

Since the aberration of distortion has a nonlinear dependence on field, it can be corrected mostly in multi-lens systems. Unfortunately, the approach to optical design based on the 3rd order aberration theory does not take into account high-order aberrations. Another widely-used method based on local optimization requires to apply initial optical systems with already satisfactory image quality.

This paper describes the implementation of automated optical design of lenses with reduced distortion by using of one of modern global optimization algorithms, namely, the adaptive Cauchy differential evolution algorithm.

By using specialized optical design software, an experimental verification of the feasibility of the proposed approach has been fulfilled in a completely automated mode. The computer simulation of a parametric synthesis process has been done on an example of the orthoscopic lens, similar to one already patented. The lens, which was selected for a comparison study, has the focal length of 100 mm, the angular field of view of 8.4°, the relative aperture of 1:1.8 and the working spectral range of 0.404 to 0.706 μm. The level of its residual relative distortion over the entire field does not exceed 0.02%. The obtained results indicate that the image quality of two found solutions exceeds the image quality of the prototype lens indicated in the patent.

Keywords: optical system, aberration, camera lens, distortion, star tracker, automated design.

Надійшла до редакції
09 листопада 2018 року

Рецензовано
20 листопада 2018 року

УДК 535.4, 535.8

КОРЕЛЯЦІЙНО-ОПТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОБЛЕМИ ГОЛОГРАФІЧНОЇ АСОЦІАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ

¹⁾Богатирьова Г. В., ²⁾Полянський П. В., ²⁾Фельде Х. В., ³⁾Зелінський Є. В.

¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Чернівецький національний університет імені Ю. Федьковича, Чернівці, Україна

³⁾Люблянський університет, Любляна, Словенія

E-mail: halyna.bohatyrova@lil.kpi.ua, christinafelde@gmail.com,
yevhen.zelinskyi@fe.uni-lj.si

Проблема голографічної асоціативної пам'яті обговорюється в рамках кореляційно-оптичного підходу. Аналіз моделей безопорної голограми та нелінійно зареєстрованих позаосевих голограм, зчитуваних в асоціативному режимі, показує широкий спектр корисних властивостей таких голограм не лише для відновлення відсутньої частини збереженого масиву даних, а й для детектування малих змін ("помилки") у записаній картині, для відновлення повного масиву даних з корекцією помилок за неповною версією масиву, а також для здійснення високоефективного гетероасоціативного відновлення на базі неінтерференційного механізму зв'язку парціальних сигналів. Показано, що візуально оцінювана якість відновленого асоціативного відгуку може наближатись до якості зображення, що досягається у звичайній позаосевій голографії.

Ключові слова: голографія, асоціативна пам'ять, фантомне зображення, фазове спряження, голографія другого порядку.

1. ВСТУП

Розвиток голографічної асоціативної пам'яті (ГАП) протягом понад 50 років, починаючи з піонерських робіт Ван Хірдена [1, 2], можна умовно розділити на два періоди, а саме ГАП на основі безопорних голограм (або «голограм фантомних зображень») – до середини вісімдесятих років двадцятого століття та нелінійних ГАП – по теперішній час. Метою даної статті є оцінка прогресу, досягнутого у цій області досліджень, та підсумовування можливостей, що забезпечуються у сучас-

них архітектурах ГАП для повністю оптичного збереження та відновлення інформації, а також визначення факторів, які усе ще перешкоджають широкому практичному застосуванню даного підходу в оптичній обробці інформації. ГАП розглядається нами як важливий напрямок й втілення концепції *кореляційної оптики* [3]. Однією з підстав для написання цього огляду є 50-та річниця отримання першої голограми й започаткування досліджень з ГАП в Україні, чим зумовлена увага авторів до історичних аспектів проблеми.

2. ВЛАСТИВОСТІ БЕЗОПОРНИХ ГОЛОГРАМ

2.1. Кореляційно-оптична модель відновлення фантомних зображень

Ван Хірдемом було введено поняття тонких [1] та об'ємних [2] голограм фантомних зображень (у вітчизняній термінології – безопорних голограм [4]) й теоретично досліджено властивості цих двох суттєво відмінних версій ГАП у рамках лінійної теорії голографії, що передбачає пропорційність експозиційно залежної частини амплітудного пропускання (для тонких голограм) або амплітудного відгуку (для об'ємних голограм), T_E , до експозиції, $E = tI$, t та I – час експонування й інтенсивність; I , E і T_E – функції просторових координат. У безопорній голографії $I = |G|^2$, де

$$G = \sum_{q=1}^N \alpha_q \exp \left[i(\omega t - kr_q + \phi_{0q}) \right] \equiv \sum_{q=1}^N \alpha_q$$

– об'єктне поле, що представляється як суперпозиція парціальних хвиль від N квазіточкових взаємно когерентних вторинних джерел (реальних оптичних ретрансляторів), ансамбль яких зіставляється з граничним полем об'єкта, ω – циклічна частота випромінювання, $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число, r_q й ϕ_{0q} , відповідно, – відстань від біжучої точки у площині реєстрації до q -го ретранслятора й вібраційна фаза цього ретранслятора.

Цікаво, ретроспективно, наголосити на наступному:

$$T_a = T_0 + T_E = T_0 + T_1 \sum_{q=1}^N \alpha_q \sum_{p=1}^N \alpha_p^* = T_0 + T_1 \left(\sum_{q=p=1}^N |\alpha_q|^2 + \sum_{q \neq p=1}^N \alpha_q \alpha_p^* \right), \quad (1)$$

де T_0 – початкове пропускання неекспонованого реєструючого середовища, а доданок з T_1 описує експозиційно залежну частину амплітудного пропускання; при цьому перша сума у дужках описує середню інтенсивність об'єктного поля у площині реєстрації (як у відсутності інтерференції/когерентності між ретрансляторами), а друга

(i) історично принцип голографії вперше було висунуто саме як безопорна голографія (хоча й в іншій термінології) Мечиславом Вольфке у 1920 у рамках концепції роздільної здатності у рентгенівській мікроскопії [5] (див. важливий коментар Шушуріна [6], з яким погодився Денніс Габор, вже отримавши Нобелівську премію);

(ii) концепція асоціативного відновлення фантомних зображень на основі тонкої безопорної голограми тривалий час піддавалась обструкції [7] на тій підставі, що тонка голограма не володіє кутвою селективністю, яка лежить в основі асоціативних властивостей об'ємних (3D) голограм [2], – навіть не зважаючи на вельми переконливі експериментальні докази протилежного [8 - 14];

(iii) симптоматично, що після фундаментальних монографій Струока [12] й Кольєра, Беркхардта і Ліна [14], де проблема ГАП є однією з найдетальніше обговорюваних, ця тематика практично зникає у наступних книжках з оптичної голографії. Так, у підручнику з голографії під редакцією Колфілда [15] проблема ГАП коротко обговорюється лише у Додатку, написаному Ю. М. Денисюком для російського видання [7]. Слід гадати, що це було пов'язане із доволі низькою якістю асоціативних реконструкцій, отримуваних на той час. Проте, варто зазначити, що перші відновлені Габором голографічні зображення також були вкрай недосконалими [16, 17], див. також [12, 14, 18]. Тим не менш, подальший прогрес був дійсно вражаючим.

Концепція безопорної голографії полягає у наступному. У рамках лінійного наближення теорії голографії [14], амплітудне пропускання тонкої безопорної голограми задається у вигляді:

подвійна сума відповідає набору $N(N-1)/2$ інтермодуляційних ґраток, записуваних усіма можливими парами ретрансляторів об'єкта.

Опромінімо безопорну голограму з амплітудним пропусканням (1) об'єктним полем:

$$\begin{aligned} \{T_a\} G &= T_0 \sum_{q=1}^N \alpha_q + T_1 \left\{ \sum_{q=1}^N \alpha_q \sum_{p=1}^N \alpha_p^* \right\} \sum_{j=1}^N \alpha_j = \\ &= \left[T_0 + T_1 \left(\sum_{j=p=1}^N |\alpha_j|^2 \right) \right] \sum_{q=1}^N \alpha_q + T_1 \left(\sum_{j \neq p}^N \alpha_p^* \alpha_j \right) \sum_{q=1}^N \alpha_q \equiv (T_0 + T_1 |G|^2) G + T_1 G G^* G. \end{aligned} \quad (2)$$

Перший доданок у правій частині рівняння (2) описує суперпозицію двох полів, а саме, дифракцію нульового порядку й дифракцію першого порядку, що визначає відновлення повного масиву даних кожним з N ретрансляторів об'єкта як "локаль-

ним" квазіточковим опорним джерелом. Другий доданок відповідає згортці збережуваного масиву даних з його автокореляційним образом (в області відновлення зображення, яка пов'язана Фур'є-перетворенням з областю узгодженої фільтрації –

площиною голограми). Остання подвійна згортка описує ореол в околі відновленого зображення, зумовлений протяжністю об'єкта, який виступає у якості опорного джерела по відношенню сам до себе.

