

УДК 681.3:535

Р. Н. Кветний, д. т. н., проф.;
О. Ю. Софіна, асп.

МЕТОД ФІЛЬТРАЦІЇ ТЕКСТУРОВАНОГО ФОНУ В ЦИФРОВИХ ГОЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

Описано метод усунення поля опорної хвилі в голографічних зображеннях та відповідного їй направленого пучка світла у відновленому зображенні. За рахунок послаблення впливу опорного пучка розширено динамічний діапазон слабких хвиль інтерференції та дифракції і таким чином досягнуто покращення візуалізації зображення. Для усунення опорної хвилі застосовано її гармонічну апроксимацію основними компонентами власних коливань у двовимірному просторі. Тому слабкі інтерференційні та дифракційні хвилі, об'єкти відновленого зображення не спотворено.

Вступ

Голографічні методи використовують для тривимірної візуалізації та просторових вимірювань. З появою CCD-камер на основі приладів із зарядовим зв'язком (Charge Coupling Device) процес запису голограм став значно простішим та доступнішим до застосування в різних галузях техніки, особливо із використанням цифрової обробки голографічних зображень. Достатньо мати голограму об'єкту, що отримана під одним кутом зору, щоб за допомогою математичних перетворень отримати його зображення під іншими кутами, в тому числі і не доступними для прямого зору. Цю властивість голограм використовують в системах відео-вимірювань та відео-контролю. Актуальним є також застосування методів цифрової голографії в таких нових інформаційних технологіях як імерсивні (immersive) системи. За допомогою цифрових голограм створюють віртуальну реальність та анімацію, наприклад, музеї, об'ємні мапи та схеми складних об'єктів. Використовують також синтезовані голограми, наприклад, для кодування тривимірних зображень та транспортування їх через комунікаційні мережі. Такий підхід дає можливість значно зменшити обсяг даних [1—3].

Через дискретність подання голограм за допомогою CCD-камер та недоліки в оптичних системах формування променів якість відновлених зображень ще не досягла того рівня, щоб задовольнити широке коло користувачів. Найдієвішим способом покращення якості зображень є математична обробка, що дозволяє збільшити просторову роздільну здатність голограм, зменшити вплив завад та спотворень через недосконалість технічних засобів. В роботах [3—6] приділено увагу саме покращенню якості зображень за рахунок досягнення надвисокої роздільної здатності.

Обробка голографічних зображень характеризується деякими принциповими відмінностями від звичайної обробки зображень через фізичні властивості способу їх отримання. Голограму утворює суперпозиція опорної хвилі когерентного світла та хвиль інтерференції і дифракції (ХІД). Інформацію про об'єкти, що досліджують шляхом голографічних вимірювань, несуть саме ХІД. Тому значну роль у візуалізації грає динамічний діапазон сигналу ХІД. Але, як показують численні приклади, в більшості випадків, прямі промені опорного джерела когерентного світла вносять до голографічного зображення найбільш потужний сигнал [6—8], що утворює текстуровану хвилясту поверхню – fringe. Це обмежує динамічний діапазон ХІД, що в свою чергу спричиняє погіршення якості зображення, особливо в цифровій голографії. Для покращення процесу відновлення зображення зазвичай використовують вимірювання полів опорної хвилі та хвилі об'єкта, потім поле опорної хвилі вилучають [8]. Інший метод базується на аналізі спеклу [9]. Але такі підходи не дають задовільного результату, якщо поле опорної хвилі не є однорідним по фазі та амплітуді. Просте вилучення опорної хвилі зазвичай спотворює поле ХІД і, звичайно, зображення. В роботі [10] запропоновано апроксимувати fringe за допомогою вейвлетів і вилучати його спектр із голограми. Описаний метод має обмеження, коли поле неоднорідне, крім того, потребує значних обчислювальних затрат для реалізації двовимірного вейвлет-перетворення у разі, коли зображення велике за розміром.

Метою даної роботи є поліпшення якості відновлених голографічних зображень шляхом розширення динамічного діапазону сигналу ХІД. Для досягнення поставленої мети потрібно виріши-

ти таку задачу: зменшити вплив прямих променів когерентного світла опорної хвилі.

