

УДК 621.37:621.391

Є.І. Жилін

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ВИЯВЛЕННЯ І ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

*Розглянуті питання підвищення ефективності рішення задач виявлення і оцінки параметрів оптичних сигналів в системах технічного зору за рахунок застосування методів кореляційного аналізу. Приведено аналітичний опис оптимальних алгоритмів виявлення оптичних сигналів і оцінки параметрів їх просторового положення в площині зображення. Зроблені висновки про можливість практичного застосування розглянутих методів.*

**Ключові слова:** системи технічного зору, статистична обробка оптичних сигналів.

### Вступ

В даний час системи технічного зору набувають все більшого поширення в сучасних зразках озброєння і військової техніки. Разом з тим методи перетворення і аналізу зображень нерозривно пов'язані з системами технічного зору, оскільки саме вони роблять можливою їх автономну роботу і автоматизовану обробку одержуваних відеозображень [1].

Не випадковим, в цьому зв'язку, є інтерес експертів американського агентства по розробці перспективного озброєння (DRAPA) до розробок рухомих роботизованих засобів з автономною системою управління [2, 3]. Одним з основних джерел інформації для функціонування автономної системи управління є оптичні датчики, у тому числі і ПЗС камери, які працюють в різних спектральних діапазонах довжин хвиль. При цьому обробка відеоінформації є ключовою операцією для планування і ухвалення рішення про маршрут пересування роботизованих засобів. Автономність таких систем управління пред'являє підвищені вимоги до достовірності одержуваної інформації і до результатів статистичного аналізу зображень.

В більшості випадків, основними операціями статистичної обробки зображень в оптико-електронних системах (ОЕС) є виявлення і оцінка параметрів сигналів сформованих відзеркаленням від об'єктів оточуючого простору оптичним випромінюванням на фоні адитивних і мультиплікативних перешкод. Таким чином, представляє практичний інтерес аналіз методів виявлення і оцінки параметрів просторового положення сигналів, на предмет їх ефективності і можливості реалізації в системах технічного зору.

**Аналіз питання.** Опису методів рішення статистичних задач обробки сигналів в радіотехнічних і ОЕС присвячено велику кількість робіт вітчизняних і зарубіжних авторів. При цьому суттю більшості задач є подолання апріорної невизначеності. При-

йом і обробка оптичних сигналів на фоні адитивних перешкод представляє собою типовий приклад задачі подібного роду [4 – 10].

В оптичній локації при вирішенні задач виявлення сигналів отримали широке розповсюдження методи енергетичного виявлення, коли рішення про наявність або відсутність сигналу приймається на підставі порівняння енергетичних характеристик реалізації адитивної суміші з порогом [6, 7]. Такий підхід цілком виправданий у ряді випадків, наприклад при застосуванні інтегральних приймачів (фотометричні системи), або для виявлення точених об'єктів в полі зображення (астрономічні спостереження). Проте, застосування даних методів для виявлення слабких оптичних сигналів від протяжних об'єктів в умовах сильних адитивних перешкод, а так само за наявності мультиплікативних перешкод, часто виявляється неефективним.

В той же час відомі кореляційні методи обробки сигналів, відмітною особливістю яких є можливість отримання, на виході пристроїв що їх реалізують, сигналів з максимально можливою енергією. Ефективність і оптимальність даних методів показана в працях по загальній теорії радіолокації і обробці сигналів радіолокацій [10, 11]. А деякі принципи їх застосування в задачах обробки оптичних сигналів в системах технічного зору розглянуті в роботах [12, 13].

**Постановка задачі.** В більшості випадків, статистична обробка зображень в системі технічного зору ставить метою знаходження невідомих характеристик сигналу. Тут розрізняють два типи задач: перевірку статистичних гіпотез (виявлення, виявлення-вимірювання) і оцінку параметрів сигналу (вимірювання) за результатами спостереження реалізації випадкового процесу. В цьому випадку випадковим процесом, залежно від прийнятої моделі, може бути описаний просторово-часовий закон розподілу перешкоди, сигналу і їх адитивної суміші [5, 8, 9].