2.2. Фотометричні характеристики зображення, відновлюваного за безопорною голограмою

Обговоримо наслідки, що впливають з рівняння (2).

По-перше, знак "+" у рівнянні (2) має різний сенс у трьох випадках: амплітудної негативної, амплітудної позитивної та фазової безопорних голограм. Зауважимо, що у традиційній позаосевій голографії така відмінність не істотна. Оскільки основне та спряжене зображення відновлюються поза межами зчитуючого пучка, доповнювальні дифракційні пристрої утворюють однакові дифракційні картини (розподіли інтенсивності в області зображення) у відповідності з принципом Бабіне [14]. Натомість, у безопорній голографії два об'єктних поля (нульового й першого порядків дифракції) не розділені за кутом i , як наслідок, інтерферують одне з іншим. Для позитивної амплітудної безопорної голограми такі два поля синфазні; для фазової безопорної голограми вони

$$\{T_a\} A = T_0 A - T_1 |A|^2 G - T_1 AB * G \equiv (T_0 - T_1 |A|^2) A - T_1 |A|^2 B - T_1 AB * G. \quad (4)$$

З рівняння (4) можна бачити, що *повне* дифракційне зображення (сформоване полем $(-T_1 |A|^2) G$) відновлюється *частинною* запам'ятованого масиву. Зауважимо, це зображення має складну структуру. Так, фантомне зображення відсутньої частини, поле $(-T_1 |A|^2) B$, має суто дифракційну природу.

Хоча для негативної голограми таке поле є проти-фазним відносно початкового об'єктного поля, воно відновлюється в області геометричної тіні зчитуючого пучка; тому фантомне зображення практично вільне від спотворень й характеризується правильним контрастом. Більш того, по мірі збільшення потужності підансамблю зчитуючих ретрансляторів, M , амплітуда фантомного зображення зростає пропорційно, так що його інтенсивність зростає пропорційно M^2 . Цей ключовий висновок впливає саме з кореляційно-оптичної моделі відновлення фантомних зображень, обґрунтованій у роботах [13, 19].

Зчитування безопорної голограми точковим джерелом призводить до відновлення автокореляційного образу збережуваного масиву даних, а не звичайного (у загальноприйнятому сенсі) зображення, у якому відтворюється початковий просторовий розподіл інтенсивності. Детальний аналіз дифракції на наборі $N(N-1)/2$ інтермодуляцій-

складаються "у квадратурі" (з фазовим зсувом $\pi/2$). Але у найбільш поширеному випадку *негативної* амплітудної безопорної голограми два поля, що суперпонує, є протифазними, що відображається знаком перед T_1 , так що рівняння (2) представляється у формі:

$$\{T_a\} G = (T_0 - T_1 |G|^2) G - T_1 GG * G. \quad (3)$$

Нехтуючи останнім доданком у рівнянні (3), що описує просторово розподілений ореол (див. обговорення нижче, підрозділ 2.3), можна бачити, що при використанні негативної безопорної голограми має місце принаймні часткова інтерференційна компенсація (послаблення) основного зображення внаслідок протифазності двох полів, що суперпонує.

По-друге, об'єктне поле може бути довільним чином розділеним на дві частини, $G = A + B$. Безопорна голограма цього поля може зчитуватись будь-яким фрагментом запам'ятованого масиву даних, наприклад полем A , утвореним $M < N$ ретрансляторами об'єкта. Це саме i є режимом асоціативного відновлення. У цьому випадку, замість рівняння (3), отримуємо:

них ґраток, асоційованих з амплітудним пропусканням безопорної голограми, показує, що реконструйований автокореляційний образ *містить* основне зображення об'єкта, яке, проте, не дискримінується з набору N 'прямих' та N 'інвертованих' зсунутих зображень, але співпадає за локалізацією та фазою з об'єктом, якщо (i лише якщо) геометричні та хвильові умови відновлення у точності відтворюють такі умови на стадії реєстрації. Дана вимога у реальності є дійсно дуже суворою: нею передбачається прецизійне відтворення усіх початкових умов, включаючи використання початкового дифузора для опромінення збережуваної картини, а також умови опромінення цього дифузора. Іншими словами, для здійснення асоціативного відновлення інформації слід вимагати (i) точного відтворення граничного поля об'єкта (або його частини) й (ii) точного узгодження амплітудного пропускання голограми зі зчитуючим об'єктним полем (на практиці – узгодження зчитуючого спекл-поля із зареєстрованою спекл-структурою).

При виконанні зазначених умов реалізується наступний сценарій дискримінації фантомного зображення з шуму:

- кожен з M зчитуючих ретрансляторів відновлює автокореляційний образ об'єкта, центрований на даному ретрансляторі;

- основні зображення, що входять до кожного з M відновлених автокореляційних образів, *співпадаючи за локалізацією та фазою*, підсилюють одне одного внаслідок конструктивної інтерференції;
- при цьому, інтенсивність фантомного зображення зростає $\sim M^2$, повна інтенсивність реконструкції (набору M зсунутих автокореляцій) зростає $\sim M$. Це означає, що у відповідності із законом збереження енергії інтенсивність ореолу, що асоціюється з останнім доданком у рівнянні (4), має зростати навіть повільніше, ніж M . Більш того, починаючи з деякого значення M , має спадати не лише відносна, але й абсолютна потужність ореолу.

У відповідності з викладеною моделлю, кореляційне відновлення фантомного зображення [8] має дискримінаційний характер [13], а саме – реалізується внаслідок перерозподілу енергії випромінювання, дифрагованого безопорною голограмою, між шумом та фантомним зображенням на користь зображення. Звідси випливає, що при не надто малих статистичних вибірках зчитуючих ретрансляторів (відношенні M/N) якість фантомного зображення може бути доволі високою, всупереч результатам піонерських експериментів [8 - 14].

Продовжимо аналіз рівняння (4). У той час, як інтенсивність фантомного зображення відсутньої частини збереженої картини завжди зростає при зростанні відношення $|A|^2/|G|^2 = M/N$, інтенсивність зображення зчитуючого фрагменту *знижується* внаслідок деструктивної інтерференції, як видно з першого доданку у правій частині рівняння (4). Це означає, що у загальному випадку розподіл інтенсивності по полю реконструкції порушується, з границею між фантомним зображенням та зображенням зчитуючого фрагменту. Дисбаланс яскравостей між двома частинами повного зображення зникає лише у вельми специфічному випадку негативної голограми, за умови

$$T_0 - T_1 |A|^2 = T_1 |A|^2, \quad (5)$$

тобто, коли амплітудні коефіцієнти при полях A і B урівнюються між собою для деякого значення $|A|^2$ (або M). Заслугує на увагу той, здавалось би, парадоксальний висновок (який, проте, підтверджується експериментом), що подальше збільшення $|A|^2$ (або M) призводить до інверсії яскравостей, тобто яскравість фантомного зображення ("забутої" частини зареєстрованого сигналу) починає перевищувати яскравість (комбінованого) зображення зчитуючого ("пригадуючого") фрагменту: "спогад" стає яскравішим, за причину, яка його викликала, так званий "ефект концентрації уваги". Цей доволі несподіваний результат ілюструється на рис. 1. Блоковані непрозорим екраном верхні

частини об'єкта показано на усіх трьох фрагментах; центральний фрагмент відповідає спеціальному випадку формування фантомного зображення з правильною передачею просторового розподілу яскравостей у відповідності з рівнянням (5).



(a) (b) (c)

Рис. 1. Розподіли яскравостей по реконструкції негативної безопорної голограми: фантомні зображення (верхні частини фрагментів) можуть характеризуватись нижчою (а) або вищою (інверсія яскравостей) інтенсивністю (с), ніж зображення зчитуючої частини об'єкта; правильний розподіл інтенсивності (b) – виключення

Зрозуміло, що ефект інверсії яскравостей в асоціативному відгуку безопорної голограми застосовний для детектування малих змін у запам'ятованій об'єктній сцені. Дійсно, при зменшенні області змін (отже, і ступеня розузгодженості зчитуючого поля зі структурою безопорної голограми) інверсія яскравостей стає більш виразною, у відповідності з рівнянням (4), так що детектування малих змін може бути високоефективним і надійним. Неважко бачити, що граничний випадок даного результату зводиться до класичної узгодженої фільтрації за Вандер Люгтом [20], де 'об'єктна сцена = об'єкт + відокремлене точкове опорне джерело', а яскраве і чітке відновлене зображення опорного джерела (точки) слугує кореляційним сигналом розпізнавання запам'ятованого символу або образу. Відмінність же обговорюваного нами випадку безопорної голограми від узгодженої фільтрації Вандер Люгта полягає у суттєво відмінній меті: візуалізація й локалізація в об'єктній сцені малих змін, а не лише детектування й ідентифікація запам'ятованого сигналу.

