість ключа, вибір режиму роботи схеми з підсвічування ключа, можливість асоціативного пошуку в масиві зашифрованих даних.

4. Запропоновано нову віртуально-оптичну систему шифрування з асоціативним ключем на базі самоасоціативної схеми фур'є-голографії із заміною інтегрального ядра: заміна перетворення Фур'є на перетворення Уолша-Адамара. Показано вищу ефективність при роботі з цифровими даними ВО системи з ядром Волша-Адамара, ніж з ядром перетворення Фур'є. Межа безпомилкового дешифрування в першому випадку складає 19% проти 34% для другого випадку.

5. Запропоновано новий кореляційний метод формування розподілу світлової енергії на базі модифікованої самоасоціативної схеми із застосуванням синтезованого дифракційного оптичного елемента. Вперше розглянуто питання щодо стійкості сформованого розподілу до аберацій у системі і його стабілізації.

6. Досліджено роль фазового дифузора у стабілізації розподілу світлової енергії, сформованого синтезованим дифракційним оптичним елементом. Запропоновано оригінальну методику зменшення спекл-шуму у сформованому розподілі. Такий шум з'являється при використанні фазового дифузора.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1* A.G. Derzhypolskii, N.A. Davidenko, D.A. Melenevskii, A.N. Gnatovskii, A.A. Ishchenko, D.D. Mysyk, R.D. Mysyk. Forming a latent associative image in photothermoplastic media in comparison with an image in a photorefractive crystal. *Journal of optical technology*. 2005. Vol. 72, № 10. P.754-758
<https://doi.org/10.1364/JOT.72.000754>
- 2*. A. Derzhypolsky, D. Melenevsky, A. Gnatovskiy, N. Medved. Some peculiarities of the associative holographic image formation and quality: the comparative analysis. *Functional materials*. 2005. Vol. 12. № 1. P.87-90
- 3*. А.Г. Держипольський, О.В. Гнатовський, Н. В. Медвідь. Метод стабілізації просторового розподілу лазерного випромінювання на технологічній мішені. *Доповіді Національної академії наук України*. 2006. Випуск № 6. Ст.68-71
- 4*. А.Г. Держипольський. Л.А. Поперенко Фазовий дифузор як стабілізатор розподілу інтенсивності, відновлюваного з фур'є-голограм// *Вісник КНУ, серія: фіз.-мат. Наук*. 2007. Випуск № 4. - С. 322-326.
- 5* A. Derzhypolsky, D. Melenevsky, O. Gnatovskiy. A Comparative Analysis of Associative Properties of Fourier versus Walsh Digital Holograms. *Acta Physica Polonica A*. 2007. № 5, Vol. 112. P. 1101-1106.
<https://doi.org/10.12693/APhysPolA.112.1101>
- 6*. A. Derzhypolskyi, D. Melenevskyi, O. Gnatovskiy, A. Negriyko. Stabilization of distribution of radiation energy in optical tweezers wand. *Proceedings of the SPIE*. 2008. Vol. 7008. P.70081T-1–70081T-5
<https://doi.org/10.1117/12.797118>.
- 7*. A. Derzhypolskyi, O. Gnatovskiy, A. Negriyko. Associative image reconstruction as a method of formation and stabilization of the energy distribution in a laser beam. *Ukrainian Journal of Physics*. 2009. Vol. 54, N 1-2 P.22-27
- 8*. A.G. Derzhypolskyi, A.M.Negrijko, V.O. Gnatovskiy. Correlation methods of formation of complex fields in optical tweezers. *Ukrainian-German Symposium on physics and chemistry of nanostructures and on nanobiotechnology*. 2010. Book of abstracts p. 266.
- 9*. A. Derzhypolskyi, O. Gnatovskiy, A. Negriyko, L. Derzhypolska Estimation of quality of reconstructed image in self-associative Fourier holography scheme. *IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*. 2016. P.228-230 <https://doi.org/10.1109/CAOL.2016>
- 10*. Derzhypolskyi A.G., Derzhypolska L.A, Gnatovskiy O.V. Reduction of speckle noise in laser energy distribution on the target by means of modified Fourier hologram and incoherent averaging. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2018. Vol. 21, № 4. P. 429-433
<https://doi.org/10.15407/spqeo21.04.429>
- 11*. A. Derzhypolskyi, L. Derzhypolska, O. Gnatovskiy Tunable associative readout in self-associative Fourier holography scheme by means of fine alignment. 2019. *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*. P. 67-70, <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019559>

Цитована література:

