

В. В. НАУМЕНКО, О. В. ТОЦЬКИЙ, Б. В. КОВАЛЕНКО, Є. М. АНІСІН

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ НА ЗОБРАЖЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ МАКСИМУМА БІАМПЛІТУДИ

Предметом вивчення в статті є аналіз ефективності нового методу виявлення неоднорідностей на цифровому зображенні за допомогою оцінювання біамплітуди інтенсивності пікселів. **Метою** є оцінка ефективності нового методу виявлення неоднорідностей на зображенні за допомогою максимуму біамплітуди у порівнянні з відомим методом на основі оцінки локального середньо квадратичного відхилення (СКВ) значень інтенсивності пікселів. **Завдання:** формалізувати процедуру розрахунку максимуму біамплітуди інтенсивності пікселів у локальному сегменті; створити тестове зображення з варіаціями контрасту на межах; розробити математичну модель для розрахунку у системі Matlab показника ефективності виявлення неоднорідностей на зображенні при наявності адитивного гаусового шуму з різними значеннями дисперсії; надати для аналізу та для порівняння графіки залежності кількості вірно класифікованих неоднорідних ділянок від кількості невірно класифікованих у вигляді параметру *receiver operating characteristic* (ROC). Використовуваними **методами** є: метод біспектрального аналізу даних; методи теорії ймовірності та математичної статистики; методи цифрової обробки зображень. Отримано такі **результати**. Побудовано карту меж для тестового зображення без спотворень та за наявності адитивного гаусового шуму з дисперсією, що дорівнює 0,2, для двох типів детекторів: перший, на основі максимуму біамплітуди та, другий, на основі оцінювання локальної величини СКВ. З результатів комп'ютерного моделювання видно, що обидва детектори гарно визначають межі на зображенні за умови відсутності шумів. Але при наявності адитивного шуму детектор на основі максимуму біамплітуди забезпечує суттєву перевагу. Побудовано графіки залежності кількості вірно класифікованих неоднорідних ділянок від кількості невірно класифікованих для пропонованого та відомого еталонного методів детектування з використанням параметру ROC. Розраховано значення параметру *area under the curve* (AUC), що характеризують ефективність виявлення неоднорідностей на зображенні. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: запропоновано новий метод детектування неоднорідностей на зображенні за допомогою нової інформаційної ознаки – оцінки локального максимуму біамплітуди. Для аналізу показників запропонованого методу було створене тестове зображення з різними контрастами меж. За допомогою пропонованого методу та відомого методу оцінки локального СКВ побудовано карти меж для тестового зображення без спотворень та при наявності адитивного гаусового шуму. Для оцінки ефективності двох методів побудовано графіки залежності кількості вірно класифікованих неоднорідних ділянок від кількості невірно класифікованих для пропонованого та еталонного методів детектування. Більш ефективним при малих значеннях дисперсії шуму є детектор на основі локального значення СКВ, але при зростанні дисперсії шуму більш ефективним є детектор на основі оцінювання максимуму біамплітуди. Розраховані величини AUC для методів на основі оцінювання локального СКВ та оцінювання максимуму біамплітуди дорівнюють відповідно 0,678 та 0,8468. Не зважаючи на те, що за показником ефективності пропонований метод програє при малих значеннях дисперсії шуму, біспектральний метод є більш ефективним при великих значеннях дисперсії шуму, окрема, коли дисперсія шуму дорівнює 0,6, $AUC = 0,8748$.

Ключові слова: біспектр; біамплітуда; обробка зображень; ROC-крива; параметр AUC.

Вступ

Комп'ютерна обробка цифрових зображень відноситься до числа тих методів, що найбільш динамічно розвиваються, а також до інформаційних технологій, яку нині застосовано в різного роду радіо-

фізичних вимірювальних системах, в тому числі, в системах радіолокації, аерокосмічного моніторингу поверхні Землі, в технічній діагностиці, фізичному матеріалознавстві та ін. [1, 2]. При обробці радіолокаційних і оптичних зображень в системах дистанційного зондування земної поверхні вирішуються

різні завдання сегментації просторово розподілених об'єктів, виявлення локалізованих об'єктів, класифікації типів земних покривів, вимірювання геометричних і радіоякісних характеристик тощо. Вирішення цих задач базується як на використанні різного роду евристичних підходів, так і на основі синтезу алгоритмів в рамках статистичної теорії рішень.

В основі статистичного синтезу лежить, як правило, використання математичних моделей випадкових полів, які формують реалізації для опису просторово однорідних об'єктів. Одним з важливих завдань є попереднє виявлення локально-неоднорідних ділянок і, на цій основі, кордонів просторово розподілених об'єктів з метою їх подальшої сегментації і класифікації. Вирішення цього завдання неодноразово розглядалося як на основі евристичних методів (В. Претт, Р. Харалік, Дж. Превітт і ін.) [3], так і в рамках теорії статистичних рішень (А. Джейн, Ч. Террайен, І. В. Никифоров, М. Бассвіль, А. Банвеніст, В. В. Моттль, Н. В. Вердєнська і ін.) [4, 5]. Алгоритми, які реалізовано на основі евристичного підходу, практично не піддаються спробам отримання кількісних оцінок показників ефективності, мають слабку стійкість по відношенню до впливу шумів і не завжди працездатні при виділенні ділянок з неоднорідною текстурою. Статистичні алгоритми також не завжди виявляються ефективними для практичних додатків, тому що: по-перше, виникає їх вкрай висока обчислювальна складність при розрахунку функціоналів правдоподібності для великого числа гіпотез при невизначеності просторового положення меж об'єктів; по-друге, статистичні моделі зображень, для яких ці алгоритми отримані, не завжди добре апроксимують існуючі на практиці зображення.

