

Винахід відноситься до області оптики, зокрема, когерентної оптики, Фур'є-оптики, оптичної обробки зображень та розпізнавання образів.

Винахід спрямовано на оптимізацію задачі розпізнавання образів: підвищення достовірності процедури розпізнавання об'єктів довільних класів в оптико-цифрових кореляторах [1-7] за рахунок формалізації процедури вибору ознак розпізнавання для цих об'єктів та уніфікації сигналів розпізнавання (кореляцій).

Задача розпізнавання полягає в ідентифікації об'єкта шляхом його порівняння з еталонним об'єктом в оптико-цифровому кореляторі. Кількісно ступінь співпаданння об'єктів визначається амплітудою функції їх взаємної кореляції, нормованою на максимум автокореляційної функції еталонного об'єкта.

В існуючих оптико-цифрових кореляторах мають справу з різноманітними об'єктами - амплітудними, амплітудно-фазовими або чисто фазовими, які прийнято розділяти на класи об'єктів по тим чи іншим ознакам. При цьому амплітуда та форма кореляційного сигналу може суттєво змінюватись, при переході від одного об'єкту до іншого як всередині класу, так і при переході до іншого класу.

Розв'язання задачі розпізнавання залежить від того, наскільки вірно вибрані ознаки розпізнавання об'єкту та, тісно з ними пов'язані, критерії достовірності результату розпізнавання.

Для оцінки результату розпізнавання використовують різні критерії. Основним і найпростішим є критерій "так/ні", котрий реалізують шляхом порогової обробки кореляційного сигналу. Об'єкт вважається ідентифікованим вірно, якщо сигнал його взаємної кореляції з еталоном перевищує вибраний поріг [2]. Використовують також багаторівневий критерій, що базується на калібровочних кривих, які характеризують відмінності досліджуваного об'єкту від еталонного (по вибраним ознакам) в залежності від сигналу їх взаємної кореляції [2, 6].

Від коректного визначення як ознак так і критеріїв достовірності розпізнавання (суб'єктом) в значній мірі залежить ефективність роботи оптико-цифрового корелятора. Така неформалізована і достатньо складна процедура розпізнавання (з необхідністю врахування специфіки об'єктів) змушує можливості систем розпізнавання, оскільки зі зміною типу об'єктів необхідно змінювати (модифікувати) також і процедуру розпізнавання. Прикладами до сказаного можуть бути роботи по розпізнаванню шрифтів [2], сигнатур [8], біометричних зображень [9-13] та ін. Роботу корелятора ускладнюють також такі фактори як непостійність співвідношення сигнал/шум кореляційного сигналу для різних об'єктів, спотворення спектру об'єкту при записі Фур'є-фільтрів на голографічних середовищах з вузьким діапазоном реєструємих інтенсивностей та інші. Останнє призводить до спотворення кореляційного сигналу та зниження достовірності розпізнавання.

Для зменшення дії негативних факторів використовують:

- фільтрацію просторових частот Фур'є-спектру при записі узгодженого фільтру або фільтру сумісного Фур'є-перетворення на середовищах з нелінійним відгуком [2];

- попередню цифрову обробку зображень та (або) спектрів еталонних об'єктів при вводі їх в корелятор за допомогою ПЗС-камер та РК-мікродисплеїв (які виконують функцію просторових модуляторів світла (ПМС)) [2, 3];

- вибір вузькоспеціальних критеріїв розпізнавання для конкретних типів об'єктів [3-6] і т.ін.

Проте перераховані і інші, методи підвищення ефективності роботи систем розпізнавання не знімають проблем, пов'язаних з їх вузькою направленістю на окремі типи об'єктів та неформалізованим (евристичним) підходом до вибору ознак та критеріїв розпізнавання.

Особливістю способу, взятого в якості прототипу [14], є використання в процесі розпізнавання процедури фазового кодування еталонного і порівнюваного об'єктів. Кодування відбувається згідно формули, яка встановлює однозначну відповідність між амплітудним пропусканням об'єкту (еталону)  $a(x,y)$  та деяким фазовим розподілом  $\psi(x,y)$ .

