

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМУ БЕЗОПОРНОЇ ГОЛОГРАФІЇ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПОВІДОМЛЕНЬ, ЯКІ ПЕРЕДАЮТЬСЯ ВІДКРИТИМИ КАНАЛАМИ ЗВ'ЯЗКУ

В роботі розглядається можливість захисту інформації, яка передається відкритими каналами зв'язку на основі принципів безопорної голографії

The possibility of the secure transmission of information based on the principles of a referenceless holography is considered.

Запровадження нових алгоритмів кодування і декодування інформації, яка передається відкритими каналами зв'язку дозволяє надійно захищати зв'язок хоча б на деякій час використання такого алгоритму. Отже, розробка таких нових методів є важливою задачею. Мета цієї роботи – спроба запровадити для таких цілей алгоритми запису і відновлення інформації, які широко використовують в оптичній обробці інформації, а саме, у безопорній голографії.

Відомо [1-5], що процес відновлення зображення з безопорної голограми (RLH), можна інтерпретувати як асоціативний. Головні аспекти безопорного запису і реконструкції оптичного сигналу такі:

1. У фізичному змісті, RLH є когерентною фотографією [1-5]. Завдяки цьому, отримання інформації про фазу сигналу (знання якої необхідне для відновлення сигналу) неможливе з прямого аналізу безопорної голограми.

2. Зображення, яке реконструюється з RLH відновлюється лише в тому випадку, коли для цього використано частину початкового поля, що записувалося на RLH [1-5]. Отже, ця частина початкового поля може бути інтерпретована як деякий "ключ" для декодування безопорної голограми.

Фізичні принципи безопорної голографії

Будемо розглядати лише Фур'є-випадок формування і відновлення RLH, оскільки саме він найширше використовується в практиці. Крім цього, як відомо властивості Фур'є-перетворення дозволяють побудувати системи обробки, що мають певні переваги перед решта експериментальними розташуваннями. До таких переваг зокрема відноситься просторова інваріантність Фур'є-системи, яка забезпечує ефективну роботу

системи незалежно від просторової локалізації сигналу у вхідній площині [1].

Фур'є-розташування для запису і відновлення безопорної голограми надане на рис.1. Комплексна амплітуда поля $U(x,y)$ в площині (x,y) в загальному випадку описується як комплексна функція. Представимо (умовно) поле $U(x,y)$ як суму двох полів:

$$U(x,y) = U_0(x,y) + U_{key}. \quad (1)$$

Після Фур'є-перетворення поле $V(w,v)$, яке сформоване у фокальній площині першого Фур'є-перетворюючого об'єктиву має вигляд:

$$V(w,v) = V_0(w,v) + V_{key}(w,v), \quad (2)$$

де $V = \mathfrak{F}\{U\}$ – Фур'є-образ початкового поля.

Розподіл інтенсивності в площині (w,v) записується на фоточутливий матеріал. Це і є безопорна голограма:

$$RLH \sim J(w,v) = \dots + V_0 V_{key}^* + \dots \quad (3)$$

При відновленні безопорної голограми закритим непрозорим екраном у вхідній площині частину поля U_0 а поле U_{key} замінимо на U_{key}^i . Поле в частотній площині після RLH має вигляд:

$$V_i = V_{key}^i \times RLH = \dots + V_0 V_{key}^* V_{key}^i + \dots \quad (4)$$

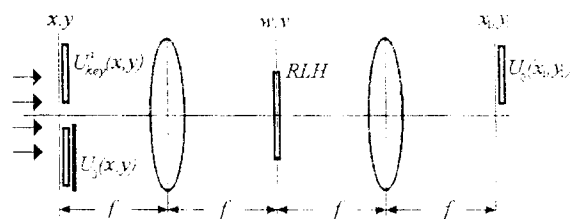


Рис.1. Сема для запису і відновлення безопорної голограми.

