

Классификация и статистика применения методов сжатия измерительной информации

А. Б. Раимжанова

Высшая школа компьютерных технологий и информационных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

raimzhanova.adele@gmail.com

К. К. Семенов

Высшая школа компьютерных технологий и информационных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

semenov_kk@spbstu.ru

Аннотация. В докладе предложена классификация основных групп методов сжатия измерительной информации. Выполнен анализ существующих лагун в спектре используемых на практике методов и подходов. Представлены результаты исследования статистики применения основных групп методов сжатия измерительной информации на массиве научных публикаций, проиндексированных в наукометрической базе Google Scholar. Выявлена потребность области в алгоритмах, обеспечивающих контроль вносимой при сжатии измерительных данных погрешности.

Ключевые слова: сжатие измерительных данных, информационно-измерительные системы, сжатие без потерь, сжатие с неконтролируемыми потерями, сжатие с контролируемыми потерями

I. ВВЕДЕНИЕ

Для современных информационно-измерительных систем (далее – ИИС) характерны значительные объемы получаемой, обрабатываемой, пересылаемой и хранимой измерительной информации. Высокие темпы развития технологий в области электроники и ее компонентной базы привели не только к совершенствованию каналов связи с увеличением их пропускной способности и устройств хранения, но и к еще более быстрому росту объема получаемой и подлежащей обработке информации. В области информационно-измерительных систем это привело к ситуациям, когда объем измерительных данных превалирует над пропускной способностью используемых каналов их передачи и размером хранилищ для их размещения, что приводит к перегрузкам и переполнениям последних [1].

Естественным способом преодолеть отмеченное затруднение являются попытки уменьшить объем измерительной информации. Достижение этого на практике обеспечивается в первую очередь уменьшением избыточности измерений там, где она имеет место (в том числе сжатием без потерь), и применением алгоритмов сжатия с потерями [2–6], если достичь нужного иным способом не получилось. Поскольку каждый результат измерений имеет конкретную экономическую ценность, обусловленную стоимостью его получения, снижение размера передаваемых и хранимых данных за счет децимации [7] или других потерь [8–10] является менее предпочтительным вариантом на практике, так как, по сути дела, является «сжиганием ассигнаций в печи». Вместе с тем такие методы находят самое широкое

применение в ряде областей вследствие того, что аппаратные возможности используемых в них информационно-измерительных систем оказываются не в состоянии справиться с растущими объемами получаемой измерительной информации с низкой избыточностью.

Снижение объема передаваемых или сохраняемых данных за счет уменьшения заложенной в них избыточности на практике достигается: 1) применением эффективной математической обработки результатов измерений в измерительных каналах и подсистемах ее передачи, 2) методами сжатия без потерь. Если разработка методов и средств сжатия данных представляет собой отдельную область науки и развивается в известной мере независимо от природы данных, подлежащих сжатию и архивированию, то методы и средства эффективной математической обработки неточных данных неразрывно связаны с тем, что за информация ей подвергается и какими свойствами она обладает, – без этих сведений нет возможности обеспечить эффективность и оптимальность, понимаемых в том числе и в смысле объема получаемых результатов обработки, направляемых для передачи и хранения. Таким образом, отмеченные методы и средства специфично зависят от конкретной измерительной задачи, и их состав определяется, прежде всего, измерительной ситуацией и предъявляемыми метрологическими требованиями. Многообразие измерительных ситуаций препятствует выполнению классификации методов снижения избыточности, поскольку та во многом сводится к классификации измерительных задач.

Оценка доли ситуаций, когда снижение избыточности производится тем или иным образом (математической обработкой или алгоритмами сжатия), в литературе отсутствует. Результаты поиска с помощью наукометрической базы данных Google Scholar сообщают следующее: по состоянию на 15.04.2024 результаты поиска научных работ, чье название, аннотация или текст (если он в открытом доступе) в обязательном порядке содержат слово «measurement», содержат свыше 8,08 млн статей, а работ, содержащих вместе с ним еще и словосочетание «data compression» – только 106 тыс. статей, т. е. примерно 1,3 %. В состав последних при этом статей, содержащих еще слово «lossless» (указание на сжатие без потерь), но не «lossy» (указание на сжатие с потерями) – 16,9 тыс. (15,9 %); слово «lossy», но не «lossless» – 14,9 тыс. (14,1 %) Таким

образом, в качестве оценки доли приложений, в которой снижение избыточности результатов измерений достигается за счет специализированной математической обработки без применения алгоритмов сжатия, может достигать значения в 70 %.

