

ВІДГУК

офіційного опонента – доктора фізико-математичних наук, професора кафедри кореляційної оптики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича Мохуня Ігоря Івановича на дисертаційну роботу **Держипольського Андрія Геннадійовича «Кореляційні перетворення оптичних полів та обробка інформації в самоасоціативній схемі Фур'є-голографії»**, представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05– оптика, лазерна фізика

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Держипольського А.Г. присвячена аналізу перетворення змінних світлових полів і кореляційної обробки інформації в голографічних схемах.

Останнім часом дослідження в галузі створення штучного інтелекту набувають все більш широкого розмаху. При цьому, як відомо, нейронна або нейроподібна мережа на відміну від традиційного комп'ютера працює на основі зовсім інших принципів. Основні відмінності полягають в тому, що характер відгуку нейронної мережі має асоціативний і імовірнісний характер. Інакше кажучи, основною складовою такої «системи обробки інформації» є, так званий, асоціативний запам'ятовуючий пристрій. Треба відзначити, що потужність нейронної мережі, кількість образів, що зберігається кількість актів навчання напряму залежить від кількості нейронів у шарі нейронної мережі. При цьому, як правило, вимагається, щоб нейронна мережа працювала в реальному масштабі часу. Разом з тим реалізація нейронних мереж на електронних компонентах, в силу різних причин, в тому числі і в результаті обмежень принципового характеру, не дозволяє досягати відповідні характеристики асоціативно запам'ятовуючих пристроїв. Зокрема кількість нейронів у шарі мережі не перевищує 10^3 - 10^4 , або поняття масштабу реального часу може бути реалізоване досить умовно.

В цьому плані лише створення нейронних мереж на оптичних принципах є єдиною розумною альтернативою, оскільки кількість нейронів може бути суттєво (на два три порядки) збільшена, а швидкість обробки інформації обмежується лише швидкістю розповсюдження електромагнітної хвилі через оптичну систему. При цьому інформація про конкретний образ, який зберігається системою інтегрально розподілена по всьому шару мережі, а інформаційна ємність пристрою величезна.

Ще один аспект, який привертає увагу в кореляційній обробці інформації і який безпосередньо впливає з природи таких технологій, це можливість гнучкої реалізації різного роду алгоритмів шифрування та дешифрування інформації, які володіють високою криптостійкістю, що є дуже важливим при розробці принципово нових пристроїв обробки і передавання сигналів.

Як відомо, ще в кінці попереднього сторіччя сформувався потужний оптичний напрямок формування асоціативно запам'ятовуючих пристроїв на основі голографічних технологій, зокрема технологій безопорної голограми, кореляційної обробки інформації.

Разом з тим досягнуті характеристики пристроїв не дозволяли перейти до їх практичного впровадження в комп'ютерних системах.

Звідси випливає низька питань на які до сьогодні немає відповіді:

- Чи можуть бути реально досягнуті потенційні можливості оптичних систем, як запам'ятовуючих пристроїв?
- Чи можна сьогодні сформулювати оптимальні принципи формування таких систем?
- Чи досяжні такі потенційні характеристики оптичних асоціативних запам'ятовуючих пристроїв, які задовольняють вимогам що висуваються до нейронних мереж, зокрема величина відношення сигнал/шум тощо?

При цьому треба відзначити, що, як правило, інформація, яка обробляється системою має статистичний «кореляційний» характер. На практиці це проявляється в тому, що поля, які формуються, передаються, обробляються оптичною системою дуже часто можна ідентифікувати як спекл-поля. Внаслідок чого «корисна інформація» зашумлена спекл-складовою оптичного сигналу, що значно знижує характеристики оптичних пристроїв при формуванні складних наперед заданих розподілів інтенсивності і фази поля. Зокрема в таких пристроях як оптичні пінцети, тощо.

Підсумовуючи можна стверджувати, що всебічне детальне дослідження кореляційних голографічних схем і процесів, які в них відбуваються, відкриває нові можливості та підходи для створення сучасних систем захисту, зберігання та обробки інформації, а також формування і стабілізації необхідних складних розподілів оптичної енергії.

Зважаючи на це, тема дисертаційної роботи, спрямування дисертаційного дослідження, мета та його задачі є безумовно актуальними як з фундаментальної, так і з практичної точки зору.

Дисертація Держипольського А.Г написана на 137 сторінках за загально прийнятою схемою. Вона складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел, який містить 132 посилання, та додатку.

Основні результати роботи

У *вступі* обгрунтовано тему та актуальність роботи, сформульовано її мету та задачі, відображено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

В *першому розділі* оглядового характеру розглянуті основні принципи запису та відновлення безпорних (у тому числі Фур'є) голограм. Розглянуті методи отримання асоціативних відгуків у різного роду кореляційних схемах. Розглянуті процеси розповсюдження, перетворення (обробки) електромагнітних хвиль у таких схемах. Окремо розглянуті можливі способи шифрування та дешифрування оптичних сигналів. Виявлено їх переваги і недоліки. Значну частину розділу присвячено задачі, яка логічно впливає з можливостей кореляційних методів, а саме формування заданого розподілу оптичних характеристик в певній області простору. Показано, що подібна техніка може бути з успіхом використана в напрямку розробки оптичних пінцетів, яка сьогодні розвивається дуже плідно і бурхливо. Намічені шляхи вирішення в рамках дисертаційного дослідження виявлених проблем.

