

О. В. Гнатовський, Л. А. Держипольська, Н. В. Медвідь,
член-кореспондент НАН України А. М. Негрійко

Інтерферометричний метод передачі просторової фазової інформації за наявності нестационарних фазових завад

Наведено результати дослідження щодо передачі інтерферометричної інформації через багатомодовий світловодний джгут, який піддається випадковим деформаціям. Аналізується можливість виключення впливу фазових змін в джгуті на передачу оптичного сигналу.

Дослідження просторових фазових характеристик об'єкта за допомогою методів інтерферометрії можливе як за умови безпосереднього розміщення об'єкта в оптичній схемі приладу, так і дистанційно — при значному віддаленні вимірювального приладу від об'єкта досліджень. Вочевидь, другий випадок є більш ймовірним і практичним. Але в цьому випадку буде досліджуватися хвильовий фронт вже не самого об'єкта, а якогось його зображення. Його фаза може бути змінена оптичним трактом системи. Найбільш придатними для досліджень хвильових фронтів полів, що були розсіяні об'єктами складної форми і в складних умовах експерименту, визнаються методи голографічної інтерферометрії [1]. Вони дозволяють визначати зміни в складних хвильових фронтах для двох голографічних зображень досліджуваного об'єкта. Такі зображення, зокрема, можна одержати при використанні світловодних джгутів [2], застосованих як зонди для передачі оптичної інформації із важкодоступних і небезпечних місць.

У роботі досліджується вплив реального оптичного тракту з непередбачуваними змінами фази, зокрема світловодного джгута, на передачу просторової фазової інформації. Також розглядаються умови, при яких виключається негативний вплив випадкових змін фази.

Голографічний інтерферометр зі світловодним джгутом. У роботі використовується загальна схема голографічного інтерферометра з багатомодовим світловодним джгутом, яка наведена на рис. 1.

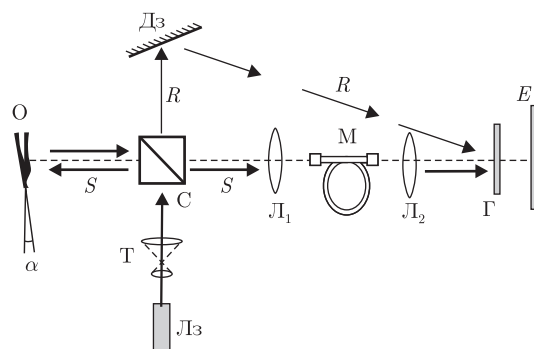


Рис. 1. Схема голографічного інтерферометра на базі світловодного джгута

© О. В. Гнатовський, Л. А. Держипольська, Н. В. Медвідь, А. М. Негрійко, 2013

Лазерний пучок L розширюється телескопом T . Частина енергії після світлоподільного кубика C формує опорний пучок R , який дзеркалом D_3 спрямовується на голограму G . Сигнальна частина пучка S потрапляє на об'єкт O . Відбите ним світло об'єктивом L_1 проектується на вхідний торець джгута D . Зображення об'єкта з вихідного торця джгута об'єктивом L_2 проектується на екран E . Голограма G розташована між L_2 і екраном E .

Досліджуються регулярні джгути довжиною 20–50 см, вхідна і вихідна апертура 5–10 мм. Торці джгута жорстко закріплювалися в тримачах.

Схема застосовувалася за умови деформацій джгута між моментами запису голограм зображення об'єкта в двох порівняльних станах. При цьому у другому стані об'єкт повертається на невеликий кут α . Роль “генератора” фазових шумів виконували випадкові набіги фази в окремих волокнах при згинанні джгутів. Стріла прогину для джгута довжиною 50 см досягала 7 см. При деформаціях, більших за 2 см, інтерференційні смуги вже не спостерігалися.

