

УДК 621.396

Кривуца В. Г., д.т.н.; Булгач В. Л., к.т.н.; Дикарев А. В., к.т.н.

(Государственный университет информационно-коммуникационных технологий)

Лазаренко В. Н., к.т.н. (Гос. служба спецсвязи и защиты информации Украины)

Лойкова А. Ю. (Киевский колледж связи)

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СЖАТИЮ ВИДЕОДАНЫХ

**Кривуца В. Г., Булгач В. Л., Дикарев О. В., Лазаренко В. М., Лойкова А. Ю. Эксперименты по ущільненню відеоданих.** Виконані у роботі експериментальні дослідження показали, що ступінь ущільнення відеоданих модифікованим дискретним косинусним перетворенням (ДКП) зростає зі зменшенням кількості коефіцієнтів ДКП з 7 до 3, варіації величини їх значень, повторного ущільнення вихідного відео блоку і не поліпшуються внаслідок попереднього математичного оброблення даних, що підлягають ущільненню.

**Ключові слова:** ДИСКРЕТНЕ КОСИНУСНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ, ВИДЕОДАНИ, УЩІЛЬНЕННЯ

**Кривуца В. Г., Булгач В. Л., Дикарев А. В., Лазаренко В. Н., Лойкова А. Ю. Эксперименты по сжатию видеоданных.** Результаты проведенных в работе экспериментальных исследований показали, что степень сжатия видеоданных модифицированным дискретным косинусным преобразованием (ДКП) улучшается с уменьшением числа коэффициентов ДКП с 7 до 3, вариации величины их значений, повторного сжатия исходного видеоблока и не улучшается в результате предварительной математической обработки сжимаемых данных.

**Ключевые слова:** ДИСКРЕТНОЕ КОСИНУСНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ, ВИДЕОДАНЫЕ, СЖАТИЕ

**Kryvutsa V. G., Bulgach V. L., Dikarev O. V., Lazarenko V. M., Lojkova A. Ju. Experiments on video data compression.** Results of the experimental researches conducted in work have shown, that the degree of compression of video data given modified discrete cosine transformation (DCT) is improved with reduction of number of factors DCT from 7 to 3, the variations of the magnitude of their values, repeated compression the original video block and does not improve as a result of the preliminary mathematical processing of compressed data.

**Keywords:** DISCRETE COSINE TRANSFORMATION, VIDEO DATA, COMPRESSION

**Модификации дискретного косинусного преобразования.** В известной монографии [1], посвящённой проблемам дискретизации видео- и аудиоинформации и международным стандартам сжатия цифровых данных без потерь и с потерями, дискретному синусному преобразованию (DST — Discrete Sine Transform) посвящен специальный параграф, в котором доказывается его непригодность для сжатия дискретных видеоданных. Доказательство сводится к двум основным положениям: коэффициенты дискретного синусного преобразования (ДСП) не образуют ортогональный (ортонормированный) базис и вследствие того, что первая строка матрицы ДСП не является единичной, невозможно получить коэффициент DC — среднее значение энергии коэффициентов преобразуемого блока данных. С другой стороны, матрица ДСП позволяет ответить на два основополагающих вопроса, которые совсем не освещены в [1]:

— как влияет ортогональность (ортонормированность) дискретного преобразования на степень сжатия коррелированных и некоррелированных дискретных данных;

— как влияет расположение и количество коэффициентов дискретного косинусного преобразования на степень сжатия коррелированных и некоррелированных дискретных данных.

На оба эти вопроса позволяет ответить сравнение работы матрицы ДСП и модифицированного дискретного косинусного преобразования (ДКП) с коэффициентами из матрицы ДСП.

Коэффициенты DST получают аналогично коэффициентам дискретного косинусного преобразования из формулы:

$$cI = \sin(f \cdot \theta), \quad f = 0, 1 \dots 7, \quad \theta = \frac{\pi}{16}, \frac{3\pi}{16}, \frac{5\pi}{16}, \frac{7\pi}{16}, \frac{9\pi}{16}, \frac{11\pi}{16}, \frac{13\pi}{16}, \frac{15\pi}{16}.$$

Конкретные значения коэффициентов двумерного синусного распределения:

$$c0 = 0, \quad c1 = 0.195, \quad c2 = 0.383, \quad c4 = 0.707, \quad c5 = 0.831, \quad c6 = 0.924, \quad c7 = 0.981. \quad (1)$$

Матрица двумерного синусного преобразования имеет вид, как показано на рис.1. В [1] для проверки эффективности работы ДСП предлагается матрица Н (рис. 2) сильно коррелированных величин, которой мы также воспользуемся.