Другий, третій та четвертий розділи, на мою думку, є основними розділами, в яких містяться основні результати дисертації, що відповідають критеріям новизни та значимості як у фундаментальному так і в прикладному аспектах.

В *другому розділі* детально проаналізована схема «безпорної» Фур'є-голографії, в якій сформульовані вимоги щодо предметної, «опорної» та відновлюючої хвиль. Проаналізовано результати відновлення голограми у різних порядках дифракції. На

основі проведеного аналізу запропонована ідея оригінальної самоасоціативної схеми з однаковими опорними та предметними пучками, яка, як показано, є перспективним напрямком розвитку безопорної Фур'є-голографії.

На наступному етапі автором детально проаналізовані якісні характеристики зображень відновлених з Фур'є голограми. Зокрема розрахована і прогнозується величина середнього контрасту, яка, виявляється, пов'язана з поперечними розмірами відновлюючого поля. Показано, що шумові характеристики контраст відновленого зображення безпосередньо пов'язані зі структурою об'єкта, його заповненням.

На закінчення розділу наведені оригінальні результати експериментальних досліджень. Показано, яким чином параметри відновлених зображень пов'язані із характеристиками Фур'є схеми, зокрема із відповідним розбалансуванням її юстувальних параметрів.

Третій розділ присвячений аналізу можливості розробки нового методу шифрування на основі самоасоціативної схеми безопорної Фур'є-голографії. Як показано, такий метод володіє певними перевагами у порівнянні із «традиційними» технологіями кодування інформації за допомогою безопорного запису і відновлення сигналів, зокрема розроблений автором метод шифрування забезпечує підвищену криптостійкість зашифрованого повідомлення. Окрім цього в силу інтегрального характеру запису та відновлення сигналу метод дозволяє відновлення інформації у випадку, коли ключ не повністю відповідає оригінальному, зокрема коли при відновленні використовується пошкоджений ключ. Автором реалізований комп'ютерний варіант розробленого методу. При цьому показано, що інтегральне ядро шифрування – перетворення Фур'є може бути замінено на інтегральне ядро у вигляді перетворення Уолша-Адамара. Така операція дозволяє у деяких випадках підняти ефективність роботи алгоритму, зокрема при шифруванні бінарних зображень. Разом з тим показано, що при шифруванні напівтонових образів більш ефективним залишається алгоритм, побудований на основі інтегрального ядра у вигляді Фур'є-перетворення.

В четвертому розділі наведений та експериментально підтверджений аналіз впливу фазової модуляції (фазового дифузора) на формування наперед заданого складного розподілу інтенсивності при використанні синтезованого дифракційного оптичного елементу. Показано, що використання фазового дифузора приводить до реалізації, як називає автор, «некогерентної згортки» (що не дуже вдало з моєї точки зору, тим не менш), яке приводить до того, що відбувається формування вихідного поля за механізмом подібним до формування некогерентного зображення, що забезпечує інший розподіл вихідної інтенсивності, більш «гладкий» у порівнянні із традиційним випадком. Додатково на основі комп'ютерного моделювання і результатів експериментальних досліджень показано, що при некогерентному усередненні спекл-полів, отриманих від статистично незалежних дифузорові вдається суттєво покращити характеристики вихідного бінарного сигналу при формуванні наперед заданих складних розподілів інтенсивності.

У висновках перелічені основні результати дисертаційного дослідження та зроблені з них відповідні висновки.

В додатку наведені теоретичні і практичні аспекти розрахунку і виготовлення синтезованих Фур'є-голограм.

На закінчення аналізу результатів дисертаційного дослідження хотілося б відзначити таке:

1. Ключовою ідеєю дисертаційного дослідження є ідея застосування кореляційних методів обробки сигналів, статистичної оптики для ефективного асоціативного відновлення образів, корекції складних розподілів характеристик електромагнітної хвилі. Як наслідок **наукова новизна** отриманих результатів не викликає сумніву.

2. Робота має комплексний характер. В усіх оригінальних розділах дисертації неодмінно присутній ланцюжок: аналіз існуючого стану, аналітичне дослідження, комп'ютерне моделювання чи експеримент. При цьому підходи та ідеї, запропоновані автором, підтверджуються результатами моделювання чи експерименту.

3. Особливо хотілося б відзначити рівень експериментальних результатів, який в теперішніх складних умовах викликає повагу до автора.

