

РАЗРАБОТКА СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОГРУЖЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ОБЛАСТЬ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. Ахматетьева, В.В. Коваленко

Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: a.v.akhmametieva@opu.ua

В работе разработан новый стеганографический метод погружения дополнительной информации в пространственную область цветных цифровых изображений, основанный на учете разности между значениями яркости цветового триплета (методе PVD). В ходе разработки метода обоснован выбор таблицы диапазонов квантования, являющейся составной частью классического метода PVD, предложена модификация таблицы диапазонов квантования, используемая в разработанном методе SCMPVD (Selected Color Matrix Pixel Value Differencing). Проведено усовершенствование классической схемы погружения дополнительной информации PVD-методом, связанной с переполнением модифицированных значений яркости за пределы диапазона $[0, 255]$, что ранее приводило к ошибкам при извлечении дополнительной информации. На основе предложенных усовершенствований в классический метод PVD разработан новый стеганографический метод, осуществляющий погружение в цветовой триплет. Для минимизации заметных искажений цветов предлагается проводить встраивание дополнительной информации в те цветовые составляющие триплета, между которыми имеем минимальное значение разности, таким образом при погружении дополнительной информации в разные пиксели могут использоваться разные цветовые составляющие. С целью корректного извлечения встроенного сообщения предусмотрена проверка, направленная на обеспечение некоторого «зазора» между модифицируемыми значениями яркости и неиспользуемым в процессе стеганопреобразования значением яркости, что позволит сохранить минимальную разность в триплете стеганосообщения. Разработанный метод обеспечивает правильное восстановление встроенной информации после ее извлечения из стеганосообщения. Стеганографический метод SCMPVD обеспечивает значения PSNR более 46,5 дБ, что значительно превышает современные аналоги при сопоставимых объемах встроенной дополнительной информации, при этом целостность восприятия стеганосообщения улучшена максимально на 13,8%.

Ключевые слова: стеганография, цифровые изображения, цветовой триплет, метод PVD, Pixel Value Differencing

Введение

В условиях распространения информационных технологий среди широких слоев населения, свободного доступа к сети Internet и возможности обмениваться разного рода информацией (документы, изображения, аудио, видео и др.) между собеседниками из разных стран первоочередной проблемой становится защита передаваемых данных от несанкционированного доступа. Надежной защитой передаваемой по сети информации считается ее криптографическая защита, однако в ряде стран введены ограничения на применение криптографии [1], что повлекло к появлению

значительного числа разработок в области стеганографии, обеспечивающей сохранение в секрете самого факта передачи конфиденциальной информации [1, 2].

Большинство разработок в области стеганографии посвящено встраиванию дополнительной информации (ДИ) в цифровые изображения (ЦИ), которые благодаря наличию в них избыточной информации позволяют обеспечить высокую пропускную способность скрытого канала связи (СПС) при сохранении целостности восприятия изображения. Тем не менее остается актуальной проблема выбора между сохранением надежности восприятия ЦИ и пропускной способностью контейнера, т.к. с увеличением объема встраиваемой информации ухудшается качество изображения.

Среди стеганографических методов, осуществляющих погружение ДИ в пространственную область ЦИ, наиболее распространенным и простым в реализации является метод замены наименьшего значащего бита. Данный метод позволяет сохранить качество стеганосообщения, являющегося результатом внедрения ДИ в контейнер, однако, как правило, применяется при малых значениях СПС (0.5 бит/пиксель и менее).

Еще одной разновидностью стеганографии в пространственной области являются различные вариации метода разности значений пикселя (Pixel Value Differencing – PVD) [3, 4], обеспечивающие высокое качество изображений при относительно высоких значениях СПС для изображений в градациях серого (в [3] для СПС 0.8 бит/пиксель PSNR составляет 50 дБ, в [4] для СПС 1.5 бит/пиксель PSNR составляет 42 дБ). Однако в случае использования в качестве контейнера цветных ЦИ результаты стеганообразования оставляют желать лучшего (для СПС ≈ 0.5 бит/пиксель PSNR составляет не более 42 дБ [5]). Тем не менее, несмотря на существующие недостатки метода PVD, его улучшение и повышение эффективности является перспективным направлением ввиду возможности обеспечения данным методом высокой СПС (до 3 бит/пиксель).