1. P. J. van Heerden. A new optical method of storing and retrieving information. *Applied Optics*. 1963. Vol.2, №4, pp. 387-392.
2. K.S.Pennington, R.J.Collier Hologram-generated ghost image experiment. *Applied physics letters*. 1966. Vol.8 № 1, pp. 14-16
3. П.В. Полянский. О формировании сопряженного изображения в схеме обобщенного голографического фильтра. *Оптика и спектроскопия*. 1988, т. 65, вып. 2. с. 435-438.
4. Polyanskii, P.V., Felde, C.V., Konovchuk, A.V. et al. On the role of higher-order nonlinearities in implementing second-order hologram-based associative memories. *Opt. Mem. Neural Networks*. 2015. Vol.24, pp. 230–234.
5. Soffer B.H., Duuning G.J., Ovechko Y., Varon E. Associative holographic memory with feedback using phase-conjugate mirrors. *Opt. Letters*. 1986. Vol.11 № 2, pp. 118-120
6. Igor Aleksander. Digital neural networks, matched filters and optical implementations in Neural Computing Architectures: The Design of Brain-Like Machines, MITP, 2003, pp.258-278.
7. Tin Maung, Aye Tomasz Jansson, Andrew Kostrzewski, Min-Yi Shih. Phase addressed holographic associative memory. Patents US8199387B1 United States G03H1/0005. Adaptation of holography to specific applications. 2012
8. А.В. Гнатовский, Н.В. Медведь, Д.А. Меленевский, Л.Д. Прядко, Л.К. Яровой. Ассоциативный кореллятор прямого действия. *Специальная техника и вооружение*. 2001. № 2, с. 26-29
9. J.J. Wu, W.X. Zhen, J.L. Zheng, W. Liu, Y. Zhang, S. Liu, Multiple-image encryption based on computational ghost imaging. *Opt. Commun*. 2016. Vol. 359, pp. 38–43
10. L. Sui, X. Zhao. An optical multiple-image authentication based on transport of intensity equation. *Opt. Lasers Eng*. 2019. Vol.116, pp. 116–124
11. Zhou, N., Yan, X., Liang, H. et al. Multi-image encryption scheme based on quantum 3D Arnold transform and scaled Zhongtang chaotic system. *Quantum Inf Process*. 2018. Vol.17, №338, pp. 1-38
12. X. Peng, Z. Cui, T. Tan, Information encryption with virtual-optics imaging system *Opt. Commun*. 2002. Vol. 212, № 4–6, pp 235-245
13. Changgeng Liu, Xiao Yu, and Myung K. Kim. Fourier transform digital holographic adaptive optics imaging system. 2012. *Appl. Opt*. Vol. 51, pp8449-8454
14. YongZhang. The fast image encryption algorithm based on lifting scheme and chaos. *Information Sciences*. 2020. Vol. 520, pp 177-194
15. M. Woerdemann, et al. Advanced optical trapping by complex beam shaping. *Laser & Photonics Reviews* 2013. Vol. 7, №6, pp. 839-854
16. R. Kampmann, S. Sinzinger, and J. G. Korvink. Optical tweezers for trapping in a microfluidic environment. *Appl. Opt*. 2018. Vol. 57, pp. 5733-5742
17. Yanan Cai, Shaohui Yan, Zhaojun Wang, Runze Li, Yansheng Liang, Yuan Zhou, Xing Li, Xianghua Yu, Ming Lei, and Baoli Yao. Rapid tilted-plane Gerchberg-Saxton algorithm for holographic optical tweezers. *Opt. Express*. 2020. Vol. 28, pp. 12729-12739.

АНОТАЦІЯ**Держипольський А.Г. Кореляційні перетворення оптичних полів та обробка інформації в самоасоціативній схемі фур'є-голографії.-
Рукопис**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – Оптика. Лазерна фізика. - Інститут фізики НАН України, Київ, 2020.

Робота присвячена дослідженню процесів голографічної обробки інформації, формування та стабілізації зображень на базі оригінальної голографічної схеми. На основі запропонованого в роботі узагальненого опису фур'є-голографії сформовано концепцію оригінальної самоасоціативної голографічної схеми з однаковим предметним і опорним пучками. Її фундаментальною властивістю є асоціативне відновлення записаної інформації. Вивчаються ключові характеристики роботи схеми, а саме, залежність якості зображення від розміру відновлюючого фрагмента та зв'язок структури відновленого зображення з параметрами юстування схеми.

В ході подальшого дослідження запропонованої схеми розвинуто концепцію асоціативного оптичного шифрування. Показано ряд важливих переваг такої системи в порівнянні з відомими аналогами, а саме: довільний вибір та надлишковість ключа шифрування, режим підсвічування ключа, гнучкий асоціативний пошук у зашифрованій бібліотеці. Перехід в область віртуальної оптики дозволив дослідити схему із заміною ядра шифрування (перетворення Фур'є) на перетворення Волша-Адамара. Це підвищує ефективність роботи системи з цифровими даними.

Кореляційні перетворення світлових полів в самоасоціативній схемі також дозволяють ефективно використовувати її для формування стабілізованого просторового розподілу інтенсивності випромінювання. Запропонований в роботі підхід мінімізує спотворення структури зображення через аберації у системі. Показано, що ключову роль при цьому відіграє фазовий дифузор. Для мінімізації спекл-шуму, притаманного застосуванню фазового дифузора, в роботі запропоновано і успішно випробувано метод некогерентного усереднення.