Данная статья направлена на анализ существующих лагун в спектре используемых на практике методов и подходов сжатия измерительной информации (без потерь и с потерями), что позволит составить лучшее представление о современном состоянии области благодаря предложенной классификации.

Содержание статьи включает три раздела, помимо настоящего введения. Первый раздел посвящен классификации основных групп методов сжатия измерительной информации. В следующем разделе представлены результаты исследования статистики их применения в измерительных ситуациях на массиве научных публикаций, проиндексированных в наукометрической базе Google Scholar. Последний раздел обсуждает возможности разработки новых методов сжатия измерительной информации с контролируемыми потерями. Такие методы позволили бы метрологически обеспечить процедуру сжатия с потерями и заполнить соответствующую лагуну между ним и сжатием без потерь, вызванную тем, что на практике потери информации почти всегда оцениваются лишь с точки зрения интегральных оценок качества и почти никогда – с величиной искажений, внесенных в каждый отдельный элемент сжимаемых данных.

II. МЕТОДЫ СЖАТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ИИС

В обзорной статье [6] предложена подробная, но довольно общая классификация алгоритмов сжатия данных с точки зрения: 1) качества данных, 2) схем осуществляемых преобразований, 3) типа данных и 4) областей применения. Для задач сжатия именно измерительных данных больший интерес представляет работа [2], в которой представлена классификация методов сжатия информации с точки зрения уменьшения их избыточности (структурной, статистической, семантической). Под информационной избыточностью понимается та часть сжимаемого сообщения, которая является не столь существенной, и при потере которой полнота сообщения сохраняется или может быть восстановлена различными способами. Как было отмечено выше, принятая на сегодняшний день классификация делит методы сжатия данных на две большие группы: неискажающих (lossless) методов, называемых также методами сжатия без потерь, и искажающих (lossy) методов сжатия с потерями [11].

К первой группе относят алгоритмы статистического (PPM – Prediction by Partial Matching [12]; DMC – Dynamic Markov Compression [13]; ACB – Associative Coding by Buyanovski [14]) и словарного (семейство алгоритмов Лемпела–Зива, Lempel-Ziv, – LZ77 [15], LZ78 [16], LZW [17], LZM [18] и другие) сжатия, алгоритмы сжатия сортировкой блоков BWT (преобразование Барроуза–Уилера – Burrows-Wheeler Transform [19]). В отдельные категории можно выделить алгоритмы по типу RLE (Run Length Encoding [20]), методы энтропийного кодирования (арифметического

[21], префиксных кодов – Шеннона–Фано [22], код Хаффмана [21] и др.). Как правило, в современных информационно-измерительных системах применяют комбинации вышеперечисленных методов для достижения лучших результатов [21, 23–26]. К примеру, алгоритмы словарного сжатия и сжатия сортировкой блоков используют вместе с кодами Хаффмана [27, 28], а методы статистического сжатия комбинируют с арифметическим кодированием [29, 30]. Применение алгоритмов сжатия без потерь в измерительных задачах сопряжено с необходимостью выполнения определенных условий, встречающихся, впрочем, в приложениях довольно часто [31–35]: значительное сокращение объема данных при использовании данных подходов возможно при известной доле стационарности в сигналах измерительной информации, подвергаемых сжатию.

Методы группы алгоритмов сжатия данных с потерями позволяют достигать большей степени сжатия по сравнению с компрессией без потерь, благодаря избирательной потере избыточной информации [11]. Наиболее популярными алгоритмами сжатия с потерями при работе с измерительной информацией являются: 1) JPEG [36–38], в основе которого используется дискретное косинусное преобразование [39, 40]; 2) JPEG2000 [41–43] – с вейвлет-преобразованием [40, 44]; 3) LTC – Lightweight Coding [45], 4) KRLE – K-Run Length Encoding [46], 5) LPC – Linear Predictive Coding [34, 47, 48] и 6) CS – Compressive Sensing [44, 49, 50]. Использование методов сжатия с потерями в измерительных задачах сопряжено с противоречием: с одной стороны достигаемая глубина сжатия побуждает широко использовать методы данной группы, с другой стороны сложность обеспечения метрологического контроля величины искажений, вносимых в сжимаемые результаты измерений, создает затруднения для их полноценного использования, поскольку величина возникающих погрешностей сильно варьируется и их предельные характеристики зачастую принципиально не могут быть гарантированы из-за природы алгоритмов сжатия с потерями. Первое обстоятельство в настоящее время превалирует над вторым, что в конечном счете выражается в осознаваемой необходимости применения методов сжатия с потерями для научных (в том числе и измерительных) данных, исходя из практических и экономических соображений [51].