Цель и задачи статьи

Целью работы является разработка стеганографического метода встраивания ДИ в пространственную область цветных ЦИ на основе метода PVD, обеспечивающего целостность восприятия стеганосообщения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

- обосновать выбор таблицы диапазонов квантования, используемой в процессе погружения ДИ;
- выявить и устранить недостатки классического метода PVD, связанные с переполнением диапазона значений яркости за пределы $[0, 255]$;
- разработать стеганографический метод погружения ДИ в пространственную область цветных ЦИ;
- провести анализ разработанного стеганографического метода и сравнение с существующими аналогами.

Основная часть

Суть классического метода PVD заключается в последовательной модификации значений яркости двух соседних пикселей P_i и P_{i+1} , для которых определяется абсолютная разность $d_i = |P_i - P_{i+1}|$, $d_i \in [0, 255]$. На основании полученного значения d_i в соответствии с таблицей диапазонов квантования (ТДК) определяются нижняя и верхняя границы $[lower_i, upper_i]$ региона R_i и количество встраиваемых бит

$t = \lfloor \log_2 (upper_i - lower_i + 1) \rfloor$. Последовательность бит сообщения длиной t преобразуется в десятичное значение t_d , после чего вычисляется новое значение разности $d'_i = t_d + lower_i$. Значения яркости P_i и P_{i+1} модифицируются в соответствии с формулой [5]:

$$(P'_i, P'_{i+1}) = \begin{cases} \left(P_i + \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil, P_{i+1} - \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor \right), & \text{if } P_i \geq P_{i+1} \ \& \ d'_i > d_i; \\ \left(P_i - \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor, P_{i+1} + \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil \right), & \text{if } P_i < P_{i+1} \ \& \ d'_i > d_i; \\ \left(P_i - \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil, P_{i+1} + \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor \right), & \text{if } P_i \geq P_{i+1} \ \& \ d'_i \leq d_i; \\ \left(P_i + \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor, P_{i+1} - \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil \right), & \text{if } P_i < P_{i+1} \ \& \ d'_i \leq d_i; \end{cases} \quad (1)$$

где $m = |d'_i - d_i|$, $\lfloor \bullet \rfloor$ - округление к меньшему целому, $\lceil \bullet \rceil$ - округление к большему целому.

В качестве ТДК возможно использование нескольких вариантов таблиц, отличающихся размерностью регионов и, соответственно, количеством встраиваемых бит, приведенных в табл.1-3.

Таблица 1.

Таблица диапазонов квантования классического метода PVD

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
$[lower, upper]$	[0,7]	[8,15]	[16,31]	[32,63]	[64,127]	[128,255]
t	3	3	4	5	6	7

Таблица 2.

Расширенная таблица диапазонов квантования метода PVD

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}
<i>lower</i>	0	2	4	8	12	16	24	32	48	64	96	128	192
<i>upper</i>	1	3	7	11	15	23	31	47	63	95	127	191	255
t	1	1	2	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6

Для выбора ТДК, обеспечивающей наименьшие визуальные искажения контейнера в процессе стеганопреобразования, был проведен вычислительный эксперимент на основе 200 ЦИ в градациях серого, в которые ДИ погружалась классическим PVD при использовании разных ТДК (табл. 1-3). По результатам проведенных экспериментов наблюдалось увеличение значений PSNR для ЦИ с увеличением количества регионов, т.е. худшие результаты достигались при использовании табл. 1 (6 регионов) – для ЦИ в градациях серого «Lena» значение PSNR составило 40,5364 дБ, табл. 2 (13 регионов) – 45,8762 дБ. В случае выбора параметров $[lower, upper]$ из табл. 3 (16 регионов) значения PSNR оказались выше предыдущих (47,2864 дБ). Следует отметить, что при использовании любой ТДК возникли ошибки, связанные с некорректным извлечением встроенной ДИ, причем при использовании табл. 3 их оказалось больше, чем при использовании табл. 1 и 2. Поэтому в целях

обеспечения целостности извлекаемой информации было проведено упрощение табл. 3, а именно не рассматриваются поддиапазоны, значение t принимается минимальным при значениях $upper - lower \leq 13$ и максимальным при $upper - lower > 13$. Вид модифицированной ТДК представлен в табл. 4.