В останні часи для обробки цифрових сигналів та зображень знаходять застосування методи статистичного аналізу з використанням статистик третього порядку, зокрема таких, як спектр третього порядку – біспектр [6, 7]. Отримання оцінок параметрів зображення та їх аналіз з використанням кореляційних функцій третього порядку (КФТП) та біспектрального аналізу (біспектр, за визначенням, – це двовимірне перетворення Фур'є від КФТП) дозволяє дізнатися про їх властивості значно більше, ніж при використанні класичних методів кореляційного аналізу, тобто статистик другого порядку.

1. Математичні основи розрахунку біамплітуди

Для вирішення багатьох прикладних завдань існує підхід, що базується на використанні куму-

лянтних функцій – кореляційних функцій і спектрів вищих порядків – поліспектрів [6]. Аналіз спектрів вищих порядків дає можливість здобуття принципово нової інформації про фазові властивості досліджуваних процесів і доповнює можливості класичного некогерентного спектрального аналізу процесів. Даний біспектральний підхід володіє рядом коштовних і привабливих переваг, а саме:

по-перше, забезпечує придушення гаусової завади,

по-друге, спектри вищих порядків містять інформацію про фазові зв'язки спектральних компонент у процесі, що спостерігається,

по-третє, кумулянтні функції дозволяють вивчати нелінійні властивості процесу і оцінювати нелінійні характеристики.

Оцінка біспектральної щільності (спектральної щільності третього порядку або кумулянтного спектру) дозволяє не лише правильно описати статистичні характеристики процесу, що спостерігається, але і визначити наявність кореляційних зв'язків спектральних компонент, а також відновити фазові зв'язки спектральних компонент даного процесу.

Безперервне зростання інтересу до біспектрального аналізу супроводжується появою великої кількості публікацій в даному напрямі. У зв'язку з цим досить відзначити ряд фундаментальних оглядових статей, основна увага яких присвячена застосуванню біспектрів до цифрової обробки сигналів і зображень [6]. Зупинимося на аналізі переваг біспектру по відношенню до енергетичного спектру, які є корисними, перспективними, знаходять практичне використання і служать основою для розробки нових методів і алгоритмів в сучасних системах обробки сигналів та зображень.

У системах обробки сигналів, що спостерігається на тлі адитивного гаусового шуму, важливою є властивість спадання до нуля біспектральної щільності завади з симетричною функцією щільності вірогідності. Дана властивість біспектру забезпечує робастність алгоритмів відновлення сигналів у присутності нормальної адитивної завади в системах цифрової обробки сигналів у радіолокації, а також в системах обробки зображень [6 - 8].

За визначенням, загальноприйнятим в поліспектральному аналізі, біспектр – це перетворення Фур'є від КФТП. Запишемо вираз для біспектру часового ряду $x(i)$ у вигляді наступного двовимірного дискретного перетворення Фур'є від КФТП як:

$$\hat{B}_x(p, q) = \sum_{k=-I+1}^{I-1} \sum_{l=-I+1}^{I-1} R_x(k, l) \exp[-j2\pi(kp + lq)], \quad (1a)$$

або

$$\begin{aligned} \dot{B}_x(p, q) &= \left\langle \dot{X}^{(m)}(p) \dot{X}^{(m)}(q) \dot{X}^{*(m)}(p+q) \right\rangle_\infty = \\ &= \left\langle \dot{X}^{(m)}(p) \dot{X}^{(m)}(q) \dot{X}^{(m)}(-p-q) \right\rangle_\infty, \end{aligned} \quad (16)$$

де біспектр $\dot{B}_x(p, q) = |\dot{B}_x(p, q)| \exp[j\gamma_x(p, q)]$ – це комплексна функція двох частотних змінних із індексами p і q ; $|\dot{B}_x(p, q)|$ і $\gamma_x(p, q)$ – відповідно амплітудний (біамплітуда) і фазовий (біфаза) біспектри даного процесу;

$p = -I+1, \dots, I-1, q = -I+1, \dots, I-1$ – частотні індекси.

Отже, алгоритм, що пропонується у даній статті, включає розрахунки на основі формули (16) локальних оцінок величин біамплітуди $|\dot{B}_x(p, q)|$ значень інтенсивності пікселів, які містяться у межах вікна. Рішення щодо виявлення наявності неоднорідностей на зображенні приймають за допомогою інформативної ознаки, якою служить величина локальної оцінки біамплітуди.

2. Оцінка ефективності виявлення неоднорідностей на зображенні

Одним з перших етапів адаптивної фільтрації, детектування меж або знаходження об'єктів на зображенні є виявлення локально-активних ділянок. На практиці для досягнення максимальної ефективності детектування часто доводиться проводити оптимізацію функціональних параметрів детекторів. Крім того, алгоритми виявлення мають різну стійкість при роботі в умовах різних рівнів шуму. Таким чином, виникає задача аналізу ефективності запропонованого методу виявлення неоднорідних ділянок за допомогою максимуму оцінки біамплітуди та порівняння його з класичними детекторами. Кожен з детекторів має ряд власних параметрів, що вимагають оптимізації.

