

М. А. БРОДСЬКИЙ¹, П. О. КОНДРАТОВ^{2*}, А. Г. ОГАНЕСЯН², В. Ф. ТКАЧЕНКО².

¹.Кафедра архітектурних конструкцій Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013;

². Науково-дослідний конструкторський інститут ЕЛВІТ Національний університет «Львівська політехніка», вул. Князя Романа, 5, Львів, Україна, 79005; E-mail: kondrpk@mail.ru

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ЗВОРОТНЬОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ІЧ ЗНІМКІВ

Метою роботи є підвищення роздільної здатності ІЧ-знімків, одержаних у результаті моніторингу теплових об'єктів. **Методика.** Відомо, що жодна оптична система не може дати на ПЗЗ-матриці точкове зображення теплового об'єкта. Замість цього, формується дифракційне зображення плями, що призводить до значного погіршення якості теплового зображення. Зменшити вплив дифракції – це нагальне завдання системи формування та оброблення корисного сигналу. Для досягнення цієї мети запропоновано використання методу зворотної фільтрації, що дозволяє, знаючи функцію розсіювання точки (ФРТ) оптичної системи, обумовленої явищем дифракції, значно зменшити її вплив на якість одержаного теплового зображення. У системі оптика – комп'ютер оптичне зображення проектується на ПЗЗ-матрицю, де ФРТ представлено вже в цифровій формі. Метод заснований на зворотній фільтрації [Рабинер и другие, 1978]. Вважається, що розмиття – це необоротна операція і інформація безповоротно втрачається, тому що кожен піксель перетворюється на пляму, – все змішується. **Результати.** Показано, що вся інформація просто перерозподіляється відповідно до ФРТ і може бути однозначно відновлена з деякими застереженнями. Запропонована методика використання алгоритму зворотної фільтрації дає змогу подолати обмеження, які накладаються оптичною системою. **Наукова новизна.** Автори пропонують для визначення впливу величин ФРТ на роздільну здатність системи моніторингу використати спеціально розроблені цифрові міри та програму двимірної згортки (конволюції) цих зображень з ФРТ. **Практична значущість.** Розроблено алгоритм зворотної фільтрації (деконволюції) разом з іншими методами (наприклад, субпіксельної обробки) можна з успіхом використати під час оброблення ІЧ-знімків, одержаних у результаті дистанційного моніторингу теплових об'єктів. Метод деконволюції дає змогу подолати обмеження на роздільну здатність, які накладаються оптичною системою в ІЧ-діапазоні. Це призводить, за відсутності шуму, до точного відтворення вхідного зображення теплового об'єкта, незалежно від діаметру світової плями. Визначальне значення, має відмінність значень ФРТ оптики та ФРТ моделі, які використовувались під час реалізації програм конволюції та деконволюції. Особливо важливі результати дії методу зворотної фільтрації в умовах дії шумів на тепловому зображенні і в каналі передачі даних. Визначена величина відношення сигнал / шум, за якого спотворення рахуються, як незначні. Водночас має значення, як показують дослідження, величина плями ФРТоб'єкта. Розглянуте питання застосування запропонованого методу зворотної фільтрації у разі невизначеності даних об'єктиву, який використовувався під час теплового моніторингу, що часто трапляється в практиці оброблення теплових знімків, наявних у користувача. Усі отримані результати перевірені на імітаційних моделях, в чому і полягає додаткова новизна та практична значущість отриманих результатів.

Ключові слова: роздільна здатність; об'єктив; функція розсіювання точки; модель; конволюція; деконволюція.

Вступ

Під час проведення обробки інфрачервоних знімків, отриманих в процесі дистанційного моніторингу теплових об'єктів, виникає проблема розмитості зображення. Відомо, що будь яка оптична система нездатна створити на приладі з зарядовим пристроєм (ПЗЗ) матриці чітке піксельне зображення. ФРТ можна отримати експериментально або представити аналітично. Останнє зручно для дослідження і розробки алгоритмів цифрової обробки зображень [Гашников, 2003р.]. Для

оцінки алгоритмів використовувалося одне з можливих виразів для ФРТ (1):

$$a := 1 \quad b := 1.3$$

$$f(x,y) := e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2a}} \cdot \cos\left[\frac{(x^2+y^2)}{2a} \cdot b\right]^2 \dots\dots\dots(1)$$