Задача виявлення сигналу в системах технічного зору може бути поставлена як задача виявлення

зображення об'єкту із заданими параметрами у всьому полі зображення. Тут під зображенням об'єкту ми будемо розуміти сигнал – розподіл енергетичних характеристик оптичного випромінювання у фокальній площині ОЕС, описуваний довільною детермінованою функцією  $w(x, y, t)$ , вид якої визначається характеристиками об'єкту спостереження (форма, лінійні розміри, характеристики відзеркалювання поверхні і т.і.), параметрами оптичного тракту і траси розповсюдження сигналу. При цьому будемо вважати, що невідомим є тільки положення сигналу в площині зображення [13 – 15].

Перешкодова складова зареєстрованої адитивної суміші сигналу і перешкоди є випадковим процесом  $g(x, y, t)$ , обумовленим множинними взаємодіями оптичного випромінювання з середовищем розповсюдження, і може характеризуватися у фокальній площині гаусовским розподілом щільності ймовірності  $P_g(x, y, t)$  з середнім  $m_g$  і дисперсією  $\sigma_g^2$ . Проте в деяких випадках представляється зручним використовувати для описання перешкодової складової модель квазібілого шуму із спектральною щільністю  $N_0$ , що виправдано, при застосуванні на практиці операції віднімання постійної складової перешкоди. Таким чином, задача виявлення сигналу в полі зображення може бути описана як задача прийняття рішення про наявність  $\gamma_1(t_0)$  або відсутність  $\gamma_0(t_0)$  відомого сигналу на фоні квазібілого шуму, по результатам спостереження реалізації їх адитивної суміші з відповідним розподілом щільності ймовірності  $P_n(x, y, t)$  [4, 9, 13].

В якості теоретичної основи для синтезу оптимального алгоритму оцінки параметрів просторового положення оптичного сигналу у фокальній площині ОЕС може бути використана розглянута вище хвильова модель. Її вибір щодо інших поширених фізичних моделей сигналу і перешкоди (корпускулярна, квантова), які приведені в [6, 12], ґрунтується на допущенні використання в ОЕС оптичних приймачів з чутливістю, що не забезпечує режим «рахунку» фотонів. Таким чином, задача вимірювання параметрів просторового положення оптичного сигналу в площині зображення розміром  $x_{\max} \times y_{\max}$  може бути сформульована як задача синтезу оптимальної оцінки параметрів (координат) просторового положення центру детермінованого сигналу  $x_0$  і  $y_0$ , який реєструється на фоні квазібілого шуму із спектральною щільністю  $N_0$ .

### Кореляційне виявлення

Відповідно до поставленої задачі, основних положень теорії виявлення [4, 9] і результатів, що отримані в роботі [13], пристрій оптимального вияв-

лення повинен обчислювати відношення правдоподібності для прийнятої реалізації

$$l = \frac{\prod_{i=1}^{x_{\max}} \prod_{j=1}^{y_{\max}} \prod_{k=0}^{T_H} P(n_{ijk})}{\prod_{i=1}^{x_{\max}} \prod_{j=1}^{y_{\max}} \prod_{k=0}^{T_H} P(g_{ijk})} \quad (1)$$

і порівнювати його значення з порогом.

Підставляючи в (1) щільності ймовірності перешкоди  $g(x, y, t)$  і адитивної суміші  $n(x, y, t)$  відповідно,

$$P(g_{ijk}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} e^{-\frac{g_{ijk}^2}{2\sigma_g^2}}; \quad (2)$$

$$P(n_{ijk}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} e^{-\frac{(n_{ijk}-m_w)^2}{2\sigma_g^2}}, \quad (3)$$

де  $g_{ijk} = g(x_i, y_j, t_k)$ ;  $i, j, k$  – просторово-часові координати точки в площині зображення.