Спосіб-прототип передбачає наступні операції:

- а) в ЕОМ (PC) цифрової частини корелятора вводять амплітудне зображення об'єкту розпізнавання  $a_{вх}(x,y)$  та еталонного об'єкту  $a_{ет}(x,y)$ ;

- б) з  $a_{вх}(x,y)$  отримують фазово-кодоване зображення  $\psi_{вх}(x,y)$ , яке з допомогою ПМС (SLM<sub>1</sub>) вводять у вхідну площину P<sub>2</sub> оптичної частини корелятора;

- в) з  $a_{ет}(x,y)$  отримують еталонний Фур'є-фільтр  $\psi_{ет}^*(\xi,\eta)$ , який з допомогою ПМС (SLM<sub>2</sub>) подають у Фур'є-площину P<sub>3</sub> оптичної частини корелятора;

- г) в оптичній частині корелятора здійснюють процедуру узгодженої фільтрації, пропускаючи лазерний пучок через коліматор K, SLM<sub>1</sub>, лінзу L<sub>1</sub> та SLM<sub>2</sub>, формуючи на виході SLM<sub>2</sub> світлове поле  $R(\xi,\eta)=\psi_{вх}(\xi,\eta)\psi_{ет}^*(\xi,\eta)$ ;

- д) формують кореляційний сигнал 
$$r(x,y) = \iint \psi_{ет}^*(x_1,y_1)\psi_{вх}(x+x_1,y+y_1)dx_1dy_1$$
 в площині P<sub>4</sub> оптичної частини корелятора, виконуючи зворотнє Фур'є-перетворення поля  $R(\xi,\eta)$  за допомогою лінзи L<sub>2</sub>;

- е) реєструють сигнал взаємної кореляції  $r(x,y)$  за допомогою ПЗС-камери (CCD<sub>2</sub>) і оцінюють результат кореляції згідно обраним критеріям.

В б) фазово-кодоване зображення  $\psi_{вх}(x,y)$  розраховується за формулою  $\psi(x,y)=\exp(ia(x,y)\pi/a_{\max})$ , де  $a_{\max}$  - максимальне значення  $a_{вх}(x,y)$ . В в) еталонний Фур'є-фільтр  $\psi_{ет}^*(\xi,\eta)$  отримують таким чином: в цифровій частині корелятора розраховують фазово-кодоване зображення  $\psi_{ет}(x,y)$ , а потім виконують над ним Фур'є-перетворення та операцію комплексного спряження отриманого результату. Розподіли фаз, розраховані згідно б) і в), відображаються за допомогою SLM<sub>1</sub> та SLM<sub>2</sub> в об'єктній та Фур'є-площині оптичної частини корелятора, відповідно.

Головний недолік способу-прототипу полягає в наступному. Робота в кореляторі з фазовими об'єктами замість амплітудних дає змогу збільшити співвідношення сигнал/шум в кореляційному сигналі, але форму сигналу при цьому не змінює. Амплітуда і форма, а також співвідношення сигнал/шум кореляційного сигналу, як і раніше, залежать від типу об'єкта, а ефективність роботи корелятора - від майстерності вибору (суб'єктом) характерних ознак об'єкта та критеріїв достовірності результату розпізнавання. Задача розпізнавання залишається об'єктно-орієнтованою, ознаки та критерії, віднайдені для одного класу об'єктів не можуть бути використані для об'єктів інших класів.

Мета запропонованого способу полягає в уніфікації процесу розпізнавання та підвищенні надійності

ідентифікації об'єктів довільних класів в оптико-цифрових кореляторах за рахунок формалізації процедури вибору ознак розпізнавання та уніфікації форми кореляційних сигналів.

Розв'язання поставленої задачі досягається тим, що довільному об'єкту (в тому числі й еталонному) з амплітудним пропусканням  $a(x,y)$  ставиться в однозначну відповідність синтезований фазовий (СФ) об'єкт - фазовий розподіл  $\psi(x,y)$ , який отримують з  $a(x,y)$  і певного початкового фазового розподілу  $\psi_0(x,y)$  за допомогою відомого алгоритму ітераційного Фур'є-перетворення (ІФП) [15-16]. СФ-об'єкти вводять в оптичну частину корелятора замість реальних об'єктів і використовують в процесі розпізнавання.