Оптичне зображення проектується на ПЗЗ-матрицю. Оскільки в оптичному діапазоні багато об'єктів по роздільній здатності перевищують роздільну здатність матриць, то існує думка, що чим більше пікселів в матриці, тим більше дрібних деталей об'єкта можна отримати на знімку. Очевидно, що ніяка, навіть сама ідеальна матриця, не зможе «розгледіти» деталі, які об'єктив не зміг

розрізнити. На рис. 1 нижче показані інтенсивності зображень двох точок, на відстані, що відповідають критерію Релея (а). Це зображення перетворюється в цифрову форму ПЗЗ-матрицями (б, в). Якщо лінійний розмір пікселя менше або дорівнює радіусу диска Ейрі, то точки помітні окремо (б).

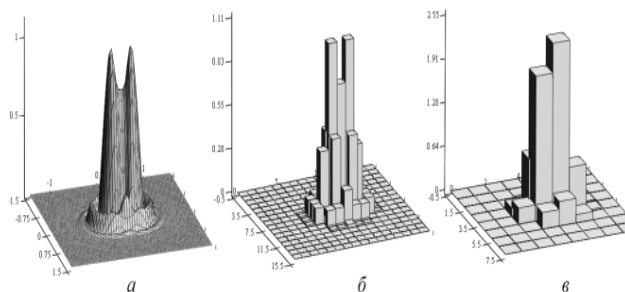


Рис.1. Інтенсивності зображення двох сусідніх точок

Мета

Зменшення розміру пікселя поліпшити роздільну здатність не може. Якщо ж розмір пікселя більше, наприклад, дорівнює діаметру диска Ейрі, то зображення точок зливаються (в). Вважається, що роздільна здатність принципово обмежена дифракцією в оптичній системі апаратури. Однак, в системі оптика-комп'ютер, це обмеження не настільки принципово. Роздільна здатність комплексу залежить від оптичної системи, методики формування кадру на ІЧ-матриці та алгоритму цифрової обробки, доцільно оцінити роздільну здатність окремо. [Переславцева, 2012.]. Можливе цифрове представлення для ФРТ:

$$\text{ФРТ} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.11 & 0 & 0.42 & 0 & 0.11 & 0 \\ 0 & 0 & 0.11 & 0.42 & 1 & 0.42 & 0.11 & 0 \\ 0 & 0 & 0.11 & 0 & 0.42 & 0 & 0.11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.11 & 0.11 & 0.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Диск Ейрі показано на рис. 2

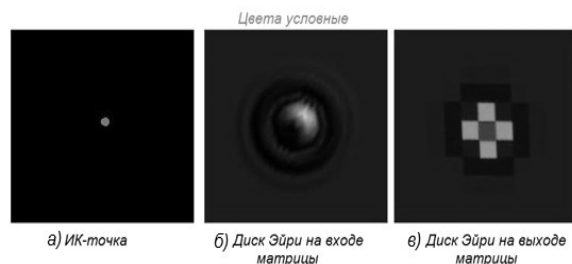


Рис.2. Диск Эйрі

Розташована в фокальній площині ІЧ-матриця перетворює ФРТ в цифрову форму (в). Розмір пікселя на цьому малюнку дорівнює радіусу диска Ейрі. Для зняття ФРТ реального об'єкта можна, наприклад, використати ІЧ-діод, розмістивши його в фокальній площині додаткової лінзи, яка на вході об'єктива сформує зображення ІЧ-діода в нескінченності, таким чином, що зображення можна вважати точковим. З точки зору цифрової обробки сигналів, оптичну систему можна розглядати як двовимірний лінійний цифровий фільтр з імпульсною реакцією, відповідної ФРТ в цифровій формі. Імпульсною реакцією називають реакцію фільтра на одиничний імпульс (імпульс Кронекера) поданий на його вхід [Гонсалес, 2006р.]. Імпульсна реакція цифрового фільтра (ЦФ) повністю і однозначно описує його властивості. Немає ніяких додаткових характеристик лінійного ЦФ, які було б неможливо отримати з імпульсної характеристики. Для того, щоб отримати зображення міри на виході об'єктива, потрібно виконати двовимірну згортку (конволюція) міри і ФРТ. Ця операція і є модель об'єктива. На рис. 3 показаний результат згортки Міри-3 і ФРТ, тобто зображення Міри-3 в фокальній площині об'єктива.

