

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ МАТРИЦ ДЛЯ АНАЛИЗА ЗВУКОВОГО СИГНАЛА

*Предлагается подход к анализу звукового сигнала на основе теории матриц. Основными параметрами, определяющими звуковой сигнал, выступают сингулярные числа блоков соответствующей матрицы.*

Стремительное развитие мультимедийных технологий за последнее время привело к возможности массового создания, использования и распространения недорогих высококачественных цифровых сигналов (ЦС) (изображений (ЦИ), аудио (ЦА), видео). Общедоступность редактирующего программного обеспечения делает необыкновенно легкой возможность манипулирования и переделки ЦС, в силу чего задача доказательства подлинности и обнаружения их фальсификации становится чрезвычайно актуальной, что заставляет искать пути ее решения, используя различные способы: технику цифровых водяных знаков [1,2,3], технику, основанную на оценке местоположения источника света при генерации ЦИ [4], методику выявления результатов элементарных операций обработки ЦС, используемых при его фальсификации [5]. Каждый из предлагаемых методов, как правило, основывается на свойствах конкретного вида сигнала и не является применимым для других видов ЦС. Большинство из методов не гарантируют обнаружение фальсификации сигнала при ее наличии, а при обнаружении — не локализируют ее область. Это заставляет искать новые математические инструменты и подходы к решению рассматриваемой задачи.

В [6,7] были представлены основы единого математического подхода для решения задачи доказательства подлинности и обнаружения фальсификации ЦС, конкретизированного для ЦИ, базирующегося на матричном анализе. Любая фальсификация ЦИ представляется в [6,7] как возмущение матрицы (матриц) изображения, а значит определяется совокупностью возмущений сингулярных чисел (СЧ) и сингулярных векторов (СВ) специального вида исходной матрицы.

*Целью* данной работы является адаптация теории матриц для всестороннего анализа ЦА, что впоследствии позволит использовать предложенный в [6,7] подход для доказательства подлинности и обнаружения его фальсификации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить способ двумерного представления ЦА, наиболее удобный с точки зрения выявления определенных особенностей сигнала при помощи матричного анализа;
2. Установить свойства СЧ (СВ), наличие или отсутствие которых даст возможность анализировать ЦА с целью выявления фальсификации или установления подлинности.

Пусть исходное ЦА хранится в формате без потерь, WAV, вектор которого  $F$  имеет размерность  $n$ , а компоненты принимают целые значения из множества  $[0;255]$ . Одномерному ЦА поставим в соответствие его двумерное представление различными способами: горизонтальным, вертикальным и диагональным, наглядная иллюстрация которых для примера «bizarro.wav» (рис.1) представлена на рис.2(а,в,д), а соответствующие визуальные представления — на рис. 2(б,г,е). Поскольку ЦА обладает свойством одномерной корреляции, то каждое из рассматриваемых двумерных представлений сохраняет его.

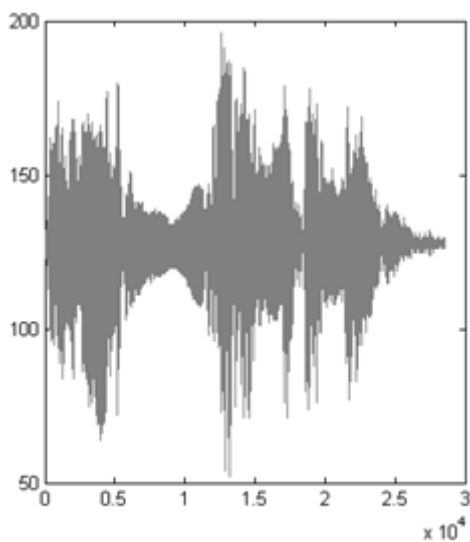


Рис.1. – ЦА «bizarro.wav»

Для горизонтального (вертикального) способа двумерного представления, в отличие от диагонального, значения в строке (столбце) блока сравнимы друг с другом благодаря одномерной корреляции, присущей ЦА, что приводит к малой мере линейной независимости строк (столбцов) матрицы блока, о чем свидетельствует наличие в ее сингулярном спектре нескольких СЧ, близких к нулю. В силу этого, как будет показано ниже, для дальнейших исследований имеет смысл использовать диагональное представление ЦА.