	0	0	0	0	0	0	0
	0	c1	c2	c3	c4	c5	c6
	0	c2	c4	c6	1	c6	c4
DST =	0	c3	c6	c7	c4	c1	-c2
	0	c4	1	c4	0	c4	-1
	0	c5	c6	c1	-c4	-c7	-c2
	0	c6	c4	-c2	1	-c2	c4
	0	c7	c2	-c5	-c4	c3	c6

Рис. 1. Матрица DST

	0	10	20	30	30	20	10	0
	10	20	30	40	40	30	20	10
	20	30	40	50	50	40	30	20
H =	30	40	50	60	60	50	40	30
	30	40	50	60	60	50	40	30
	20	30	40	50	50	40	30	20
	10	20	30	40	40	30	20	10
	0	10	20	30	30	20	10	0

Рис. 2. Матрица Н

Выполним дискретное синусное преобразование по формуле:

$$G = DST (DST \cdot H)^T \quad (2)$$

Результаты прямого ДСП приведены на рис. 3.

G=	1.0e+003 *							
1.9200	1.1361	1.4133	1.0091	0.5890	-0.0440	0.7499	0.0668	
1.1361	0.6715	0.8322	0.5910	0.3437	-0.0231	0.4455	0.0435	
1.4133	0.8322	1.0181	0.7095	0.4067	-0.0164	0.5616	0.0707	
1.0091	0.5910	0.7095	0.4805	0.2693	0.0008	0.4085	0.0673	
0.5890	0.3437	0.4067	0.2693	0.1482	0.0058	0.2417	0.0465	
-0.0440	-0.0231	-0.0164	0.0008	0.0058	-0.0105	-0.0241	-0.0170	
0.7499	0.4455	0.5616	0.4085	0.2417	-0.0241	0.2888	0.0168	
0.0668	0.0435	0.0707	0.0673	0.0465	-0.0170	0.0168	-0.0185	

Рис. 3. Результаты прямого ДСП

Как и следовало ожидать, никакого сжатия даже на основании сильной корреляции элементов исходной матрицы Н не происходит, хотя обратное преобразование и получение исходной матрицы Н выполняется точно (здесь не приводится). При этом используется формула:

$$H = DST^{-1} (DST^{-1} G)^T \quad (3)$$

Теперь с теми же самыми коэффициентами (1) и по тем же самым формулам (2) и (3) выполним дискретное косинусное преобразование (ДКП), но коэффициенты  $cI, I=1, \dots, 7$  разместим так, как это принято в классическом дискретном косинусном преобразовании [1, 2] и показано на рис. 4:

Результат прямого дискретного косинусного преобразования, представленный далее, получается неожиданный, см. рис. 5.

Оказывается, с помощью всего четырёх чисел можно однозначно восстановить исходную матрицу Н, состоящую из семи сильно коррелированных чисел.

```
>> DST=[1 1 1 1 1 1 1 1;
c7 c5 c3 c1 -c1 -c3 -c5 -c7;
c6 c2 -c2 -c6 -c6 -c2 c2 c6;
c5 -c1 -c7 -c3 c3 c7 c1 -c5;
c4 -c4 -c4 c4 c4 -c4 -c4 c4;
c3 -c7 c1 c5 -c5 -c1 c7 -c3;
c2 -c6 c6 -c2 -c2 c6 -c6 c2;
c1 -c3 c5 -c7 c7 -c5 c3 -c1]
```

Рис. 4. Размещение коэффициентов ДКП

Отсюда следует **1-й основополагающий вывод**: Эффективность сжатия двумерных дискретность блоков данных не зависит от базиса коэффициентов сжатия, как утверждается в [1], а только от их расположения в матрице прямого ДКП.