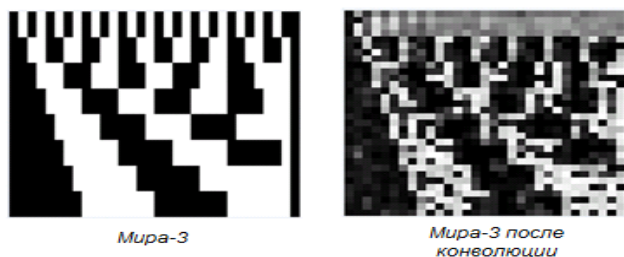


Рис.3. Зображення Міри-3 на вході і виході об'єктива.

Оскільки використана модель об'єктива з ФРТ, яка далеко не одиничний імпульс Кронекера, то зображення Міри-3 сильно розмиті. Завдання полягає в тому, щоб усунути розмитість і відновити вихідне зображення світи, якщо відома ФРТ об'єктива. Багато хто вважає, що розмиття - це необоротна операція і інформація безповоротно втрачається, тому що кожен піксель перетворюється в пляму, все змішується, а при великому радіусі розмиття отримаємо однорідний колір по всьому зображенню [Zhang Ningyu 2007]. Насправді, вся інформація просто перерозподіляється відповідно до ФРТ і може бути однозначно відновлена з деякими застереженнями. Виняток становлять лише краї зображення шириною в радіус розмиття - там повноцінне відновлення неможливо. Основним способом відновлення чіткості зображення є

обробка спостережуваного зображення інверсним фільтром [Сергиенко, 2002р.]. Передавальна функція інверсного фільтра визначається із співвідношення:

$$\text{ФРТ}(z_1, z_2) \cdot \text{ФРТ}_{\text{інв.}}(z_1, z_2) = 1, \\ \text{звідки } \text{ФРТ}_{\text{інв.}}(z_1, z_2) = 1 / \text{ФРТ}(z_1, z_2)$$

Методика

Відновлене зображення дорівнює сумі початкового зображення і шуму, що пройшов через інверсний фільтр. При відсутності шуму досягається точне відновлення інверсним фільтром вихідного зображення. При відновленні зображень інверсним фільтром виникають крайові ефекти, які проявляються у вигляді осцилюючої завади. Для дослідження можливостей зворотної фільтрації (деконволюції) розроблена програма «Інверсія ФРТ.mcd» [Дьяконов, 2007р.]. Результати зворотної фільтрації (розгортки, деконволюції) Міри-3, отриманих об'єктивами з різними ФРТ ($a = 1, 10$ і 100) при відсутності шумів і ідентичності ФРТ при конволюції і деконволюції, показані на рис.4. Практично досягнуто ідеальне відновлення, яке не залежить від розмірів плями Ейрі:

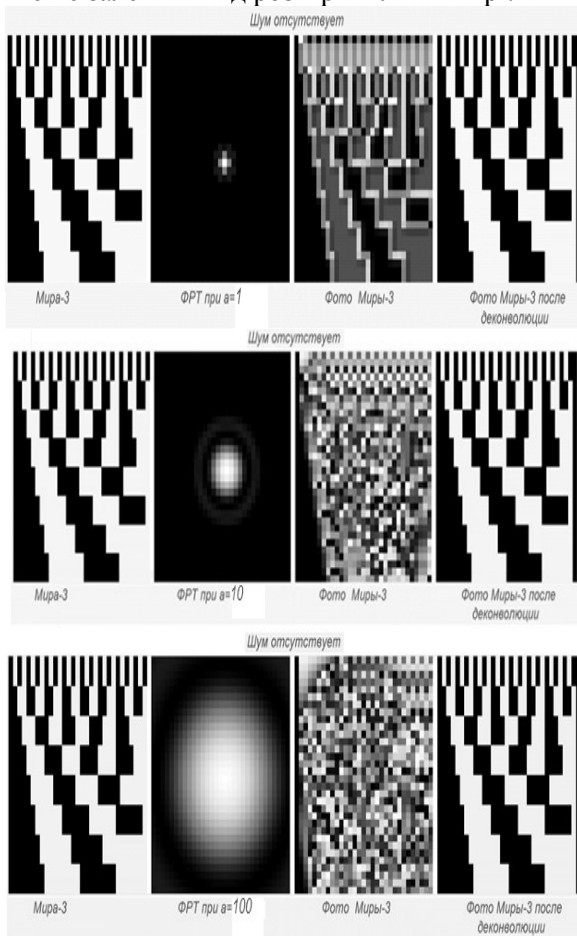


Рис. 4. Результати зворотної фільтрації

Про вплив шумів

Найчастіше вплив шуму при інверсній фільтрації розглядають незалежно від місця його впливу [Сойфер и другие, 2002р.]. Однак можливі два варіанти з різними результатами.