ТАБЛИЦА I. ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ МЕТОДОВ СЖАТИЯ ДАННЫХ В ИИС

Методы сжатия данных		
Синтаксического сжатия		Семантического сжатия (с потерями)
структурного сжатия (без потерь)	статистического сжатия (с потерями)	– по моделям технической диагностики
– кодирования	– адаптивной дискретизации	– ситуационного анализа (с учетом воздействия на объект измерения)
– сигнатурного анализа	– интерполяции и экстраполяции полиномами	– по моделям объекта измерения
– компрессии	– калмановской фильтрации	
	– методом наименьших квадратов	
	– аппроксимации по системе базисных ортогональных функций (Чебышева, Уолша, Адамара, Хаара)	

Учитывая рекомендации из упомянутой ранее работы [2] и принимая во внимание результаты приведенного выше обзора, в табл. 1 представлены основные группы методов сжатия данных, применяемых в ИИС при решении измерительных задач.

III. СТАТИСТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СЖАТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ИИС

Разные методы сжатия измерительной информации (с потерями или без них) находят разное применение в измерительных задачах. Для оценки доли их использования был выполнен статистический анализ частоты совместного упоминания названий методов в работах, имеющих либо изначально метрологическую направленность, либо содержащих в себе часть, связанную с измерениями. Для этого было выполнено следующее исследование. В наукометрической базе данных Google Scholar были исполнены поисковые запросы, подобные упомянутым в разделе 1 настоящей статьи, в которые были добавлены названия одного из методов сжатия. Недостатком такого подхода к поиску является то, что полученные результаты содержат, в том числе работы, в которых анализируемый метод просто упоминается среди прочих в обзорной части статьи. Для получения более взвешенных результатов было проведен дополнительный поиск только по названиям статей по запросу, который в обязательном порядке включал в себя слово «measurement» и название метода сжатия. Такой подход к поиску пропускает часть работ, тематически относящихся к вопросу, но позволяет обеспечить уверенность в том, что анализируемый метод сжатия данных значимо использован в найденной статье. Полученные результаты представлены в табл. 2 по мере их упоминания в обзорной части настоящей статьи.

ТАБЛИЦА II. СТАТИСТИКА ПРИМЕНЕНИЯ РАЗНЫХ МЕТОДОВ СЖАТИЯ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ

Метод сжатия	Количество научных статей	
	по тексту	по названию
PPM: Prediction by Partial Matching	200	1
DMC: Dynamic Markov Compression	166	2
ACB: Buyanovski Associative Coding	67	0
LZ77: Lempel-Ziv	962	2
LZ78: Lempel-Ziv	405	
LZW: Lempel-Ziv-Welch	1290	0
LZM	6	0
BWT: Burrows-Wheeler Transform	509	0
RLE: Run Length Encoding	1290	3
Shannon-Fano	358	0
Huffman	5460	1
arithmetic coding	2990	0
JPEG	6400	19
JPEG2000	2440	3
LTC: Lightweight Coding	132	0
KRLE: K-Run Length Encoding	13	0
LPC: Linear Predictive Coding	353	12
CS: Compressive Sensing	1610	224

Полученные результаты свидетельствуют о следующем: 1) отдельной большой областью применения средств сжатия измерительной информации выступает обработка изображений с применением алгоритма JPEG; 2) отдельным важным направлением развития методов снижения избыточности измерительной информации выступает compressive sensing, ему посвящен значительный объем литературы, обособляющий данное направление в отдельную

подобласть исследований; 3) наиболее популярными подходами к сжатию собственно измерительной информации являются широко известные классические алгоритмы Хаффмана, арифметического кодирования, RLE, LZW, другие подходы применяют реже.