G=	1. 0e+003 *						
1.9200	-0.0000	-0.5048	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0360	-0.0000
-0.0000	0	0.0000	0.0000	-0.0000	0	0	-0.0000
-0.5048	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0	0	0
-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0	0.0000	0	-0.0000	-0.0000	0	0	0
-0.0360	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	0	-0.0000	-0.0000	0.0000	0	0.0000	-0.0000

Рис. 5. Результаты прямого ДКП

Теперь рассмотрим, каким образом степень сжатия дискретных данных в блоках размером 8x8 при использовании ДКП зависит от числа ненулевых коэффициентов. С этой целью используем блок  $H$  случайных целых равномерно распределённых в интервале  $[16...128]$ , представленный на рис. 6.

```

H128=[16 128 56 74 32 11 73 100;
      55 92 18 79 79 20 45 98;
      77 88 22 33 44 55 66 99;
      118 23 61 94 109 57 84 100;
      98 26 62 78 81 19 21 119;
      79 58 83 28 121 85 68 89;
      21 123 58 87 32 76 32 108;
      90 37 54 74 67 99 121 18];
    
```

Рис. 6. Матрица  $H_{128}$

Выполним прямое ДКП по формуле  $G = DCT \cdot (DCT \cdot H)^T$  для значений коэффициентов  $cI, I = 1, \dots, 7$ , представленных множеством

(1). Полученный результат хорошо иллюстрирует трёхмерная гистограмма (рис. 7), полученная следующим образом.

Интервал изменения коэффициентов полученной в результате прямого преобразования сжатой матрицы, равный  $[-340...350]$ , делится на 10 частей. Тогда значения коэффициентов, попадающих в каждый из десяти интервалов, отличаются на 10%. Если тот же интервал разделить на 20 частей, то значения коэффициентов на гистограмме будут отличаться на 5%, на 30 частей – соответственно на 3.3% и т.д. Кучность значений  $G$  в нескольких отдельных интервалах позволяет затем правильно строить таблицу квантования [1, 2]. Желательно, чтобы значения  $G$  располагались в небольшом количестве интервалов. Из гистограммы на рис. 7 видно, что при 7 различных значениях коэффициентов модифицированного ДКП  $cI$  для матрицы (блока) равномерно распределённых чисел трудно строить таблицу квантования, так как кучность значений элементов сжатой матрицы слабая.

Теперь одному коэффициенту  $cI$  присвоим нулевое значение:

$c1=0.195; c2=0.383; c3=0.556; c4=0.707; c5=0.831; c6=0.924; c7=0;$

Гистограмма приобретает вид, как показано на рис. 8.

Далее двум коэффициентам  $cI$  присвоим нулевые значения:

$c1=0; c2=0.267; c3=0.327; c4=0.378; c5=0.423; c6=0.463; c7=0;$

Гистограмма этого случая показана на рис. 9.

Теперь трём коэффициентам  $cI$  присвоим нулевые значения:

$c1=0.195; c2=0.383; c3=0.556; c4=0.707; c5=0.831; c6=0.924; c7=0.981;$   
 $c1=0.195; c2=0.383; c3=0; c4=0.707; c5=0; c6=0.924; c7=0;$

И в последнем случае четырём коэффициентам  $cI$  присвоим нулевые значения:

$c1=0; c2=0.383; c3=0; c4=0.707; c5=0; c6=0.924; c7=0;$

Гистограмма показана на рис. 11.