Варіант перший. Зашумлена міра (або реальний об'єкт). У загальному випадку цей варіант здається тривіальним. Однак в ІЧ-діапазоні фотографії одного об'єкта в різні моменти часу можуть мати різну шумову компоненту. Як показано на рис. 5, шум сприймається об'єктивом як елемент вихідного зображення і не впливає на якість інверсної фільтрації.

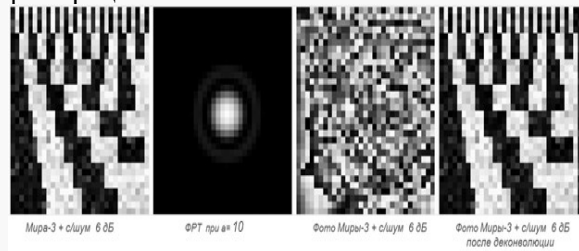


Рис.

5. Вплив шуму на інверсну фільтрацію

Варіант другий. Шум додається до зображення, яке формується об'єктивом. Такий випадок можливий, наприклад, коли зображення з приймальні ІЧ-матриці передається по зашумленому каналу зв'язку для подальшої обробки інверсним фільтром. Як показано на Рис.6, в цьому випадку відновити вихідне зображення без спотворень не вдається:

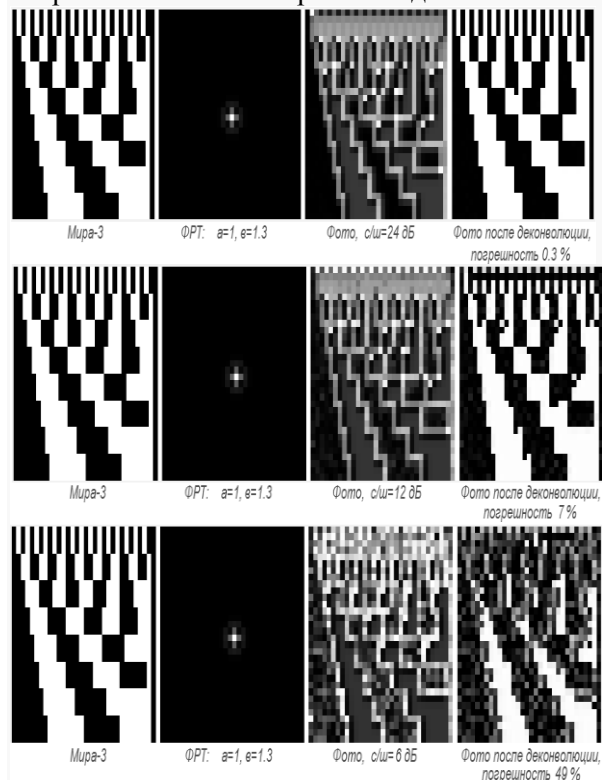


Рис.6. Передача зображень по зашумленому каналу

Як показано на Рис. 7, величина спотворень в цьому випадку, залежить від розміру ФРТ:

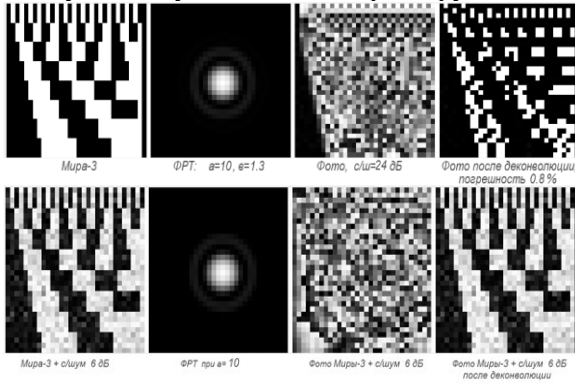


Рис. 7. Величина спотворень в залежності від розміру ФРТ

Вплив неточності визначення ФРТ

Аналітичні (розрахункові) значення ФРТ нехай трохи, але все ж будуть відрізнятися від реальних. Різниця між ними в загальному випадку невідома [Prudyus Ivan. 2015]. Тому, перш ніж переходити до деконволюції з реальною ФРТ, важливо попередньо оцінити допустиму величину похибки між ФРТ при конволюції (яку виконує об'єктив) і ФРТ, яка застосовується при деконволюції. Експериментально це виконати практично неможливо. Цифрова ж модель ФРТ об'єктива [Сойфер, 2000р.] дозволяє зробити це досить просто. Для цього використовувався знімок Міри-2 моделлю об'єктива з ФРТ при $a = 1$ і $v = 1$ (конволюція), а деконволюція виконувалася об'єктивами з ФРТ при $a = 1 \dots 5$ і $v = 1$. Якість обробки можна оцінити як візуально, так і кількісно. Для цього обчислювалися відносна похибка $\Delta\%$ між ФРТ, яка використовувалася при конволюції, і ФРТ - при деконволюції (ФРТ-0 і ФРТ-1 відповідно) [Переславцева и другие, 2012р.]. Результати показані на рис. 8.

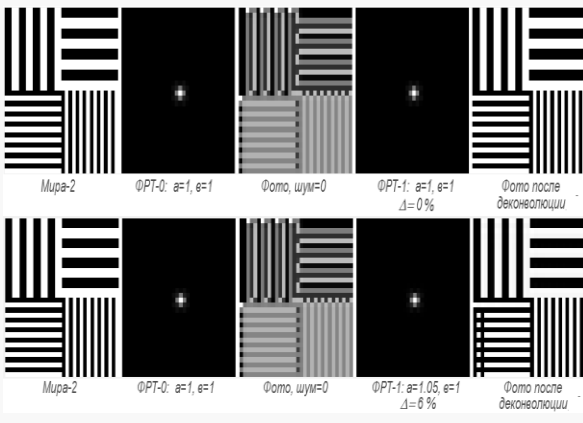


Рис. 8. Якість обробки знімків Міри 2 в залежності від ФРТ

Крім того, паралельно обчислювалася відносна похибка $\mu\%$ між Мірою-2 і знімком після деконволюції, а також коефіцієнт взаємної кореляції K_r між ними. Навіть при дуже невеликих відмінностях між ФРТ при конволюції і деконволюції (які візуально практично не відрізняються), похибка швидко зростає. Правда, коефіцієнт взаємної кореляції падає повільно. Справа в тому, що і при досить великих розузгодженнях між ФРТ, основні деталі Міри-2 все-таки можна розрізнити..

Результати

Для перевірки деконволюції реальних знімків теплових мір використовувалося два кадри з більш-менш візуально помітними деталями: IR1_P15_32 і IR_P0,8_32. Деконволюція виконувалася моделлю ФРТ з параметрами $a = 1$ і $v = 1$. Про результати можна судити тільки візуально. Як видно з рис.9,

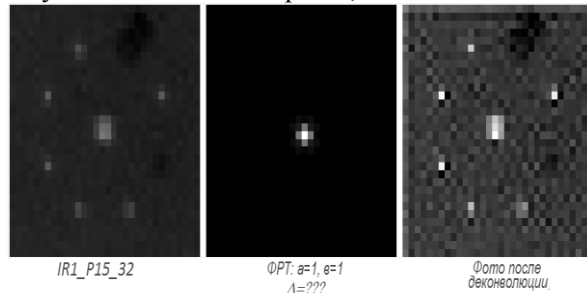


Рис.9. Результати обробки кадру

центральна область кадру IR1_P15_32 до деконволюції мала розмір 4×4 пікселя, а після - 3×3 пікселя. Хоча параметри моделі ФРТ обрані практично довільно, але певний прогрес все ж є. Зробити будь-який висновок про результат обробки кадру IR_P0,8_32 складно. По-перше, контрастність оригіналу кадру дуже мала і, по-друге, в кадрі немає чітко визначених деталей для порівняння. До речі, на цьому кадрі явно виражене розмиття кордонів обробленого знімка, про що говорилося раніше, як про недолік, який є властивою методу зворотної фільтрації [Крилов и другие, 2014р.] як показано на Рис. 10.