Для кількісної оцінки ефективності роботи різних локальних параметрів (детекторів неоднорідності) існує досить велика кількість підходів. Одним з найбільш популярних методів є receiver operating characteristic аналіз (ROC-аналіз) [9, 10]. Даний метод передбачає побудову так званих ROC-кривих, які містять дані про залежності ймовірності вірно класифікованих значень, званих чутливістю, від ймовірності помилкового спрацьовування, званого специфічністю. Очевидно, що дана оцінка має проводитися на тестових зображеннях, де доступні справжні розподіли класів, що визначаються. При цьому для отримання оцінки ймовірності правильного виявлення на практиці аналізується число

спрацьовувань в межах одного сегмента на одному або декількох тестових зображеннях. Потім число спрацьовувань відноситься до загальної кількості сегментів, що лежать в зазначеній області. Оцінка ймовірності помилкових спрацьовувань проводиться на однорідних ділянках зображення, де також розраховується число спрацьовувань детектора, і нормується на загальне число сегментів, що належать до цих ділянок. Деяка оптимізація залежності може бути проведена шляхом варіювання порогу, який встановлено для детектора. Під порогом мається на увазі таке значення, при перевищенні якого, значення детекторів будуть враховані, або прирівняні нулю в іншому випадку.

Подібний метод аналізу має суттєвий недолік: при отриманні залежностей для декількох детекторів для кожного з них необхідно встановлювати деяке число порогів, при цьому величини порогів, що відповідають одному й тому ж значенню ймовірності помилкового спрацьовування цих детекторів, різні для кожного детектора. Це створює додаткові труднощі, пов'язані з тим, що перед реалізацією описаної процедури стає обов'язковим додатковий попередній аналіз досліджуваних детекторів з метою наближеної оцінки значень порога для кожного з них.

Доповненням до стандартного ROC-аналізу і, в деякому роді, альтернативою виступає параметр area under the curve (AUC), який було спочатку запропоновано для оцінки якості розпізнавання двох класів:

$$A = \frac{S_0 - n_0(n_0 - 1) / 2}{n_0 n_1}, \quad (2)$$

де n_0 і n_1 – кількість елементів в першому і в другому класі, відповідно; $S_0 = \sum r_i$, r_i – ранг i -го елемента, що належить одному з двох визначених класів.

Характерною особливістю і основною перевагою використання параметру AUC є те, що це є ранговий параметр, тобто він базується не на абсолютних значеннях оцінюваного локального параметру, але на їхньому положенні у відсортованій вибірці. Таким чином, даний параметр позбавлений недоліку описаних вище методів - необхідності установки якогось порогу для кожного детектора. Також особлива зручність використання цього параметра полягає в тому, що він дозволяє характеризувати ефективність класифікації єдиним параметром замість аналізу груп залежностей. Цей факт дозволяє використовувати його в автоматизованому режимі обробки даних.

Розглянемо приклад розрахунку AUC для елементарних детекторів меж і малорозмірних об'єктів. Спочатку на тестових зображеннях отримуємо ідеа-

льні карти меж за умови відсутності шуму. Ці ідеальні карти визначають два класи, що класифікуються: «межа» і «однорідна ділянка» (значення n_0 і n_1 – кількість значень, що належать кожному з цих класів). Досліджуваний детектор меж застосовується тепер до цих же тестових зображень, але на цей раз спотворених завадою, яка відповідає досліджуваним умовам. Після цього отриманий масив значень для детектора сортується, і разом з цим проводиться перестановка елементів масиву ідеальних значень. Позиції елементів в «ідеальному» масиві змінюються так само, як і в сортованому масиві результатів роботи детектора меж. Після цього має бути розрахована сума індексів елементів в зміненому масиві ідеальних значень, що належать одному з визначених класів (наприклад, до класу «межа») - значення S_0 , і нарешті, обчислюється вихідне значення самого параметра.

Результатом розрахунку AUC є число, яке змінюється в межах від 0 до 1. Чим краще якість розпізнавання, тим значення AUC вище. Значення, близькі до одиниці, вказують на високу ефективність досліджуваного детектора. Зазначені властивості дозволяють вважати застосування цього параметру за доцільне при оцінюванні та порівнянні характеристик детекторів.

3. Результати моделювання

Для того, щоб мати можливість досліджувати підходи до детектування неоднорідностей, необхідно мати тестове зображення, де справжнє положення і значення яскравості ділянок, що детектуються, апріорно відомі.

Реальні зображення лише частково підходять для перевірки працездатності, показників ефективності і застосовності детекторів меж, оскільки для таких зображень не існує ідеальних карт меж. Тому для того, щоб мати можливість кількісно оцінювати ефективність роботи різних детекторів використовувалися тестові зображення, які було штучно спотворено шумом.

Створене тестове зображення містить однорідні ділянки різної інтенсивності, межі і текстурні ділянки. Воно має розмір 256×256 пікселів і являє собою 8 вертикальних смуг різної інтенсивності (рис. 1). В результаті сформовано послідовність меж з різними рівнями контрасту.