Таблица 3.

Таблица диапазонов квантования из [3]

	R_1	R_2	R_3		R_4	R_5	
$[lower, upper]$	[0,1]	[2,5]	[6,11]		[12,19]	[20,29]	
Поддиапазон	[0,1]	[2,5]	[6,7]	[8,11]	[12,19]	[20,21]	[22,29]
t	1	2	3	2	3	4	3
	R_6		R_7		R_8	R_9	
$[lower, upper]$	[30,41]		[42,55]		[56,71]	[72,89]	
Поддиапазон	[30,33]	[34,41]	[42,47]	[48,55]	[56,71]	[72,73]	[74,89]
t	4	3	4	3	4	5	4
	R_{10}		R_{11}		R_{12}		
$[lower, upper]$	[90,109]		[110,131]		[132,155]		
Поддиапазон	[90,93]	[94,109]	[110,115]	[116,131]	[132,139]	[140,155]	
t	5	4	5	4	5	4	
	R_{13}		R_{14}		R_{15}		R_{16}
$[lower, upper]$	[156,181]		[182,209]		[210,239]		[240,255]
Поддиапазон	[156,165]	[166,181]	[182,193]	[194,209]	[210,223]	[224,239]	[240,255]
t	5	4	5	4	5	4	4

Таблица 4.

Модифицированная таблица диапазонов квантования

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
$[lower, upper]$	[0,1]	[2,5]	[6,11]	[12,19]	[20,29]	[30,41]
t	1	2	2	3	3	3
	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}
$[lower, upper]$	[42,55]	[56,71]	[72,89]	[90,109]	[110,131]	[132,155]
t	3	4	4	4	4	5
	R_{13}	R_{14}	R_{15}	R_{16}		
$[lower, upper]$	[156,181]	[182,209]	[210,239]	[240,255]		
t	5	5	5	4		

При использовании модифицированной ТДК удалось уменьшить ошибки при извлечении данных, при этом значение PSNR осталось высоким (47,1855 дБ). Таким образом, в разрабатываемом стеганографическом методе будем использовать модифицированную таблицу диапазонов квантования.

Еще одной причиной возникновения ошибок при извлечении ДИ является переполнение диапазона значений яркости за пределы $[0, 255]$. Рассмотрим пример.

Пусть имеется пара пикселей $(P_i, P_{i+1}) = (30, 0)$. Тогда $d_i = |P_i - P_{i+1}| = |30 - 0| = 30$, $30 \in R_6$, следовательно $lower = 30$, $upper = 41$, $t = 3$. Пусть необходимо погрузить бинарную последовательность «101», т.е. 5 в десятичной системе счисления, тогда $d'_i = 5 + 30 = 35$. Т.к. $30 > 0$ ($P_i \geq P_{i+1}$) и $35 > 30$ ($d'_i > d_i$), то значения яркости изменяются в соответствии с формулой $\left(P_i + \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil, P_{i+1} - \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor \right)$, т.е. $\left(30 + \left\lceil \frac{5}{2} \right\rceil, 0 - \left\lfloor \frac{5}{2} \right\rfloor \right) = (30 + 3, 0 - 2) = (33, -2)$, т.е. получили значение яркости, равное -2, что недопустимо. Поэтому необходимо откорректировать значения яркости таким образом, чтобы не было переполнения за пределы диапазона $[0, 255]$:

$$(P''_i, P''_{i+1}) = \begin{cases} (255, 255 - d - m), & \text{if } P'_i > 255; \\ (0, d + m), & \text{if } P'_i < 0; \\ (255 - d - m, 255), & \text{if } P'_{i+1} > 255; \\ (d + m, 0), & \text{if } P'_{i+1} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Выполнив коррекцию значений яркости в рассмотренном примере, получим значения $(35, 0)$. Благодаря предложенной коррекции значений яркости удалось полностью избежать ошибок извлечения ДИ из стеганосообщения.