Проводячи логарифмування, перейшовши до інтегрування при прагнучому до нуля кроці зміни просторово-часових координат, а так само враховуючи узгодженість смуг адитивної суміші, що приймається, і приймача ( $N_0 = \sigma_g^2$ ), отримуємо вираз вигляду

$$\ln l = -\frac{1}{2N_0} \iint_{x,y} w(x, y) s(x - x_0, y - y_0) dx dy + \frac{1}{N_0} \iint_{x,y} [g(x, y) + w(x, y)] s(x - x_0, y - y_0) dx dy. \quad (4)$$

В (4), на підставі припущення про реєстрацію зображення тільки в одному кадрі, упущена операція інтегрування за часом, що надалі, може бути враховано введенням коефіцієнту пропорційно до часу експозиції (накопичення) сигналу і перешкоди  $T_H$ .

Достатньою статистикою логарифма відношення правдоподібності (4), з урахуванням залежності його доданків від прийнятої реалізації є

$$L = Y(x_0, y_0) N_0^{-1}; \quad (5)$$

$$\text{де } Y(x_0, y_0) = \iint_{x,y} n(x, y) s(x - x_0, y - y_0) dx dy \quad (6)$$

кореляційний інтеграл;  $s(x - x_0, y - y_0)$  – строб, що сформований відповідно до параметрів сигналу.

З (6) витікає, що значення кореляційного інтегралу, є випадковим і характеризується так само як і  $n(x, y, t)$ , нормальною щільністю ймовірності.

Очевидно, що математичне очікування  $m_Y$  кореляційного інтегралу, у відсутність сигнальної складової, рівно 0, а дисперсія  $\sigma_Y^2$  визначається виразом

$$\sigma_Y^2 = [Y(x_0, y_0) - m_Y]^2. \quad (7)$$

Підставляючи (6) в (7) и проводячи перетворення отримаємо

$$\sigma_Y^2 = \iiint_{x y} \overline{g(x_1, y_1)g^*(x_2, y_2)} \times s(x_1 - x_o, y_1 - y_o)s(x_2 - x_o, y_2 - y_o) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2, \quad (8)$$

де \* – позначення комплексного сполучення.

Середній добуток перших двох співмножників (8) є кореляційною функцією перешкодової складової. Перетворюючи і інтегруючи (8) по  $x_2, y_2$ , отримаємо

$$\sigma_Y^2 = \frac{N_o}{2} E. \quad (9)$$

Враховуючи, що

$$\overline{n(x, y)} = \overline{g(x, y)} + \overline{w(x, y)}$$

і те, що середнє значення перешкодової складової  $\overline{g(x, y)} = 0$ , отримаємо відповідно для математичного очікування кореляційного інтеграла  $m_{Y_w}$ , за умови присутності сигнальної складової

$$m_{Y_w} = \iint_{x y} \overline{w(x, y)s(x - x_o, y - y_o)} dx dy = E. \quad (10)$$

З (10) витікає, що математичне очікування кореляційного інтегралу дорівнює повній енергії сигналу.

У разі виявлення сигналу з повністю відомими параметрами, дисперсія  $\sigma_Y^2$  буде визначатися значенням (9) кореляційного інтегралу, обчисленого за відсутністю сигнальної складової.

Таким чином, робота пристрою оптимального виявлення, згідно отриманого виразу, зводиться до формування кореляційного інтегралу (6) від твору реалізації адитивної суміші і стробу  $s(x - x_o, y - y_o)$ , що описує очікуваний сигнал. Рішення про наявність  $\gamma_1$  або відсутність  $\gamma_0$  сигналу в прийнятій реалізації приймається за результатом порівняння величини кореляційного інтегралу з порогом  $Y_o$ , який не залежить від прийнятої реалізації

$$Y(x_o, y_o) = \iint_{x y} n(x, y)s(x - x_o, y - y_o) dx dy \begin{matrix} \leq \\ > \end{matrix} \begin{matrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \end{matrix} Y_o. \quad (11)$$

Використовуючи отримані результати для математичного очікування та дисперсії кореляційного інтегралу, кількісно опишемо якість рішення задачі виявлення. Запишемо вирази для умовної ймовірності помилкової тривоги  $F$  та правильного виявлення  $D$