Аналіз проблеми та постановка задачі

Приклад цифрової голограми подано на рис. 1. Голограма має вигляд квазірегулярної текстури. Зображення, відновлене за допомогою метода Френеля [9], показано на рис. 2.

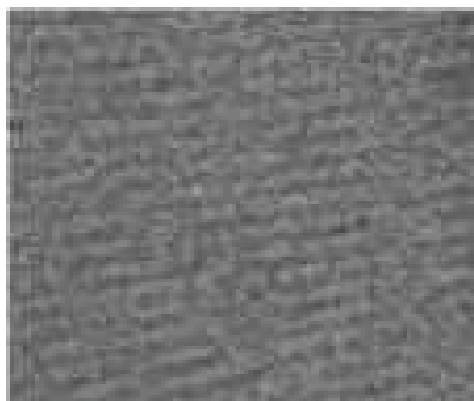


Рис. 1. Цифрова голограма

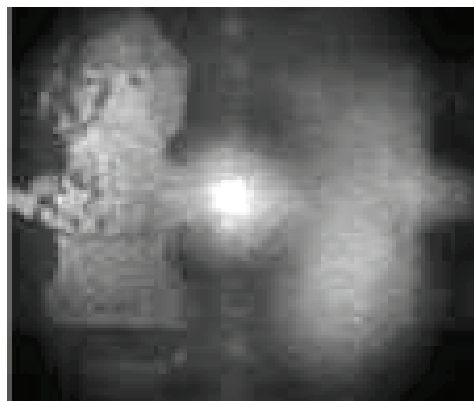


Рис. 2. Відновлене зображення

Метод Френеля можна записати як дискретне перетворення голографічного поля об'єкта та опорної хвилі.

$$I_{m,n} = \exp\left(-\frac{i\pi d\lambda}{MN}\left(\frac{m^2}{\Delta\xi_x^2} + \frac{n^2}{\Delta\xi_y^2}\right)\right) \cdot \mathbf{F}^{-1}\left\{h_{k,l}r_{k,l} \exp\left(\frac{i\pi}{d\lambda}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right)\right\}, \quad (1)$$

де $I_{m,n}$ — відновлене зображення, $h_{k,l}$, $r_{k,l}$ — відліки поля об'єкта \mathbf{h} і опорної хвилі \mathbf{r} , $\mathbf{F}^{-1}\{\cdot\}$ — оператор двовимірного оберненого дискретного перетворення Фур'є, Δx , Δy — розміри пікселя в голографічній площині ($\Delta x = \Delta y = 1$), $\Delta\xi_x$, $\Delta\xi_y$ — розміри пікселя в площині відновленого зображення, d — відстань між цими площинами, λ — довжина хвилі когерентного світла, M , N — розмір голограми, $m(n) = 0, 1, \dots, M(N) - 1$. Зображення на рис. 2 показує, що опорний промінь займає основний динамічний діапазон сигналу, а об'єкти, що формують ХІД, представлено значно слабше у порівнянні з ним. Тому, покращення відображення голографічного зображення може бути досягнуто шляхом усунення поля опорного променя.

Як видно з рис. 1, поле когерентного світла має квазірегулярну хвилясту структуру. Воно є неоднорідним по амплітуді та фазі коливань, але має приблизно однакову періодичність. Тому для його апроксимації в повному об'ємі потрібна велика кількість складових гармонічного або будь-якого іншого ряду функцій. Але, якщо розділити зображення на частки, де поле приблизно однорідне, то кожна із них може бути апроксимована рядом із невеликим числом складових. Щоб число складових було мінімальним потрібно вибрати базис функцій ряду такий, що за формою найближчий до форми поверхні сигналу зображення. Очевидно, що це можуть бути двовимірні гармонічні функції з частотами, кратними періоду власних коливань сигналу зображення на рис. 1. Для визначення параметрів власних двовимірних гармонік, особливо їх частоти, може бути застосовано ряд методів [11—14], але при цьому потрібно враховувати деякі обмеження, що буде розглянуто нижче.