2.3. Якісні характеристики фантомних зображень

Розглянемо тепер останній доданок у середній та правій частинах рівняння (2).

Зауважимо, по-перше, що даний доданок, що асоціюється з ореолом декореляції між зареєстрованою картиною та її спотвореною/частковою версією, *не може бути обчисленим безпосередньо*. Беручи до уваги застосований вище закон збереження енергії, шум слід обчислювати *лише як різ-*

ницю між повною енергією випромінювання, дифрагованого безпорною голограмою при зчитуванні її M ретрансляторами об'єкта, та енергією, яка йде на формування безпосередньо (когерентно утвореного) фантомного зображення. А саме, $I_{halo} = I_{total} - I_{image}$, тобто

$$I_{halo} = MN(N-1) - M^2(N-1) \rightarrow 0,$$

при $M \rightarrow N$. (6)

При записі рівняння (6) береться до уваги, що кожен з M ретрансляторів об'єкта відновлює зображення решти $N-1$ його ретрансляторів. Звідси випливає, що ореол декореляції в асоціативному відгуку безпорної голограми (фантомному зображенні) має *залишковий* характер, так що відношення сигналу до шуму прямує до нескінченості, коли M наближається до N . Цей висновок – ключовий для обґрунтування кореляційно-оптичного підходу до проблеми голографічної асоціативної пам'яті. Він означає, що при не надто малих вибірках зчитуючих ретрансляторів якість фантомного зображення може бути досить високою (рис. 1).

По-друге, урахування дифракції парціальних зчитуючих хвиль на повному наборі інтермодуляційних ґраток (як 'своїх', тобто записаних за участю даного зчитуючого ретранслятора, так і 'чужих', записаних іншими парами ретрансляторів об'єкта) показує сильну неоднорідність просторового розподілу шумових максимумів, так що левова доля ореолу знаходиться, як правило, поза відновлюваним зображенням й, отже, може бути відфільтрованою, не впливаючи на якість зображення. Простий, але показовий приклад, що ілюструється рис. 2, пояснюється нижче.

Нехай безпорна голограма записується полем об'єкта, що складається з чотирьох точок (верхній фрагмент). При зчитуванні половиною об'єкта (точками 3 і 4) безпорна голограма, а саме набір шести інтермодуляційних ґраток, відновлює фантомне зображення точок 1 і 2 та ореол декореляції, мала частина якого припадає безпосередньо на зображення (нижній фрагмент). Слід зауважити, що мають місце випадкові накладання деяких шумових максимумів, відновлених двома зчитуючими ретрансляторами. Проте, перебуваючи у випадкових фазових співвідношеннях (на відміну від точок фантомного зображення, які є строго синфазними за означенням), такі шумові максимуми додаються у відповідності до правила Релея, тобто по інтенсивностях, так що інтенсивність цих точок ореолу зростає зі збільшенням M у відповідності до рівняння (6).

Можна показати, що у середньому, для великих значень N і M , інтенсивність шуму, що безпосередньо накладається на зображення двовимірного збережуваного сигналу, складає

$$I_{noise} \approx \frac{4}{9} I_{halo}.$$

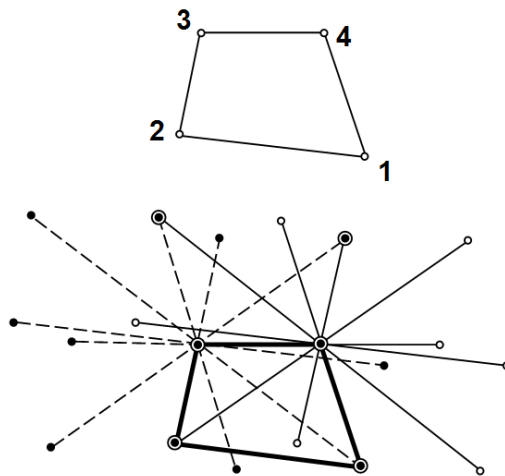


Рис. 2. Просторовий розподіл ореола в околі асоціативного відгуку безпорної голограми від 4-точкового об'єкта, де враховано повний набір інтермодуляційних ґраток. При зчитуванні безпорної голограми половиною об'єкта (точки 3 і 4) значна частина ореола розподілена за межами фантомного зображення (точки 1 і 2)

При цьому, якість зображення відсутньої частини збережуваного образу навіть перевищує якість зображення його зчитуючої частини, як можна бачити з рис. 2.

Базуючись на викладеній кореляційно-оптичній моделі формування фантомного зображення із використанням тонкої безпорної голограми, отримано результати, показані на рис. 3, які ілюструють якісні характеристики процесу відновлення фантомних зображень у функції відношення $R = M/N$.

Аналіз наведених залежностей призводить до наступного, не очевидного заздалегідь, висновку. Відношення сигналу до шуму в асоціативному відгуку виявляється дуже високим для достатньо потужних вибірок зчитуючих ретрансляторів, зокрема при $M > N/2$, $N \gg 1$, що не є надто актуальним при реалізації повністю оптичної асоціативної пам'яті, коли прагнуть отримати високоякісний відгук саме за обмеженими вибірками. При менших від вказаної вибірках відношення сигналу до шуму виявляється обмеженим знизу *одичним* значенням, дуже зрідка сягаючи значення 10. Даний висновок було неодноразово підтверджено експериментально у кількох незалежних лабораторіях. З іншого ж боку, візуально й навіть інструментально – із використанням квадратичного (або логарифмічного) детектора – оцінювана якість фантомного зображення виявляється несподівано високою! Цей результат потребує спеціального обговорення, до якого й перейдемо.

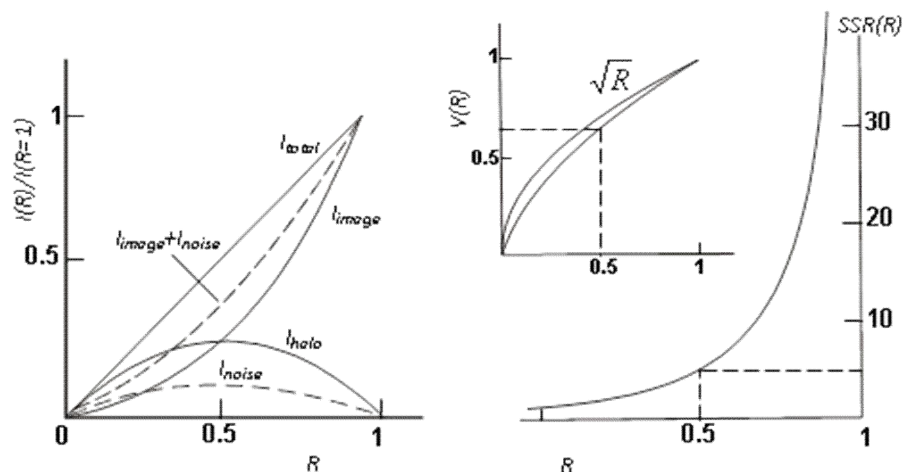


Рис. 3. Якісні характеристики асоціативного відгуку у функції відношення $R = M/N$, обчислені у рамках кореляційно-оптичної моделі: I_{total} – повна інтенсивність реконструкції, I_{image} – інтенсивність асоціативного відгуку, I_{halo} – інтенсивність ореолу в околі асоціативного відгуку, I_{noise} – інтенсивність шуму, що безпосередньо накладається на асоціативний відгук; V – контраст асоціативного відгуку, SSR – відношення сигналу до бокової пелюстки (локального шумового максимуму).

Як можна бачити з рис. 3, інтенсивність повного ореолу й інтенсивність шуму (частини ореолу, безпосередньо накладеного на зображення, яка не може бути відфільтрованою із використанням непрозорого екрану) зростає зі збільшенням відношення R набагато повільніше, аніж інтенсивність асоціативного відгуку. Ключовим пунктом є те, що не лише відносна значення інтенсивності шуму, але й абсолютна інтенсивність ореолу знижується, починаючи з деякого значення відношення R . Цей результат підтверджує висновок, що впливає з рівняння (6): відношення сигналу до шуму, $SNR \rightarrow \infty$ при $M \rightarrow N$. (Зауважимо, що останнє твердження не є антифізичним, оскільки нескінченне значення відношення сигналу до шуму, строго кажучи, є не фізичною, а лише оціночною величиною, і свідчить саме про відсутність шуму; окрім того, ця величина не є об'єктивною, оскільки залежить від способу її експериментального визначення [15]).