Большинство существующих разработок, основанных на PVD, осуществляют встраивание ДИ либо в соседние пиксели цветовой матрицы [3-5], либо в блоки различного размера, как правило применяют блоки 3×3 [6-7] или 2×2 [8]. Однако для цветных изображений логичнее встраивать ДИ в цветовой триплет (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}) , $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$, что позволит модифицировать значения яркости таким образом, чтобы минимизировать заметные искажения цвета. В работе [9] уже был предложен подобный подход, однако за счет изменения значений яркости всех трех цветовых составляющих триплета были получены очень низкие значения PSNR (максимальное значение составило 35,66 дБ для ЦИ «Airplane (Jet)», минимальное – 30,10 дБ для ЦИ «Peppers»), что говорит о заметных искажениях цвета.

С целью минимизации искажений цветов в процессе стеганопреобразования предлагается для встраивания ДИ использовать только два значения яркости триплета (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}) , выбор которых осуществляется с учетом минимальной разности между парами (r_{ij}, g_{ij}) , (g_{ij}, b_{ij}) и (r_{ij}, b_{ij}) для каждого конкретного пикселя. Минимальная разность между значениями яркости обусловлена необходимостью модифицировать цветовой триплет таким образом, чтобы исключить заметные визуальные искажения стеганосообщения, т.к. максимальная разность предполагает погружение бинарной строки большей длины, что приведет к большим искажениям значений яркости.

Т.к. в различные элементы контейнера погружаются фрагменты бинарной последовательности разной длины (в зависимости от региона, к которому принадлежит разность), для встраивания будем использовать только те пиксели, для которых выполняется условие

$$|dif1 - d| > upper - lower + 1 \ \& \ |dif2 - d| > upper - lower + 1, \quad (3)$$

где d - минимальная разность между значениями яркости пар (r_{ij}, g_{ij}) , (g_{ij}, b_{ij}) и (r_{ij}, b_{ij}) , $dif1, dif2$ - разности между значениями яркости пар, большие d , $upper, lower$ - соответственно верхняя и нижняя граница региона, к которому принадлежит разность d .

Проверка условия (3) при погружении ДИ позволяет избежать ситуаций, связанных с изменением минимального значения разности между парами триплета (r_{ij}, g_{ij}) , (g_{ij}, b_{ij}) и (r_{ij}, b_{ij}) в результате стеганопреобразования. При извлечении ДИ проверка условия (3) направлена на правильное определение того пикселя, который содержит ДИ. Если же после модификации значений яркости триплета (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}) все же нарушается выполнение условия (3), то ДИ в рассматриваемый триплет не встраивается, но при этом в стеганосообщение сохраняются модифицированные значения яркости, а не исходные значения пикселя. Восстановление исходных значений триплета (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}) приведет к тому, что при извлечении ДИ пиксель будет рассматриваться как содержащий ДИ. В результате длина извлеченной бинарной последовательности будет больше, чем погруженной ДИ, а следовательно, невозможно будет корректно восстановить переданное сообщение.

Таким образом, с учетом внесенных изменений, связанных с коррекцией значений яркости в случае переполнения за пределы диапазона $[0, 255]$, а также с учетом проверки, необходимой для корректного извлечения ДИ, основные шаги предлагаемого стеганографического метода выглядят следующим образом.

Погружение дополнительной информации.

Для каждого пикселя изображения (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}) , $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$:

Шаг 1. Определить разность между значениями яркости для трёх пар значений:

$$(r_{ij}, g_{ij}), (g_{ij}, b_{ij}) \text{ и } (r_{ij}, b_{ij}): d^{rg} = |r_{ij} - g_{ij}|, d^{gb} = |g_{ij} - b_{ij}|, d^{rb} = |r_{ij} - b_{ij}|$$

соответственно.

Шаг 2. Определить пару значений яркости, используемую для погружения ДИ:

$$d = \min(d^{rg}, d^{gb}, d^{rb}).$$

2.1. Если $d = d^{rg}$, то для погружения ДИ используются значения яркости красной и зелёной цветовой составляющей, т.е. $px1 = r_{ij}$, $px2 = g_{ij}$, $px3 = b_{ij}$, $dif1 = d^{gb}$, $dif2 = d^{rb}$.