Усунення опорного променя когерентного світла

Оскільки коливання на рис. 1 мають однорідну частотну складову, то власні гармоніки коливань можуть бути визначені для всієї поверхні. Враховуючи амплітудну та фазову неоднорідність, поверхня хвилі може бути поділена на набір часток, кожна з яких може бути апроксимована двовимірним рядом Фур'є

$$u_{i,j}^{t_x,t_y} = \sum_{m=0}^P \sum_{n=0}^Q U_{m,n}^{t_x,t_y} z_{xm}^i z_{yn}^j + e_{i,j}^{t_x,t_y}, \quad (2)$$

де $u_{i,j}^{t_x,t_y}$ — вибірки, що апроксимують частки поверхні, які утворені добутком поверхонь h та r розміром $T_x \times T_y$; P, Q — порядок ряду; $i(j) = 0, 1, \dots, T_{x(y)} - 1$; $t_{x(y)} = 0, 1, \dots, M(N)/T_{x(y)} - 1$; $U_{i,j}^{t_x,t_y}$ — амплітуди двовимірних гармонічних функцій $z_{xm}^i z_{yn}^j$; $z_{xm}^i = \exp(i2\pi f_{xm}i)$; $z_{yn}^j = \exp(j2\pi f_{yn}j)$; f_{xm}, f_{yn} — частоти; $e_{i,j}^{t_x,t_y}$ — сигнал похибки, який в даному випадку є корисною частиною зображення, тому що включає ХІД. Основними параметрами ряду (2) є P і Q . Вони повинні бути вибрані таким чином, щоб ряд (2) відображав характеристики лише опорної хвилі. Розкладання по сингулярним числам [12] або кореляційний метод визначення мінімального оптимального порядку [15,16] можуть бути використані для визначення порядку ряду (2) та числа принципових гармонічних складових. Потрібно також виконання умови $T_x \gg P, T_y \gg Q$, інакше сигнал похибки буде надто малим і ХІД будуть спотворені. З використанням ряду (2) голограму ХІД можна записати як

$$e_{i,j} = h_{i,j} r_{i,j} - u_{i,j}. \quad (3)$$



Рис. 3. Відновлене зображення з усуненням опорного поля

Відновлене зображення за допомогою рівняння (3) та перетворення (1), де замість $h_{k,l} r_{k,l}$ підставлено вираз (3), показано на рис. 3.

Параметри ряду (2) такі: $P = Q = 4, T_x = T_y = 32, M = N = 1024$. Зображення на рис. 3 було додатково оброблено за допомогою низькочастотного фільтра з граничною частотою 0,25 і медіанного фільтра розміром 4×4 . Очевидно, що опорний промінь усунуто без порушення об'єктів зображення. Більше того, стали видимі такі фрагменти рисунка як ручка амфори і малі об'єкти на передньому плані. Суттєво збільшились яскравість та чіткість.

Апроксимація в базисі власних гармонік

Розглянемо апроксимацію із застосуванням власних гармонік. Так як коливання хвилі на рис. 1 мають середню постійну амплітуду на всій площині зображення, значення гармонік $z_{x(y)m}$ повинні бути розміщені на одиничному колі. Дане обмеження може бути враховане шляхом накладання умови симетрії характеристичних поліномів ряду (2), коренями яких є z_{xm} та z_{yn} [16]. Такий підхід дає надійне гармонічне розкладання, навіть за умови, що дані погано визначені, що є типовим для зображень. Для обчислення амплітуд гармонік може бути застосовано метод найменших квадратів [12]. Рівняння (2) можна записати в матричній формі

$$\mathbf{u}^{t_x,t_y} = \mathbf{Z}_x \mathbf{U}^{t_x,t_y} \mathbf{Z}_y^T + \mathbf{e}^{t_x,t_y},$$

де матриця $\mathbf{Z}_{x(y)} = [z_{x(y)k}^i]_{i=0 \dots T_{x(y)}-1, k=1 \dots P(Q)}$, T — транспонування. Обчислення амплітуд може бути проведено за наближеним виразом

$$\mathbf{U}^{t_x,t_y} \approx \mathbf{Z}_x^\# \mathbf{u}^{t_x,t_y} \mathbf{Z}_y^{\#T},$$

де $\#$ — псевдоінверсія матриці.