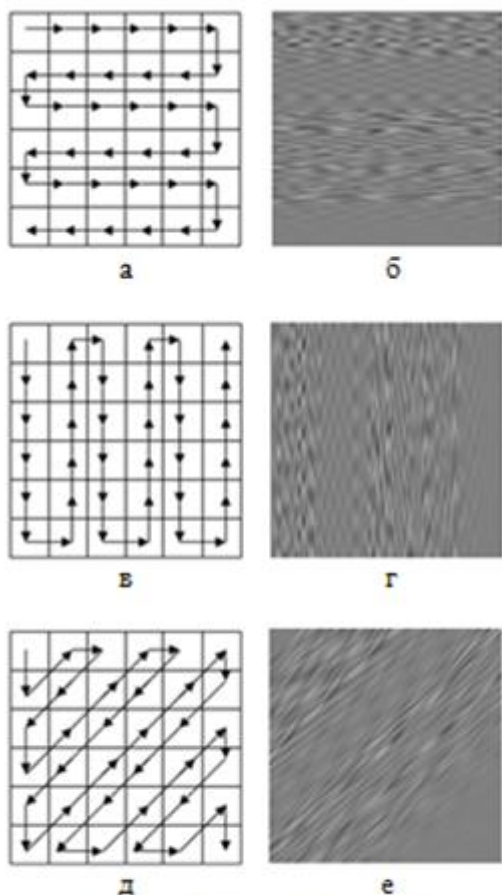


Рис.2. – Способы преобразования векторного представления ЦА в матричное и соответствующие ЦИ: а,б – горизонтальный; в,г – вертикальный; д,е – диагональный

вычислительный эксперимент. Обработке подвергались тестовые ЦА, предложенные MATLAB, и реальные ЦА. Для выявления характерных особенностей СЧ анализировались матрицы нулевых сингулярных чисел блоков (МНСЧБ) исходного двумерного представления ЦА, МНСЧБ сжатого и ЧВ, а также

Матрица ЦА, полученная после каждого из таких видов двумерных представлений, стандартным образом разбивается на блоки  $8 \times 8$ , для каждого из которых определяется набор СЧ (наборы средних значений СЧ по всем блокам матриц, отвечающих «bizarro.wav» представлены в табл.1).

Для горизонтального (вертикального) способа двумерного представления, в отличие от диагонального, значения в строке (столбце) блока сравнимы друг с другом благодаря одномерной корреляции, присущей ЦА, что приводит к малой мере линейной независимости строк (столбцов) матрицы блока, о чем свидетельствует наличие в ее сингулярном спектре нескольких СЧ, близких к нулю. В силу

этого, как будет показано ниже, для дальнейших исследований имеет смысл использовать диагональное представление ЦА. В настоящее время хранение и передача ЦС по каналам телекоммуникаций в связи со значительным увеличением объемов информации осуществляется в сжатом состоянии.

Общая схема сжатия (с потерями) как для ЦИ, так и для ЦА, состоит из трех основных шагов: отображение в частотную область, квантование, энтропийное кодирование. Восстановление включает в себя шаги, обратные к перечисленным выше, в обратном порядке [11]. На последнем шаге восстановления, при переходе из частотной области во временную, осуществляется округление значений до целых и их ввод в диапазон  $[0, 255]$  - полное восстановление (ПВ). Анализ могут подвергаться только первые два шага восстановления, без округления и введения в диапазон  $[0, 255]$  (частичное восстановление (ЧВ)). Квантование коэффициентов, полученных в частотной области, за счет округления является необратимой процедурой и приводит к некоторым особенностям СЧ блоков. Для иллюстрации этих особенностей в среде MATLAB был проведен

ПВ ЦА, при этом МНСЧБ – это такая матрица  $M$  размерности  $\lfloor n/8 \rfloor \times \lfloor n/8 \rfloor$ , где  $\lfloor \cdot \rfloor$  — целая часть аргумента, значение каждого элемента которой определяется как количество нулевых СЧ в соответствующем блоке двумерного представления ЦА.