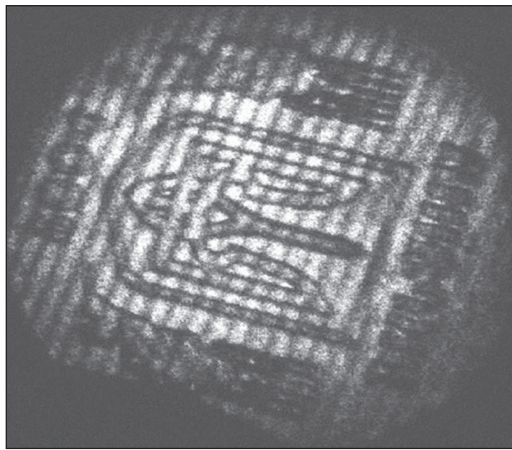
Оцінювався випадковий вплив поля в межах окремих волокон джгута. Для цього реєструвався і оцифровувався розподіл енергії на вихідному торці джгута до і після експозицій голограм. Масиви чисел, які відповідали значенням інтенсивності кожної точки торця джгута в різних його станах, віднімалися поелементно один від одного. Отримані такі дані. Для незмінного джгута: максимальне значення різниці до 44 в. о., середнє значення до 5,2 в. о. Діапазон збереження смуг, відповідно, 164 та 18,5 в. о. Діапазон відсутності смуг, відповідно, 226 в. о. та 24.

На рис. 2 наведено фотографії інтерферограми об'єкта і розподіл нормалізованої інтенсивності смуг для випадків: а) коли не було жодної деформації фазового джгута; б) була легка деформація (вигин джгута на ~ 2 см) відповідно. Також показано волокна джгута і як саме змінюється оптичне поле між першою і другою експозиціями в інтерферометрії в межах окремого волокна. Як видно, інтерференційні смуги при такій деформації ще досить впевнено спостерігаються.

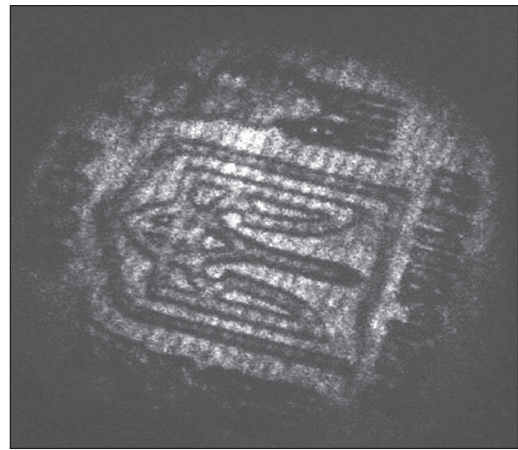
Метод передачі сигналу через середовище із випадковими змінами фази. Отримані результати визначають межі застосовування багатомодових джгутів для передачі інформації про зміни фази оптичного сигналу, проте залишають задачу про передачу повного оптичного сигналу через середовище із випадковою зміною фази невирішеною. Але, обмежуючись задачею передачі тільки певного інформативного параметра сигналу (в нашому випадку — просторового розподілу фази), її можна спростити. Для цього, в розвиток міркувань [3], ми пропонуємо під час запису голограм стану об'єкта і сигнальний і опорний пучки пропускати строго в одному і тому ж напрямку через оптично неоднорідний тракт.

Отже, пропонується така оптична схема (рис. 3). На ній зроблені такі ж самі позначення, як на рис. 1. Головна відмінність між цими схемами полягає в тому, що поворотом дзеркала D_3 опорний пучок R спрямовується на світлоподільник C і далі разом з предметним пучком S попадає на фазовий дифузор D з випадковими фазовими зсувами по його перетину. Різні розподіли фази (D_1 та D_2) в оптичному тракті моделюються поперечним переміщенням дифузора. Вплив дифузора $D = \exp(-i\psi(x, y))$ подамо як дію транспаранта, що має однорідний розподіл амплітуди поля по перетину пучка та довільний і складний просторовий розподіл фази [4].