СФ-об'єкти мають наступні властивості:

- усі  $\psi(x,y)$  належать множині довільних фазових розподілів, котрі складним, але точно визначеним чином пов'язані з об'єктами розпізнавання  $a_{вх}(x,y)$ ;

- випадковість природи СФ-об'єктів означає, що їх Фур'є-спектри практично однорідні по амплітуді;

- автокореляція  $\psi(x,y) \otimes \psi(x,y)$  СФ-об'єктів має  $\delta$ -подібний вигляд і забезпечує максимально можливе співвідношення сигнал/шум, характерне для випадкових фазових масок [17];

- кореляція  $\psi_1(x,y) \otimes \psi_2(x,y) = 0$  в усіх тих випадках, коли  $a_1(x,y) \otimes a_2(x,y) = 0$  (1,2-номери об'єктів);

Запропонований спосіб передбачає наступні операції:

а) в ЕОМ (РС) цифрової частини корелятора (Фіг.1) вводять амплітудні зображення об'єкту розпізнавання  $a_{вх}(x,y)$  та еталонного об'єкту  $a_{ет}(x,y)$ ;

б) з  $a_{вх}(x,y)$  отримують СФ-об'єкт  $\psi_{вх}(x,y)$ , який за допомогою ПМС (SLM<sub>1</sub>) вводять у вхідну площину  $P_2$  оптичної частини корелятора;

в) з  $a_{ет}(x,y)$  отримують еталонний Фур'є-фільтр  $\psi_{ет}^*(\xi,\eta)$ , який з допомогою ПМС (SLM<sub>2</sub>) вводять у Фур'є-площину  $P_3$  оптичної частини корелятора;

г) в оптичній частині корелятора здійснюють процедуру узгодженої фільтрації, пропускаючи лазерний пучок через коліматор  $K$ , SLM<sub>1</sub>, лінзу  $L_1$  та SLM<sub>2</sub>, формуючи на виході SLM<sub>2</sub> світлове  $R^*(\xi,\eta) = \psi_{вх}^*(\xi,\eta) \psi_{ет}(\xi,\eta)$ ;

д) формують кореляційний сигнал  $r^*(x,y) = \iint \psi_{ет}^*(x_1,y_1) \psi_{вх}(x+x_1,y+y_1) dx_1 dy_1$  в площині  $P_4$  оптичної частини корелятора, виконуючи зворотнє Фур'є-перетворення поля  $R^*(\xi,\eta)$  за допомогою лінзи  $L_2$ ;

е) реєструють сигнал взаємної кореляції  $r^*(x,y)$  за допомогою ПЗЗ-камери (CCD<sub>2</sub>) і оцінюють результат кореляції згідно вибраних критеріїв.

В порівнянні зі способом-прототипом, спосіб, що пропонується, має такі переваги:

- амплітуда та форма кореляційного сигналу не залежать від типу об'єкта, в усіх випадках сигнал має  $\delta$ -подібний (уніфікований) вигляд і максимальне значення співвідношення сигнал/шум;

- уніфікована форма кореляційного сигналу дає можливість запропонувати загальний (формалізований) підхід при оцінці результату розпізнавання незалежно від типу об'єкта і підвищити, таким чином, достовірність розпізнавання.

Нами розроблено декілька критеріїв для визначення необхідного числа ітерацій при розрахунку СФ-об'єктів. Одним з них є число ітерацій при якому досягається мінімум дисперсії ( $\sigma$ ), котра визначається формулою:

$$\sigma^{(k)} = \sum_x \sum_y \left( |a_{ет}(x,y)| - \left| \mathcal{Z}^{-1} \left( \arg \left( \mathcal{Z}^{+1} \left( \psi_{вх}^{(k)}(x,y) a_{вх}(x,y) \right) \right) \right) \right| \right)^2 / \sum_x \sum_y |a_{ет}(x,y)|^2 \quad (1)$$

$$\sum_x \sum_y |a_{ет}(x,y)|^2$$

де  $\mathcal{Z}^{\pm 1}$  оператор прямого (зворотного) Фур'є-перетворення,  $\sum_x \sum_y |a_{ет}(x,y)|^2$  - повна енергія еталонного об'єкту,  $k$  - число ітерацій ІФП-алгоритму.

Формалізована і незалежна від типу об'єкта процедура мінімізації дисперсії (1) використовується в запропонованому способі замість суб'єктивної і залежної від типу об'єкта процедури вибору ознак розпізнавання, яка притаманна способу-прототипу.

Винахід пояснюється ілюстраціями:

Фіг.1. Схема оптико-цифрового корелятора:

а) 1, 2 - цифрова та оптична частини корелятора; б)  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  - вхідна, об'єктна, Фур'є та кореляційна площини корелятора, відповідно; в) CCD<sub>1</sub>, CCD<sub>2</sub> - камери вводу зображень і реєстрації кореляційних сигналів, відповідно; г)  $K$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  - коліматор та Фур'є-об'єктиви, відповідно; е) РС - ЕОМ; ф) SLM<sub>1</sub>, SLM<sub>2</sub> - фазові ПМС для вводу фазових розподілів в корелятор.