Таблица 1. – Средние значения СЧ по всем блокам матриц, отвечающих ЦА «bizarro.wav»

№ СЧ	Значение СЧ		
	горизонтальное представление	вертикальное представление	диагональное представление
1	969.12	969.12	964.86
2	43.089	43.089	55.429
3	11.122	11.122	46.292
4	1.8301	1.8301	36.034
5	0.8695	0.8695	28.51
6	0.55363	0.55363	20.142
7	0.31078	0.31078	12.791
8	0.090668	0.090668	4.7569

Некоторые из результатов эксперимента представлены в табл. 2-4. Очевидно, что элементы МНСЧБ для исходного двумерного представления ЦА будут практически все нулевыми. Если до квантования количество блоков, содержащих нулевые СЧ, в среднем не превышает 3% от общего числа блоков (ОЧБ) (табл.2), то после квантования и ЧВ практически все блоки содержат нулевые СЧ, причем таких значений будет достаточно много (табл.3). Это приведет к тому, что МНСЧБ для двумерного представления ЧВ ЦА будет качественно отличаться от своего аналога для исходного двумерного представления ЦА.

Таблица 2. - Результаты сингулярного разложения блоков  $8 \times 8$  исходных ЦА, полученных с помощью двумерного диагонального представления

№ п/п аудио	Кол-во блоков, имеющих $m$ нулевых СЧ, по отношению к ОЧБ (%)									Кол-во блоков с нулевыми СЧ, по отношению к ОЧБ (%)	ОЧБ
	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$		
1	81,6	0	0	0	14,7	1,18	0,59	1,78	0	18,34	10000
2	76,2	2,16	1,54	0,31	2,16	9,26	1,23	7,10	0	23,77	19321
3	84,5	0	1,23	0,31	0	10,8	0	3,09	0	15,43	19321
4	91,1	0	0	0	0	0	0	8,88	0	8,88	28561
5	83,3	5,54	0,83	0	0	0	10,2	0	0	16,62	21316
6	81,0	0	0	0	19,0	0	0	0	0	19,00	5776
7	75,1	2,22	3,56	0,89	0	10,2	0,89	7,11	0	24,89	13225
8	90,3	0,19	0,19	0,19	0	0	0	9,07	0	9,64	31329
9	88,4	1,07	1,17	5,37	0,88	0,59	0,78	1,66	0	11,52	64009
10	91,5	1,66	0,63	0,63	3,59	0,78	0,44	0,70	0	8,43	169744
11	79,0	20,00	0	0	0	1,00	0	0	0	21,00	6241
12	87,3	2,93	1,15	5,74	0,51	0,38	0,26	1,66	0	12,63	48841
13	92,3	0	0	0	0	7,69	0	0	0	7,69	41209
14	86,7	0,52	0	0,10	4,16	0	0	8,43	0	13,22	59536
15	85,2	0	14,79	0	0	0	0	0	0	14,79	10404
16	56,2	0	0	0	0	0	43,7	0	0	43,75	676
17	94,6	0,44	4,69	0,19	0	0	0	0,06	0	5,38	101124
Ср-е зня по столбцам	83,8	2,16	1,75	0,81	2,65	2,46	3,02	2,91	0	16,18	

После ПВ МНСЧБ (табл.4) будет иметь большинство нулевых элементов, однако в среднем порядка трети элементов будут отличны от нуля, кроме того,

среди ненулевых будет значительная часть элементов, больших 2. Нулевые СЧ блоков двумерного представления ЧВ ЦА хоть и станут нулями после ПВ, но их значения будут сравнимы с погрешностью округления, что при выбранном диагональном способе двумерного представления ЦА не характерно для блоков матрицы исходного сигнала.