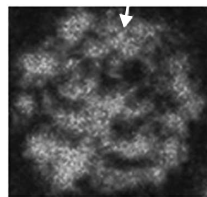
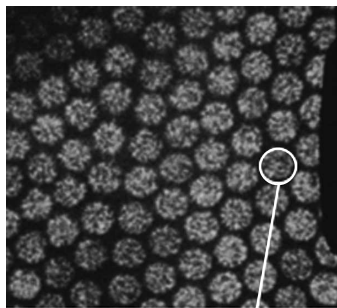
За таких умов при записі рівняння голограми використовуються позначення: SD — поле предмета; RD — поле опорного пучка ($R = b(x, y) = \text{const}$). Амплітудне пропускання



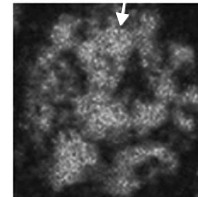
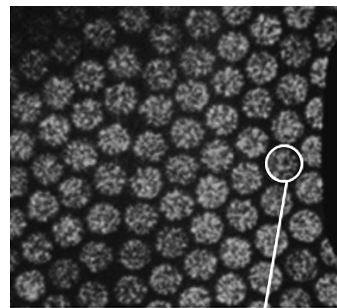
a



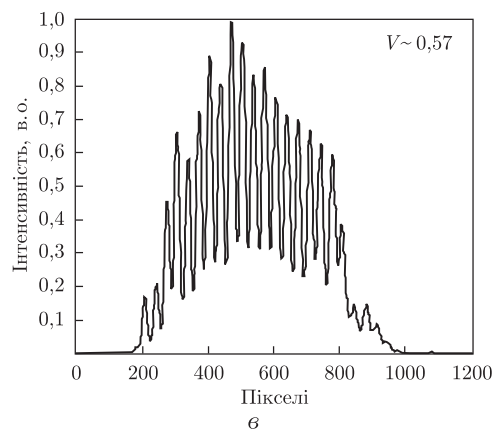
a'



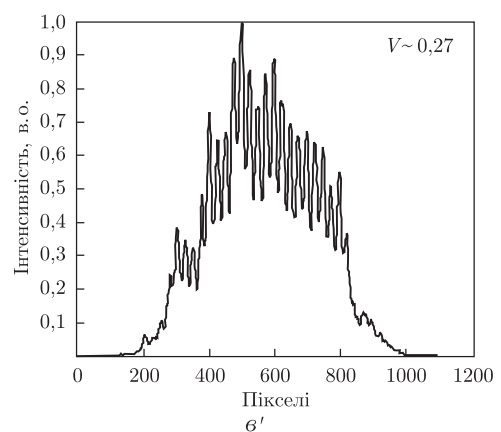
b



b'



b



b'

Рис. 2. Випадок недеформованого джгута: інтерферограма об'єкта, відповідні зміни оптичного поля в межах окремих волокон та нормалізована інтенсивності усереднена вздовж інтерференційних смуг картини (*a*, *b*, *в*); випадок деформованого джгута: інтерферограма об'єкта, відповідні зміни оптичного поля в межах окремих волокон та нормалізована інтенсивності усереднена вздовж інтерференційних смуг картини (*a'*, *b'*, *в'*)

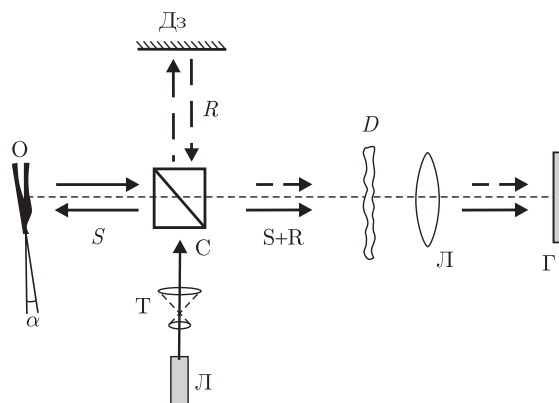


Рис. 3. Схема передачі сигналу крізь середовища із випадковими змінами фази

голограми, яке вважається пропорційним просторовому розподілу інтенсивності інтерференційного поля сигнального та опорного пучків, визначається виразом:

$$A \sim |SD + RD|^2 = |D|^2 |S + R|^2 = |S|^2 + |R|^2 + S^*R + SR^*. \quad (1)$$