Важливим є те, що при зменшенні відношення R інтенсивність асоціативного відгуку знижується як R^2 , тоді як видність (контраст) V в асоціативному відгуку – лише як $R^{1/2}$, так що $I/V \sim R^4$. Це – дуже сильне співвідношення, яке показує, що зростання шуму при спадаючому відношенні R не є обмежуючим фактором при реалізації голографічної асоціативної пам'яті, оскільки інтенсивність відгуку спадає значно швидше, ніж його якість. Цей висновок має пряме відношення до пояснення сприйняття образів людиною. Виходячи з базових положень 'машинного бачення', можна дійти висновку, що людське око не є до-

сконалим вимірювальним пристроєм у тому сенсі, що око (як і зоровий механізм у цілому) не оцінює кількісно відношення сигналу до шуму, а виявляється більш чутливим до контрасту спостережуваної картини. При цьому, саме контраст виявляється у наборі головних константних величин людського сприйняття (й не лише візуального) [21]. З огляду на цю обставину, асоціативний відгук, формально розцінюваний як низькоякісний у термінах відношення сигналу до шуму, може виявитись цілком прийнятним для практичних застосувань повністю оптичної асоціативної пам'яті.

Представимо ключове експериментальне підтвердження чинності кореляційно-оптичної моделі формування фантомного зображення безпорною голограмою, а саме експериментально отриману залежність V від \sqrt{R} . Як можна бачити з рис. 4, викладена нами модель надійно підтверджується, незважаючи навіть на те, що у наведеному розгляді нехтуються деякі важливі фактори, такі як світлорозсіяння у реєструючому середовищі й шуми, зумовлені нелінійністю реєстрації.

Останній із зазначених факторів заслуговує на особливу увагу, оскільки безпорна голограма, за означенням, є записом спекл-картини, яка характеризується одиничним контрастом [14] і, як наслідок, невідворотним виходом за межі наближено лінійної ділянки $T_a - E$ залежності, яка неявно приймалась у попередньому розгляді. Проте, навіть беручи до уваги зазначені обмеження, в експерименті надійно підтверджується основна залежність: $V \sim \sqrt{R}$.

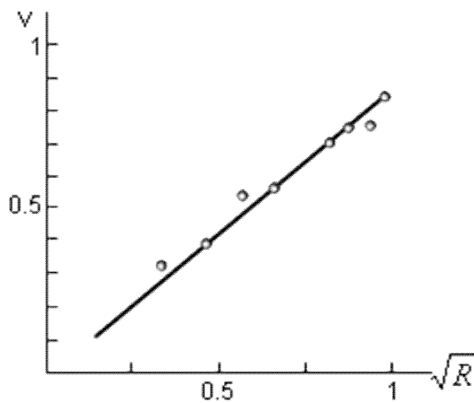


Рис. 4. Експериментально отримана залежність $V(\sqrt{R})$, що підтверджує головний з результатів, представлених на рис. 3. V – контраст асоціативного відгуку, R – вибірка зчитуючих ретрансляторів (відношення M/N)

2.4. Обмеження методу формування зображень безопорними голограмами

На закінчення цього розділу обговоримо інше обмеження гнучкості методу реалізації голографічної пам'яті на основі безопорних голограм. Всупереч оптимістичним раннім передбаченням [8], асоціативне відновлення повного збережаного образу за його неповною версією можливе, лише якщо усі геометричні та хвильові умови запису точно (а саме, із інтерференційною точністю) відтворюються на стадії реконструкції. Це передбачає використання того самого набору неоднорідностей (як поверхневих, так і об'ємних), який представляє об'єкт, ту саму локалізацію об'єкта відносно записаної ним безопорної голограми, а також умови опромінення. Дійсно, безопорна голограма запам'ятовує не об'єдну розподілу інтенсивності по об'єкту (як у звичайній фотографії), а єдину стаціонарну реалізацію ансамблю амплітудно-фазового розподілу об'єктного поля у площині реєстрації,

$$\begin{aligned} \{T_a\} \tilde{G} &= T_0 \sum_{q=1}^N \alpha_q \exp(i\delta_q) + T_1 \left\{ \sum_{q=1}^N \alpha_q \sum_{p=1}^N \alpha_p^* \right\} \sum_{j=1}^N \alpha_j \exp(i\delta_j) = \\ &= \left[T_0 + T_1 \left(\sum_{j=p=1}^N |\alpha_j|^2 \exp(i\delta_j) \right) \right] \sum_{q=1}^N \alpha_q + T_1 \left(\sum_{j \neq p}^N \alpha_p^* \alpha_j \exp(i\delta_j) \right) \sum_{q=1}^N \alpha_q. \end{aligned} \quad (7)$$

Рівняння (7) суттєво відрізняється від рівняння (2), яке описує когерентну (більш того, синфазну) суперпозицію N парціальних основних зображень збережаного образу, що призводить до дискримінації цього зображення з ореолу. Натомість, рівняння (7) описує когерентну суперпозицію розфазованих (практично рівномірно, в інтервалі від 0 до 2π) N парціальних основних зображень згідно виразу

яка цілком однозначно визначається амплітудно-фазовою структурою граничного поля об'єкта. Ансамбль реалізацій відповідає усім можливим просторовим розподілам, асоційованим з (нескінченним) набором об'єктів з однаковою макроформою й однаковою статистикою неоднорідностей, тобто усім об'єктам, що відносяться до певного визначеного класу. Проте, лише єдина запам'ятована реалізація, втілена як відповідна спекл-картина, розпізнається безопорною голограмою, приводячи до відновлення асоціативного відгуку. Усі інші реалізації розподілів, асоційовані з тим самим класом об'єктів, сприймаються безопорною голограмою як "чужі" й фантомне зображення не відновлюється. Іншими словами, безопорна голограма функціонує у режимі узгодженої фільтрації [20] й розпізнає об'єкт у сенсі ідентифікації, а не у сенсі групової класифікації.

Проілюструємо останнє твердження для випадку, коли безопорна голограма зчитується об'єктом, для якого вона була записана, зі строгим відтворенням геометричних умов реєстрації, але з дещо зсунутим точковим джерелом, використаним для опромінення об'єкта. Такий зсув джерела зумовлює випадкові зміни початкового фазового розподілу у граничному полі об'єкта, що призводить до випадкових фазових зсувів парціальних хвиль від неоднорідностей об'єкта, що вволікаються у процес відновлення. Навіть мале зміщення опромінюючого джерела на практиці призводить до випадкових фазових затримок парціальних хвиль $\delta_q \in [0; 2\pi]$, $1 \leq q \leq N$, $N \gg 1$. При цьому,

безопорна голограма, записана полем $G = \sum_{q=1}^N \alpha_q$,

зчитується полем $\tilde{G} = \sum_{q=1}^N \alpha_q \exp(i\delta_q)$ (або його неповною версією). Тому замість рівняння (2) отримуємо:

$$\left[T_1 \left(\sum_{j=p=1}^N |\alpha_j|^2 \exp(i\delta_j) \right) \right] \sum_{q=1}^N \alpha_q \equiv (T_1 G \tilde{G}^*) G, \quad (8)$$

що відповідає подвійній згортці, не скомпенсованій до дійсного амплітудного множника. Фізично рівняння (8) відповідає N зсунутим автокореляційним образам збережаного образу, серед яких основне зображення не дискримінується, оскільки множина розфазованих парціальних зображень

подається за інтенсивностями, згідно правилу Релея [22], тобто так само, як і повна реконструкція:

$$I_{tot} = MN(N-1), \quad I_{im} = M(N-1),$$

так що

$$I_{halo} = MN(N-1) - M(N-1) = M(N-1)^2, \quad (9)$$

й $\frac{I_{im}}{I_{halo}} = \frac{1}{N-1} = const \rightarrow 0$ при $N \gg 1$. Іншими

словами, відношення сигналу до шуму не залежить від потужності вибірки зчитуючих ретрансляторів, тому асоціативний відгук не дискримінується з шуму. Проведений розгляд повністю спростовує раннє передбачення [8] стосовно можливості відновлення фантомного зображення з використанням іншого об'єкта, ніж записуючий, 'з тією самою статистикою'.

Вказана особливість процесу асоціативного відновлення є найсильнішим обмеженням гнучкості ГАП як на основі безопорних голограм, так і в новітніх нелінійно-голографічних версіях ГАП, де забезпечуються помилко-коригуючі властивості, і має ту саму природу, що й головне обмеження ефективності розпізнавання образів за методом узгодженої фільтрації Вандер Люгта [20]. Фізичний сенс даного обмеження полягає у розузгодженні (декореляції) фазової структури зміненого зчитуючого поля із зареєстрованим. У наступному розділі буде показано, що дане обмеження ГАП є більш сильним, аніж спотворення просторового розподілу інтенсивності по асоціативно відновленому зображенню, яке може бути подоланим при реалізації схемного або фізичного розв'язку проблеми нелінійної ГАП з правильною яскравісною тонопередачею.