Фіг.2. Зображення об'єкту, Фур'є-спектрів та кореляційних сигналів:

а) об'єкт; б) модуль Фур'є-спектра об'єкту; в) модуль Фур'є-спектра об'єкту фазово-кодованого за способом-прототипом; г) модуль Фур'є-спектра СФ-об'єкта, обчисленого згідно запропонованого способу; е) автокореляційна функція об'єкта; ф) авто кореляційна функція СФ-об'єкта;

Фіг.3. Об'єкт - амплітудна бінарна маска з довільним розподілом елементів;

Фіг.4а. Залежність максимуму кореляційного сигналу від ступеня діафрагмування об'єкту: 1) спосіб-прототип; 2) запропонований спосіб;  $S$  - площа діафрагмованого об'єкту в % від площі еталонного.

Фіг.4б. Залежність максимуму кореляційного сигналу від рівня адитивного шуму в об'єкті: 1 - спосіб-прототип; 2 - запропонований спосіб, СФ-об'єкт розрахований для 1-ї та 10-ї ітерацій відповідно,  $E_n$  - енергія шуму в % від енергії об'єкту.

Приклад. Для схеми 4F - корелятора (Фіг.1) були виконані модельні експерименти по розпізнаванню різних типів напівтонівих та бінарних об'єктів. Експерименти виконувались згідно пунктам способу-прототипу та запропонованого способу. Метою експериментів було а) визначення працездатності запропонованого способу та оцінка його чутливості до можливих спотворень об'єкту (в даному разі - діафрагмування та внесення шуму); в) порівняння результатів, отриманих двома способами.

По результатам експериментів надається: Фіг.2а,б - бінарний об'єкт та його спектр; Фіг.2с,д - Фур'є-

спектр фазово-кодованого об'єкту та СФ-об'єкту; Фіг.2е,ф - кореляційні сигнали отримані способом-прототипом та запропонованим способом, відповідно.

Ітераційний процес формування СФ-об'єкту для об'єкту на Фіг.2а завершено на 25-ій ітерації при значенні  $\sigma_{25}=0,004$ . На Фіг.2f видно, що автокореляційна функція для СФ-об'єкту є  $\delta$ -подібною. Співвідношення сигнал/шум для неї становить 35дБ, це значення є характерним для даного класу фазових функцій і граничним для об'єктів довільних класів при даній розмірності (64Х64 елемента). Співвідношення сигнал/шум, обчислене за способом-прототипом для цього ж об'єкту, становить 2,85дБ. Співвідношення сигнал/шум обчислювалось за формулою:

$$\mu=10\log_{10}(I_S/I_N) \quad (2)$$

де  $\mu$  - співвідношення сигнал/шум,  $I_S$  і  $I_N$  - інтенсивності сигналу та шуму, відповідно.

Для об'єкта, зображеного на Фіг.3, знайдена залежність амплітуди кореляційного сигналу від ступеня діафрагмування (Фіг.4а). Графік 1 відповідає способу-прототипу, графік 2 - запропонованому способу, S - площа діафрагмованого об'єкту в % від площі еталонного. Бачимо, що графік 2 є більш гостроспадаючим, це вказує на більшу чутливість запропонованого методу до спотворень об'єкту.

На Фіг.4б - графіки залежності амплітуди кореляційного сигналу від рівня шуму в об'єкті (Фіг.3) при розрахунку відповідних йому СФ-об'єктів з різним числом ітерацій. Криві 2, 3 для СФ-об'єктів (1-а та 10-а ітерації) лежать нижче кривої 1, яка відповідає способу-прототипу. Це означає, що запропонований спосіб більш чутливий до впливу шумів, ніж традиційний. Даний факт може грати як позитивну так і негативну роль при розпізнаванні в залежності від поставленої задачі. Важливо відмітити, що, на відміну від способу-прототипу, запропонований спосіб є способом з регульованою чутливістю до змін, які вносяться в об'єкт (в даному випадку - діафрагмування та шум). Зі збільшенням числа ітерацій при розрахунку СФ-об'єктів ця чутливість підвищується.