Таблица 3. - Результаты сингулярного разложения блоков 8×8 ЧВ ЦА, полученных с помощью двумерного диагонального представления

№ п/п аудио	Кол-во блоков, имеющих $m$ нулевых СЧ, по отношению к ОЧБ (%)									Кол-во блоков с нулевыми СЧ, по отношению к ОЧБ (%)	ОЧБ
	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$		
1	1.18	13.61	20.71	20.7	28.9	10.0	1.18	3.55	0	98.82	10000
2	10.4	18.52	12.35	10.1	8.95	12.3	7.72	19.4	0	89.51	19321
3	2.16	8.33	23.46	25.9	20.6	14.8	1.54	3.09	0	97.84	19321
4	0.83	3.31	12.19	23.5	21.6	15.2	5.58	17.5	0	99.17	28561
5	0	0	0.55	5.54	15.5	22.9	15.2	40.1	0	100.00	21316
6	18.0	11.00	13.00	3.00	17.0	10.0	13.0	15.0	0	82.00	5776
7	15.5	8.00	8.00	9.33	1.78	9.33	7.11	40.8	0	84.44	13225
8	1.13	4.91	6.43	14.5	28.3	21.5	9.64	13.4	0	98.87	31329
9	0	1.66	6.25	14.3	23.6	11.4	9.47	33.2	0	100.00	64009
10	1.07	1.52	1.89	6.69	13.3	13.7	14.0	47.6	0	98.93	169744
11	5.00	10.00	10.00	12.0	16.0	12.0	8.00	27.0	0	95.00	6241
12	0	0.77	3.32	3.44	13.0	8.42	16.0	54.9	0	100.00	48841
13	31.9	15.09	6.07	6.95	7.69	9.32	10.3	12.5	0	68.05	41209
14	22.6	28.82	24.04	10.4	5.10	0.31	0	8.64	0	77.32	59536
15	8.28	19.53	32.54	27.8	11.2	0.59	0	0	0	91.72	10404
16	12.5	18.75	0	6.25	12.5	0	37.5	12.5	0	87.50	676
17	4.31	13.69	19.50	25.5	17.7	4.94	3.50	10.7	0	95.69	101124
Ср-е зн-я по столбцам	7.95	10.44	11.78	13.3	15.4	10.4	9.41	21.2	0	92.05	

Таблица 4. - Результаты сингулярного разложения блоков 8×8 ПВ ЦА, полученных с помощью двумерного диагонального представления

№ п/п аудио	Кол-во блоков, имеющих $m$ нулевых СЧ, по отношению к ОЧБ (%)									Кол-во блоков с нулевыми СЧ, по отношению к ОЧБ (%)	ОЧБ
	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$		
1	81.0	0.59	0	0.59	14.2	0	0	3.55	0	18.93	10000
2	67.2	2.16	0.31	1.85	0.62	8.33	0	19.4	0	32.72	19321
3	83.9	1.85	0	0	0.31	10.8	0	3.09	0	16.05	19321
4	76.0	2.89	1.03	1.65	0.62	0.21	0	17.5	0	23.97	28561
5	43.7	4.71	2.22	2.22	1.66	1.94	3.32	40.1	0	56.23	21316
6	63.0	1.00	2.00	3.00	14.0	2.00	0	15.0	0	37.00	5776
7	46.6	2.67	0	0	2.67	7.11	0	40.8	0	53.33	13225
8	71.6	7.18	2.08	2.46	1.32	1.89	0	13.4	0	28.36	31329
9	56.8	2.73	1.07	3.03	0.98	2.05	0.10	33.2	0	43.16	64009
10	38.9	3.99	2.44	2.33	2.70	1.85	0.04	47.6	0	61.02	169744
11	56.0	10.00	0	2.00	2.00	3.00	0	27.0	0	44.00	6241
12	29.5	2.93	3.32	1.79	2.30	5.10	0	54.9	0	70.41	48841
13	73.9	2.51	2.07	2.66	0.59	5.47	0.15	12.5	0	26.04	41209
14	87.3	0	0	0	4.06	0	0	8.64	0	12.70	59536
15	85.2	0	14.79	0	0	0	0	0	0	14.79	10404
16	56.2	0	0	0	0	0	31.2	12.5	0	43.75	676.00
17	82.6	1.44	3.19	1.13	0.13	0.69	0	10.7	0	17.31	101124
Ср-е зн-я по столбцам	64.7	2.75	2.03	1.45	2.83	2.97	2.05	21.2	0	35.28	