Поле у вихідній площині відповідно описується виразом:

$$U_i(x_1, y_1) = \mathfrak{Z}^{-1}\{V_i\} = \dots + U_0 \otimes \mathfrak{Z}^{-1}\{V_{key}^* V_{key}^i\} + \dots \quad (5)$$

де $\mathfrak{Z}^{-1}\{V_{key}^* V_{key}^i\} = U_{key} U_{key}^i = \varphi(x_1, y_1)$ – кореляційна функція, яка може бути представлена:

$$\varphi(x_1, y_1) \rightarrow \begin{cases} \delta(x_1, y_1), & U_{key}^i = U_{key} \\ 0, & U_{key}^i \neq U_{key} \end{cases} \quad (6)$$

відповідно.

З (5) і (6) легко можна побачити, що вихідне поле прямує до U_0 , якщо виконується перша умова:

$$U^i(x_1, y_1) \rightarrow \begin{cases} U_0(x_1, y_1), \\ 0. \end{cases} \quad (7)$$

Отже, частина U_{key} початкового поля, яка формується при запису *RLH* може бути використана як деякий ключ для відновлення поля U_0 . Зауважимо, що така реконструкція може бути успішною лише у випадку $U_{key}^i = U_{key}$.

Алгоритм кодування і декодування інформації

Відомо, що дані, які передаються, як правило, надаються певною послідовністю "0" і "1" (бінарний файл). Кожна "1" може бути інтерпретована як деяке точкове джерело з одиничною інтенсивністю і координатою, яка визначається місцем цієї "1" у файлі. Додатково кожному точковому джерелу може бути присвоєна випадкова фаза (у межах $0, 2\pi$). Отже, такий трансформований ("image" файл) можна розглядати як деяке скалярне поле, яке є комп'ютерним аналогом поля U_0 (рис.2).

Природно, що ключовий файл також може бути сформований як аналог поля U_{key} .

Квадрат модуля амплітуди Фур'є-образу

$$RHL(w, v) = |\mathfrak{Z}\{U_0(x, y) + U_{key}\}|^2$$

є комп'ютерним аналогом *RLH*. *RLH*-файл передається відкритим каналом зв'язку. Фур'є-образ поля V_{key} , або номер ключового файлу (якщо отримувач має набір ключових файлів), передається закритим каналом зв'язку.

Процедура відновлення повідомлення починається з того, що отримувач множить поелементно дані файлів *RLH* та ключового файлу V_{key}^i . Після оберненого Фур'є-перетворення результату мно-

ження отримане поле $U_i(x_1, y_1)$ прямує до поля $U_0(x_1, y_1)$, якщо $V_{key}^i = V_{key}$.

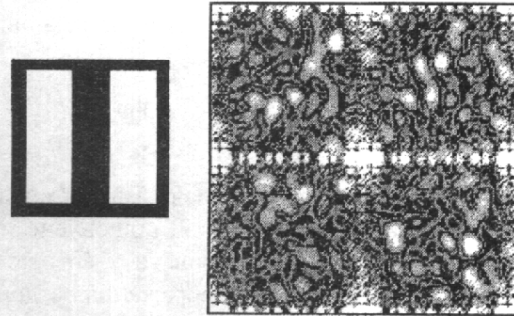


Рис.2. Тест-об'єкт (а), "розподіл інтенсивності" в площині (w, v) (безопорна голограма) (б).

Результати відновлення цифрової безопорної голограми

В якості тест-файла, якій передавався по каналу зв'язку нами був вибраний графічний файл у форматі "bmp", що відповідає бінарному зображенню двох просторово розділених прямокутників (рис.2а). Ключовим файлом був файл, який можна інтерпретувати як вибірку випадково розташованих точкових джерел з випадковою фазою (у межах 2π). "Розподіл інтенсивності в частотній площині" – графічне представлення переданого повідомлення (*RLH*), наведено на рис.2б.