2.2. Если $d = d^{gb}$, то для погружения ДИ используются значения яркости зелёной и синей цветовой составляющей, т.е. $px1 = g_{ij}$, $px2 = b_{ij}$, $px3 = r_{ij}$, $dif1 = d^{rg}$, $dif2 = d^{rb}$.

2.3. Если $d = d^{rb}$, то для погружения ДИ используются значения яркости красной и синей цветовой составляющей, т.е. $px1 = r_{ij}$, $px2 = b_{ij}$, $px3 = g_{ij}$, $dif1 = d^{rg}$, $dif2 = d^{gb}$.

Шаг 3. В соответствии с табл. 4 определить регион, которому принадлежит минимальная разность и параметры $lower$ – нижняя граница региона, $upper$ – верхняя граница региона, и t – количество встраиваемых бит.

Шаг 4. Из сообщения, представляющего собой бинарную последовательность, взять t бит двоичной информации b_2 , полученное значение преобразовать в десятичную систему счисления (далее b_{10}). Определить $dn = lower + b_{10}$ и $m = |dn - d|$.

Шаг 5. Погружение ДИ.

Если

$$|dif1 - d| > upper - lower + 1 \ \& \ |dif2 - d| > upper - lower + 1,$$

то погружаем ДИ в соответствии с формулой:

$$(px1', px2') = \begin{cases} \left(px1 + \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil, px2 - \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor \right), & \text{если } px1 \geq px2 \ \& \ dn > d, \\ \left(px1 - \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor, px2 + \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil \right), & \text{если } px1 < px2 \ \& \ dn > d, \\ \left(px1 - \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor, px2 + \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor \right), & \text{если } px1 \geq px2 \ \& \ dn \leq d, \\ \left(px1 + \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil, px2 - \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil \right), & \text{если } px1 < px2 \ \& \ dn \leq d, \end{cases}$$

где $\lfloor \bullet \rfloor$ - округление к меньшему целому, $\lceil \bullet \rceil$ - округление к большему целому.

Иначе ДИ не встраивается, переход к шагу 8.

Шаг 6. При необходимости, откорректировать полученные значения $(px1', px2')$:

6.1. Если $px1' > 255$, то $px1' = 255$, $px2' = px1' - d - m$;

6.2. Если $px2' < 0$, то $px2' = 0$, $px1' = px2' + d + m$;

6.3. Если $px2' > 255$, то $px2' = 255$, $px1' = px2' - d - m$;

6.4. Если $px1' < 0$, то $px1' = 0$, $px2' = px1' + d + m$.

Шаг 7. Проверка условий для корректного извлечения ДИ.

Определить: $d' = |px1' - px2'|$, $dif1' = |px3 - px1'|$, $dif2' = |px3 - px2'|$.

Если

$$d' \neq \min(d', dif1', dif2') \ \|\ |dif1' - d'| \leq upper - lower + 1 \ \|\ |dif2' - d'| \leq upper - lower + 1$$

то при извлечении ДИ пиксель не рассматривается, как содержащий встроенную информацию, бинарная последовательность b_2 погружается повторно в следующий пиксель. При этом измененные значения яркости не восстанавливаются к исходным!

Шаг 8. Переход к следующему пикселю (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}) , $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$.

Шаг 9. Сохранение стеганосообщения в формате без потерь.

Извлечение дополнительной информации.

Для каждого пикселя стеганосообщения $(r'_{ij}, g'_{ij}, b'_{ij})$, $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$:

Шаг 1. Определить разность между значениями яркости для трёх пар значений: (r'_{ij}, g'_{ij}) , (g'_{ij}, b'_{ij}) и (r'_{ij}, b'_{ij}) : $d^{rg'} = |r'_{ij} - g'_{ij}|$, $d^{gb'} = |g'_{ij} - b'_{ij}|$, $d^{rb'} = |r'_{ij} - b'_{ij}|$ соответственно.