Для наглядности рассмотрим блок (1,11) диагонального матричного представления ЦА «bearings.wav» (табл.5).

Таблица 5. – СЧ блока матрицы ЦА «bearings.wav»

Зн-я СЧ	Исходное ЦА	1002.92	111.33	83.79	74.41	64.87	34.16	28.25	3.66
	После ЧВ	1011.04	101.42	67.50	25.71	11.12	0.00	0.00	0.00
	После ПВ	1010.93	101.21	67.27	26.02	11.40	0.65	0.52	0.01

Хотя последние 3 СЧ после ПВ стали ненулевыми, их значения незначительно отличаются от нуля и друг от друга по сравнению с соответствующими значениями для двумерного представления исходного ЦА и явно отличаются от предыдущих. Такая особенность дает возможность различать блоки двумерного представления ЦА, ПВ после сжатия, и блоки исходного двумерного представления ЦА.

Таким образом, задачи, поставленные в работе, решены. Обоснован способ двумерного представления ЦА, наиболее удобный для матричного анализа с целью установления определенных свойств ЦА. Приведенные выше результаты полностью соответствуют выводам, полученным при исследовании характерных признаков возмущений СЧ ЦИ [6,7], что говорит в пользу общности предлагаемого подхода к анализу свойств ЦС, основанного на теории матриц.

На основе установленных свойств СЧ блоков матриц, отвечающих ЦА, позволяющих отличить сигнал, хранимый без потерь, от ЧВ или ПВ после сжатия, автором разработан практический метод доказательства подлинности ЦА и установления области его фальсификации, проведенной определенными способами, полученные результаты в настоящий момент готовятся к печати.

#### Литература

1. Kundur D., Hatzinakos D. Digital watermarking for tell-tale tamper proofing and authentication // Proceedings of the IEEE. — 1999. — Vol. 87(7). — P. 1167—1180,
2. Fridrich J., Goljan M., Du M. Invertible authentication // In SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Contents. — 2001.
3. Blythe P., Fridrich J. Secure digital camera // In Proc. Digital Forensic Research Workshop. — 2004.
4. Johnson M. K., Farid H. Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting // In Proc. ACM Multimedia and Security Workshop, New York. — 2005. — P. 1—10.
5. Bayram S., Sankur B., Memon N. Image manipulation detection // Journal of Electronic Imaging. — 2006. — Vol. 15(4). — P. 1—17.
6. Кобозева А.А. Использование особенностей возмущений сингулярных чисел матрицы цифрового изображения для обнаружения его фальсификации // Искусственный интеллект.- 2008.- №1.- С.145-153.
7. А.А. Кобозева, Е.А. Трифонова. Обнаружение фальсификации цифрового изображения на основе анализа возмущений собственных значений его матрицы//Труды Одес.Политехн-го ун-та. – 2008.-№1. – С.140-147.
8. Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. — М.: Мир, 2001. — 430 с.
9. Кобозева А.А. Связь свойств стеганографического алгоритма и используемой им области контейнера для погружения секретной информации // Искусственный интеллект. — 2007. — №4. — С.531—538.
10. wikipedia WAV <http://en.wikipedia.org/wiki/WAV>
11. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука // М.: Техносфера, 2004.