Помимо выполненного анализа были также оценены темпы роста числа публикаций, так или иначе связанных с алгоритмами сжатия применительно к измерительным данным. Полученные результаты по запросам на русском и английском языках представлены на рис. 1. Видно, что темпы роста примерно линейные и составляют около 100 % на каждые 6 лет, что говорит об увеличении значения задачи сжатия измерительных данных и необходимости разработки новых методов и подходов.

Широкое применение для сжатия измерительных данных методов с потерей информации указывает на наличие дилеммы: есть несомненная потребность в использовании таких подходов, но их использование сопряжено с внесением неконтролируемой погрешности в сжимаемые данные, что противоречит требованиям и духу метрологии. Преодолеть данное затруднение могли бы методы сжатия с контролируемыми потерями, которые сочетали бы в себе и более эффективное сжатие, которое возможно при допущении потерь, но в то же время и позволяли бы остаться в рамках требований единства измерений. Частичное осознание данной потребности привело к возникновению первых подобных методов и подходов, движущихся в соответствующем направлении обеспечения контроля вносимых искажений. Стоит упомянуть работы [45] и [46], посвященные алгоритмам сжатия с потерями на основе алгоритмов LTC и KRLE применительно к беспроводным сетям сенсоров: авторы данных статей предлагают вносить небольшое контролируемое «зашумление» в измерительные данные с целью последующего их более эффективного сжатия. Важным шагом к алгоритмам сжатия с контролируемыми потерями следует считать работы [52, 53], в которых изложен подход к такой модификации алгоритма JPEG, который позволил бы контролировать вносимые искажения в каждый элемент сжимаемых данных и который авторами назван «метрологическим JPEG».

Обеспечение сжатия с контролируемыми потерями открывает существенные возможности в метрологии: становится возможным «обменять» незначительную часть точности на выигрыш в сжатии, если такой компромисс уместен с экономической точки зрения. Обозначим предел допустимой относительной погрешности результата измерений равным γ . В большинстве измерительных задач внесение в результат измерения дополнительной случайной погрешности величиной не более $k\cdot\gamma$, где $k \leq 0,7$, не привело бы к существенным искажениям и не сказалось бы значимо на качестве дальнейших решений, принимаемых на основе результатов измерений, но при этом потенциально могло бы обеспечить существенный выигрыш в степени сжатия. Действительно, поскольку предел погрешности в метрологической практике всегда подвергается округлению в большую сторону и вносимая при применении алгоритмов сжатия с потерями погрешность принципиально носит случайный (по сравнению с инструментальными погрешностями результатов

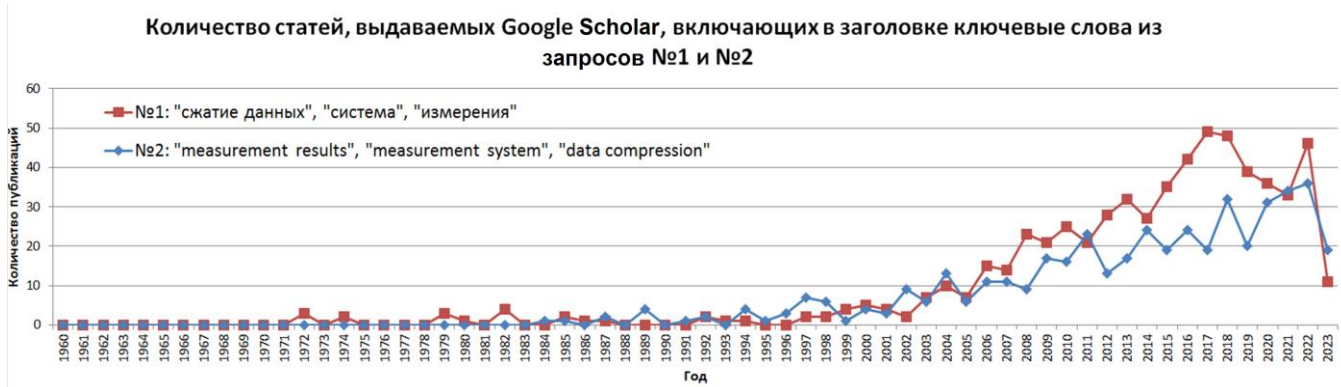


Рис. 1. Количество статей, упоминающих в заголовке тот или иной метод сжатия (по данным Google Scholar)