Отже, на мій погляд, сказане вище дозволяє стверджувати, що **робота має завершений характер, а дослідження виконані на високому рівні.**

Підсумовуючи, я вважаю, що наведений перелік основних результатів та висновків безумовно відповідає критерію новизни, який висувається до результатів дисертаційного дослідження. **Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та зроблених висновків, їх фундаментальна та практична значимість не викликає сумніву.**

Результати роботи всебічно обговорювалися на 9 міжнародних конференціях.

За матеріалами дисертації опубліковано 6 статей у фахових виданнях, 4 статті в працях SPIE та IEEE, що індексуються у наукометричних базах Scopus та Web of Science, Це цілком задовольняє вимогам до кандидатської дисертації з точки зору її апробації та всебічного аналізу науковою спільнотою.

На мою думку, в дисертаційній роботі відсутні принципові недоліки, вона написана достатньо чітко, фізично грамотно і лаконічно. Разом з тим можна зробити такі **зауваження:**

1. Контраст відновленого зображення є важливою характеристикою, особливо коли мова йде про бінарне зображення. Проте, більш об'єктивною характеристикою є відношення сигнал/шум.

2. Я не побачив оцінок щодо контрасту відновленого зображення (відношення сигнал/шум), які враховують характер модуляції об'єкта, створюючого вхідне зображення. Наприклад, залежність того ж самого контрасту від дисперсії фази у граничному полі вхідного зображення.

3. Подібне запитання можна сформулювати відносно характеристик голограми (товста, тонка). Адже відомо, що для систем з тонкою безпорною голограмою відношення сигнал шум у фантомному зображенні складає величину від ~ 2 (нелінійна фазова голограма) до ~ 5 (амплітудна лінійна голограма). В той самий час як для систем із товстою голограмою, внаслідок її кутової селективності відношення сигнал/шум може наближатися до величини, яка характерна для корелятора Ван-дер-Люгта (див., наприклад, Мохунь І.І., Бесага Р.Н., Яценко В.В. Восстановление оптических полей из безпорных голограмм. // Оптика и спектроскопия. – 1994. – т.76. – №4. – С. 660-666.)

4. На мою думку твердження на стор. 60 «...Тобто в даній схемі ключем для дешифрування є спряжений з дифуззором транспарант, який містить частину первинної інформації ...» не зовсім відповідає фізичній ситуації. Насправді амплітудна модуляція, яка вноситься транспарантом на процес відновлення інформації практично не впливає (див., наприклад, Мохунь І.І., Росляков С.Н., Яценко В.В. Восстановление фазовой и

амплитудной составляющих дифракционного поля, рассеянного мелкоструктурным объектом, из голограммы без опорного пучка. // Известия РАН, серия физическая. – 1992. – т. 56. – № 4. – С. 205-211.). Інакше кажучи кодуючу (відновлюючу) функцію виконує лише спряжений із транспарантом дифузор, який вносить дрібно структурну фазову модуляцію.

Таке твердження має частковий сенс внаслідок того, що автор використовує транспарант, який формує просторово обмежені строго локалізовані бінарні символи, роль яких практично зводиться до виділення певної групи ретрансляторів в дифузорі. Відповідно зміна амплітудної інформації при умові підсвітлення інших ділянок дифузора дійсно приведе до зникнення відновленого зображення. Разом з тим, якщо освітлювати значну частину дифузора хвилею з постійною інтенсивністю (освітлення дифузора широким пучком) то це приведе до відновлення нехай і не дуже високої але достатньої якості зображення.

5. В роботі зустрічаються дрібні неточності та недоліки:

- Орфографічні помилки, наприклад, стор 56,57,80,94, тощо. Осі на деяких рисунках мають досить дивні позначення (див. наприклад, рис. 2.7, 2.8, 4.3, 4.4, тощо).
- Певні «неоднозначні» визначення. Наприклад, див. стор. 57 «... Основною вимогою для дешифрованого зображення є його впізнаваність ...»? Абсолютно не зрозуміло, що саме стоїть за цією фразою. Або (стор. 84) «...чисто фазовий Фур'є-образ...», тощо.
- Не повністю адекватні визначення. Наприклад автор застосовує термін промінь (**лінія**, вздовж якої відбувається перенесення світлової енергії) замість пучок. Або (стор. 85) «... спотворень з діапазоном фаз до $1,2\lambda$...» замість викривлення фронту хвилі у термінах довжин хвиль, тощо.

Проте наведені зауваження не впливають на загальну високу оцінку дисертації Держипольського Андрія Геннадійовича «Кореляційні перетворення оптичних полів та обробка інформації в самоасоціативній схемі Фур'є-голографії». Вона є самостійним, завершеним науковим дослідженням; за науковим рівнем і значенням отриманих результатів дисертація відповідає вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня кандидата наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 261 від 23.03.2016 р. (зі змінами і доповненнями від 03.04.2019 р. № 283), а її автор, Держипольський Андрій Геннадійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Офіційний опонент
професор кафедри кореляційної оптики
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича,
доктор фізико-математичних наук,
професор

Мохунь І.І.

Підпис Мохуня І.І. засвідчую:
Вчений секретар Чернівецького
національного університету

Якубовська Н.О.