

УДК 621.397.1

В.В. Зоріло,
кандидат технічних наук

АЛГОРИТМ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОГО РОЗМИТТЯ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ

Захист інформаційних систем, зокрема виявлення порушень цілісності цифрових зображень, є важливим завданням сьогодення. Часто ознакою порушення цілісності цифрового зображення є виявлення слідів його розмиття. Дослідження в цій статті спрямовані на створення алгоритму виявлення розмиття цифрового зображення за Гаусом із радіусом, меншим від одиниці, що не дозволяє жоден з відомих алгоритмів виявлення розмиття.

Ключові слова: цифрове зображення, розмиття зображення, фальсифікація зображення, сингулярні числа.

Защита информационных систем, в частности выявление нарушений целостности цифровых изображений, является важной задачей современности. Часто признаком нарушения целостности цифрового изображения является выявление следов его размытия. Исследования в данной статье направлены на создание алгоритма выявления размытия цифровых изображений по Гауссу с радиусом меньше единицы, чего не позволяет ни один из известных алгоритмов выявления размытия.

Ключевые слова: цифровое изображение, размытие изображения, фальсификация изображения, сингулярные числа.

Nowadays information system security, in particular, identifying the violation of the integrity of digital images is considered to be an important task. When the integrity is violated, the image is often blurred. Investigation of this paper is aimed at creating algorithm of Gaussian blur detection with radius, less than one, which does not allow any of the known algorithms for detecting blur.

Keywords: digital image, image blurring, image falsification, singular values.

Стрімкий розвиток ІТ-технологій, здешевлення та загальнодоступність редагуючих цифрових сигналів програмних засобів, таких як, наприклад, Adobe Photoshop, призводить до зростання комп'ютерної злочинності, зокрема, до значного збільшення кількості випадків несанкціонованих змін ЦЗ. Оскільки є безліч способів зміни стану ЦЗ, що відрізняються за своєю суттю і спрямованістю, є й безліч методів виявлення наслідків впливу на них чи порушення їх цілісності. На цей час активно розвивається галузь експертизи цифрових контентів, створюються нові та вдосконалюються наявні програмні методи виявлення порушень цілісності ЦЗ.

Як показує практика та факти, відомі з відкритих джерел, одним з програмних інструментів, що часто використовується під час обробки (фальсифікації) ЦЗ, є розмиття. Крім того, розмиття може застосовуватися як стеганографічні атаки на ЦЗ. І в тому, і в іншому випадку розмиття має бути настільки малим, щоб якість (чіткість) ЦЗ не викликала сумнівів в його автентичності. Наявність слідів

розмиття є вказівкою на можливу фальсифікацію ЦЗ або свідчить про застосування атаки на піддослідне зображення-стеганоповідомлення.

На цей момент методи виявлення розмиття, про які відомо з відкритих джерел, дозволяють частково вирішити зазначену проблему. В [1] наведений метод, основою якого є аналіз найбільш контрастного рядка (стовпця) зображення. Цей метод дозволяє оцінити ступінь розмиття цифрового монохроматичного зображення. Але недоліком цього методу є те, що його застосування є можливим лише тоді, коли факт розмиття заздалегідь відомий.

Активно протягом останнього десятиріччя розвиваються методи виявлення порушень цілісності цифрових зображень, засновані на загальному підході до аналізу стану та технології функціонування інформаційної системи (ЗПАІС), який, у свою чергу, базується на матричному аналізі та теорії збурень [2]. У [3] було проведено адаптацію стеганоаналітичного методу (САМ), заснованого на ЗПАІС, для задачі знаходження порушень цілісності ЦЗ, а саме накладання шуму та розмиття зображення. Цей метод дозволяє з високою ймовірністю визначити факт порушення цілісності ЦЗ. Та недоліком такого методу є те, що він недієздатний в умовах, коли ЦЗ було збережено із втратами. Адаптований для вирішення цієї задачі САМ дозволяє з високою ймовірністю вірно відокремити розмиті ЦЗ від нерозмитих за умови, що радіус розмиття не менше двох пікселів, і зображення до розмиття зберігалося у форматі з втратами, а після – у форматі без втрат. Розроблений у [4] метод виявлення розмиття (МВР) при додатковому дослідженні є ефективним при виявленні розмиття, починаючи з радіусу один піксель, крім того ЦЗ до та після розмиття може бути у форматі як з втратами, так і без них, у чому полягає його головна перевага перед іншими відомими методами.