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \int_{Y_o}^{\infty} e^{-\frac{Y^2}{2\sigma_Y^2}} dY; \quad (12)$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \int_0^{Y_o} e^{-\frac{(Y - m_{Y_w})^2}{2\sigma_Y^2}} dY. \quad (13)$$

## Кореляційне вимірювання

Процедура синтезу оптимального алгоритму оцінки параметрів сигналу в загальному випадку схожа з синтезом алгоритму виявлення і розглянута в роботах [4,5,12]. При цьому під параметром сигналу, значення якого вимагає оцінки, будемо мати на увазі координати геометричного центру зображення  $x_o$  і  $y_o$ , сформованого сигналом від об'єкту в площині зображення розміром  $x_{max} \times y_{max}$  відповідно лінійним розмірам активної частини фотокатоду приймача оптичного випромінювання.

Для забезпечення незміщеності, і ефективності оцінок  $\hat{x}_o$  і  $\hat{y}_o$  використаємо метод найбільшої правдоподібності, що описується виразом [4]

$$\hat{x}_{o_{мп}}, \hat{y}_{o_{мп}} = \arg \max \ln l. \quad (14)$$

Аналогічно приведеному вище, при синтезі оптимальної оцінки використаємо достатню статистику логарифма відношення правдоподібності, що визначається виразами (5) і (6). З даних виразів витікає, що величина логарифма відношення правдоподібності з точністю до постійних коефіцієнтів визначається функцією  $Y(x_o, y_o)$ .

З [1, 6, 7] відомо, що будь-яке зображення яке сформоване у фокальній площині дифракційно обмеженої ОЕС може бути представлено, як суперпозиція функцій розрізнення точки, що описують відгук системи на дію точкового джерела випромінювання. З урахуванням цього, представляє інтерес синтез оптимальної оцінки параметрів просторового положення сигналу, який сформованого точковим джерелом у фокальній площині ОЕС. В цьому випадку розподіл інтенсивності сигналу у фокальній площині ОЕС може бути описане функцією розрізнення точки у вигляді

$$w(x, y) \square I_o \left( \frac{\sin a(x - x_o)}{a(x - x_o)} + \frac{\sin a(y - y_o)}{a(y - y_o)} \right) = I_o (\text{sinc}a(x - x_o) + \text{sinc}a(y - y_o)), \quad (15)$$

де  $I_o$  – інтенсивність світлового потоку в точці з координатами  $x = x_o$  и  $y = y_o$ ;  $a$  – розмірний коефіцієнт пропорційності, що враховує параметри ОЕС.

З урахуванням вищезазначеного, оптимальну оцінку параметрів знайдемо з умови максимуму виразу (6):

$$\frac{\partial}{\partial x_o} \frac{\partial}{\partial y_o} Y(x_o, y_o) = 0, \quad (16)$$

звідки, підставив (15) в (16) і про диференціювавши, для значень відношення сигнал/шум  $\phi \gg 1$ , отримаємо

$$\frac{\partial}{\partial x_o} \frac{\partial}{\partial y_o} Y(x_o, y_o) = \int_0^{x_{max}} \int_0^{y_{max}} n(x, y) \cdot s(x - x_o, y - y_o) dx dy, \quad (17)$$

де

$$s(x - x_0, y - y_0) = 2a \cdot \left( \text{sinc}^2 a(x - x_0) \cdot \text{cosca}(x - x_0) + \text{sinc}^2 a(y - y_0) \cdot \text{cosca}(y - y_0) \right). \quad (18)$$

Аналіз (18) в області значень  $x \rightarrow x_0$  і  $y \rightarrow y_0$  указує на наявність невизначеності вигляду  $0/0$ , яка легко розкривається, як показано в [12].

