

ВПЛИВ ОБЕРТАННЯ ФАЗОВОЇ МАСКИ НА КОРЕЛЯЦІЙНИЙ СИГНАЛ В ОПТОЕЛЕКТРОННОМУ ПРИСТРОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДОКУМЕНТІВ

Проаналізовано вплив обертання фазової маски на інтенсивність кореляційного сигналу в кореляторі сумісного перетворення Фур'є. Отримано аналітичні залежності між інтенсивністю кореляційного піка та кутом повороту оптичної мітки відносно еталонної маски. Зроблено оцінку похибки кутового позиціонування оптичних міток у пристрої ідентифікації документів залежно від розмірності фазових масок.

Умовні позначення:

- (x, y) - вхідна площа корелятора сумісного перетворення Фур'є;
- N - кількість пікселів в рядку (у стовпці) фазової маски;
- $c \times d$ - площа прямокутної комірки фазової маски;
- $a \times b$ - площа прямокутного пікселя фазової маски;
- N_e - маска - фазова маска з парною кількістю пікселів на рядках і стовпцях;
- N_o - маска - фазова маска з непарною кількістю пікселів на рядках і стовпцях;
- \bar{x} - горизонтальна вісь у вхідній площині (x, y) корелятора;
- $r(x, y)$ - функція комплексного амплітудного пропускання еталонної фазової маски;
- $rect$ - позначення прямокутної функції (прямокутного імпульсу);
- n_1 - номер стовпця фазової маски;
- n_2 - номер рядка фазової маски;
- y_0 - віддаль від початку координат площини (x, y) до геометричного центра фазової маски;
- j - комплексна одиниця;
- θ - фаза пікселя;
- i - натуральне число і нуль;
- x_{n1}, y_{n2} - координати центрів пікселів фазових масок;
- x_{n1+}, y_{n2+} - координати центрів пікселів з фазою $\theta = 0$;
- $x_{n1-}, y_{n1,2-}$ - координати центрів пікселів з фазою $\theta = \pi$;
- n_1^+ - порядковий номер пікселя з фазою $\theta = 0$ у n_1 -ому стовпці фазової маски;
- n_1^- - порядковий номер пікселя з фазою $\theta = \pi$ у n_1 -ому стовпці фазової маски;
- n_2^+ - порядковий номер пікселя з фазою $\theta = 0$ у n_2 -ому рядку фазової маски;
- n_2^- - порядковий номер пікселя з фазою $\theta_{1,2} = \pi$ у n_2 -ому рядку фазової маски;
- $P_{\pm}(0, \pm 2y'_0)$ - амплітуда кореляційного піка у ± 1 -ому дифракційному порядку;
- Λ - символ трикутної функції;
- Σ - площа фазової маски;
- Φ - кут повороту однієї з фазових масок відносно другої маски;
- $k = 1, 2, \dots, K$ - номер концентричного шару пікселів у фазовій масці;
- $P(k, \Phi_1)$ - оцінка знизу амплітуди крос-кореляційного піка при взаємній кореляції k -их шарів двох однакових масок N_e для $\Phi_1 = N^{-1}$;
- $P(0, \pm 2y'_0, \Phi_1)$ - оцінка знизу амплітуди крос-кореляційного піка від двох однакових масок N_e для $\Phi_1 = N^{-1}$;
- $P(0, \pm 2y'_0, \Phi)$ - оцінка знизу амплітуди крос-кореляційного піка від двох однакових масок N_e для $\Phi = l \cdot N^{-1}$;

l - натуральне число;

$p_{\pm}^2(\varphi)$ - оцінку знизу відносної інтенсивності крос-кореляційного піка від двох однакових масок N_e
для $\varphi = l \cdot N^{-1}$;

$\Delta\varphi$ - похибка кутового позиціонування оптичної мітки.

Вступ.