3. ГАП З КОРЕКЦІЄЮ ПОМИЛОК

3.1. Помилко-коригуюча ГАП на основі відбиваючої безопорної голограми

Виходячи з розгляду у розділі 2, можна зробити висновок, що важливий недолік, притаманний стандартному способу відновлення фантомного зображення, полягає у спотворенні просторового розподілу яскравостей, обумовлений накладанням двох полів (нульового та першого дифракційних порядків) у зображенні зчитуючого фрагмента об'єкта. Зрозуміло, що для виключення цього недоліку слід залучити концепцію помилко-коригуючого кодування/декодування, загальноприйняту у теорії інформації. Центральний пункт цієї концепції полягає у тому, що детектування й виправлення помилок передбачає введення, тим чи іншим чином, *надлишковості*. У досліджуваній нами проблемі така надлишковість може бути реалізованою шляхом формування оптичного двійника збережуваного масиву даних – з відповідним подвоєнням кількості записуваних ґраток. При цьому, слід забезпечити просторове (кутове) роз-

несення оптичного двійника об'єкта з самим об'єктом, неповна версія якого використовується для зчитування. Простий та ефективний спосіб реалізації такого підходу [23, 24] базується на схемі відбиваючої голограми Денисюка.

Як відомо, голограма Денисюка отримується при проходженні опорної хвилі (наприклад, від точкового джерела) через прозору голографічну платівку, опромінює об'єкт, й розсіяна об'єктом хвиля падає на ту ж платівку з протилежного боку. Проста модифікація такої схеми представлена на рис. 5. Нехай збережуваний образ (двовимірний масив інформації), що підлягає асоціативному відновленню, виступає у якості *дифузного, протяжного опорного джерела*.

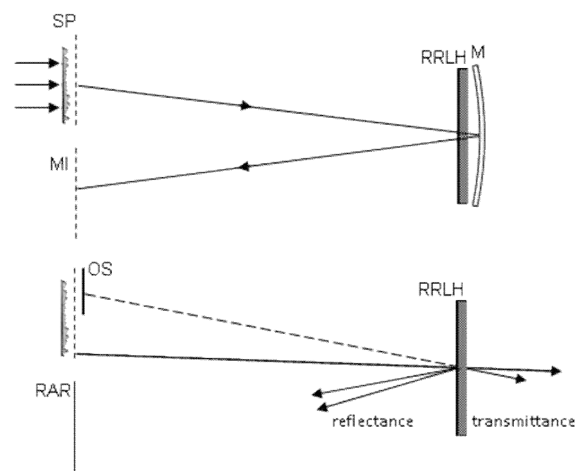


Рис. 5. Схема реалізації помилко-коригуючого асоціативного відновлення на основі відбиваючої безопорної голограми: SP – збережуваний сигнал, опромінюваний через дифузор, RRLH – відбиваюча безопорна голограма, M – дзеркало, MI – дзеркальне зображення, OS – непрозорий екран (на стадії асоціативного відновлення), RAR – відбитий асоціативний відгук

Безпосередньо за фотоплатівкою розташовується дзеркало, наприклад (хоча не обов'язково) сферичне, як на рис. 5. Дзеркало, разом із сформованим ним зображенням джерела, відіграє роль об'єкта. Проявлена голограма зчитується у відсутності дзеркала повним запам'ятованим у такий спосіб сигналом або його неповною версією у режимі узгодженої фільтрації, тобто при відтворенні геометричних та хвильових умов запису. Можна бачити, що така голограма має два виходи – на пропускання та на відбивання. На пропусканні спостерігається те саме, що і у випадку звичайної безопорної голограми: слабке фантомне зображення відсутньої частини запам'ятованого сигналу та яскраве зображення зчитуючого фрагменту (рис. 6). У той же час, дзеркальний двійник збереженої картини, який відновлюється на відбиванні, будучи розділеним зі зчитуючою хвилею, ви-

являється помилко-скорегованим, вільним від спостережуваної границі між двома частинами реконструкції й від дисбалансу просторового розподілу яскравостей, як видно з рис. 6. Також, з останньої реконструкції можна бачити, що дзеркальний асоціативний відгук не є цілком однорідним: контраст виявляється вищим у частині зображення, що відповідає відсутній ("забутій") частині запам'ятованої картини, у відповідності з розглядом у Розділі 2.

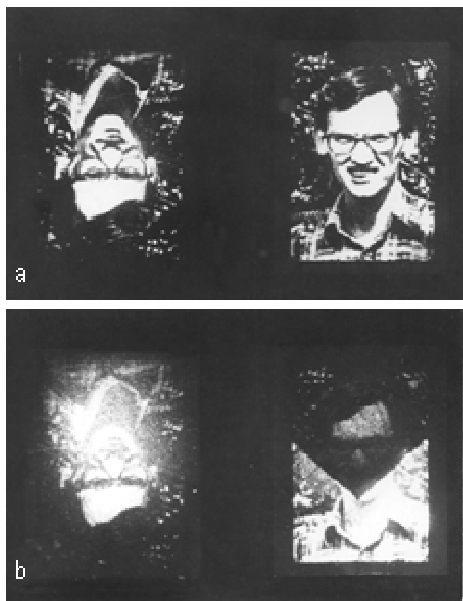


Рис. 6. Асоціативні відгуки зі скоректованими помилками, відновлювані за відбиваючою безопорною голограмою, зареєстрованою й зчитуваною у схемі рис. 5: зчитування повним полем об'єкта (а) та частиною об'єкта (б); справа – на пропускання, зліва – на відбивання. Див. просторовий розподіл шуму у модельній побудові рис. 2

Обговоримо коротко основні формули, що описують даний алгоритм асоціативного відновлення інформації. Амплітудний відгук голограми представляється у наближенні лінійної теорії голографії наступним чином:

$$T_a = T_0 + T_1 |G + Q|^2, \quad (10)$$

де $G = \sum_{q=1}^N \alpha_q$ й $Q = \sum_{p=1}^N \beta_p$ – поле збережуваного образу й поле, асоційоване з його дзеркальним двійником (обидва представляються наборами N парціальних хвиль).

Розгляд механізму відновлення асоціативного відгуку на пропускання буквально співпадає з викладеним у розділі 2. Але тепер вихідні $N(N-1)/2$ пропускаючі інтермодуляційні ґратки доповнюються набором N^2 відбиваючих ґраток, сформованих усіма можливими парами ретрансляторів збережуваного сигналу та ретрансляторами

його дзеркального двійника. Актуальний парціальний оператор такої голограми, що відповідає за відновлення відбитого асоціативного відгуку, має вигляд: $T_1 G^* Q$, отже результат зчитування описується наступним чином:

$$\{T_1 G^* Q\} G = (T_1 |G|^2) Q, \quad (11.1)$$

або, при зчитуванні неповною версією збережуваного образу – полем A – у формі:

$$\{T_1 (A^* + B^*) Q\} A = (T_1 |A|^2) Q + T_1 AB^* Q. \quad (11.2)$$

Перший доданок у правій частині рівняння (11.2) описує повний відбитий асоціативний відгук, вільний від впливу доданку, пов'язаного з T_0 ; другий (шумовий) доданок має залишкову природу, як і у попередньому розгляді.

3.2. ГАП з корекцією помилок на основі резонаторних архітектур

Інший варіант *схемного* розв'язання проблеми помилко-коригуючого асоціативного відновлення збережуваного масиву даних, підсумований в огляді [25], базується на так званих резонаторних архітектурах ГАП, у яких використовується оптичний зворотний зв'язок й нелінійності у кореляційній області. Даний підхід ґрунтується на концепції Вандер Люгта когерентно-оптичного розпізнавання образів/символів шляхом узгодженої фільтрації та можливостей, що надаються методом обертання хвильового фронту (фазового спряження) із використанням фоторефрактивних кристалів, а саме методом виродженого чотирьоххвильового змішування [26].

У рамках даного підходу, записується звичайна позаосева голограма об'єкта з точковим опорним джерелом. Оброблена голограма зчитується об'єктом або його частиною (при точному відтворенні геометричних та хвильових умов запису) й відновлює фантомне зображення опорного джерела, а саме, відгук розпізнавання Вандер Люгта. Далі, відновлена опорна хвиля обертається (фазове спряження) й зчитує ту саму голограму у зворотному ході променів, у результаті чого відновлюється повне зображення збережуваного масиву даних, як показано на рис. 7. Таке зображення (основне або спряжене) може бути виведеним у площину спостереження із використанням світлоподільника й, таким чином, відокремленим від зчитуючого пучка й, отже, виправленим на помилки.