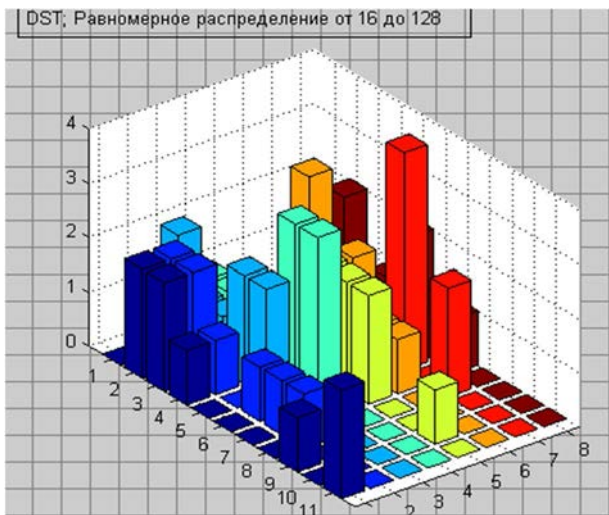


Рис. 7. Гистограмма значений  $G$  при семи ненулевых коэффициентах  $cI$

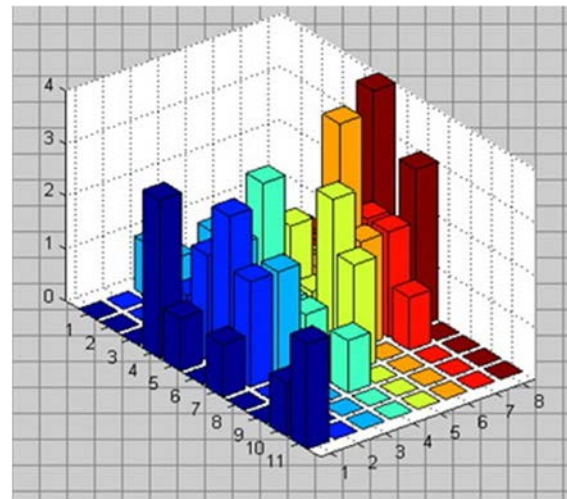


Рис.8. Гистограмма значений  $G$  при шести ненулевых коэффициентах  $cI$

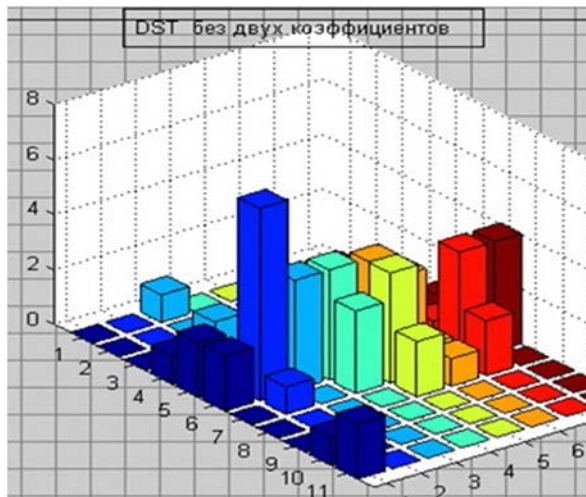


Рис. 9. Гистограмма значений  $G$  при пяти ненулевых коэффициентах  $cI$

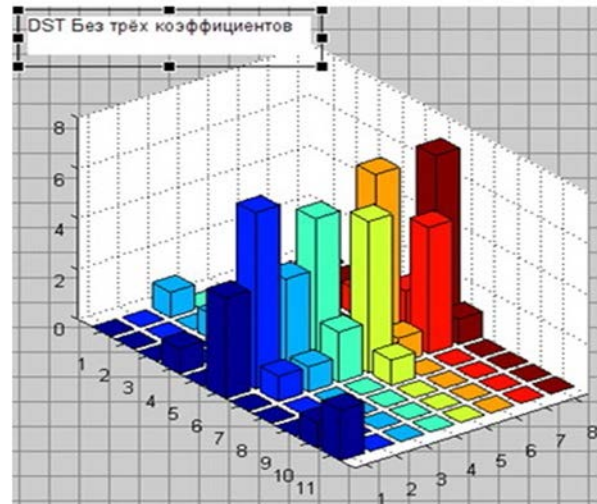


Рис. 10. Гистограмма значений  $G$  при четырёх ненулевых коэффициентах  $cI$

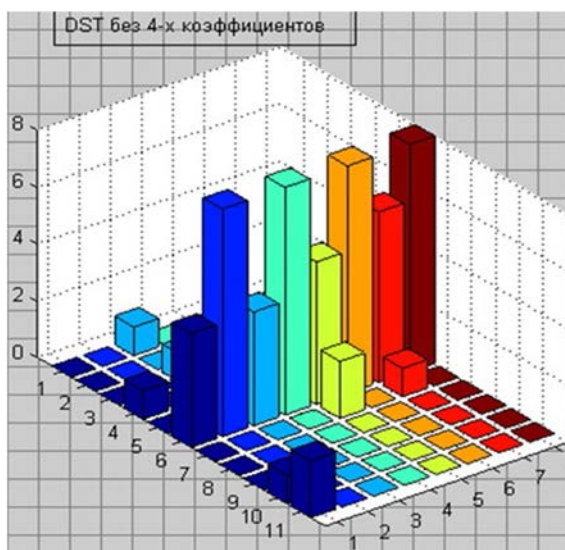


Рис. 11. Гистограмма значений  $G$  при трёх ненулевых коэффициентах  $cI$

Рассмотрение приведенных в работе пяти случаев для предельного случая некоррелированных значений элементов видеоблока даёт основание сделать **2-й основополагающий вывод**: Эффективность сжатия двумерных дискретных блоков данных зависит от числа коэффициентов сжатия и улучшается с уменьшением их числа.