Вироблення нових високонадійних і оперативних інформаційних систем та приладів оптичного захисту документів, цінних паперів, виробів і товарів від підробки вважається одним з найбільш актуальних практичних завдань розпізнавання образів та оптичного приладобудування [1-6]. Досі часу найбільш надійними вважалися методики і технології оптичного захисту, в яких елементами захисту, або оптичними мітками, є голограми, голографічні і дифракційні ґратки [1,2,7]. Вироблена Хорнером і Джавіді принципово нова методика захисної перевірки (“security verification technique”) [3-5] з використанням випадкових амплітудно-фазових картин та випадкових фазових масок (ФМ), що впроваджуються з метою ідентифікації на вхід оптичного корелятора, дозволила значно підвищити рівень захисту документів і виробів. Такі оптичні мітки можуть мати від десятків тисяч до декількох мільйонів фазових дифракційних елементів (пікселів) - однакових за розмірами і різних за фазою. Тому підробити такі мітки шляхом їх фотореєстрації, зчитування сканером або запису за допомогою ПЗЗ-камери з подальшою обробкою в комп’ютері практично неможливо. Оптичні мітки у вигляді ФМ або закодованого цією маскою зображення прикріплюються до об’єктів захисту (документів, кредитних карток, цінних паперів, тощо) і вводяться на вхід оптичного корелятора. Якщо оптична мітка є аутентичною, тобто її фазова складова співпадає з еталонною ФМ, то на виході корелятора формується різкий та інтенсивний кореляційний пік (ідентифікаційний сигнал). Якщо ж на вхід корелятора вводиться неаутентична оптична мітка, то на виході корелятора кореляційного піку нема. Комп’ютерне моделювання та експериментальна перевірка виробленої методики з використанням оптичних та гібридних кореляторів показали її практичність [3,4,8,9]. Протягом останніх років на базі розробленої методики захисної перевірки та її модифікацій створено ряд діючих макетів оптоелектронних пристроїв ідентифікації документів (ПД), побудованих на базі відомих архітектур оптичних кореляторів [8,10-14].

Однак при практичній реалізації запропонованої методики виникає ряд технічних проблем, розв’язання яких пов’язане зі значним ускладненням ПД. Однією з таких проблем вважається висока чутливість ідентифікаційного сигналу до незначних кутових розузгоджень між оптичною міткою та еталонною маскою або її узгодженим фільтром. Оцінку впливу кутового розузгодження між оптичною міткою і еталонним фазовим елементом на кореляційний сигнал ідентифікації оптичної мітки в ПД, побудованому на базі архітектури корелятора сумісного перетворення Фур’є, розглянуто у цій роботі.

Залежність інтенсивності кореляційного піку від кута повороту оптичної мітки. Проблема кутового узгодження оптичної мітки (ФМ або фазово-кодованого зображення) з еталонним елементом може стати серйозною перешкодою при технічній реалізації ПД. Справа у тому, що операція двовимірного фур’є-перетворення зображення є неінваріантною до зміни кутової орієнтації (до повороту) цього зображення. Тому, якщо вхідне зображення розузгоджується за кутом з еталонним елементом, то на виході корелятора інтенсивність автокореляційного піка зі

збільшенням кута розузгодження починає різко спадати. Тому ця проблема особливо актуальна саме при побудові ПД.

Зробимо наближену оцінку (оцінку знизу) залежності інтенсивності кореляційного піка від величини кутового розузгодження між двома однаковими ФМ в лінійному кореляторі сумісного перетворення Фур'є. З цією метою розглянемо дві однакові бінарні маски з розмірністю $N \times N$, розташовані у вхідній площині корелятора (x, y) . Одну з них будемо вважати оптичною міткою, а другу - еталонною ФМ. Такого типу маски складаються з N стовпців і N рядків, розміщених впритул одна до одної однакових прямокутних комірок площею $c \times d$. У кожній комірці розташований піксель прямокутної форми з площею $a \times b$, причому геометричний центр пікселя збігається з центром комірки. Для спрощення розрахунків припускаємо, що кожен піксель маски має форму квадрата і повністю заповнює свою квадратну комірку, тобто $a = b = c = d$, а кількість пікселів у рядках і стовпцях маски парна. Маски такого типу називатимемо масками N_e , а маски з непарною, але однаковою кількістю пікселів по рядках і стовпцях, - масками N_o .

Якщо оптична мітка і еталонна ФМ мають однакову орієнтацію, а рядки масок розташовані вздовж осі \bar{x} вхідної площини корелятора (x, y) , то комплексне амплітудне пропускання мітки можна описати виразом

$$r(x, y) = \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \text{rect}\left(\frac{x-x_{n_1}}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_{n_2}+y_0}{b}\right) \exp[j\theta(x-x_{n_1}, y-y_{n_2}+y_0)] = \\ = \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \left[\text{rect}\left(\frac{x-x_{n_1+}}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_{n_2+}+y_0}{b}\right) - \text{rect}\left(\frac{x-x_{n_1-}}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_{n_2-}+y_0}{b}\right) \right], \quad (1)$$