Дане зображення створювалося таким чином, щоб на ньому були присутні межі з різними контрастами. Напрямок та форма меж має невелике значення, оскільки всі дослідження в даній роботі проводяться для параметрів, що обчислюються в невеликих вікнах, і при цьому інтерес мають лише вихідні значення цих параметрів, а не елементи зображення. Дослідження проводилося для детекторів на основі локального середньо квадратичного відхилення та максимуму біамплітуди.

Контраст межі в даному випадку розглядається як відношення значення інтенсивності з одного боку межі до значення інтенсивності з іншого. При цьому контраст завжди вважається позитивним - тобто, більші значення інтенсивності завжди відносяться до меншого. Елементи різної інтенсивності розташовано не в порядку зміни інтенсивності, а таким чином, щоб утворити великий набір контрастів. Отже, на зображеннях присутні такі контрасти: 250; 223; 196; 153; 58,5; 37; 22; 15; 1,5. Таким чином, є контрасти як з дуже малими значеннями (виявлення меж при яких є дуже складним), так і з великими значеннями, що є вкрай важливим для оцінки ефективності виявлення неоднорідностей.

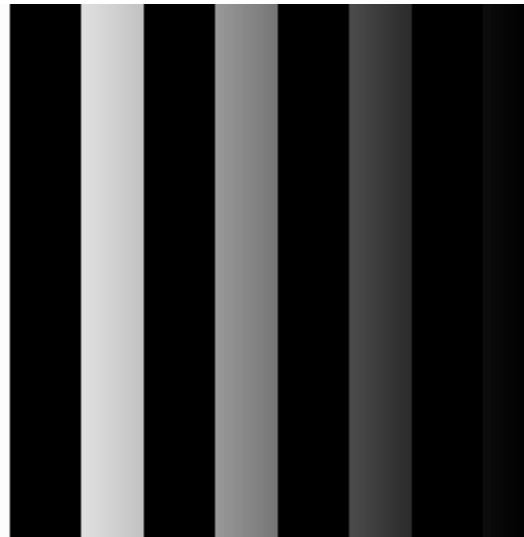


Рис. 1. Тестове зображення

На рис. 2, 3 наведено приклади детектування ділянок зображення, що містять межу для тестового зображення без спотворень (див. рис 2) та при наявності адитивного гаусового шуму з дисперсією, що дорівнює 0,2 (рис. 3) для двох методів: на основі максимуму біамплітуди та локального значення СКВ інтенсивності пікселів [11-13]. Карта тестового зображення, що побудована за максимумом біамплітуди має логарифмічний масштаб, бо розмах значень складав 10^{12} .

Як видно з наведених рисунків обидва детектори гарно виявляють межу на зображенні без спотворень, але при наявності адитивного шуму детектор на основі максимуму біамплітуди візуально програє, але треба пам'ятати, що цей графік побудовано у логарифмічному масштабі.

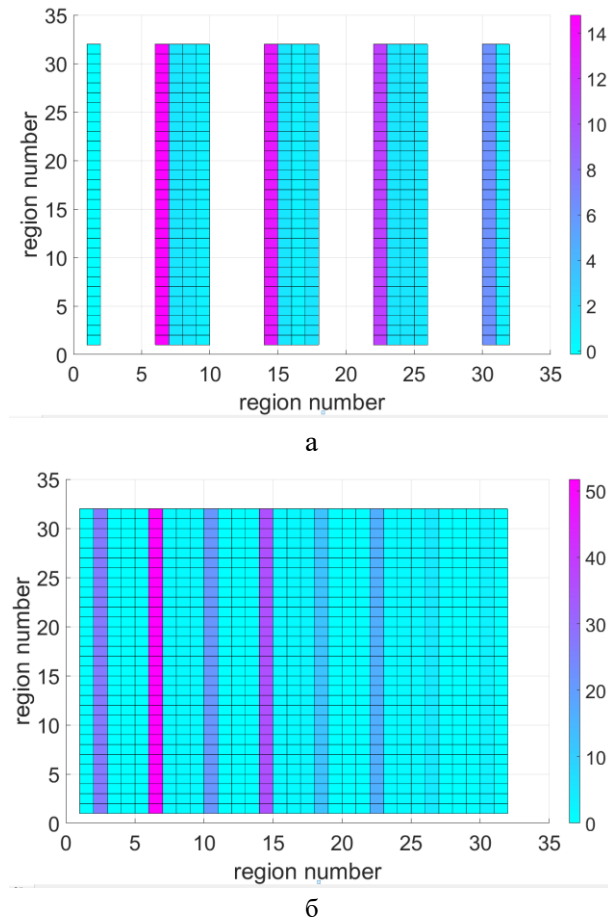


Рис. 2. Приклади детектування ділянок на тестовому зображенні без спотворень: а – за максимумом біамплітуди, б – за локальним значенням СКВ