Якщо розмиття ЦЗ проводиться з метою приховання результатів його фальсифікації або як стеганографічна атака, то при великому радіусі воно з високою ймовірністю стає помітним візуально та одразу викликає підозри. З огляду на те, що розмиття ЦЗ має залишатися візуально непомітним, доцільно розмивати ЦЗ з якомога меншим радіусом. Сучасні графічні редактори (Adobe Photoshop), у свою чергу, дають можливість здійснювати розмиття ЦЗ з радіусом, меншим від одиниці. Про застосування МВР та інших методів для виявлення розмиття із радіусом, меншим одиниці, нічого не відомо.

У зв'язку з цим, можна констатувати, що завдання детектування порушення цілісності цифрового зображення не є до кінця вирішеним, воно залишається важливою та потребує розробки нових алгоритмів, зокрема виявлення розмиття зображення.

Мета цієї роботи – детектування порушення цілісності цифрових зображень шляхом розробки алгоритму виявлення його розмиття з радіусом, меншим від одиниці.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання.

1. Виявлення характерних особливостей формальних параметрів, що відповідають цифровому зображенню, в умовах його розмиття з радіусом, меншим одиниці.

2. Розробка алгоритму виявлення розмиття цифрового зображення з радіусом, меншим від одиниці, та оцінка його ефективності.

За основу в цьому дослідженні взято найефективніший на сьогодні метод виявлення розмиття цифрового зображення, заснований на ЗПАІС. Згідно з ЗПАІС як математична модель ЦЗ використовується його матриця яскравості пікселів. Властивості ЦЗ визначаються математичними властивостями відповідних матриць. Будь-яка матриця однозначно визначається повним набором формальних параметрів – множиною сингулярних чисел (СНЧ) і набором сингулярних векторів (СНВ): СНЧ і СНВ несуть в собі всю інформацію про стан ЦЗ. Будь-яке перетворення ЦЗ формально представляється у вигляді сукупності збурень СНЧ і СНВ відповідної йому матриці (матриць) [2]. Для досягнення поставленої мети як формальні параметри будемо використовувати СНЧ-блоки стандартного розбиття матриці ЦЗ. Сингулярні вектори не розглядаються через те, що їх реакція на збурення не дає можливості оцінити величину самої збурної дії [2].

У [5] виявлено деякі особливості СНЧ, що виникають у наслідок розмиття цифрового зображення з радіусом, меншим одиниці. Характерною особливістю СНЧ, що дозволяє детектувати розмиття з малим радіусом, є збільшення в наслідок розмиття певної їх кількості у відношенні до загальної кількості блоків стандартного розбиття матриці ЦЗ. Слід звернути увагу на те, що аналізу підлягають усі СНЧ блоків матриці ЦЗ, крім максимального. У цій роботі проведемо більш детальне дослідження зазначеного явища.

Проведемо експеримент: матрицю яскравості пікселів тестового ЦЗ розміром $m \times n$ розіб'ємо стандартним чином на блоки 8×8 . Для кожного блоку знайдемо множину СНЧ. Отримаємо так звану матрицю сингулярних чисел (МСЧ) ЦЗ розміром $m \times [n/8]$, що складається з блоків сингулярних чисел розміром 8×1 , які відповідають блокам стандартного розбиття матриці яскравості пікселів ЦЗ. Засобами графічного редактору Adobe Photoshop CS5 розмиємо ЦЗ за Гаусом із радіусом, меншим від одиниці (для визначеності нехай радіус дорівнює 0.5 пікселя), та збережемо результат у форматі без втрат. Для розмитого зображення побудуємо МСЧ.

Візуально застосоване розмиття непомітне. Проте зміни можна побачити, проаналізувавши відповідні МСЧ ЦЗ до та після розмиття.

Розмиття – це згладжування контурів, тобто зменшення високочастотної складової сигналу ЦЗ, що для більшості СНЧ призводить до їх зменшення [4]. Однак під час порівняння СНЧ до і після проведення зазначеного розмиття було виявлено, що деякі СНЧ деяких блоків матриці ЦЗ збільшуються (рис. 1).

Для підрахунку кількості тих СНЧ, що збільшилися після розмиття ЦЗ, відніmemo від МСЧ нерозмитого зображення МСЧ розмитого зображення. Отримаємо так звану матрицю різниці (МР) (рис. 2). Шукані СНЧ відповідають від'ємним значенням МР.