измерений) характер, то итоговая погрешность результата окажется не более $\sqrt{1+k^2} \cdot \gamma$. При $k=0,7$, получим, что итоговая погрешность не превзойдет величины $\sqrt{1+0,7^2} \cdot \gamma \approx 1,2 \cdot \gamma$, что в сравнении с γ примерно соответствует завышению, возникающему вследствие округления в большую сторону.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты обзора методов сжатия информации, применяемых в измерительных задачах. Дана классификация основных применяемых методов, рассмотрен спектр используемых на практике подходов. Представлена статистика по всем основным алгоритмам сжатия на основе наукометрической базы данных Google Scholar применительно к задачам метрологии. По итогам анализа сделан вывод о возрастающей потребности в разработке методов сжатия измерительной информации (как на основе отечественной, так и зарубежной литературы), в особенности – методов сжатия с контролируемым уровнем потерями, которые могли бы обеспечить компромисс между достигаемой эффективностью сжатия с потерями и величиной вносимой при этом в результаты измерений дополнительной погрешности.

В работе отмечено, что разработка новых методов сжатия сигналов измерительной информации с контролем вносимой при сжатии погрешности позволит существенно повысить степень сжатия для нужд и целей информационно-измерительных систем, но при этом обеспечить сохранение результатов сжатия в метрологическом смысле: пределы погрешности получаемых в конечном счете результатов будут известны и проконтролированы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] I.C. Paschalidis and S. Vassilaras, "On the estimation of buffer overflow probabilities from measurements," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47(1), pp. 178-191, 2001.
- [2] Бурый А.С., Лобан А.В., Ловцов Д.А. Модели сжатия массивов измерительной информации в автоматизированной системе управления // *Автоматика и телемеханика*. 1998. № 5. С. 3–26.
- [3] Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображения и аудио. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 384с.
- [4] J. Uthayakumar, T. Vengattaraman and P. Dhavachelvan, "A survey on data compression techniques: From the perspective of data quality, coding schemes, data type and applications," *Journal of King Saud*

- University – Computer and Information Sciences, vol. 33(2), pp. 119-140, 2018.
- [5] Левенец А.В. Методы и алгоритмы геометрического подхода к сжатию измерительных данных в информационно-измерительных системах: диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук, 05.11.16. Хабаровск: 2017. 347 с.
- [6] Левенец А.В. Классификация телемеханических данных и их разностных рядов с точки зрения задачи сжатия // *Вестник ТОГУ*. 2009. № 4(15). С. 71-80.
- [7] N. Polat, M. Uysal and A.S. Toprak, "An investigation of DEM generation process based on LiDAR data filtering, decimation, and interpolation methods for an urban area," *Measurement*, vol. 75, pp. 50-56, 2015.
- [8] D. Smutek, "Quality measurement of lossy compression in medical imaging," *Prague medical report*, vol. 106(1), pp. 5-26, 2005.
- [9] T. Lu, Q. Liu, X. He, H. Luo, E. Suchyta, J. Choi, N. Podhorszki, S. Klasky, M. Wolf, T. Liu and Z. Qiao, "Understanding and modeling lossy compression schemes on HPC scientific data," In *2018 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, pp. 348-357, 2018.
- [10] Y. Blau and T. Michaeli, "Rethinking lossy compression: The rate-distortion-perception tradeoff," In *International Conference on Machine Learning*, pp. 675-685, 2019.
- [11] C. Chen, L. Zhang and R.L.K. Tiong, "A new lossy compression algorithm for wireless sensor networks using Bayesian predictive coding," *Wireless Networks*, vol. 26(8), pp. 5981-5995, 2020.
- [12] Y. Zhang and D.A. Adjeroh, "Prediction by partial approximate matching for lossless image compression," *IEEE transactions on image processing*, vol. 17(6), pp. 924-935, 2008.
- [13] R. Wang, M. Teng, Y. Bai, T. Zang and Y. Wang, "Dmcompress: Dynamic markov models for bacterial genome compression," In *2016 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine*, pp. 776-779, 2016.
- [14] Буяновский Г. Ассоциативное кодирование // *Монитор*. 1994. No 8. С. 10–22.
- [15] S. Kreft and G. Navarro, "LZ77-like compression with fast random access," In *2010 Data Compression Conference*, pp. 239-248, 2010.
- [16] Y. Tamakoshi, I. Tomohiro, S. Inenaga, H. Bannai and M. Takeda, "From run length encoding to LZ78 and back again," In *2013 Data Compression Conference*, pp. 143-152, 2013.
- [17] D. Barman and M.B. Ahamed, "Improved LZW Compression Technique using Difference Method," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 9(5), pp. 87-92, 2020.
- [18] LZM – A high speed LZ style lossless compressor. [Электронная страница]. Дата обращения: 30.04.2024. Формат доступа: свободный. URL: <https://github.com/lmcilroy/lzm>
- [19] D. Kempa and T. Kociumaka, "Resolution of the burrows-wheeler transform conjecture," *Communications of the ACM*, vol. 65(6), pp. 91-98, 2022.
- [20] S. Fiergolla and P. Wolf, "Improving run length encoding by preprocessing," *arXiv preprint, arXiv:2101.05329*, 2021.