Шаг 2. Определить пару значений яркости, используемую для извлечения ДИ:

$$d' = \min(d^{rg'}, d^{gb'}, d^{rb'}).$$

2.1. Если $d' = d^{rs'}$, то для извлечения ДИ используются значения яркости красной и зелёной цветовой составляющей, т.е. $px1' = r'_{ij}$, $px2' = g'_{ij}$, $px3' = b'_{ij}$, $dif1' = d^{sb'}$, $dif2' = d^{rb'}$.

2.2. Если $d' = d^{sb'}$, то для извлечения ДИ используются значения яркости зелёной и синей цветовой составляющей, т.е. $px1' = g'_{ij}$, $px2' = b'_{ij}$, $px3' = r'_{ij}$, $dif1' = d^{rs'}$, $dif2' = d^{rb'}$.

2.3. Если $d' = d^{rb'}$, то для извлечения ДИ используются значения яркости красной и синей цветовой составляющей, т.е. $px1' = r'_{ij}$, $px2' = b'_{ij}$, $px3' = g'_{ij}$, $dif1' = d^{rs'}$,

$$dif2' = d^{sb'}$$

Шаг 3. В соответствии с табл. 4 определить регион, которому принадлежит минимальная разность и параметры $lower'$ – нижняя граница региона, $upper'$ – верхняя граница региона, и t' – количество извлекаемых бит.

Шаг 4. Извлечение ДИ.

Если

$$|dif1' - d'| > upper' - lower' + 1 \ \& \ |dif2' - d'| > upper' - lower' + 1,$$

то:

4.1. Определить $dn' = d' - lower'$.

4.2. Преобразовать dn' в двоичную систему счисления (результат b').

4.3. При необходимости дополнить b' слева нулевыми битами, если длина b' меньше t' .

4.4. Записать b' к предыдущей извлечённой информации.

Иначе извлечения ДИ не происходит, переход к следующему пикселу.

В результате тестирования алгоритмической реализации предложенного метода все погруженные биты ДИ извлекались верно.

Для сравнения разработанного стеганографического метода, который далее будем называть SCMPVD (Selected Color Matrix Pixel Value Differencing) с современными аналогами используются PSNR и длина погруженного сообщения. Сравнение осуществляется с теми аналогами, которые обеспечивают сокрытие ДИ сравнимой длины с предлагаемым методом. Результаты сравнения приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5.

Длина встроенного сообщения (в байтах) разработанного метода и существующих аналогов

	SCMPVD (2018)	[5] (2003)	[10] (2008)	[11] (2013)	[12] (2015)
Lena	70215	51219	75836	83654	24576
Baboon (Mandrill)	54503	57146	82407	91286	24576
Airplane (Jet)	26394	51224	76352	81851	24576
House	55347	нет	нет	нет	нет
Boat (Sailboat)	57923	нет	нет	нет	24576
Peppers	68144	50907	75579	78612	24576
Pot (Splash)	64106	нет	нет	нет	нет

Таблица 6.

Значения PSNR (дБ) разработанного метода и существующих аналогов

	SCMPVD (2018)	[5] (2003)	[10] (2008)	[11] (2013)	[12] (2015)
Lena	46,8038	41,79	38,89	45,0926	41,58
Baboon (Mandril)	47,0908	37,9	33,93	39,0633	33,29
Airplane (Jet)	52,5019	40,6	38,7	43,9345	43,73
House	48,8819	нет	нет	нет	нет
Boat (Sailboat)	48,6236	нет	нет	нет	38,76
Peppers	46,7401	40,97	38,5	42,05	47,41
Pot (Splash)	46,9678	нет	нет	нет	нет

Как видно из табл. 5 и 6, разработанный метод обеспечивает более высокую целостность восприятия изображения по сравнению с аналогами при сопоставимой длине встроенного сообщения – значения PSNR превышают 46,5 дБ (табл. 6), что не достигалось аналогами (результат улучшен максимально на 13,8%).