Проведемо більш детальне дослідження цього явища. Для повноти експерименту будемо розмивати ЦЗ із радіусами від 0.1 до 1 пікселя з кроком 0.1. Розмиті ЦЗ збережемо без втрат.

Під час експерименту, до якого було залучено 200 ЦЗ, різних за форматом збереження та сюжетом, однакових за розміром, було встановлено: чим розмиття менше, тим більше таких блоків у ЦЗ, СНЧ в яких збільшуються при розмитті (табл. 1).

Винятком стало розмиття з радіусом 0.1. Експеримент показав, що матриця різниці складається з нулів, тобто на СНЧ це розмиття не вплинуло взагалі. На

основі цього можна зробити припущення, що настільки маленьке розмиття не реалізоване у зазначеному графічному редакторі. Видно також, що розмиття цифрових зображень із радіусами 0.4, 0.8 та 0.9 децю вибиваються із загальної тенденції (рис. 3).

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.8003e+03	1.8384e+03	1.7051e+03	1.7123e+03	1.6634e+03	1.6907e+03	1.7680e+03	1.7293e+03
2	17.0415	32.6355	54.0154	47.4048	41.1182	24.8423	35.6029	38.5938
3	2.8183	17.0340	28.7057	34.4063	15.4810	13.0558	8.6010	24.0496
4	1.0572	0.9660	17.1543	7.7705	0.8940	2.6466	2.6305	1.7626
5	0.7225	0.8189	0.9243	0.7223	0.8002	0.9841	0.9325	0.9076
6	0.4554	0.5587	0.6291	0.4715	0.4337	0.4749	0.6990	0.5783
7	0.2714	0.2958	0.3190	0.0385	0.3775	0.4021	0.3055	0.2401
8	0.0544	0.0260	0.0808	8.2242e-04	0.0717	0.1114	0.0829	0.1378
9								

а

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.8011e+03	1.8360e+03	1.7088e+03	1.7133e+03	1.6634e+03	1.6931e+03	1.7681e+03	1.7311e+03
2	14.2461	31.2367	45.8543	33.3745	30.9274	19.7833	29.7157	37.4178
3	2.2034	13.7303	21.5605	21.8400	15.8269	8.7870	5.3632	14.2250
4	1.3676	0.9870	8.8022	7.5504	1.1477	2.5158	2.4842	2.3545
5	0.7452	0.9266	0.7838	0.9885	0.7175	1.2281	0.7553	1.0242
6	0.6314	0.4183	0.4297	0.5101	0.5157	0.5163	0.5705	0.6744
7	0.2501	0.2471	0.2576	0.2750	0.2883	0.3694	0.2145	0.3063
8	0.1446	0.1078	0.0657	0.0939	0.0209	0.0458	0.0274	0.0555
9								

б

Рис. 1. Фрагмент МСЧ блоків ЦЗ до розмиття (а), після розмиття за Гауссом з радіусом 0.5 (б)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0.7563	2.4021	-3.6929	-0.9429	0.0544	-2.3871	-0.1242	-1.7930
2	2.7954	1.3988	8.1612	14.0304	10.1909	5.0590	5.8872	1.1760
3	0.6148	3.3036	7.1452	12.5662	-0.3459	4.2687	3.2378	9.8246
4	-0.3104	-0.0211	8.3520	0.2202	-0.2537	0.1307	0.1463	-0.5919
5	-0.0227	-0.1077	0.1405	-0.2662	0.0827	-0.2440	0.1772	-0.1166
6	-0.1760	0.1404	0.1994	-0.0386	-0.0820	-0.0414	0.1285	-0.0961
7	0.0213	0.0488	0.0614	-0.2365	0.0892	0.0326	0.0910	-0.0661
8	-0.0902	-0.0818	0.0151	-0.0931	0.0508	0.0657	0.0554	0.0822
9								

Рис. 2. Фрагмент матриці різниці

Примітно, що кількість від'ємних значень матриці різниці для більшості радіусів поступово зменшується зі збільшенням радіусу розмиття, а кількість від'ємних значень для 0.4, 0.8 та 0.9 знаходяться у «впадинах» графіку. Пояснення цього явища може бути приховане в програмній реалізації описаного розмиття, що використовується в графічному редакторі, проте розробники Adobe Photoshop не афішують математичну реалізацію своїх фільтрів зі зрозумілих причин, тому зазначену гіпотезу досі не перевірено.