Видно, що за умови утворення інтерференційних смуг рівної товщини, коли випадкові зміни фази дифузора є однаковими для обох пучків, наявність дифузора D проявляється лише як сталий коефіцієнт $|D|^2$, тобто випадкові зміни фази, що виникають на шляху поширення сигналу, не впливають на отриманий вираз. Експериментально даний розподіл поля найкращим чином може бути реалізований при запису голограми за схемою Габора [5], коли і сигнальний, і опорний пучки поширюються в одному напрямку. Лише за таких умов буде однаковим розподіл випадкових змін фази для кожного з пучків, що пройшли дифузор D . Проте при використанні схеми Габора у виразі (1) всі доданки описують поля, які поширюються в однаковому напрямку. Ці поля будуть впливати одне на інше, спотворюючи кінцевий результат.

При реєстрації на голограмах двох станів об'єкта S_1 та S_2 ($S_1 = a \exp(-i\varphi)$, $S_2 = a \exp(-i[\varphi + \Delta])$) маємо при відновленні сумарної голограми інтерференцію двох полів зображень A_1 та A_2 . Відповідно можна записати:

$$\begin{aligned} G &= A_2 + A_1 = |S_1|^2 + |R|^2 + S_1^*R + S_1R^* + |S_2|^2 + |R|^2 + S_2^*R + S_2R^* = \\ &= \dots = 2|S|^2 + 2|R|^2 + 2aR\{\cos(\varphi) + \cos(\varphi + \Delta)\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Вираз (2) містить три доданки. Головний — третій, який описує промодульовану спеклами інтерференційну картина з конфігурацією смуг, яка визначається фазовим набігом Δ . Другий доданок — пропорційний просторовому розподілу інтенсивності зображення (яке легко одержується при попередній зйомці). Третій є функцією однорідного засвітлення зображення опорним пучком. Другий і третій доданки спотворюють шуканий розподіл інтерференційних смуг. Оскільки ці доданки є функціями інтенсивності зображення і фону і при цьому не містять спеклів (гладкі), вони легко фільтруються при електронній обробці зображення. До того ж гладкість цих функцій порівняно зі спекл-модуляцією дозволяє їх неповне суміщення при фільтрації.

З застосуванням описаної теоретичної моделі проводився модельний експеримент, для якого використовувалась схема рис. 3. Створювалися масиви чисел (матриці), які відпо-