Исключение составило изображение «Airplane (Jet)», где длина встроенного сообщения составила всего 26394 байт (табл. 5), что позволяет сделать вывод, что при погружении ДИ методом SCMPVD длина встраиваемого сообщения зависит от характеристик самого контейнера. И действительно, данное изображение содержит большое число пикселей, для которых не выполняется условие (3), которое не позволяет использовать такие пиксели для встраивания ДИ. Однако по сравнению с аналогом [12] при сопоставимой длине сообщения значение PSNR составило 52,5019 дБ по сравнению с 43,73 дБ.

Выводы

В работе проведен анализ и выявлены недостатки существующих стеганографических методов на основе разности пикселей (метода PVD), результатом чего явилось усовершенствование классического метода путем коррекции значений яркости пикселей в случае переполнения за пределы диапазона $[0, 255]$, а также модификация таблицы диапазонов квантования. С учетом предложенных усовершенствований разработан стеганографический метод погружения ДИ в пространственную область цветных ЦИ на основе метода PVD. Предложенный метод SCMPVD для погружения ДИ использует цветовой триплет, что позволяет модифицировать значения яркости таким образом, чтобы сохранить визуальную целостность стеганосообщения. По результатам вычислительного эксперимента удалось получить значения PSNR для цветных ЦИ более 46,5 дБ, что превышает результаты современных аналогов.

Список литературы

1. Конахович, Г.Ф. Компьютерная стеганография: теория и практика / Г.Ф. Конахович, А.Ю. Пузыренко. – К.: «МК-Пресс», 2006. – 288 с.
2. Стеганография, цифровые водяные знаки и стеганоанализ: [монография] / А.В. Аграновский, А.В. Балакин, В.Г. Грибунин, С.А. Сапожников. — М.: Вузовская книга, 2009. — 220 с.
3. Hsien-Wen Tseng. A Steganographic Method Based on Pixel-Value Differencing and the Perfect Square Number / Hsien-Wen Tseng, Hui-Shih Leng // Journal of Applied Mathematics. — Volume 2013. — Pp.1-8.

4. Khalid, A. Darabkh. A New Steganographic Algorithm Based on Multi Directional PVD and Modified LSB / Khalid A. Darabkh, Ahlam K. Al-Dhamari, and Iyad F. Jafar // *Journal of Information Technology and Control*. — 2017. — Vol. 46, No. 1. — Pp. 16-36.
5. D.C. Wu. A Steganographic method for images by pixel-value differencing / D.C. Wu, W.H. Tsai // *Pattern Recognition Letters*. — 2003. — Vol. 24. — Pp. 1613-1626.
6. Anita Pradhan. Digital Image Steganography based on Seven Way Pixel Value Differencing / Anita Pradhan, K. Raja Sekhar, Gandharba Swain // *Indian Journal of Science and Technology*. — 2016. — Vol. 9 (37). — Pp. 1-11.
7. Osama Hosam. Adaptive block-based pixel value differencing steganography / Osama Hosam, Nadhir Ben Halima // *Security Comm. Networks*. — 2016. — No. 9. — Pp. 5036-5050.
8. Gandharba Swain. A steganographic method combining LSB substitution and PVD in a block / Gandharba Swain // *International Conference on Computational Modeling and Security (CMS 2016)*. - *Procedia Computer Science*. — Pp. 39 – 44.
9. Shiv Prasad. An RGB colour image steganography scheme using overlapping block-based pixel-value differencing / Shiv Prasad, Arup Kumar Pal // *Royal Society Open Science*. — 2017. — No. 4. — Pp. 1-14.
10. Chang, K.C. A Novel Image Steganographic Method Using Triway Pixel-Value Differencing / K.C. Chang, C.P Chang, P.S. Huang, T.M. Tu // *Journal of Multimedia*. — 2008. — Vol. 3, No. 2. — Pp.37-44.
11. Nagaraja, V. Color Image Steganography based on Pixel Value Modification Method Using Modulus Function / V. Nagaraja, Dr. V. Vijayalakshmi, Dr. G. Zayaraz // *2013 International Conference on Electronic Engineering and Computer Science, 2013*. — *IERI Procedia* 4. — Pp. 17-24.
12. Yang, C-Y. Block based color image steganography using smart pixel-adjustment / Yang C-Y, Wang W-F // *Adv. Intell. Syst. Comput*. — 2015. — No. 329. — Pp. 145–154.