Найпростіший варіант реалізації цього алгоритму – розташування плоского дзеркала у площині відновлення (дійсного) зображення опорного джерела. Проте, внаслідок низької дифракційної ефективності голограми, повторне зчитування її фазооберненою опорною хвилею досягається енергетична ефективність порядку 10^{-3} .

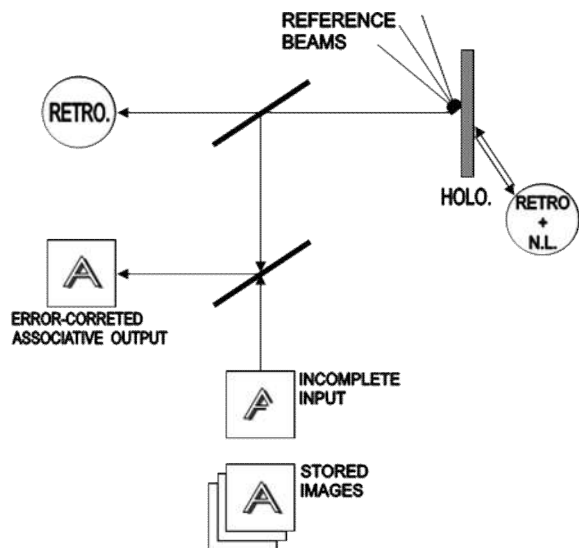


Рис. 7. Принцип реалізації резонаторної архітектури для здійснення помилко-коригуючої ГАП з нелінійністю в кореляційній області, пов'язаною з концепціями самоорганізації та зворотного [25]

Такі енергетичні втрати, навіть за досконалого концептуального обґрунтування обговорюваного методу, знецінюють його практичну значущість. Тому у більш ефективних реалізаціях даного алгоритму звичайне дзеркало замінювалось фоторефрактивним фазообертаючим дзеркалом, яке забезпечує як обертання хвильового фронту, так і підсилення опорної хвилі. Авжеж, здійснення такої операції передбачає значне ускладнення оптичної схеми, оскільки функціонування фазоспрямуючого дзеркала у кореляційній області можливе лише при використанні двох потужних, строго контранарямлених пучків помпування. Ореол в околі відновленого зображення опорного джерела, зумовлений (i) декореляцією зчитуваної й збереженої картин; (ii) нелінійністю реєстрації; (iii) шумами розсіяння, – можуть бути мінімізованими просторовою фільтрацією (введенням порогу) у кореляційній області із використанням непрозорого екрану перед фазообертаючим дзеркалом. Така фільтрація розглядається [25] як *нелінійність у кореляційній області*.

Даний алгоритм асоціативного відновлення представляється наступним ланцюгом перетворень:

$$G \rightarrow \Omega \xrightarrow{PC+NL} \Omega^* \rightarrow G^*$$

або

$$A \rightarrow \Omega \xrightarrow{PC+NL} \Omega^* \rightarrow G^*, \quad (12)$$

де PC та NL позначають, відповідно, фазове спряження й нелінійність (у кореляційній області); Ω – опорна хвиля.

Додаткове підвищення якості вихідного асоціативного відгуку може бути досягнуте при реалізації 'резонаторної архітектури' ГАП [25] й ітераційного алгоритму відновлення. Для цього вико-

ристовується друге дзеркало фазового спряження в області відновленого асоціативного відгуку (відповідно, з подальшим суттєвим ускладненням схеми й енергетичними втратами, беручи до уваги, що *усі* пучки, які вволікаються у процес асоціативного відновлення, мають бути отриманими від одного джерела). При цьому, покращений (помилко-скорегований) асоціативний відгук знову потрапляє у резонатор, що призводить до чергового покращення зображення і т.д. Зауважимо, що результати, наведені у фундаментальному огляді [25], показують, що збіжність такого ітераційного алгоритму дуже висока, що визначає доволі відносну ефективність алгоритму: кілька десятків ітерацій забезпечують приблизно ту саму якість результуючого асоціативного відгуку (оцінювану за відношенням сигналу до шуму, див. розділ 2), як і перші три ітерації.

4. ГАП З НЕЛІНІЙНІСТЮ В ОБЛАСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ

Високоєфективна ГАП із корекцією помилок може бути реалізованою не лише через *схемні* рішення, обговорені у Розділі 3, але також через *фізичне* рішення, запропоноване у статті [27]. Даний підхід до проблеми помилко-коригуючої ГАП базується на природній нелінійності голографічного запису, яка в абсолютній більшості випадків розглядається (у рамках габорівської лінійної теорії голографії) як джерело шумів. Цей підхід веде до заздалегідь (на час опублікування роботи [27]) не очевидної концепції оптичного фазового спряження (обертання хвильового фронту) на основі голографічного методу, у якому поєднуються властивості динаміко-голографічного чотиреххвильового виродженого змішування (4WDM) та самообертання хвильового фронту на основі Бріллюєнівського розсіяння [28, 29]. А саме, голограма, записана з позаосевою опорною хвилею або зі стоячою опорною хвилею [30, 31], зчитується об'єктивним полем (або, в асоціативному режимі, – частиною об'єкта). Найпростіший випадок [27] – запис нелінійної позаосевої голограми. Умови нелінійного голографічного запису добре відомі й надзвичайно просто реалізуються на практиці [14]: $|\Omega|^2 \approx \langle |G|^2 \rangle$

(у сенсі просторового усереднення інтенсивності об'єктної спекл-картини), переекспонування й перепроявлення або здійснення фазового голографічного запису, який є нелінійним за означенням.

Амплітудне пропускання нелінійно зареєстрованої позаосевої голограми представляється як розклад у ряд по степенях експозиції:

$$T_a = \sum_{l=0}^{\infty} T_l (|G + \Omega|^2)^l, \quad (13)$$

де $T_l = c_l t^l$, t – час експонування, c_l – узгоджуючі розмірності коефіцієнти. Компонента розкладу (13) другого порядку містить, поза іншими, дода-

нок $T_2(G^* \Omega)^2$, що відповідає за відновлення реконструкції мінус другого порядку. При зчитуванні нелінійно записаної голограми точковим опорним джерелом отримуємо:

$$\{T_2(G^* \Omega)^2\} \Omega = T_2 \Omega^3 (G^*)^2. \quad (14)$$

Даний результат не представляє особливого інтересу, оскільки Фур'є-перетворення від $(G^*)^2$ визначає інвертовану (комплексно спряжену) автозгортку запам'ятованого сигналу, у вихідний розподіл інтенсивності. Проте, вказаний доданок набуває актуальності при зчитуванні нелінійно зареєстрованої голограми полем запам'ятованого образу:

$$\{T_2(G^* \Omega)^2\} G = (T_2 |G|^2 \Omega^2) G^*, \quad (15.1)$$

або його частковою версією:

$$\{T_2(G^* \Omega)^2\} A = (T_2 |A|^2 \Omega^2) G^* + T_2 B^* A G^* \Omega^2. \quad (15.2)$$

Рівняння (15) представляють центральний результат нашого розгляду. А саме, вони описують процес самозображення збережуваного образу, $G \rightarrow G^*$ або $A \rightarrow G^*$, в останньому випадку – в асоціативному режимі. Дифракція зчитуючої хвилі від збережуваного образу або його фрагмента у мінус другий порядок, що призводить до відновлення спряженого асоціативного відгуку, відбувається на наборі N^2 комбінаційних (а саме, сумарних) псевдо-граток [32], які виникають в амплітудному пропусканні тонкої голограми завдяки нелінійності реєстрації. Дійсно, праві сторони рівнянь (15) співпадають, з точністю до тривіальних дійсних множників, з результатом відновлення спряженого зображення за лінійно зареєстрованою голограмою, зчитуваною опорною хвилею:

$$\{T_1 G^* \Omega\} \Omega = (T_1 \Omega^2) G^*. \quad (16)$$

Особливо наголосимо, що у випадку тонкої голограми 'каскадний' механізм спряженого самозображення за схемою $G \rightarrow \Omega \rightarrow G^*$, згідно якої об'єктна хвиля (або її частина) відновлює опорну, яка у свою чергу зчитує ту саму голограму із відновленням повного спряженого зображення, категорично виключається через неможливість кратних актів дифракції. Спряжений асоціативний відгук відновлюється безпосередньо, в одному акті дифракції на визначеному наборі комбінаційних граток.

Подібність рівнянь (15) до рівнянь (2) і (4) дозволяє використати результати виконаного вище розгляду для обговорюваного випадку. Зауважимо, що розвиток моделі ГАП, яка була започаткована у статті [13], було остаточно завершено саме у

зв'язку зі становленням концепції спряженого самозображення у відповідності до рівнянь (15).