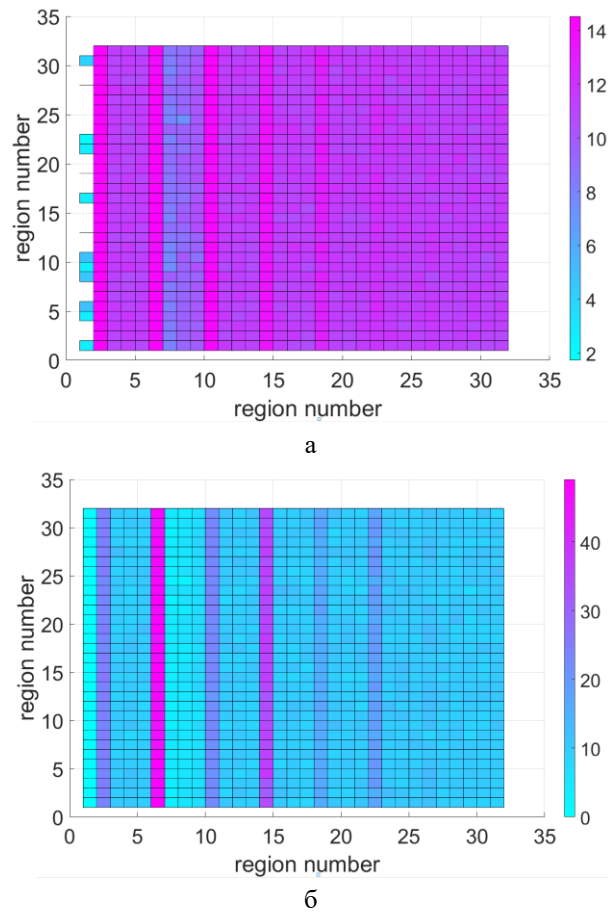


Рис. 3. Приклади детектування ділянок на тестовому зображенні при наявності адитивного гаусового шуму з СКВ 0,2: а – за максимумом біамплітуди, б – за локальним значенням СКВ

На рис. 4 та 5 наведено криві залежності ймовірності вірно класифікованих ділянок зображення від ймовірності помилкового спрацьовування для двох детекторів відповідно.

Як видно з наведених кривих на рис. 5 відсутні графіки для значень СКВ адитивного гаусового шуму для дисперсій, що дорівнюють величинам 0,6 та 0,8. Насправді ці дані присутні, але вони зійшлися у крапку із значеннями (1, 1).

Ці залежності відображають, фактично, чутливість цього детектора до шумів і його здатність виявляти межу при фіксованій ймовірності помилкової тривоги. Чим вище проходить крива, тим детектор ефективніше, тобто він менш чутливий до завад і більш ефективно розпізнає межу.

Аналіз цих залежностей показує, що більш ефективним при малих значеннях дисперсій шуму є детектор на основі локального значення СКВ, але при зростанні дисперсії шуму більш ефективним є детектор на основі максимуму біамплітуди.

Розрахункові значення параметру AUC наведено у таблиці 1. Розрахункові середні значення AUC для методів на основі значення локального СКВ та максимуму біамплітуди дорівнюють відповідно 0,678 та 0,8468.

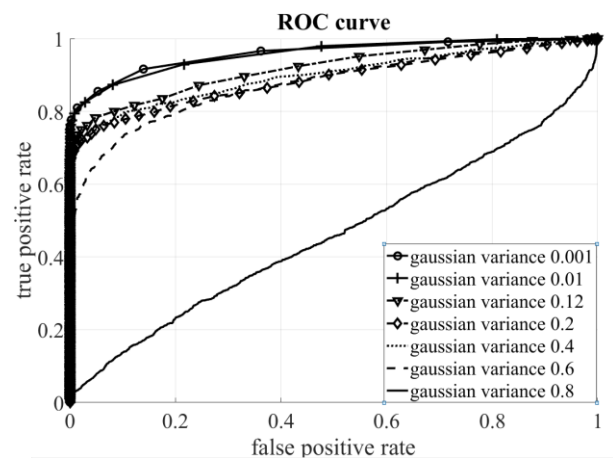


Рис. 4. Криві чутливості детектування межі на основі максимуму біамплітуди

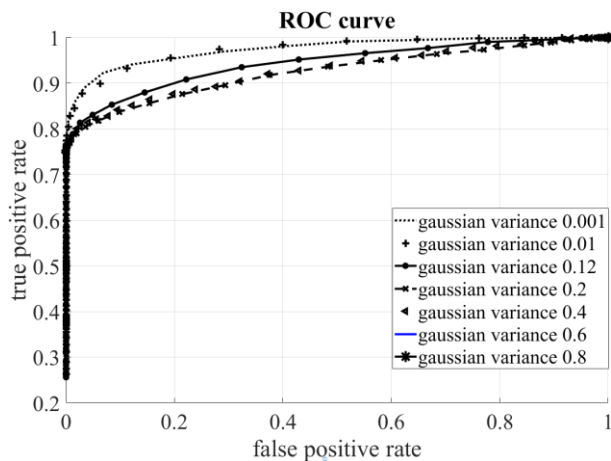


Рис. 5. Криві чутливості детектування межі на основі локального значення СКВ

Таблиця 1

Розрахункові значення параметру AUC

AUC (макс. біамплітуди)	AUC (ЛСКВ)	Дисперсія шуму
0,9382	0,9744	0,001
0,9491	0,9745	0,01
0,9187	0,9437	0,12
0,8876	0,9241	0,2
0,8987	0,9276	0,4
0,8748	0,0015	0,6
0,4608	0	0,8

Не зважаючи на те, що за показником ефективності запропонований метод програє (див. табл. 1), треба зробити зауваження, що він є більш ефективним при великих значеннях дисперсії шуму, але при малих значеннях дисперсії шуму програє відомому методу.