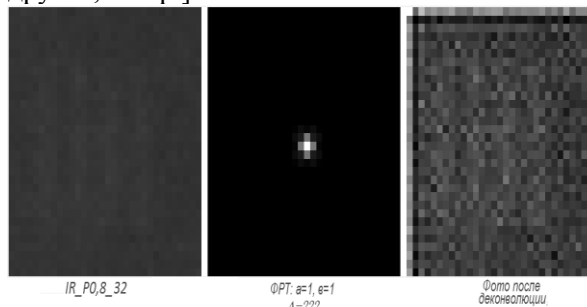


Рис. 10. Розмиття границь при застосуванні методу зворотної фільтрації

Наукова новизна і практична значущість

Розроблений алгоритм зворотної фільтрації (деконволюції) разом з іншими методами (наприклад, - субпіксельної обробки) може бути з успіхом використаний при обробці ІЧ знімків, одержаних в результаті дистанційного моніторингу теплових об'єктів. Метод деконволюції дозволяє подолати обмеження на роздільну здатність, які накладаються оптичною системою в ІЧ-діапазоні. Це призводить, при відсутності шуму, до точного відтворення вхідного зображення теплового об'єкту, незалежно від діаметру світової плями. Визначальне значення, при цьому, має відмінність значень ФРТ оптики та ФРТ моделі, які використовувались при реалізації програм конволюції та деконволюції. Особливо важливі результати дії методу зворотної фільтрації в умовах дії шумів на тепловому зображенні і в каналі передачі даних. Визначена величина відношення сигнал / шум, при якому спотворення рахуються, як незначні. В той же час, має значення, як показують дослідження, величина плями ФРТ об'єктиву. Розглянуте питання застосування запропонованого методу зворотної фільтрації у разі невизначеності даних об'єктиву, який використовувався при тепловому моніторингу, що часто зустрічається в практиці обробки теплових знімків, наявних у користувача. Усі отримані результати перевірені на імітаційних моделях, в чому і полягає додаткова новизна та практична значущість отриманих результатів.

Висновки

Метод зворотної фільтрації дозволяє подолати обмеження на роздільну здатність, що накладається оптичною системою в ІЧ-діапазоні. При відсутності шуму досягається точне відновлення інверсним фільтром вихідного зображення. При відношенні сигнал/шум менше 6 дБ якість відновлення недостатньо висока.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Гашников М.В., и др. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А.

- Сойфера. — 2-е изд.. — М.: Физматлит, 2003. - 784 с. — ISBN 5-9221-0270-2.
- Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab Москва: Техносфера, 2006. - 616с. ISBN 5-94836-092-X
- Дьяконов В. П. Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 958 с.
- Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю., Писаренко Р. А. Восстановление сигналов посредством слепой деконволюции на базе мультистартового метода оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования. — Электротехнические и компьютерные системы № 13 (89), 2014, Системы искусственного интеллекта.
- Переславцева Е. Е., Филиппов М. В. Метод ускоренного восстановления изображений, смазанных при движении. 02, февраль 2012 МГТУ им. Н.Э. Баумана, код доступа: profitbig@rambler.ru
- Переславцева Е. Е. Методы восстановления искаженных изображений на основе решения уравнения. — 09, сентябрь 2012. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Код доступа: bauman@bmstu.ru
- Методы компьютерной оптики/Под ред. В.А. Сойфера: Учеб.для вузов. — 2-е изд., испр. - М.: физматлит, 2003. - 688 с. - ISBN 5-9221-0434-9.
- Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: «Мир», 1978, 849 с.
- Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб.: Питер, 2002. — 608 с.
- Теоретические основы цифровой обработки изображений: Учебное пособие/ В.А.Сойфер, В.В.Сергеев, С.Б.Попов, В.В. Мясников, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева. Самара, 2000, 256 с.
- Prudyus Ivan., V. Tkachenko, P. Kondratov, L. Lazko, S. Fabirovskyy, A. Gryvachevskyy. Earth surface diagnostic based on cluster analysis of multispectral monitoring data. IX Krajowa Konferencja "Diagnostyka techniczna urzadzeń i systemów" (Diag'2015). Ustroń. Polska. 22÷25 września 2015r. Referaty. P. 32
- Zhang Ningyu, Quanyuan Wub. Effects of Brovey Transform and Wavelet Transform on the Information Capacity of SPOT-5 Imagery. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007 Proc. of SPIE Vol. 6623 66230W-1, June 2007, pp. 2690–2695.

Received 14.03.2017