Кількість від'ємних значень МР залежно від радіусу розмиття (R – радіус розмиття)

№ ЦЗ	R=0.2	R=0.3	R=0.4	R=0.5	R=0.6	R=0.7	R=0.8	R=0.9	R=1
1	120361	94228	1653	79564	77188	66293	800	717	58425
2	121474	88616	3950	80806	76401	71109	3500	3376	64368
3	120907	85470	4026	73523	70314	60990	2944	2838	54830
4	123582	86518	2497	73313	70096	54622	1444	1366	48158
5	118162	97118	1531	77544	75801	57844	493	468	49247
6	29528	20142	1211	16707	15809	13645	936	900	12435
7	35147	25172	1425	20490	19373	16639	925	872	15295
8	36582	24002	1540	19844	18662	16286	1012	983	14969
9	27968	25533	1169	24913	23776	21573	1007	994	20164
10	28751	27367	930	23916	23083	19406	541	530	18004
...

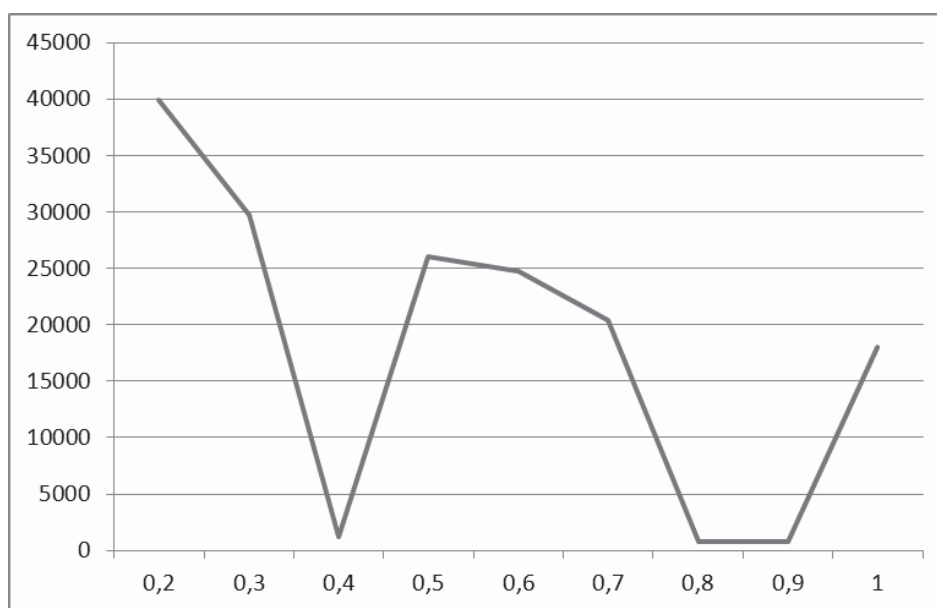


Рис. 3. Середні значення кількості від'ємних значень МР в залежності від радіусу розмиття (вісь абсцис – радіус розмиття, вісь ординат – кількість від'ємних значень МР)

Загальна тенденція полягає в зменшенні кількості СНЧ, що збільшуються після розмиття ЦЗ, із наближенням радіусу до одиниці зліва, як показано на рисунку 3. Далі для визначеності будемо розглядати розмиття за Гаусом із радіусом 0.5 пікселя як середній радіус від 0 до 1.

Проведемо наступний експеримент: подібно тому, як у МВР [4] проводилося експертне розмиття для уточнення висновку про наявність первинного розмиття цифрового зображення, перевіримо вплив повторного розмиття із радіусом 0.5 пікселя на кількість сингулярних чисел, що збільшуються після застосування першого розмиття. Тестові зображення, розмиті з радіусом 0.5, піддамо повторному розмиттю

з цим же радіусом. З отриманих даних (табл. 2) очевидно, що кількість від'ємних значень МР для вдруге розмитих зображень зменшилася настільки, що стає можливим виділити порогове значення для відокремлення вперше розмитих ЦЗ від тих, що були розмиті до проведення розмиття експертом.

Позначимо матриці різниці ЦЗ, розмитого вперше та вдруге, МР(1) та МР(2) відповідно. Знайдемо відношення кількості від'ємних значень МР(1) та МР(2) до загальної кількості блоків цифрового зображення (табл. 3).