Надо ожидать, что для коррелированных значений элементов видеоблока эта закономерность сохраняется и улучшается. Отсюда следует и **3-й основополагающий вывод**: Алгоритм размещения коэффициентов в матрице прямого ДКП не поддаётся математизации и должен находиться методом перебора или последовательного приближения.

**Математические операции с сжимаемой матрицей.** Рассмотрим воздействие на эффективность сжатия модифицированным ДКП блоков с некоррелированной дискретной информацией следующих математических операций:

а) предварительного умножения элементов четных строк сжимаемой матрицы  $N$  на одну и ту же константу;

б) предварительного сложения каждого элемента чётных строк сжимаемой матрицы  $N$  с одной и той же константой;

в) заменой всех элементов сжимаемой матрицы  $N$  диапазонными средними значениями.

**Постановка эксперимента.** Исследованию подвергается блок, подобный тому, на которые обычно делятся видеоинформация intra-кадров. В натуральных экспериментах это блок  $N$ , представляющий собой матрицу размером  $8 \times 8$  равномерно распределенных целых чисел в интервале 1..64. Элементы блока показаны на рис. 12.

```
N=[1 13 38 23 53 12 46 20;
   6 10 64 8 1 35 39 11;
   29 4 51 34 57 62 35 30;
   1 18 38 54 32 48 30 48;
   53 13 53 10 47 18 44 47;
   8 34 54 28 61 36 31 55;
   30 63 48 13 54 33 2 37;
   35 54 43 54 8 21 19 9];
```

Рис. 12. Элементы блока

В процессе натурального эксперимента блок подвергался прямому ДКП матрицей DST, с коэффициентами:

$c_1=0.189$ ;  $c_2=0.267$ ;  $c_3=0.327$ ;  $c_4=0.378$ ;  $c_5=0.423$ ;  $c_6=0.463$ ;  $c_7=0.5$ ;

С целью получения сжимаемых блоков  $N$  с предварительной математической обработкой операциями сложения, умножения и заменой его диапазонными средними в среде Matlab был отлажен следующий скрипт:

```
%% МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ С ЭЛЕМЕНТАМИ ЧЁТНЫХ СТРОК МАТРИЦЫ :
min=6; s=0; sum=0; a2=0; b=1; N1=N; prd=min;
while b<=10
for i=1:8
for j=1:8
c=H(i,j);
if c>=prd-min+1
if c<=prd
s=s+1;

sum=sum+c;
end
end
end
end
s;
sum;
F=sum/s;
%% СОЗДАНИЕ ДИАПАЗОННЫХ СРЕДНИХ
for i=1:8
for j=1:8
c=H(i,j);
if c>=prd-min+1
if c<=prd
N1(i,j)=F;
end
end
end
end
%% КОНЕЦ СОЗДАНИЕ ДИАПАЗОННЫХ СРЕДНИХ!!
s=0; sum=0; b=b+1;
prd=prd+min;
end
```

На основании прямого модифицированного ДКП исходной, до математических преобразований, сжимаемой матрицы  $H$ , получается гистограмма, показанная на рис. 13.

Далее проводился эксперимент, в котором каждый элемент чётных строк сжимаемой матрицы  $H$  умножался на константу – число 25. Результат показан на рис. 14.

Результаты эксперимента, в котором каждый элемент чётных строк сжимаемой матрицы  $H$  складывался с константой – числом 25, представлены на рис. 15.

В следующем эксперименте исследовалась эффективность сжатия блока  $H$  после замены множества его 64 элементов их диапазонными средними значениями (рис.16). Для этого программно в скрипте предварительно находились минимальное и максимальное значения чисел, образующих множество значений величин элементов матрицы  $H$ . Интервал между этими двумя значениями делится на десять (или иное число) одинаковых отрезков.