- [21] G. Kumar and R. Kumar, "Analysis of arithmetic and Huffman compression techniques by using DWT-DCT," *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, vol. 13(4), pp. 63-70, 2021.
- [22] T.D. Lawal, L.O. Olatunbosun and K.A. Gbolagade, "An Improve Shannon Fano Data Compression Algorithm using Residue Number System," *Communications on Applied Electronics*, vol. 7(35), pp. 19-25, 2021.
- [23] G. Giorgi, "A combined approach for real-time data compression in wireless body sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17(18), pp. 6129-6135, 2017.
- [24] G. Koning, B.A. Van Meurs, H. Haas and J. H. Reiber, "Effect of data compression on quantitative coronary measurements," *Catheterization and cardiovascular diagnosis*, vol. 34(2), pp. 175-185, 1995.
- [25] H. Harb and C. Abou Jaoude, "Combining compression and clustering techniques to handle big data collected in sensor networks," In 2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference, pp. 1-6, 2018.
- [26] D. Loidolt, R. Ottensamer, A. Luntzer, F. Kerschbaum, H. Ottacher, J. Tonfat, M. Steller, S. Pezzuto, M. Focardi and R. Cosentino, "A combined software and hardware data compression approach in PLATO," In *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, vol. 11443, pp. 794-804, 2020.
- [27] M.R. Hasan, "Data compression using Huffman based LZW encoding technique," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 2(11), pp. 1-7, 2011.
- [28] B. Li, G. Ni, J. Luo and X. Zhang, "BWT-based Data Preprocessing for LZW," In 2011 International Conference on Multimedia and Signal Processing, vol. 1, pp. 37-40, 2011.
- [29] P.G. Howard and J.S. Vitter, "Arithmetic coding for data compression," *Proceedings of the IEEE*, vol. 82(6), pp. 857-865, 1994.
- [30] A. Shahbahrami, R. Bahrapour, M.S. Rostami and M. Ayoubi, "Evaluation of Huffman and Arithmetic Algorithms for Multimedia Compression Standards," *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications*, vol. 1(4), pp. 34-47, 2011.
- [31] R. Gupta, "Lossless compression technique for real-time photoplethysmographic measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64(4), pp. 975-983, 2014.
- [32] R. Klump, P. Agarwal, J.E. Tate and H. Khurana, "Lossless compression of synchronized phasor measurements," In IEEE PES general meeting, pp. 1-7, 2010.
- [33] F. Marcelloni and M. Vecchio, "An efficient lossless compression algorithm for tiny nodes of monitoring wireless sensor networks," *The computer journal*, vol. 52(8), pp. 969-987, 2009.
- [34] Y. Li and Y. Liang, "Temporal lossless and lossy compression in wireless sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 12(4), pp. 1-35, 2016.
- [35] M. Isenburg, "LASzip: lossless compression of LiDAR data," *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 79(2), pp. 209-217, 2013.
- [36] Z. Li, X. Yuan and K.W. Lam, "Effects of JPEG compression on the accuracy of photogrammetric point determination," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 68(8), pp. 847-853, 2002.
- [37] F. Yasar, B. Apaydin and H.H. Yilmaz, "The effects of image compression on quantitative measurements of digital panoramic radiographs," *Medicina oral, patologia oral y cirugia bucal*, vol. 17(6), paper e1074, 2012.
- [38] A. Fidler, B. Likar, F. Perns and U. Skalerič, "Impact of JPEG lossy image compression on quantitative digital subtraction radiography," *Dentomaxillofacial Radiology*, vol. 31(2), pp. 106-112, 2002.