Ключові слова: кореляційна оптика, фур'є-голографія, оптичне шифрування, голографічна обробка інформації, віртуальна оптика, стабілізація зображення на технологічній мішені.

АННОТАЦИЯ**Держипольский А.Г. Корреляционные преобразования оптических полей и обработка информации в самоассоциативной схеме фурье-голографии.- Рукопись**

Работа посвящена исследованию процессов голографической обработки информации, формирования и стабилизации изображений как проявлений корреляционных преобразований световых полей на базе

оригинальной голографической схемы. На основе построенного в работе описания обобщенной схемы фурье-голографии сформирована концепция оригинальной самоассоциативной голографической схемы с одинаковым предметным и опорным пучками. Фундаментальным свойством которой является ассоциативное восстановление записанной информации. Изучаются ключевые характеристики работы схемы, а именно, зависимость качества изображения от размера восстанавливающего фрагмента и связь структуры восстановленного изображения с параметрами юстировки схемы.

В ходе дальнейшего исследования предложенной схемы развито концепцию ассоциативного оптического шифрования. Показано ряд важных преимуществ такой системы по сравнению с известными аналогами, а именно: произвольный выбор и избыточность ключа шифрования, режим подсветки ключа, гибкий ассоциативный поиск в зашифрованной библиотеке. Переход в область виртуальной оптики позволил исследовать схему с заменой ядра шифрования по преобразованию Фурье на преобразование Уолша-Адамара, что повышает эффективность работы системы с цифровыми данными.

Корреляционные преобразования световых полей в самоассоциативной схеме также позволяют эффективно использовать ее для формирования стабилизированного пространственного распределения интенсивности излучения. Предложенный в работе подход минимизирует искажения структуры изображения через аберрации в системе. Показано, что ключевую роль при этом играет фазовый диффузор. Для минимизации спекл-шума, присущего применению фазового диффузора, в работе предложен и успешно испытан метод некогерентного усреднения.

Ключевые слова: корреляционная оптика, фурье-голография, оптическое шифрование, обработка информации, виртуальная оптика, стабилизация изображения на технологической мишени.

SUMMARY

A.G.Derzhypolskyi “Correlation transformations of optical fields and information processing in self-associative Fourier-holography scheme” - Manuscript

Candidate thesis in physics and mathematics in speciality 01.04.05 – Optics. Laser physics. – Institute of physics, National Academy of sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is dedicated to the study of correlation transformations of light fields in original Fourier-holography scheme. The named transformations yield a holographic data processing, holographic formation and stabilization of images, etc.. First, the basic principles of Fourier-holography are analyzed to build a generalized description of a holography scheme with arbitrary signal, reference and restoring beams as well as reconstruction in every possible order of diffraction. Based on such generalized model formulated is the original self-

associative Fourier-holography scheme with identical signal and reference beams. A fundamental feature of the scheme is an associative reconstruction of recorded information. Detailed investigation of operation of the scheme gives an explanation and description of its key characteristics as associative memory system. These are: the dependance of the structure of associatively restored image on the parameters of fine adjustment of the scheme, and the dependance of quality of reconstructed image on the size of reconstructing part.

In further study developed and investigated is the concept of optical encryption based on the self-associative scheme. As shown in the work, the concept has several important advantages as compared to known analogues. Namely: arbitrary choice of encryption/decryption key, redundancy of the key, tunable mode of highlighting of the key, possibility of flexible associative search in encrypted library. Transfer of the encryption scheme into virtual optics domain reveals a possibility to change the transformational kernel of encryption from Fourier transform to Walsh-Hadamard transform. Such a substitution significantly improves the operation of the scheme with digital data.

Another appearance of correlation transformations in self-associative scheme may be effectively used for formation of required spatial intensity distribution of light on technological target and its stabilization against different aberrations in the system. The approach offered in the work minimizes the distortion of the structure of formed image caused by aberrations in forming laser beam. Revealed is that the key stabilizing role plays a random phase modulator used when creating (recording or synthesizing) a hologram. However, the use of random phase diffuser results in unwanted speckle noise in formed image. The solution to speckle problem is offered and tested in the work by means of incoherent averaging.

Keywords: correlation optics, Fourier-holography, optical encryption, holographic data processing, virtual optics, image stabilization on technological target.

Підписано до друку “20” січня 2021 р. Формат паперу 60х90^{1/16}.
Папір офсетний 80 гр/м². Ум.–друк. аркушів 1.2.
Обл.–вид. аркушів 1.0. Тираж 100 прим.
Замовлення № ____

Віддруковано на ризографі у видавничому центрі «Принт-центр»
04053, Київ, вул. Січових стрільців, 26а