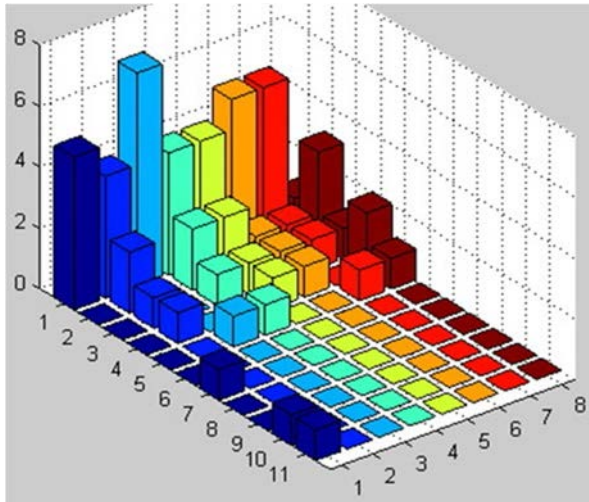


Рис. 13. Гистограмма значений прямого ДКП матрицы  $H$

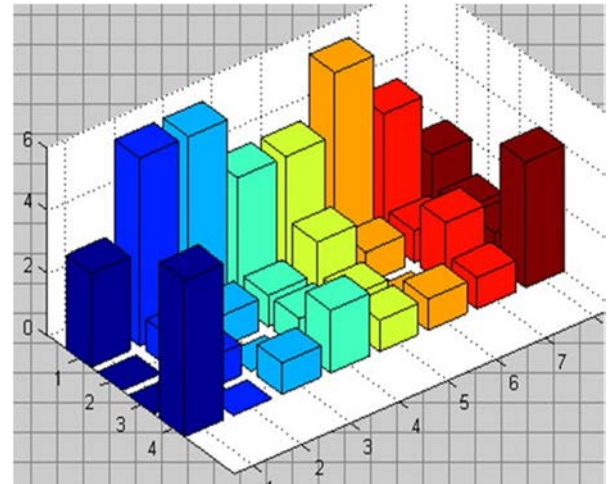


Рис. 14. Гистограмма значений прямого ДКП с умножением  $H$

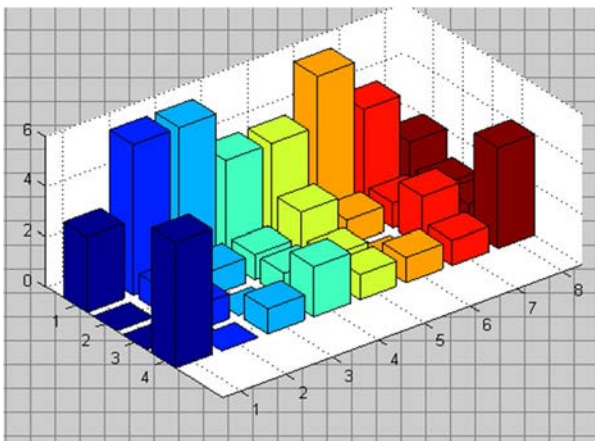


Рис. 15. Гистограмма значений прямого ДКП с суммированием  $H$

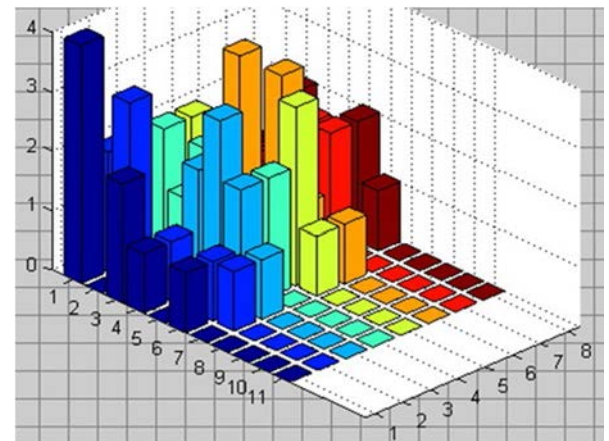


Рис. 16. Гистограмма значений прямого ДКП с диапазонными средними  $H$

Программа скрипта в матрице  $H$  находит все элементы, попадающие в каждый из заданных интервалов, суммирует их значения и запоминает общее количество элементов в каждом интервале. Это позволяет для каждого интервала найти его статистическое среднее элементов матрицы  $H$ , попадающих в данный интервал. Одновременно программой скрипта создаётся дополнительная матрица, эквивалентная матрице  $H$ , в которой элементы, попадающие в тот или иной интервал, заменяются только одним средним статистическим значением данного интервала. После выполнения этой операции для всех интервалов элементы матрицы  $H$  заменяются значениями элементов дополнительной матрицы, после