Як бачимо з рис.2 передане повідомлення сформоване як файл з випадковими даними. Наявність "регулярної" структури у вигляді хреста пояснюється тим, що випадкова фазова модуляція вводилася лише в ключовий файл. Можна показати, що і в цьому випадку відновлення початкового зображення неможливо з прямого аналізу *RHL*-файлу.

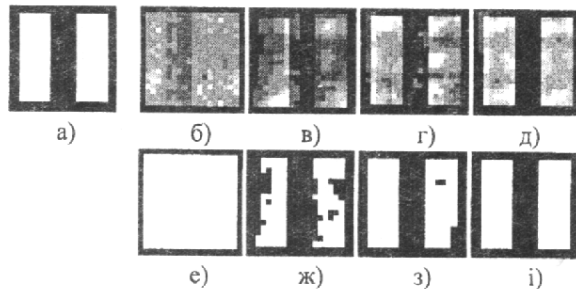


Рис.3. Вплив дискретизації на характеристики відновлених даних. Початковий об'єкт (а), результати відновлення переданих даних (б-і), крок дискретизації в частотній площині рівний 1/2 довжини кореляції початкового поля (б-е), крок дискретизації рівний 1/6 довжини кореляції (в, ж), крок дискретизації рівний 1/10 довжини кореляції (д, і), результати відновлення повідомлення після нелінійної обробки (е, і).

Результати відновлення повідомлень, які були передані (тест-зображення) наведені на рис.3.

Рис.3б-д відрізняються кроком квантування RLH в частотній площині. Рис.3е-і відповідають відновленим зображенням, які піддавалися нелінійній обробці:

$$I(x_1, y_1) = \begin{cases} 1 & |U_r(x_1, y_1)|^2 \geq h, \\ 0 & |U_r(x_1, y_1)|^2 < h, \end{cases} \quad (8)$$

де h – деякий пороговий рівень. В нашому випадку $h=0,5$. Як бачимо з рис.3і відновлене зображення можна реконструювати з абсолютною точністю. Відновлення зображення за допомогою хибного ключа (поля, яке відрізняється від ключового поля, що було використане при запису) наведено на рис.4.

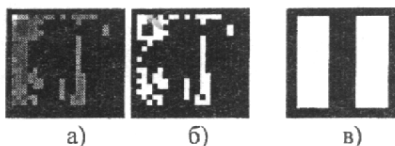


Рис.4. Відновлення переданого повідомлення "чужим" ключем. Результати відновлення (а,б), початковий тест-об'єкт (в), результати відновлення після нелінійної обробки (б).

Закінчення

На закінчення додамо, що фактори, які впливають на якість відновленого зображення і визначають ідентичність відновленого і переданого повідомлень будуть ретельно розглянуті в подальших публікаціях. В даній роботі також не розглядався ступень захисту передаваної інформації, оскільки метою цієї статті була демонстрація принципових можливостей кодування і декодування повідомлень за допомогою комп'ютерної реалізації алгоритму безопорної голограми.

Додамо також, що при застосуванні розробленого алгоритму повинна спостерігатися висока завадозахищеність передаваного повідомлення, яка обумовлена асоціативним характером процесу відновлення повідомлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Van Heerden P.J.* A new optical method of storing and retrieving information // *Appl. Opt.* - 1963. - 2. - P.387-392.
2. *Van Heerden P.J.* Theory of optical information storage in solids // *Appl. Opt.* - 1963. - 2. - P.393-399.
3. *Collier R.J.* Some current viewson holography // *IEEE Spectrum.* - 1966. - 3. - P.67-74.
4. *Collier R.J., Pennington K.S.* Ghost imaging by holograms formed in the field // *Appl. Phys. Letters.* - 1966. - 8. - P.44-46.
5. *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. - 56, №4. - С.205-211.
6. *Сороко Л.М.* Основы голографии и когерентной оптики. - М.: Наука, 1971.