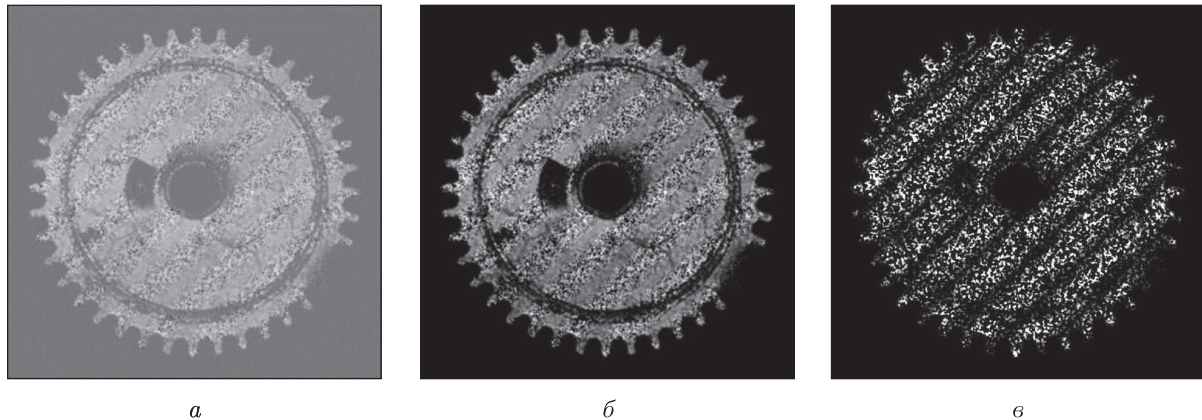


Рис. 4. Результат обробки зображення об'єкта на ПК: *a* — зареєстроване зображення; *b* — видалений загальний фон $|R|^2$; *c* — видалена інтенсивність зображення $|S(x, y)|^2$

відають комплексним амплітудам полів R , S_1 , S_2 (відповідно до наведених у роботі формул). Потім розраховувалися матриці, які чисельно описують інтенсивності зображень A_1 і A_2 , ті, що записуються на голограмі. Далі ці матриці додаються поелементно. Результатом є матриця G — суперпозиція двох голограм станів об'єкта, яка, відповідно до (2), містить як інтерферометричну інформацію, так і неінформативні доданки. Продовженням є фільтрація неінформативних доданків (від матриці G поелементно віднімалися матриці $|R|^2$ і $|S(x, y)|^2$).

Результати експерименту наведені на рис. 4, з якого видно, що фільтрація отриманого за запропонованою методикою зображення дозволяє зафіксувати зміни в досліджуваному хвильовому фронті, незалежно від випадкових фазових змін в оптичному тракті.

Таким чином, в роботі досліджено діапазон можливих деформацій багатомодового джгута при використанні в інтерферометричних схемах. Розроблено кількісний метод для визначення такого діапазону. Запропоновано новий голографічний метод передачі інформації про стан хвильового фронту зображення після його проходження крізь оптичне середовище з випадковими змінами фази. Метод виключає наслідки випадкової зміни фази в оптичному тракті і є перспективним при використанні світловодних джгутів для інтерферометричних досліджень у важкодоступних місцях.

1. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. — Москва: Мир, 1982. — 504 с.
2. *Zolochovkaja O. V., Gnatovskij C. O.* A holographic interferometer on the basis of multimode lightguiding bundles // *Proceedings SPIE.* — 1995. — **2648**. — P. 694–697.
3. *Goodman J. W. et al.* Wavefront-reconstruction imaging through random media // *Appl. Phys. Lett.* — 1966. — **8**. — P. 311–315.
4. *Ангельский О. В., Магун И. И., Максимьяк П. П.* Исследование статистики фазово-неоднородных объектов корреляционно-оптическими методами // *Оптика и спектр.* — 1989. — **67**, вып. 5. — С. 1173–1177.
5. *Gabor D.* Microscopy by reconstructed wavefronts // *Proc. Phys. Soc. Ser. B.* — 1951. — **64**. — P. 449.

О. В. Гнатовский, Л. А. Держипольская, Н. В. Медведь,
член-корреспондент НАН Украины **А. М. Негрийко**

Интерферометрический метод передачи пространственной фазовой информации при наличии нестационарных фазовых помех

Приведены результаты исследования по передаче интерферометрической информации через многомодовый световодный жгут, который поддается случайным деформациям. Анализируется возможность исключения влияния фазовых изменений в жгуте на передачу оптического сигнала.

O. V. Gnatovskyi, L. A. Derzhypolska, N. V. Medvid,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. M. Negriyko**

Interferometric method of transmission of spatial phase information under unsteady phase distortions

The results of investigation of the transfer of interferometric information through a multimode light-guiding bundle subject to random deformations are presented. The possibility to avoid the effect of phase changes in a bundle on the transfer of an optical signal is analyzed.