чего производится её прямое дискретное косинусное преобразование. Полученные в эксперименте значения диапазонных средних для матрицы  $N$  приведены ниже:

2.5000 9.5000 15.0000 20.7500 29.4000 33.8889 38.0000 46.3750 53.3333 56.0000

Результаты эксперимента для прямого ДКП матрицы из диапазонных средних для  $N$  видны из рис.16. Для этого случая отсутствует возможность точно восстановить блок  $N$  в первоначальном виде и в этом его недостаток. Сжатие получается в результате замены полного множества значений элементов матрицы  $N$  всего десятью диапазонными средними.

**Вывод:** *Предварительная обработка элементов сжимаемой матрицы не даёт видимого положительного эффекта.*

**Повторное дискретное косинусное преобразование.** Следующим этапом выполняемой серии машинных экспериментов с модифицированным дискретным косинусным преобразованием была проверка эффективности не одного, а двух последующих прямых ДКП одной и той же матрицы  $N$  равномерно распределённых целых чисел в диапазоне [1..235]. Поскольку скорость цифровых процессоров непрерывно возрастает, двойное (повторное) ДКП может найти практическое приложение. Для повторного сжатия использовалось дочернее ДКП с одними и теми же коэффициентами.

Эксперимент в среде Matlab проводился следующим образом. Указанная выше матрица  $N$  подвергалась первому сжатию дочерним ДКП и на основании полученных данных была построена гистограмма рис. 17, в которой интервальные значения отличались на 10%. С этой целью находились минимальное и максимальное значения элементов сжатой матрицы, исключая коэффициент  $DC$ , и полученный интервал делился на 10 поддиапазонов. На гистограмме видно, что полученные после сжатия данные попали в 5 поддиапазонов. Это даёт основание предложить 5 уровней квантования величин матрицы  $N$  после первого сжатия. В среде Matlab диапазонные значения ординат для этого случая определялись как  $y=[-150:50:380]$ .

На втором этапе выполнялось повторное сжатие уже сжатого один раз блока  $N$ . Диапазон квантования значений величин повторно сжатой матрицы выбирался 10% и 3.3%. В среде Matlab после нахождения минимума и максимума значений повторно сжатой матрицы  $N$  эти два случая программировались как  $y=[250:245:3700]$  и  $y=[250:115:3700]$ . Гистограмма для первого случая показана на рис. 18.

Такой же результат даёт и второй случай (рис.19). Концентрация данных вокруг их среднего значения получается достаточно плотной, не превышающей 3%, что свидетельствует об эффективности повторного сжатия видеоданных даже некоррелированных блоков.

Положительный эффект повторного сжатия очевиден. Но этому вопросу должно быть уделено более пристальное внимание и проведены дополнительные исследования.

### **Выводы**

1. Применяемое для сжатия видеоданных в intra-блоках модифицированное дискретное косинусное преобразование должно иметь от 3 до 7 различных коэффициентов, меньших 1 и не равных между собой.

2. Первая строка матрицы модифицированного ДКП должна быть единичной.

3. Базис коэффициентов модифицированного ДКП существенной роли не играет.

4. Расположение коэффициентов в модифицированной матрице ДКП с целью эффективного сжатия данных видеоблоков должно соответствовать классическому ДКП [1, 2]. Очевидно, существует и более оптимальное размещение коэффициентов в матрице ДКП, но в настоящее время не известны подходы (кроме метода перебора), которые позволили бы его найти. Метод перебора связан со значительными техническими трудностями.

5. Степень сжатия информации видеоблоков определяется расположением и числом коэффициентов ДКП и в меньшей мере их величиной.