а комплексне пропускання еталонної ФМ - виразом

$$s(x, y) = \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \text{rect}\left(\frac{x-x_{n_1}}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_{n_2}-y_0}{b}\right) \exp[j\theta(x-x_{n_1}, y-y_{n_2}-y_0)] = \\ = \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \left[\text{rect}\left(\frac{x-x_{n_1+}}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_{n_2+}-y_0}{b}\right) - \text{rect}\left(\frac{x-x_{n_1-}}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_{n_2-}-y_0}{b}\right) \right], \quad (2)$$

де $n_1 = 1, 2, \dots, N$; $n_2 = 1, 2, \dots, N$; $x_{n_1} = an_1 - \frac{a}{2}(N+1)$; $y_{n_2} = -an_2 + \frac{a}{2}(N+1)$ - координати центра пікселя у площині (x, y) ; y_0 - віддаль від початку координат площини (x, y) до геометричного центра ФМ, θ - фаза пікселя, що дорівнює $2\pi i$ або $2\pi i + \pi$, де $i = 0, 1, 2, \dots$ (далі розглядатимемо лише дві фази пікселя, що дорівнюють 0 або π); x_{n_1+}, y_{n_2+} - координати центрів пікселів з фазою $\theta = 0$; $x_{n_1-}, y_{n_1, 2-}$ - координати центрів пікселів з фазою $\theta = \pi$; n_1^+ - порядковий номер пікселя з фазою $\theta = 0$ у n_1 -ому стовпці; n_1^- - порядковий номер пікселя з фазою $\theta = \pi$ у n_1 -ому стовпці; n_2^+ - порядковий номер пікселя з фазою $\theta = 0$ у n_2 -ому рядку; n_2^- - порядковий номер пікселя з фазою $\theta_{1,2} = \pi$ у n_2 -ому рядку, при цьому $\{n_1^+\}, \{n_1^-\} \subset \{n_1\}$; $\{n_2^+\}, \{n_2^-\} \subset \{n_2\}$.

Якщо маски мають однакову орієнтацію, то амплітуда кореляційного піку у ± 1 -му дифракційному порядку у вихідній площині (x', y') лінійного корелятора СПФ згідно з [15] є пропорційна до площі кожної з масок, тобто

$$P_{\pm}(0, \pm 2y'_0) = (a^2 N^2) \Lambda(0, 0) = a^2 N^2 = \Sigma, \quad (3)$$

де Λ - символ трикутної функції, Σ - площа маски.

Якщо ж внести певне кутове розузгодження між двома масками, то сумарна площа перекриття всіх відповідних пікселів зменшиться, а значить, зменшиться амплітуда кореляційного піку. На рис. 1 зображено дві ідентичні квадратні ФМ, одна з яких повернута відносно другої на якийсь кут φ .

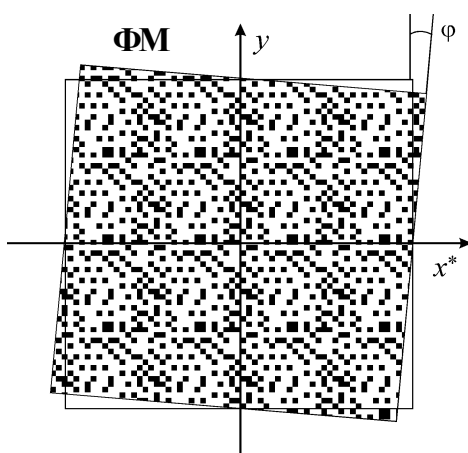


Рис. 1. Дві ідентичні квадратні ФМ, одна з яких повернута відносно другої ФМ на кут φ .

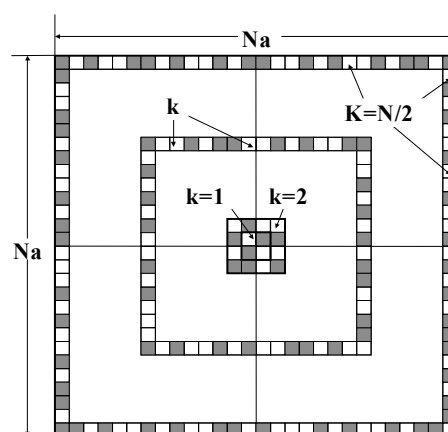


Рис. 2. Схема процедури поділу маски розмірністю $N \times N$ на концентричні пласти для оцінки знизу залежності інтенсивності кореляційного піку від кута φ .