Оскільки спряжене зображення відділене від зчитуючої об'єктної хвилі (на подвоєний опорний кут), цей асоціативний відгук виявляється помилко-скорегованим й відтворює початковий розподіл інтенсивності по збережуваному образу, з точністю до залишкового ореолу декореляції, що описується останнім доданком рівняння (15.2). Усі інші компоненти поля, дифрагованого нелінійно зареєстрованою голограмою, дають паразитні (такі, що не відновлюють зображень) реконструкції в інших дифракційних порядках й не впливають на якість спряженого асоціативного відгуку.

На рис. 8 ілюструється експериментальний результат, визначений рівняннями (15), отриманий у розташуванні безлінзової Фур'є-голографії, у якому плоский дифузний об'єкт й точкове опорне джерело розміщуються в одній площині, паралельній площині реєстрації голограми [14].

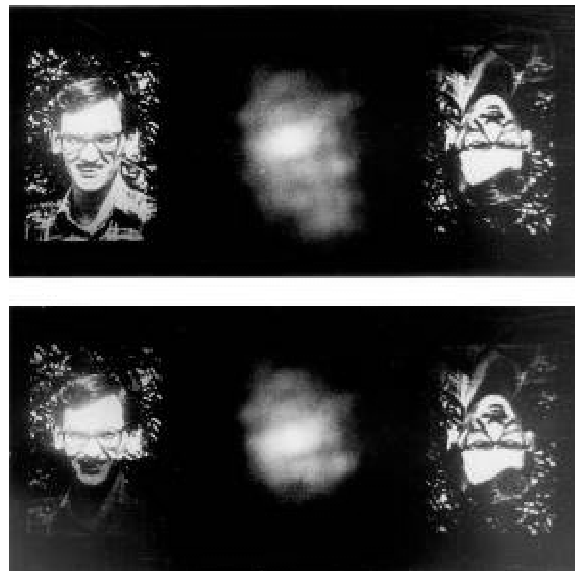


Рис. 8. Помилко-коригуюче асоціативне відновлення на основі фазо-спряжених властивостей тонкої нелінійно зареєстрованої голограми (схема безлінзової Фур'є-голографії)

У такій схемі реконструкції усіх дифракційних порядків лежать у площині зчитуючого джерела, на рис. 8 – у площині об'єкта, – що виключає можливість містифікації як щодо самого унікального ефекту спряженого самозображення, так і щодо якості комплексно спряженого асоціативного відгуку. Можна бачити, що втрата навіть половини збережуваного образу не призводить до спостережуваного зниження якості спряженого асоціативного відгуку. Отже, ГАП на основі природної нелінійності в області фільтрації виявляється надзвичайно ефективною щодо якості зображення – без будь-яких схемних ускладнень порівняно зі звичайною позаосевою голографією.

ВИСНОВКИ

Наприкінці зауважимо, що обстоюваний кореляційно-оптичний підхід до проблеми помилко-коригуючої ГАП із використанням нелінійності в області фільтрації не обмежується випадком, ілюстрованим на рис. 8. Виявляється, що даний результат має далекосяжні наслідки у реалізації оптичного обертання хвильового фронту (фазового спряження) засобами нелінійної статичної голографії, які забезпечують нові можливості здійснення помилко-коригуючої ГАП на основі *об'ємних* голограм (де завдяки Бреґівській кутовій селективності досягається суттєве підвищення якості відновлюваних асоціативних відгуків, особливо при малих вибірках із зберезуваного образу) [33 - 35].

Інше втілення розглянутого підходу – глобальні або вибіркові голографічні гетероасоціації між складними зберезуваними образами, поля яких не інтерферують між собою [36, 37], – що є предметом окремого огляду, будучи концептуально пов'язаними з концепцією ‘голограм другого порядку’ [38], втіленою у дослідженнях [39 - 42] на основі так званого дзеркала подвійного фазового спряження.

Ми розглянули проблему голографічної асоціативної пам'яті у її кореляційно-оптичному аспекті. Ранні дослідження з даної проблеми (Ван Хірден [1, 2], Вандер Люгт [20], Строук [8, 12], Кольер [9 - 11, 14]) базувались головним чином на формальному Фур'є-аналізі процесу асоціативного відновлення. Кореляційно-оптичний підхід, впроваджений В. К. Полянським [4, 13, 19], дав можливість дослідити проблему ГАП методами, не притаманними Фур'є-оптиці – такими, що спираються на наочні інтерференційно-дифракційні уявлення. Це сприяло дослідженню таких характеристик процесу асоціативного відновлення як розподіл яскравостей по зображенню, особливості просторового розподілу шуму в асоціативному відгуку та його околі, визначити природу шуму й можливостей надійного асоціативного відновлення інформації з корекцією помилок шляхом кутового розділення порядків дифракції. По суті, викладений у цій статті підхід (зокрема, розділи 3 і 4) концептуально близький, хоча й не ідентичний, кроку, здійсненому Лейтом та Упатнієксом порівняно з осевою голографією Габор [14]. При цьому, у представленому нами підході суттєво використовується *неідеальність* (нелінійність) голографічної реєстрації. Багато раніше утаємничених властивостей голографічної асоціативної пам'яті стають якісно й кількісно зрозумілими при залученні кореляційно-оптичного підходу завдяки урахуванню й детальному обчисленню усіх дифракційних ґраток (*міжзв'язків*, у термінології концепції нейронних мереж [25]), що вволакаються у процес асоціативного відновлення. Зауважимо, що поза рамками представленого розгляду залишилися деякі важливі аспекти ГАП, такі як шум, спричинений світло-

розсіянням у реєструючому середовищі, обмеженість динамічного діапазону голографічного запису, можливості підвищення відношення сигналу до шуму, досяжному в об'ємній (3D) голографії (останнє має фундаментальне значення, беручи до уваги результати робіт [2, 14, 35]).

Відновлення асоціативного відгуку прийнятної якості із використанням голографічного методу для практичного застосування в інформаційних технологіях вимагає створення оптичних матеріалів й технологій, які були б достатньо гнучкими одночасно як для архівного (постійного) збереження інформації, так і для оперативної (real-time) обробки даних.

В подальшому планується дослідити реалізованість нелінійної ГАП для вищих дифракційних порядків та порівняти можливості статичних та динамічних голограм.

Ця робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України, проект № 0117U001152.

Література

- [1] P. J. van Heerden, “A new optical method of storing and retrieving information”, *Applied Optics*, 2 (4), pp. 387-392, 1963.
- [2] P. J. van Heerden, “Theory of optical information storage in solids”, *Applied Optics*, 2 (4), pp. 393-400, 1963.
- [3] O. V. Angelsky, P. V. Polyanskii, Ch. V. Felde, “The emerging field of correlation optics”, *Optics and Photonics News*, 23 (4), pp. 25-29, 2012. <http://dx.doi.org/10.1364/OPN.23.4.000025>
- [4] V. V. Aristov, V. L. Broude, L. V. Kovalskii, V. K. Polyanskii, V. B. Timofeev, V. I. Shekhtman, “On holography without reference beam”, *USSR Dokl. Acad. Sci.*, 177 (1), pp. 65-67, 1967.
- [5] M. Wolfke, “Über die Möglichkeit der optischen Abbildung vom Molekulargittern”, *Physikalische Zeitschrift*, 21, 495-497, 1920.
- [6] S. F. Shushurin, “To the history of holography”, *Sov. Usp. Phys. Nauk*, 105, pp. 145-148, 1971.
- [7] Yu. N. Denisyuk, “Some problems and perspectives of holography in 3D media”, in *Handbook of Optical Holography*, Ed by H. J. Caulfield, Academic Press, NY, 1979; Addendum to the Russian Edition, pp. 691-729, 1982.
- [8] G. W. Stroke, R. Restruck, A. Funkhouser, D. Brumm, “Resolution-retrieving compensation of source effects by correlative reconstruction in high-resolution holography”, *Physics Letters*, 18 (3), pp. 274-275, 1965.
- [9] K. S. Pennington, R. J. Collier, “Hologram-generated ghost-image experiments”, *Applied Physics Letters*, 8 (1), pp. 14-16, 1966.
- [10] R. J. Collier, K. S. Pennington, “Ghost imaging by holograms formed in the near field”, *Applied Physics Letters*, 8(2), pp. 44-46, 1966.