Таблиця 2

Кількість від'ємних значень МР, де a – МР(1), a' – кількість від'ємних значень МР(2)

№ ЦЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a	23812	23639	24427	23515	22062	21378	21776	18806	18806	22287
a'	12154	12628	10961	12202	12301	15013	12354	12354	11369	14052

Таблиця 3

Результати проведеного експерименту, де a – кількість від'ємних значень МР(1); a' – кількість від'ємних значень МР(2)

№ ЦЗ	a	a'	загальна кількість блоків ЦЗ (d)	a/d	a'/d
1	23812	12154	12288	1.9	1.0
2	23639	12628	12288	1.9	1.0
3	24427	10961	12288	2.0	0.9
4	23515	12202	12288	1.9	1.0
5	22062	12301	12288	1.8	1.0
6	21378	15013	12288	1.7	1.2
7	21776	12354	12288	1.8	1.0
8	18806	11369	12288	1.5	0.9
9	21794	11179	12288	1.8	0.9
10	21346	11744	12288	1.7	1.0

Під час аналізу отриманих даних встановлено, що як порогове значення, що дозволяє відділити більшість розмитих експертом вперше ЦЗ від повторно розмитих, доцільно використовувати значення 1.3, що підтверджується експериментально.

На основі досліджень, проведених вище, пропонується такий алгоритм.

Нехай F – $n*m$ -матриця піддослідного ЦЗ, G – $n*m$ -матриця піддослідного ЦЗ після експертного розмиття.

1. Розбити матриці F та G зображення стандартним чином на блоки $8*8$:

$$F_{ij}, i = 1, 2, \dots, [n/8], j = 1, 2, \dots, [m/8],$$

$$G_{ij}, i = 1, 2, \dots, [n/8], j = 1, 2, \dots, [m/8].$$

2. Визначити сингулярний спектр для кожного блоку $F_{ij} G_{ij}$. Максимальне сингулярне число в кожному блоці $F_{ij} G_{ij}$ прирівняти до нуля.
3. Побудувати матрицю різниці $RAZN$ розміром $n \times [m/8]$ з елементами

$$RAZN_{i(k)j} = F_{i(k)j} - G_{i(k)j},$$

де k – номер сингулярного числа у блоці, $k = 1, 2, \dots, 8$.

4. Обчислити кількість блоків ЦЗ: $d = (m * n)/64$.
5. Знайти відношення: a/d , де a – кількість від'ємних значень в матриці різниці $RAZN$:

якщо $a/d \leq 1,3$, зображення розмите,
інакше – зображення не розмите.

Ефективність цього алгоритму наведено в таблиці 4 у вигляді помилок першого та другого роду.

Таблиця 4

Аналіз ефективності розробленого алгоритму

	Помилки першого роду	Помилки другого роду
Для ЦЗ у форматі без втрат	20 %	5 %
Для ЦЗ у форматі з втратами	19 %	6 %

У статті розроблено практичний алгоритм, який дозволяє виявити розмиття цифрового зображення за Гаусом із радіусом, меншим одиниці, а саме – 0.5. Отримана принципова можливість виявлення розмиття ЦЗ з радіусом, меншим одиниці. З урахуванням складності виявлення розмиття з настільки малим радіусом, ефективність цього алгоритму є задовільною.

Подальші наші зусилля будуть спрямовані на теоретичне пояснення результатів, отриманих під час проведення зазначеного дослідження, та створення методу виявлення розмиття за Гаусом цифрового зображення з радіусом, меншим від одиниці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кольцов П.П. Оценка размытия изображения / П.П. Кольцов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 95–102.
2. Кобозева А.А. Основы общего подхода к решению проблемы обнаружения фальсификации цифрового сигнала / А.А. Кобозева // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2009. – Вип. 72. – С. 35–41.
3. Бобок И.И. Адаптация стеганоаналитического метода, основанного на теории возмущений, для задачи выявления нарушения целостности цифрового изображения / И.И. Бобок, Е.В. Малахов // Информатика та математичні методи в моделюванні. – 2012. – Том 2, № 4. – С. 297–303.
4. Зорило В.В. Метод выявления результатов размытия цифрового изображения / В.В. Зорило, А.А. Кобозева // Сучасна спеціальна техніка. – 2010. – № 3 (22). – С. 52–63.
5. Зорило В.В. Влияние размытия с малым радиусом на формальные параметры цифрового изображения / В.В. Зорило // Труды Одесского политехнического университета. – 2014. – Вып. 1 (31). – С. 128–133.

Отримано 17.06.2014