Таким чином, аналіз та порівняння величин параметру AUC, які наведено у таблиці 1, дозволяє визначити як кількісні переваги запропонованого біспектрального методу розпізнавання неоднорідностей на зображенні в умовах певних великих величин дисперсії шуму, так і певні недоліки біспектрального методу, які спостерігають за умов малих величин дисперсії адитивного шуму.

Висновки

Запропоновано новий метод детектування неоднорідностей на зображенні за допомогою нової інформативної ознаки – оцінки локального максимуму біамплітуди.

Для аналізу ефективності запропонованого методу було створене тестове зображення з різними

контрастами меж. За допомогою запропонованого біспектрального методу та відомого методу оцінки локального СКВ побудовано карти меж для тестового зображення без спотворень та при наявності адитивного гаусового шуму.

Для порівняння показників запропонованого та відомого методів побудовано графіки залежності кількості вірно класифікованих неоднорідних ділянок від кількості невірно класифікованих (ROC) для запропонованого та відомого методів детектування. Як видно з графіків (див. рис. 4, 5) більш ефективним при малих значеннях дисперсії шуму є детектор на основі локального значення СКВ, але при зростанні дисперсії шуму більш ефективним є детектор на основі максимуму біамплітуди.

Розраховані значення AUC, для методів на основі значення локального СКВ та максимуму біамплітуди близькі і дорівнюють відповідно величинам 0,678 та 0,8468. Незважаючи на те, що за показником ефективності запропонований метод програє (див. табл. 1, треба зробити зауваження, що він є більш ефективним при великих значеннях дисперсії шуму (при дисперсії шуму 0,6 AUC = 0,8748), але при малих значеннях дисперсії шуму програє відомому методу.

Література

1. Erinjery, J. J. Mapping and assessment of vegetation types in the tropical rainforests of the Western Ghats using multispectral Sentinel-2 and SAR Sentinel-1 satellite imagery [Text] / J. J. Erinjery M. Singh, R. Kent // *Remote Sens. Environment*, – October 2018. – vol. 216. – P. 345-354. DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.006.
2. Investigating the Effects of Land Use and Land Cover on the Relationship between Moisture and Reflectance Using Landsat Time Series [Text] / H. J. Tollerud, J. F. Brown, T. R. Loveland // *Remote Sensing*. – June 2020. – vol. 12. – P. 1 – 29. DOI: 10.3390/rs12121919.
3. Haralick, R. M. Textural features for image classification [Text] / R. M. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – November 1973. – Vol. 3, no. 6. – P. 610-621.
4. Террайн, Ч. У. Алгоритмы анализа изображений, основанные на статистических моделях [Текст] / Ч. У. Террайн, Т. Ф. Куатъери, Д. Е. Даджон // *ТИИЭР*. – 1986. – Т. 74, Вып. 4. – С. 4-25.
5. Бассвиль, М. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем [Текст] / М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвенист. – М. : Мир, 1989. – 278 с.
6. Малахов, А. Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований

[Текст] / А. Н. Малахов. – М. : Сов. радио, 1978. – 376 с.

7. Nikias, C. L. *Bispectral estimation: A digital signal processing framework* [Text] / C. L. Nikias, M. R. Raghuveer // *Proceedings of the IEEE*. – July 1987. – Vol. 75, no. 7. – P. 869-891. DOI: 10.1109/PROC.1987.13824.

8. *Application of bispectrum estimation for time-frequency analysis of ground surveillance Doppler radar echo signals* [Text] / J. T. Astola, K. O. Egiazarian, G. I. Khlopov, S. I. Khomenko, I. V. Kurbatov, V. Ye. Morozov, A. V. Totsky // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2008. – Vol. 57, no. 9. – P. 1949–1957.

9. Ling, X. C. *AUC: a Statistically Consistent and more Discriminating Measure than Accuracy* [Text] / C. X. Ling, J. Huang, H. Zhang // *IJCAI'03: Proceedings of the 18th international joint conference on Artificial intelligence*. – August 2003. – P. 519–524.

10. Ling, X. C. *AUC: a Better Measure than Accuracy in Comparing Learning Algorithms* [Text] / C. X. Ling, J. Huang, H. Zhang // *Advances in Artificial Intelligence: 16th Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*. – 2003. – P. 329-341.

11. Беликова, Т. П. *Использование адаптивных амплитудных преобразований для препарирования изображений* [Текст] / Т. П. Беликова, Л. П. Ярославский // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетехн.* – 1974. – Вып. 14. – С. 88-98.

12. *Применение устойчивых оценок параметров выборок данных при обработке изображений* [Текст] / А. А. Роечко, Д. В. Февралев, Н. Н. Пonomarenko, В. В. Лукин // *Восточноевропейский журнал передовых технологий*. – 2007. – № 3/2 (27). – С. 21-31.

13. *Local activity indicators: analysis and application to hard-switching adaptive filtering of images* [Text] / V. P. Melnik, V. V. Lukin, A. A. Zelensky, J. T. Astola, P. Kuosmanen // *Optical Engineering Journal*. – 2001. – Vol. 40, No 8. – P. 1441-1445.