Висновки

Описаний метод дозволяє підвищити якість візуалізації голографічних зображень за рахунок зменшення впливу опорного світлового променя та розширення динамічного діапазону порівняно слабкого сигналу хвиль інтерференції та дифракції. Метод реалізовано шляхом апроксимації голографічного зображення опорної хвилі рядом невисокого порядку, що утворено власними гармонічними коливаннями поля хвилі. Роботу методу досліджено за допомогою прикладу цифрової го-

лограми. Показано, що фільтрація поля опорної хвилі не спотворює та не згладжує зображення об'єктів, дозволяє підвищити їх чіткість та яскравість.

Метод можна використовувати також для розв'язання задач визначення слабких об'єктів на текстурованому фоні в тих випадках, коли властивості періодичності текстури наперед невідомі і неможливо використати звичайну смугову фільтрацію. Слід також зазначити, що запропонований метод має суттєву перевагу перед смуговою фільтрацією, тому що він дозволяє виділити слабкі сигнали, які знаходяться у тому ж частотному діапазоні, що й сигнал текстури, адже опорну хвилю та ХІД створено одним джерелом когерентного світла.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Javidi B., Okano F. Three-Dimensional Television, Video, and Display Technologies. — Springer, Berlin, 2002. — 467 p.
2. Matoba O., Naughton T. J., Frauel Y., Bertaux N., Javidi B. Real-time three-dimensional object reconstruction by use of a phase-encoded digital hologram // *Appl. Opt.* — 2002. — V. 41. — P. 6187—6192.
3. Yaroslavsky L., Eden M. Fundamentals of Digital Optics. — Birkhauser, Boston, 1996. — 540 p.
4. Park S. C., Park M. K., Kang M. G. Super-Resolution Image Reconstruction // *A Technical Overview. IEEE Signal Processing Magazine.* — 2003. — V. 5. — P. 21—36.
5. Capel D., Zisserman A. Computer vision applied to super-resolution // *IEEE Signal Processing Magazine.* — 2003. — V. 3. — P. 75—86.
6. Zhang S. Application of Super-resolution Image Reconstruction to Digital Holography // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing.* — 2006. — Article ID 90358. — P. 56—68.
7. Farsiu S., Robinson D., Elad M., Milanfar P. Advances and Challenges in Super-Resolution // *IJST Magazine.* — 2004. — V. 14. — P. 47—57.
8. Skotheim O., Tuft V. L. Numerical reconstruction of digital holograms // *Group of Technical Optics, Department of Physics, Norwegian University of Science and Technology.* — 2000. — P. 12—24.
9. Centurion M., Psaltis D. Holographic recording of laser-induced plasma // *Optics letters.* — 2004. — V. 7. — P. 772—774.
10. Rojo P., Harrington J. A method to remove fringes from images using wavelets // *Preprint arXiv: astro-ph/0605609v1.* — 2006. — 7 p.
11. Буняк Ю. А. Гармонический анализ волновых полей // *Изв. РАН. Радиотехника и электроника.* — 1998. — Т. 43. — № 3. — С. 261—265.
12. Marple S. L. Jr. Digital Spectral Analysis with applications. — Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall, 1987. — 584 p.
13. Буняк Ю. А. Определение координат источников излучения по методу факторизации матриц отсчетов данных антенных решеток // *Изв. РАН. Радиотехника и электроника.* — 1995. — Т. 40. — № 8. — С. 1231—1237.
14. Буняк Ю. А. Двухмерный спектральный анализ по методу максимального правдоподобия на основе линейной симметрии корреляционной матрицы // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* — 1996. — Т. 39. — № 4. — С. 19—27.
15. Кветний Р. Н., Буняк Ю. А. Кореляційний метод визначення оптимального порядку моделі авторегресії // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* — 2005. — № 2. — С. 20—22.
16. Bunyak O., Bunyak Yu. Location and Estimation Parameters of Weak Wave Packets in Noise // *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference — IMTC-2007, Warsaw, Poland, May 1—3, 2007.* — 5 p.

Рекомендована кафедрою автоматики та інформаційно-виміральної техніки

Надійшла до редакції 21.03.07
Рекомендована до друку 02.04.08

Кветний Роман Наумович — завідувач кафедри; **Софіна Ольга Юрївна** — аспірантка.

Кафедра автоматики та інформаційно-виміральної техніки, Вінницький національний технічний університет