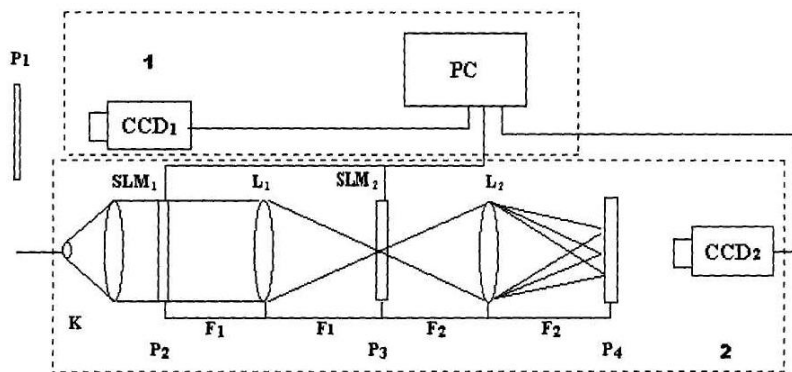
Порівнюючи результати двох методів розпізнавання, бачимо, що запропонований метод дає можливість:

- формувати однотипні ( $\delta$ -подібні) кореляційні сигнали для об'єктів будь-якого типу;
- формалізувати (уніфікувати) процедуру розпізнавання за рахунок переформулювання проблеми знаходження ознак розпізнавання об'єкту;
- отримувати більш високі (граничні) значення співвідношення сигнал/шум;
- забезпечувати більш високу чутливість до змін у структурі об'єкта з можливістю її регулювання;

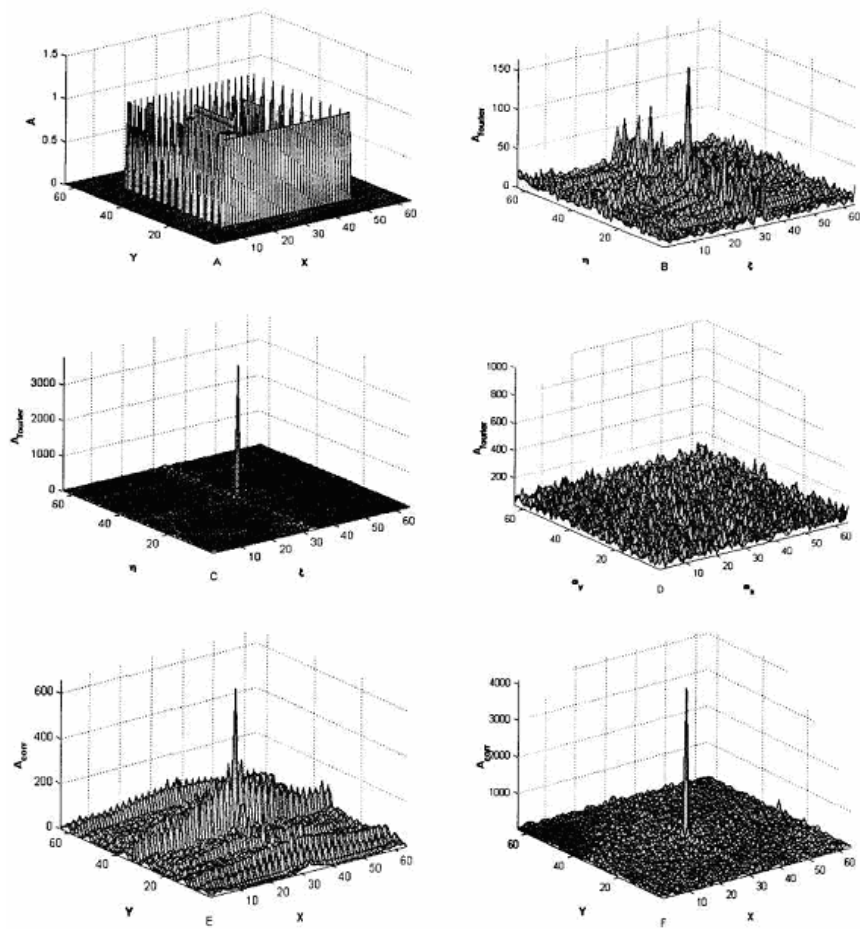
Наслідком цього є більш надійне розпізнавання об'єктів в кореляційних системах, що базуються на архітектурі кореляторів Ван дер Люгта або сумісного Фур'є-перетворення.