References

1. Erinjery, J. J., Singh, M., Kent, R. Mapping and assessment of vegetation types in the tropical rainforests of the Western Ghats using multispectral Sentinel-2 and SAR Sentinel-1 satellite imagery. *Remote Sens. Environment*, October 2018, vol. 216, pp. 345-354.

2. Tollerud, H. J., Brown, J. F., Loveland, T. R. Investigating the Effects of Land Use and Land Cover on the Relationship between Moisture and Reflectance Using Landsat Time Series. *Remote Sensing*, June 2020, vol. 12, pp. 1-29.

3. Haralick, R. M., Shanmugam, K., Dinstein, I. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 3, no. 6, 1973, pp. 610-621.

4. Terraien, Ch. U., Kua'eri, T. F., Dadzhon, D. E. *Algoritmy analiza izobrazhenii, osnovannye na statisticheskikh modelyakh* [Statistical Model Image Analysis Algorithms]. vol. 74, no. 4, 1986, pp. 4-25.

5. Basvil, M., Vilsky, A., Banvenist, A. *Obnaruzhenie izmeneniya svoistv signalov i dinamicheskikh sistem* [Detection of changes in the properties of signals and dynamic systems]. Moscow, Mir Publ., 1989. 278 p. ISBN 5-03-000573-0.

6. Malakhov, A. N. *Kumulyantnyi analiz sluchainykh negaussovykh protsessov i ikh preobrazovaniy* [Cumulative analysis of random non-Gaussian processes and their transformations]. Moscow, Soviet radio Publ., 1978. 376 p.

7. Nikias, C. L., Raghuveer, M. R. Bispectral estimation: A digital signal processing framework. *Proc. IEEE*, vol. 75, no. 7, 1987, pp. 869-891.

8. Astola, J. T., Egiazarian, K. O., Khlopov, G. I., Khomenko, S. I., Kurbatov, I. V., Ye. Morozov, V., Totsky, A. V. Application of bispectrum estimation for time-frequency analysis of ground surveillance Doppler radar echo signals. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 9, 2008, pp. 1949-1957.

9. Ling, X. C., Huang, J., Zhang, H. AUC: a Statistically Consistent and more Discriminating Measure than Accuracy. *IJCAI'03: Proceedings of the 18th international joint conference on Artificial intelligence*, 2003, pp. 519-524.

10. Ling, X. C., Huang, J., Zhang, H. AUC: a Better Measure than Accuracy in Comparing Learning Algorithms. *Advances in Artificial Intelligence: 16th Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*, 2003, pp. 329-341.

11. Belikova, T. P., Yaroslavskij, L. P. *Ispolzovanie adaptivnyh amplitudnyh preobrazovaniy dlya preparirovaniya izobrazhenij* [Using adaptive amplitude transforms for image preparation]. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Obshetehn.*, 1974, vol. 14, pp. 88-98.

12. Roenko, A. A., Fevraleev, D. V., Ponomarenko, N. N., Lukin, V. V. *Primenenie ustoychivykh otsenok parametrov vyborok dannykh pri obrabotke izobrazhenii* [Application of stable estimates of parameters of data samples in image processing]. *Vostochnoevropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2007, no. 3/2 (27), pp. 21-31.

13. Melnik, V. P., Lukin, V. V., Zelensky, A. A., Astola, J. T. Kuosmanen, P. *Local activity indicators: analysis and application to hard-switching adaptive filtering of images*. *Optical Engineering Journal*, 2001, vol. 40, no. 8, pp. 1441-1445.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИИ С ПОМОЩЬЮ МАКСИМУМА БИАМПЛИТУДЫ

В. В. Науменко, А. В. Тоцкий, Б. В. Коваленко, Е. Н. Анисин

Предметом изучения в статье является анализ эффективности нового метода выявления неоднородностей на цифровом изображении с помощью оценивания биамплитуды интенсивности пикселей. **Целью** является оценка эффективности нового метода выявления неоднородностей на изображении с помощью максимума биамплитуды по сравнению с известным методом на основе оценки локального среднеквадратичного отклонения (СКО) значений интенсивности пикселей. **Задача:** формализовать процедуру расчета максимума биамплитуды интенсивности пикселей в локальном сегменте; создать тестовое изображение с вариациями контраста на границах; разработать математическую модель для расчета в системе Matlab показателя эффективности выявления неоднородностей на изображении при наличии аддитивного гауссова шума с различными значениями СКО шума; предоставить для анализа и сравнения графики зависимости количества верно классифицированных неоднородных участков от количества неверно классифицированных в виде параметра receiver operating characteristic (ROC). Были использованы следующие **методы:** метод биспектрального анализа данных; методы теории вероятности и математической статистики; методы цифровой обработки изображений. Получены следующие **результаты:** построена карта границ для тестового изображения без искажений и при наличии аддитивного гауссова шума с дисперсией шума, равной 0,2, для двух типов детекторов: первый, на основе максимума биамплитуды и, второй, на основе оценки локальной величины СКО. Из результатов компьютерного моделирования видно, что оба детектора хорошо определяют границу на изображении при отсутствии шумов. Однако при наличии аддитивного шума детектор на основе максимума биамплитуды обеспечивает существенное преимущество. Построены графики зависимости количества верно классифицированных неоднородных участков от количества неверно классифицированных для предлагаемого и известного эталонного методов детектирования с использованием параметра ROC. Рассчитано значение параметра area under the curve (AUC), характеризующие эффективность обнаружения неоднородностей на изображении. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: предложен новый метод детектирования неоднородностей на изображении с помощью нового информативного признака - оценки локального максимума биамплитуды. Для анализа показателей предложенного метода было создано тестовое изображение с различными контрастами границ. С помощью предлагаемого метода и известного метода оценки локального СКВ построены карты границ для тестового изображения без искажений и при наличии аддитивного гауссова шума. Для оценки эффективности двух методов построены графики зависимости количества верно классифицированных неоднородных участков от количества неверно классифицированных для предлагаемого и эталонного методов детектирования. Более эффективным при малых значениях дисперсии шума является детектор на основе локального значения СКО, но при росте дисперсии шума более эффективно работает детектор на основе оценки максимума биамплитуды. Рассчитанные величины AUC для методов на основе оценки локального СКВ и оценки максимума биамплитуды равны соответственно 0,678 и 0,8468. Несмотря на то, что по показателю эффективности предлагаемый метод проигрывает при малых значениях дисперсии шума, биспектральный метод является более эффективным при больших значениях дисперсии шума, в частности, когда дисперсия шума равна 0,6, $AUC = 0,8748$.