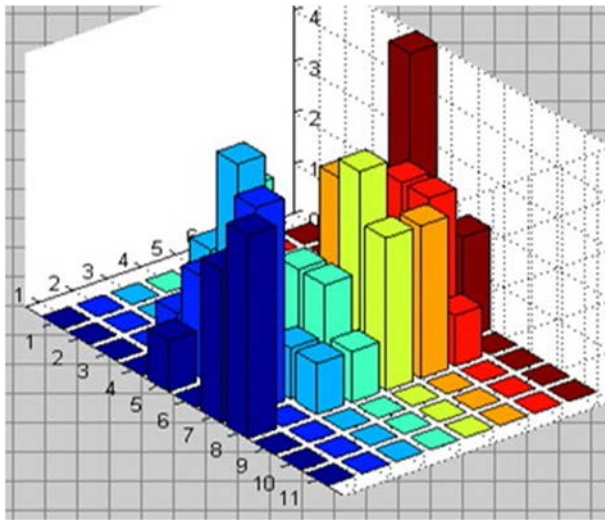


Рис. 17. Гистограмма первого сжатия  $N$  с интервалом 10%

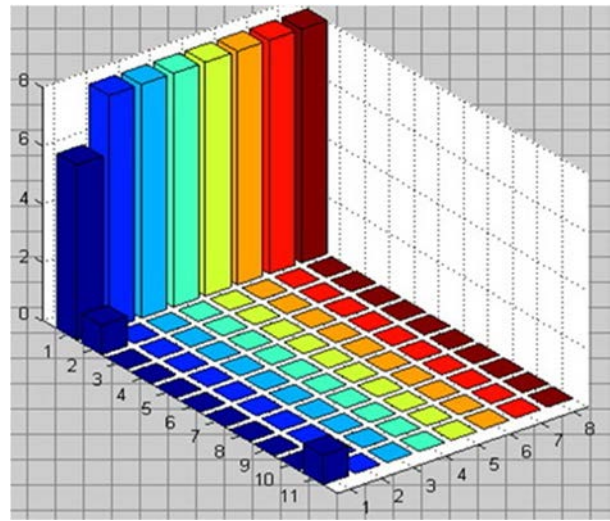


Рис. 18. Гистограмма повторного сжатия  $N$  с интервалом 10%

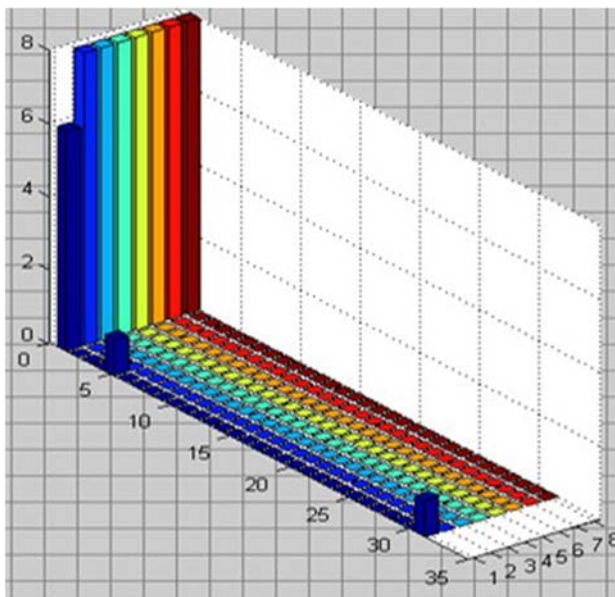


Рис. 19. Гистограмма повторного сжатия  $N$  с интервалом 3.3%

6. Повторное применение сжатия видеоблоков даёт значительный положительный эффект, но в два раза увеличивает число математических операций на обработку видеоблоков.

7. Дальнейшие исследования по повышению эффективности сжатия видеоданных следует проводить по направлениям:

- оптимизации расположения коэффициентов в матрице ДКП;
- поиск оптимального числа ненулевых элементов в матрице ДКП;
- определение оптимального соотношения между величинами коэффициентов ДКП;
- применения повторного сжатия видеоданных;

- Поиска распараллеливания математических операций при обработке видеоблоков ДКП.

### Литература

1. Сэлмон Д. Сжатие изображений и звука / Д. Сэлмон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
2. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 MPEG-4 – стандарты нового поколения / Ян Ричардсон. – М.: Техносфера, 2005. – 368с.
3. Бронштейн И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720с.