Щоб знайти аналітичну залежність між інтенсивністю піку та кутом φ , розіб'ємо маску N_e на $\frac{N}{2}$ концентричні пласти, кожен з яких формується з рядків і стовпців пікселів, що утворюють квадратні периметри, центровані відносно геометричного центра маски (див. рис. 2), при цьому номер k кожного пласту зростає із зростанням його периметру. Номер $k=1$ присвоюється першому пластові, що є квадратом і складається з чотирьох пікселів навколо геометричного центру маски, а останній номер $K = \frac{N}{2}$ присвоюється пластові пікселів, розташованих за периметром квадратної маски, тобто $k = 1, 2, \dots, K = \frac{N}{2}$.

Припустімо спочатку, що кут розузгодження між масками становить $\varphi_1 = N^{-1}$. Тоді при взаємній кореляції двох k -их пластів двох однакових масок N_e амплітуда крос-кореляційного піку буде не меншою від такої амплітуди:

$$P(k, \varphi_1) = [4k + 4(k-1)] \left[\left(1 - \frac{1-k}{N} \right) a^2 \right]. \quad (4)$$

В отриманому виразі (4) перший множник показує, скільки пікселів міститься в k -му пласті, а другий множник є площею перекриття двох відповідних пікселів. Амплітуда крос-кореляційного сигналу, обчислена за формулою (4), завжди буде меншою від реальної амплітуди такого сигналу, оскільки тут вибрана мінімально можлива площа перекриття двох пікселів.

На основі формули (4) оцінку знизу амплітуди крос-кореляційного піку від двох однакових масок N_e можна записати так:

$$P(0, \pm 2y'_0, \varphi_1) = \sum_{k=1}^K P(k, \varphi_1) = 4a^2 \sum_{k=1}^K (2k-1) \left(1 - \frac{1-k}{N}\right).$$

Аналогічно можна вивести формулу для кута розузгодження $\varphi = l \cdot N^{-1}$ і записати її у вигляді

$$P(0, \pm 2y'_0, \varphi) = 4a^2 \sum_{k=1}^{k_{\max}} (2k-1) \left(1 - \frac{l \cdot k}{N}\right) = 4a^2 \sum_{k=1}^{k_{\max}} (2k-1) (1 - \varphi k), \quad (5)$$

$$\text{де } l = 1, 2, \dots; k_{\max} \leq \begin{cases} N/2, & l \leq 2 \\ N/l, & l \geq 2 \end{cases}.$$

Використовуючи (3) і (5), формулу для оцінки знизу відносної інтенсивності крос-кореляційного піку запишемо так:

$$p_{\pm}^2(\varphi) = \frac{P^2(0, \pm 2y'_0, \varphi)}{P_{\pm}^2(0, \pm 2y'_0)} = \left[\frac{4}{N^2} \sum_{k=1}^{k_{\max}} (2k-1) (1 - \varphi \cdot k) \right]^2. \quad (6)$$

На рис.3 зображені графічні залежності між $p_{\pm}^2(\varphi)$ і кутом φ , обчислені за формулою (6). Як показують отримані залежності, інтенсивності піків спадають зі зростанням кута φ , а зі збільшенням N критичність піків до кута розузгодження різко зростає.

Обговорення результатів. Отримані графічні залежності (див. рис. 3) показують, що маски великої розмірності використовувати в ПД досить складно через високий рівень критичності сигналів ідентифікації, що формуються в результаті взаємної кореляції цих масок, до кута повороту φ . А саме такі маски є найбільш бажаними для використання, оскільки зі збільшенням розмірності маски кореляційний пік звужується, його інтенсивність зростає, внаслідок чого зростає співвідношення сигнал/шум на виході корелятора. Тому, з одного боку зі зростанням розмірності ФМ зростає інтенсивність і крутизна кореляційного піка, однак, з іншого боку різко спадає інтенсивність цього піку при сталому куті φ . Для розв'язання цієї дилеми треба шукати компромісних шляхів.

Так, наприклад, якщо в оптоелектронному ПД зменшення вдвічі інтенсивності кореляційного піку ще не впливає на достовірність ідентифікації аутентичної оптичної мітки, а кутове позиціонування мітки можна забезпечити з похибкою, що не перевищує

$\Delta\varphi = 0.8^\circ$, то в такому пристрої можна використовувати маски розмірністю до 256×256 пікселів, оскільки згідно з отриманими на рис. 3 графічними залежностями зменшення інтенсивності піку вдвічі для таких масок досягається при куті $\varphi = 0,4^\circ$. Таким чином, отримані графічні залежності дозволяють оптимізувати параметри ПОЗ у процесі їх проектування і синтезу.