Ключевые слова: биспектр; биамплитуда; обработка изображений; ROC-кривая; параметр AUC.

PERFORMANCE EVALUATION FOR HETEROGENEITIES DETECTION IN THE IMAGES USING BIMAGNITUDE MAXIMUM

V. Naumenko, O. Totsky, B. Kovalenko, Y. Anisin

The **subject** of the article is to analyze the effectiveness of a new method for detecting heterogeneities in a digital image by estimating the bimagnitude maximum of the pixel intensities. The **aim** is to evaluate the effectiveness of the new method of detecting heterogeneities in the image using the maximum of the bimagnitude compared to the known method based on the estimation of the local root mean square deviation (LRMSD) of pixel intensity values. The **objectives** of the paper are the following: to formalize the procedure for computing the bimagnitude maximum of the pixels in the local segment; create a test image with different contrast values on the borders; to develop a mathematical model for calculating in the Matlab system the efficiency of detecting heterogeneities in the image in the presence of additive Gaussian noise with different values of noise RMS; provide for analysis and comparison of the graphs the receiver operating characteristic (ROC) contained the number of correctly classified non-homogeneous areas versus the number of incorrectly classified areas. The used **methods** are the following: bispectral data analysis method; methods of probability theory and mathematical statistics; methods of digital image processing. The following **results** were obtained. A boundary map for the test image without distortion and the presence of additive Gaussian noise with a variance equal to 0.2 is constructed for two types of detectors: the first one is based on the maximum amplitude and the second one is based on the estimation of the local RMS. The results of

computer simulations show that both detectors fine-tune the boundary for the images in the absence of noise. But in the presence of additive noise, the detector based on the biamplitude maximum provides a significant advantage. Graphs of the dependence of the number of correctly classified inhomogeneous sections on the number of incorrectly classified areas for the proposed and known reference detection methods are represented. The area under the curve (AUC) values that characterize the efficiency of detecting heterogeneities in the image are calculated. The scientific novelty of the obtained results is the following: a new approach of detecting inhomogeneities in the image is proposed with the help of a new informative feature estimated in the form of the local biamplitude maximum. To analyze the effectiveness of the proposed method, a test image was formed with different border contrast values. Using the proposed technique and the known method, boundary maps were constructed for the test image without distortion and in the presence of additive Gaussian noise. To evaluate the effectiveness of two methods, the graphs were plotted against the number of correctly classified inhomogeneous sites by the number of incorrectly classified (ROC) for both proposed and known detection methods. A detector based on the local RMS value is more effective at small Gaussian noise variance values, but as the noise variance increases, detector based on the biamplitude maximum estimation is more effective. The calculated AUC values for studied methods based on local RMS estimation and maximum biamplitude estimation are equal to 0.678 and 0.8468, respectively. Even though the proposed method loses efficiency, the bispectrum-based method is more effective at large values of noise variance, in particular, when the noise RMS is 0.6, AUC = 0.8748.

Keywords: bispectrum; biamplitude; image processing; ROC curve; AUC parameter.

Науменко Виктория Владимировна – канд. техн. наук, доц. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. А. А. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Тоцкий Александр Владимирович – д-р техн. наук, проф., професор інформаційно-комунікаційних технологій ім. А. А. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Коваленко Богдан Витальевич – студ. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. А. А. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Анисин Евгений Николаевич – студ. каф. інформаційно-комунікаційних технологій ім. А. А. Зеленського, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Victoriia Naumenko – PhD of Technical Science, Associate Professor of Department of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: v.naumenko@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-5291-6032, Scopus Author ID: 55847192600, Researcher ID: E-9331-2019, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=NzQEfiAAAAAJ&hl>.

Alexander Totsky – Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Department of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: totskiyalexander@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-3966-0746, Scopus Author ID: 6507438749, Researcher ID: F-1300-2019, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=MEBF4fIAAAAJ>.

Bohdan Kovalenko – student of Department of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: svonton7@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-9360-0691.

Yevhenii Anisin – student of Department of Information-communication technologies named after O. O. Zelensky, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: anisinjack890@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6564-2395.