Пошук аналітичного рішення виразів (17), (18) щодо визначених параметрів представляється достатньо трудомістким, тому процедура пошуку оцінки параметрів, на практиці може бути здійснена чисельними методами. При цьому необхідно пам'ятати, що строб який входить у вираз (17) для довільного сигналу протяжного об'єкту не завжди може бути отриманий шляхом суперпозиції стробів вигляду (18), оскільки на практиці досить часто може мати місце ситуація, коли енергетичний центр зображення не суміщений з його геометричним центром.

### Висновки

Результати представлених в статті досліджень дозволяють зробити наступні висновки:

Кореляційна обробка зображень, сформованих в системах технічного зору телевізійного типу, дозволяє реалізувати процедуру оптимального виявлення сигналів і оцінку їх параметрів;

Реалізація оптимальної обробки зображення можлива з використанням єдиного алгоритму, за рахунок обчислювальної схожості описаних процедур виявлення сигналів і оцінки їх параметрів.

### Список літератури

1. Быков Р.Е. Цифровое преобразование изображений / Р.Е. Быков, Р. Фрайер, К.В. Иванов, А.А. Манцетов / под ред. проф. Р.Е. Быкова. – М.: Телеком, 2003. – 228 с.
2. Офіційний сайт Пентагону [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до сайту: [www.pentagon.gov](http://www.pentagon.gov).

3. Сайт американського агентства по розробці перспективного озброєння [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до сайту: [www.drapa.mil](http://www.drapa.mil).

4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

5. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигнала / С.Е. Фалькович. – М.: Советское радио, 1970. – 336 с.

6. Москвитин С.В. Теоретические основы оптической локации / С.В. Москвитин, А.И. Стрелков. – Х.: ВИРТА ПВО, 1992. – 369 с.

7. Писаревский А.Н. Системы технического зрения / А.Н. Писаревский, А.Ф. Чернявский и др. –Л.: Машиностроение, 1988. – 432 с.

8. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

9. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов / К. Хелстром. – М.: Инostr. лит., 1963. – 432 с.

10. Ширман Я.Д. Основы теории радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Д. Голиков. – Х.: АРТА СА, 1962. – 204 с.

11. Алмазов В.Б. Основы теории радиолокации / В.Б. Алмазов. – Х.: ВИРТА ПВО, 1992. – 204 с.

12. Стрелков А.И. Оптимизация процесса измерения частоты радиосигнала с учетом вида аппаратной функции акустооптического анализатора спектра / А.И. Стрелков, Е.И. Жилин, А.П. Лытюга, В.В. Марченко // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС. – 2006. – Вып. 8 (57). – С. 93-95.

13. Стрелков А.И. Обнаружение сигналов в системах технического зрения / А.И. Стрелков, Е.И. Жилин, А.П. Лытюга, А.С. Калмыков, С.А. Лисовенко // Радиотехника. Всеукр. Межвед. научн.-техн. сб. – 2006. – Вып. 145. – С. 178-184.

14. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

15. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002 – 608 с.

Надійшла до редколегії 20.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.І. Стрелков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Е.И. Жилин

Рассмотрены вопросы повышения эффективности решения задач обнаружения и оценки параметров оптических сигналов в системах технического зрения за счет применения методов корреляционного анализа. Приведено аналитическое описание оптимальных алгоритмов обнаружения оптических сигналов и оценки параметров их пространственного положения в плоскости изображения. Сделаны выводы о возможности практического применения рассмотренных методов.

**Ключевые слова:** системы технического зрения, статистическая обработка оптических сигналов.

## APPLICATION OF METHODS OF THE CORRELATION ANALYSIS FOR THE DECISION OF PROBLEMS OF DETECTION AND AN ESTIMATION OF PARAMETERS OF OPTICAL SIGNALS IN SYSTEMS OF TECHNICAL SIGHT

E.I. Zhilin

Questions of rise of efficiency of decision of tasks of discovery and estimation of parameters of visual signals in the systems of technical sight due to application of methods of correlation analysis are considered. Analytical description of optimum algorithms of discovery of visual signals and estimation of parameters of their spatial position in the image plane is led. Inferences are done about possibility of practical application of considered methods.

**Keywords:** systems of technical sight, statistical treatment of visual signals.