- [11] R. J. Collier, "Some current views on holography", *IEEE Spectrum* (July 1966), pp. 67-74, 1966.
- [12] G. W. Stroke, *An Introduction to Coherent Optics and Holography*, Academic Press, NY, 1966.
- [13] L. V. Kovalskii, V. K. Polyanskii, "Investigation of feasibilities of the holographic technique without using a reference beam", *Optics and Spectroscopy*, 28 (2), pp. 338-341, 1970.
- [14] R. J. Collier, C. D. Burckhardt, L. H. Lin, *Optical Holography*, Academic Press, NY, 1971.
- [15] *Handbook of Optical Holography*, Ed by H. J. Caulfield, Academic Press, NY, 1979.
- [16] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefronts: I", *Proc. Roy. Soc. (London)*, A197, 454-487, 1949.
- [17] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefronts: II", *Proc. Phys. Soc. (London)*, B64, 449-469, 1951.
- [18] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th Edition (expanded), Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1999.
- [19] V. K. Polyanskii, S. N. Roslyakov, V. V. Tarnovetskii, "Brightness characteristics of an image reconstructed by referenceless hologram", *Ukrainian Journal of Physics*, 25 (4), pp. 645-648, 1980.
- [20] A. Vander Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering," *IEEE Transaction Information Theory IT-10* (2), pp. 139-145, 1964.
- [21] D. H. Hubel, *Eye, Brain and Vision*, Scientific American Library, A Division of HPHLP, NY, 1988.
- [22] Lord Rayleigh, *The Theory of Sound vol. I*, §42a (London: Macmillan, 1877, 1894) (alternative link: Bibliothèque Nationale de France OR (Cambridge: University Press, reissued 2011, ISBN 978-1-108-03220-9).
- [23] P. V. Polyanskii, "On matched filtering using reflection hologram", *Ukrainian Journal of Physics*, 35 (3), pp. 353-356, 1990.
- [24] V. K. Polyanskii, P. V. Polyanskii, "Holographic associative memories with a true brightness tone rendering", *Optical Engineering*, 34(4), pp. 1079-1087, 1995.
- [25] Yu. Owechko, "Nonlinear holographic associative memories", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 25 (3), pp. 619-634, 1989.
- [26] N. V. Kukhtarev, S. G. Odoulov, "Wavefront conjugation via degenerate four-wave mixing in electro-optics crystals", *Proc. SPIE 0213*, 1980. <https://doi.org/10.1117/12.958389>
- [27] P. V. Polyanskii, "On conjugate imaging in generalized holographic filtering arrangement", *Optics and Spectroscopy*, 65 (2), pp. 345-348, 1988.
- [28] B. Ya. Zel'dovich, N. F. Pilipetsky, V. V. Shkunov, *Principles of Phase Conjugation*, Berlin, Springer Series in Optical Sciences, 42, Berlin, 1985.
- [29] Pochi Yeh, *Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics*, Wiley, NY, 1993.
- [30] P. V. Polyanskii, "Associative memory using static phase-conjugate mirror based on the second-order hologram", *Optics and Spectroscopy*, 84 (2), pp. 346-351, 1998.
- [31] P. V. Polyanskii, "On the limits of existence of the effect of phase conjugation by nonlinear hologram", *Optics and Spectroscopy*, 86 (2), pp. 333-338 (1999).
- [32] J. Upatnieks, C. Leonard, "Efficiency and image contrast of dielectric holograms", *J. Opt. Soc. Amer.*, 60 (3), pp. 297-305, 1970.
- [33] B. Fischer, Sh. Sternklar, Sh. Weiss, "Self Bragg-matched beam steering using the double color pumped photorefractive oscillator", *Applied Physics Letters*, 51 (2), pp. 74-75, 1987.
- [34] Sh. Weiss, M. Segev, Sh. Sternklar, B. Fischer, "Photorefractive dynamic optical interconnects", *Applied Optics*, 27 (16), pp. 3422-3427, 1988.
- [35] B. Fischer, Sh. Sternklar, Sh. Weiss, "Photorefractive oscillators," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 25 (3), pp. 550-569, 1989.
- [36] P. V. Polyanskii, "Moire mechanism of conjugate-image reconstruction in a generalized holographic filter scheme," *Optics and Spectroscopy*, 72 (3), pp. 391-394, 1992.
- [37] P. V. Polyanskii, "Heteroassociative processor of selective action based on a quadric hologram", *Optics and Spectroscopy*, 86 (4), pp. 675-680, 1999.
- [38] H. J. Caulfield, "Holography and information: getting something for nothing with light," *Proc. Intern. Confer. "From Galileo's "occhialino" to optoelectronics"*, World Sc. Publishing, NY, pp. 34-49, 1993.
- [39] A. Yariv, S. Kwong, K. Kyuma, "Demonstration of an all-optical associative holographic memory", *Applied Physics Letters*, 48, pp. 114-1116, 1986.
- [40] E. G. Paek, D. Psaltis, "Optical associative memory using Fourier-transform hologram", *Optical Engineering*, 26, pp. 428-433, 1987.
- [41] D. Z. Anderson, M. C. Rise, "Resonator memories and optical novelty filters", *Optical Engineering*, 26, 434-444 (1987).
- [42] Sh. Weiss, Sh. Sternklar, B. Fischer, "Double phase conjugate mirror: Analysis, demonstrations and applications", *Optics Letters*, 12 (2), pp. 114-116, 1987.

УДК 535.4, 535.8

¹Г. В. Богатырева, ²П. В. Полянский, ²К. В. Фельде, ³Е. В. Зелинский¹Национальний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського», Київ, Україна

²⁾Черновицкий национальный университет имени Ю. Федьковича, Черновцы, Украина

³⁾Люблянський Университет, Любляна, Словения

КОРРЕЛЯЦИОННО ОПТИЧЕСКИЙ ПОХОД К ПРОБЛЕМЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ

Проблема голографической ассоциативной памяти обсуждается в рамках корреляционно-оптического подхода. Анализ моделей безопорной голограммы и нелинейно зарегистрированных внеосевых голограмм, считываемых в ассоциативном режиме, показывает широкий спектр полезных свойств таких голограмм не только для восстановления недостающей части сохраненного массива данных, но и для детектирования малых изменений ("ошибок") в записанной картине, для восстановления полного массива данных с коррекцией ошибок по неполной версии массива, а также для осуществления высокоэффективного гетероассоциативного восстановления на базе неинтерференционного механизма связи парциальных сигналов. Показано, что визуально оцениваемое качество восстановленного ассоциативного отклика может приближаться к качеству изображения, которое достигается в обычной внеосевой голографии.

Ключевые слова: голография, ассоциативная память, фантомное изображение, фазовое сопряжение, голография второго порядка.

¹⁾Halina V. Bogatyryova, ²⁾Peter V. Polyanskii, ²⁾Christina V. Felde, ³⁾Yevhen V. Zelinskyi

¹⁾National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

²⁾Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

³⁾University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia

HOLOGRAPHIC ASSOCIATIVE MEMORY PROBLEM WITHIN CORRELATION-OPTICAL APPROACH

Holographic associative memory problem within correlation-optical approach is discussed. Early investigations of this problem (P. J. van Heerden, A. Vander Lugt, G. W. Stroke, R. J. Collier) based, mainly, on formal Fourier analysis of associative reconstruction process. Correlation-optical approach, implemented by V. K. Polyanskii, enabled to investigate the problem of holographic associative memory via methods unused in Fourier-optics. These methods found on heartfelt interference-diffraction notions. Correlation-optical approach contributed to investigate such characteristics of associative reconstruction process as allocation of brightness along the image, peculiarities of spatial noise allocation in associative response and its vicinity, definition of the noise nature and possibilities of reliable associative reconstruction of information with the errors correction via angle separation of diffraction orders.

Analysis of referenceless hologram model and nonlinear recorded off-axis holograms, reconstructed by associative method, shows wide spectrum of valuable characteristics of these holograms both for reconstruction of conserved data array missing part and for detection of small changes ("errors") at the recorded scene, for reconstruction of total data array with error correction by partial array version, and for realization of highly efficient hetero-associative reconstruction based on noninterference mechanism of partial response connection. These characteristics of holographic associative memory (which earlier were ignored) become qualitatively and quantitatively comprehensible by implementation of correlation-optical approach due to registration and detail estimation of all diffraction gratings (interconnections in the terms of neural networks) that acts in the associative reconstruction process.

Shown, that reconstructed associative response quality, estimated by sight, can approximate of general off-axis holography image quality.

Demonstrated, that correlation-optical approach to the problem of error-correction holographic associative memory by using nonlinearity in the filtration area, has extensive results for realization of optical wave front conjugation (phase conjugation) via nonlinear static holography methods. These methods provide new possibilities to realize error-correction holographic associative memory, based on volume holograms (where, due to Bragg angle selectivity, one can rich essential raise of quality of reconstructed associative responses, especially for small samples from conserved image).

Keywords: holography, associative memory, ghost image, phase conjugation, second-order holography.

Надійшла до редакції
13 листопада 2018 року

Рецензовано
23 листопада 2018 року