Джерела інформації:

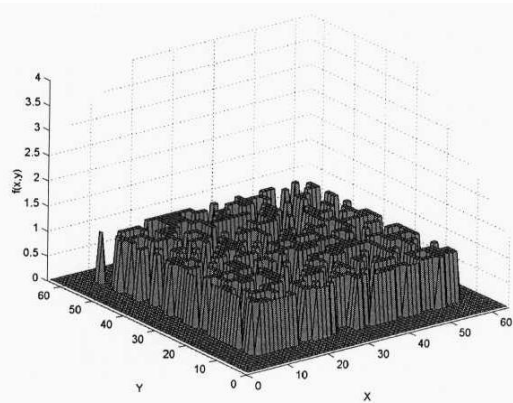
1. Anthony B. VanderLugt, "Signal detection by complex spatial filtering", IEEE Trans.Inf.TheoryIT-10, 1964, pp.139-145.
2. "Применение методов Фурье-оптики" // под ред. Г. Старка. М., "Радио и связь", 1988, с.535.
3. J.S. Sharp, N.E. MacKay at all, "Experimental systems implementation of a hybrid optical-digital correlator", Appl. Opt.V.38, N.29, pp.6116-6128, 1999.
4. US Patent 4,809,340. September 26, 1989. Hartman, Richard L: "Hybrid optical correlator".
5. D. Weber, J. Trolinger "Novel implementation of nonlinear joint transform correlators in optical security and validation", Opt. Eng. 38 (1), 1999, pp.62-68.
6. Л.И. Муравский. "Обработка фазовых изображений в оптико-цифровых корреляционных системах", Тернополь, "Серпень", 1999, с.535.
7. US Patent 4,573,198, Anderson, "Optical image processing/pattern recognition system", February 25, 1986.
8. R.S. Kashi, W. Turin, W.L. Nelson, "On-line handwritten signature verification using stroke direction coding", Opt.Eng. Vol.35, N.9, pp.2526-2533, 1996.
9. D. Roberge, C Soutar, B.V.K. Vijaya Kumar, "Optimal trade-off filter for the correlation of fingerprints", Opt.Eng. Vol.38, N.1, pp.108-113, 1999.
10. T.J. Grycewicz, "Techniques to improve binary joint transform correlator performance for fingerprint recognition", Opt.Eng. Vol.38, N.1, pp.114-119, 1999.
11. E.G. Johnson, J. Brasher at all, "Optical recognition of phase-encrypted biometrics", Opt. Eng. Vol.37, N.1, pp.1825, 1998.
12. S. Chang, M. Rloux, J. Domey, "Face recognition with range images and intensity images", Opt.Eng. Vol.36, N.4, pp.1106-1112, 1997.
13. S.C. Verrall, "Windowed binary joint transform correlation with feedback", Opt.Eng.Vol.38, N.1, pp.76-88, 1999.
14. US Patent 5214534, May 25, 1993. Kallman, Robert R., Goldstein, Dennis H. "Coding intensity images as phase - only images for use in an optical correlator".
15. R.W. Gerchberg, W.O. Saxton, "A practical algorithm for determination of phase from image and diffraction plane pictures", Optik Vol.35, pp.237-246, 1972.
16. USA Patent 3,619,022, Nov. 9 1971. P.M. Hirsh, J.A. Jordan, L.B. Lezem, "Method of making an object-dependent diffuser".
17. V.M. Fitio, L.M. Muravsky and A.I. Stefansky, "Using phase masks for image recognition in optical correlators", Proc. SPIE Vol.2647, pp.224-234, 1995.



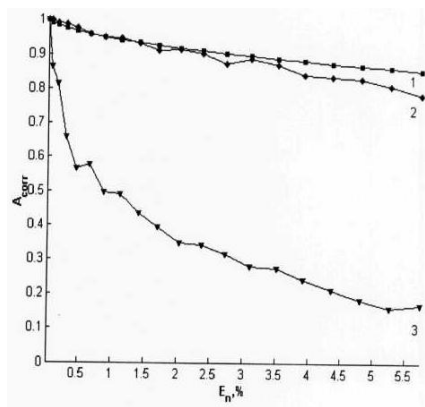
Фиг.1



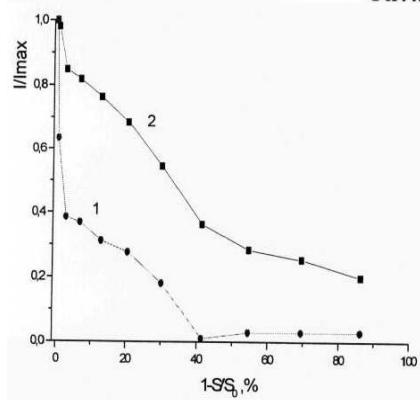
Фиг.2



Фиг.3.



Фиг.4а.



Фиг.4б