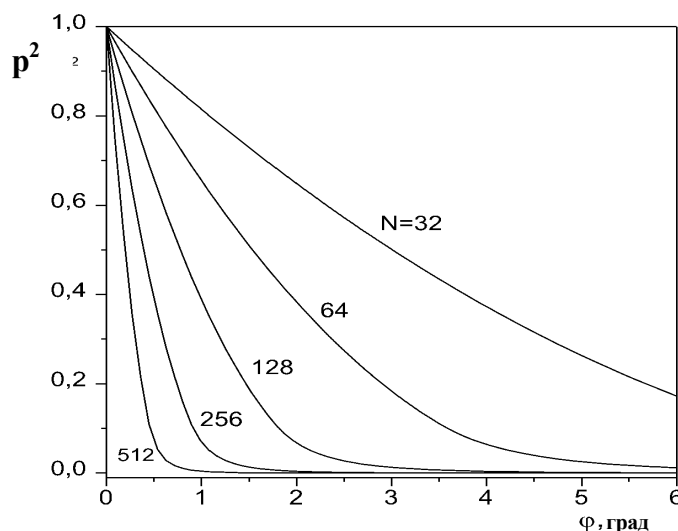


Рис.3. Графічні залежності між $p_{\pm}^2(\varphi)$ і кутом φ , обчислені за формулою (6).

The analysis of angular selectivity of correlation signals produced by phase masks in a joint transform correlator is realized. The analytical dependencies for a correlation peak intensity versus rotation angle of an optical mark are found. Estimation of an correlation signal as a function of a phase mask dimension in an optoelectronic device for documents identification is carried out.

Література

1. Van Renesse R.L. Optical Document Security. - Norwood, MA: Artech House, 1994.
2. Proc. SPIE. - 1996. - Vol. 2659. Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques/ R.L. Van Renesse, Ed. - 248 p.
3. Javidi B., Horner J.L. Optical pattern recognition for validation and security verification// Opt. Eng. - 1994. - Vol. 33, N 6. - P. 1752-1756.
3. Horner J.L., Javidi B. Optical pattern recognition for validation and security verification// Euro-American Workshop on Optical Pattern Recognition/ B. Javidi and P. Refregier, Eds. - Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 1994. - P. 193-203.
4. Пат. 5 485 312 (США). Optical pattern recognition system and method for verifying the authenticity of a person, product or thing/ J.L. Horner, B. Javidi, J.F. Walkup.
5. Fitio V.M., Muravsky L.I., Stefansky A.I. Using of random phase masks for image recognition in optical correlators// Proc. SPIE. - 1995. - Vol. 2647. - P. 224-234.
6. Staub R., Tompkin W.R., Schilling A. Gratings of constantly varying depth for visual security devices// Opt. Eng. - 1999. - Vol. 38, N 1. - P. 89-98.
7. Javidi B., Zhang G., Li J. Experimental demonstration of the random phase encoding technique for image encryption and security verification// Opt. Eng. - 1996. - Vol. 35, N 9. - P. 2506-2512.
8. Javidi B., Sergent A. Fully phase encoded key and biometrics for security verification// Opt. Eng. - 1997. - Vol. 36, N 3. - P. 935-942.
9. Javidi B., Kippelen B., Peyghambarian N. Optical processing system can foil counterfeiters// Laser Focus World. - 1996, October. - P. 75-81.
10. Optical recognition of phase-encrypted biometrics/ Johnson E.G., Brasher J.D. Gregory D.A. et al.// Opt. Eng. - 1998. - Vol. 37, N 1. - P. 18-26.
11. Weber D., Trolinger J. Novel implementation of nonlinear joint transform correlators in optical security and validation// Opt. Eng. - 1999. - Vol. 38, N 1. - P. 62-68.

12. Separation of random phase mask in optical correlator for security verification/ L.I. Muravsky, V.M. Fitio, M.V. Shovgenyuk, P.A. Hlushak// Proc. SPIE. Algorithms, Devices, and Systems for Optical Information Processing. - 1998. - Vol. 3466. - P. 267-277.
13. Transformed phase mask and photoanisotropic material in optical correlators applied for security verification/ L.I. Muravsky, T.I. Voronyak, V.M. Fitio, M.V. Shovgenyuk// Opt. Eng. - 1999. - Vol. 38, N1. - P. 25-32.
14. Муравський Л.І. Аналіз бінарних фазових зображень в кореляторі сумісного фур'є-перетворення// Відбір і обробка інформації. - 1997. - Вип. 11(87). - С. 75-79.

Одержано 10.02.2000 р.