- [39] H. Hosseini-Nejad, A. Jannesari and A.M. Sodagar, "Data compression based on discrete cosine transform for implantable neural recording microsystems," In *IEEE International Conference on Circuits and Systems*, pp. 209-213, 2012.
- [40] Левенец А.В., Токарев Р.Е., Чье Е.У. Применение популярных алгоритмов компрессии изображений для сжатия измерительных данных // *Вестник ТОГУ*. 2012. № 4(27). С. 125-132.
- [41] T.H. Oh and R. Besar, "JPEG2000 and JPEG: image quality measures of compressed medical images," In 4th National Conference of Telecommunication Technology, pp. 31-35, 2003.
- [42] L. Zhai, T. Xinming, L. Lin, "Effects of JPEG2000 compression on remote sensing image quality," In 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, pp. 3297-3300, 2006.
- [43] A. Fidler, B. Likar, F. Pernus and U. Skaleric, "Comparative evaluation of JPEG and JPEG2000 compression in quantitative digital subtraction radiography," *Dentomaxillofacial Radiology*, vol. 31(6), pp. 379-384.
- [44] A.N. Akansu, W.A. Serdijn, I.W. Selesnick, "Emerging applications of wavelets: A review," *Physical Communication*, vol. 3(1), pp. 1-18, 2010.
- [45] T. Schoellhammer, B. Greenstein, E. Osterweil, M. Wimbrow and D. Estrin, "Lightweight temporal compression of microclimate datasets," In 29th annual IEEE international conference on local computer networks, pp. 1-9, 2004.
- [46] E.P. Capo-Chichi, H. Guyennet and J.M. Friedt, "K-RLE: a new data compression algorithm for wireless sensor network," In 2009 Third international conference on sensor technologies and applications, pp. 502-507, 2009.
- [47] L. Liu and T. Shimamura, "A noise compensation LPC method based on pitch synchronous analysis for speech," *Journal of Signal Processing*, vol. 17(6), pp. 283-292, 2013.
- [48] L. Wang, J. Belina, A. Vasinonta, M. Berner and S. Ramprasad, "Compression of ECG using a code excited linear prediction (CELP)," In *Proceedings of 16th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 2, pp. 1264-1265, 1994.
- [49] Парфенов В.И., Голованов Д.Ю. Эффективность обнаружения дискретных разреженных сигналов с использованием алгоритмов, основанных на принципах теории compressive sensing // *Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика*. 2017. № 4. С. 21-28.
- [50] M.A. Davenport, J.N. Laska, J.R. Treichler and R.G. Baraniuk, "The Pros and Cons of Compressive Sensing for Wideband Signal Acquisition: Noise Folding versus Dynamic Range," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60(9), pp. 4628-4642, 2012.
- [51] F. Cappello, S. Di, S. Li, X. Liang, A.M. Gok, D. Tao, C.H. Yoon, X.C. Wu, Y. Alexeev and F.T. Chong, "Use cases of lossy compression for floating-point data in scientific data sets," *The International Journal of High Performance Computing Applications*, vol. 33(6), pp. 1201-1220, 2019.
- [52] O. Kosheleva, "Towards Optimal Compression of Meteorological Data: A Case Study of Using Interval-Motivated Overestimators in Global Optimization," In *Models and Algorithms for Global Optimization* (ed. by A. Torn and J. Zilinskas), Springer, New York, p. 59-71, 2007.
- [53] O. Kosheleva, A. Aguirre, S.D. Cabrera and E. Vidal, "Assessment of KLT and Bit-Allocation Strategies in the Application of JPEG2000 to the Battlescale Forecast Meteorological Data," In *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 6, pp. 3589-3591, 2003.