РОЗРОБКА СТЕГАНОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ВБУДОВИ ДОДАТКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ПРОСТОРОВУ ОБЛАСТЬ КОЛЬОРОВИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Г.В. Ахмаметьєва, В.В. Коваленко

Одеський національний політехнічний університет,
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: a.v.akhmametieva@onu.ua

В роботі розроблено новий стеганографічний метод вбудови додаткової інформації в просторову область кольорових цифрових зображень, заснований на врахуванні різниці між значеннями яскравості кольорного триплету (методі PVD). В ході розробки методу обґрунтований вибір таблиці діапазонів квантування, яка є складовою частиною класичного методу PVD, що використовується в розробленому методі SCMPVD (Selected Color Matrix Pixel Value Differencing). Проведено удосконалення класичної схеми вбудови додаткової інформації PVD-методом, пов'язане з переповненням модифікованих значень яскравості за межі діапазону [0, 255], що раніше призводило до помилок в процесі вилучення додаткової інформації. На основі запропонованих удосконалень до класичного методу PVD розроблений новий стеганографічний метод, що здійснює вбудову в кольорний триплет. З метою мінімізації помітних спотворень кольорів пропонується проводити вбудову додаткової інформації в ті кольорні складові триплету, між якими маємо мінімальне значення різниці, таким чином в процесі вбудови додаткової інформації в різні пікселі можуть використовуватися різні кольорні складові. Для коректного вилучення вбудованого повідомлення передбачена перевірка, направлена на забезпечення деякого «зазору» між модифікованими значеннями яскравості та значенням яскравості, яке не використовується в процесі стеганоперетворення, що дозволяє зберегти мінімальну різницю в триплеті стеганоповідомлення. Розроблений метод забезпечує правильне відновлення вбудованої інформації після її вилучення з стеганоповідомлення. Стеганографічний метод SCMPVD забезпечує значення PSNR більше 46,5 дБ, що значно перевищує сучасні аналоги при порівняних об'ємах вбудованої додаткової інформації, при цьому цілісність сприйняття стеганоповідомлення підвищено максимально на 13,8%.

Ключові слова: стеганографія, цифрові зображення, кольорний триплет, метод PVD, Pixel Value Differencing

DEVELOPMENT OF THE STEGANOGRAPHIC METHOD OF EMBEDDING OF ADDITIONAL INFORMATION INTO THE SPATIAL DOMAIN OF COLOR IMAGES

A.V. Akhmametiyeva, V.V. Kovalenko

Odesa National Polytechnic University,
1, Shevchenko Str., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: a.v.akhmametiyeva@opu.ua

A new steganographic method of embedding of additional information into the spatial domain of color digital images based on taking into account the difference between the brightness values of the color triplet (PVD method) is developed. During the development of the method the selection of the quantization range table which is an integral part of the classical PVD method is justified, a modification of the quantization range table used in the developed method SCMPVD (Selected Color Matrix Pixel Value Differencing) is proposed. An improvement in the classical scheme of embedding of additional information by the PVD method was proposed related to the overflow of the modified brightness values outside the range [0, 255] which previously led to errors in the extraction of additional information. On the basis of the proposed improvements to the classical PVD method a new steganography method is developed that embeds additional information into a color triplet. To minimize noticeable color distortions, it is suggested to insert additional information into those color components of the triplet between which we have the minimum value of the difference, thus, when embedding of additional information into different pixels different color components can be used. For correctly extracting of the embedded message the check, which reckon for a "gap" between the modified values of brightness and unused during steganographic transformation brightness value is provided that will save the minimum difference in the triplet stego. The developed method ensures correct restoration of the built-in information after its extraction from the stego. The steganographic method SCMPVD provides PSNR of more than 46.5 dB which is significantly higher than modern analogs with comparable amounts of embedded additional information, at the same time the integrity of perception of a stego is improved by as much as possible for 13,8%.

Keywords: steganography, digital image, color triplet, method PVD, Pixel Value Differencing