

УДК 621.391

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-33-42

Для цитирования: Повышение срока активного использования бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов / А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 1. С. 33–42. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-33-42.

For citation: Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Gizatulin A. R. [Increasing the period of active use of on-board electronic equipment of spacecraft]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 1, P. 33–42. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-33-42.

Повышение срока активного использования бортовой электронной аппаратуры космических аппаратов

А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов, И. К. Мешков, А. Р. Гизатулин

Уфимский университет науки и технологий
Российская Федерация, 450076, г. Уфа, ул. З. Валиди, 32
E-mail: a_l_t@inbox.ru

Для электронной аппаратуры космических систем, и в первую очередь устройств памяти, актуальна задача защиты от воздействия ионизирующего космического излучения и других внешних факторов, искажающих хранимую и обрабатываемую информацию. В данной работе предложен голографический метод кодирования, позволяющий восстанавливать информацию при большом числе ошибок. Метод основан на записи в память вместо исходных данных цифровой голограммы виртуального цифрового объекта, соответствующего блоку данных. Использовано свойство делимости голограммы, позволяющее восстановить записанный блок данных по его фрагменту. Достижимый уровень помехоустойчивости определяется размером голограммы. Для 8-разрядного блока данных запись 256-разрядной голограммы обеспечивает восстановление информации при потере 75 % записанной голограммы. Разработанный декодер корректирует пакет зависимых (группирующихся) ошибок, искажающих все биты голограммы. Количество случайных независимых ошибок, которые корректирует декодер, может составлять до 40 % записанной информации. Система хранения информации, устойчивая к ионизирующему излучению, представляет собой массив памяти увеличенной емкости с учетом выбранного коэффициента избыточности, и контроллер памяти, осуществляющий голографическое кодирование при записи информации и декодирование с автоматическим исправлением ошибок при чтении информации. Алгоритм работы самого контроллера может быть реализован в виде программируемой логической интегральной схемы, либо хранится в постоянном запоминающем устройстве, не подверженном влиянию ионизирующего излучения.

Ключевые слова: голографическое кодирование, корректирующий код, исправление случайных и группирующихся ошибок.

Increasing the period of active use of on-board electronic equipment of spacecraft

A. L. Timofeev, A. Kh. Sultanov, I. K. Meshkov, A. R. Gizatulin

Ufa State Aviation Technical University
32, Z. Validi St., Ufa, 450076, Russian Federation
E-mail: a_l_t@inbox.ru

For electronic equipment of space systems, and primarily memory devices, the task of protection from the effects of ionizing cosmic radiation and other external factors that distort stored and processed information is relevant. This paper proposes a holographic coding method that allows you to restore

information in the event of a large number of errors. The method is based on recording into memory, instead of the original digital hologram data, a virtual digital object corresponding to a data block. The divisibility property of a hologram is used, which makes it possible to reconstruct a recorded data block from its fragment. The achieved level of noise immunity is determined by the size of the hologram. For an 8-bit data block, recording a 256-bit hologram provides information recovery if 75 % of the recorded hologram is lost. The developed decoder corrects a package of dependent (grouping) errors that distort all bits of the hologram. The number of random independent errors that the decoder corrects can be up to 40 % of the recorded information. The information storage system, resistant to ionizing radiation, is a memory array of increased capacity, taking into account the selected redundancy factor, and a memory controller that performs holographic encoding when recording information and decoding with automatic error correction when reading information. The operating algorithm of the controller itself can be implemented in the form of a programmable logic integrated circuit, or stored in a read-only memory device that is not affected by ionizing radiation.

Keywords: holographic coding, correction code, correction of random and clustered errors.

Введение

Для электронной аппаратуры космических систем, и в первую очередь устройств памяти, актуальна задача защиты от воздействия ионизирующего космического излучения и других внешних факторов, искажающих хранимую и обрабатываемую информацию [1]. Радиационные эффекты и космические частицы создают большое число накапливающихся в устройствах памяти ошибок. Использование известных методов помехоустойчивого кодирования информации дает эффект в течение ограниченного времени, пока число ошибок не становится слишком большим. В ответственных системах используется ЕСС-память – (англ. error-correcting code memory, память с коррекцией ошибок) – тип компьютерной памяти, которая автоматически распознаёт и исправляет спонтанно возникшие изменения (ошибки) битов памяти – одну ошибку в одном машинном слове. При длине машинного слова 64 бита количество исправляемых ошибок < 1,5 %.

Для повышения надежности хранения информации представляет интерес форма записи данных, обеспечивающая восстановление блока информации по его фрагменту – голографический метод записи, использующий свойство делимости голограммы (возможность восстановления полного изображения объекта по фрагменту голограммы) [2].

Голографический метод восстановления информации

Идея использования голографических принципов кодирования была сформулирована в работах [3; 4], но полное цифровое моделирование голограммы требовало больших вычислительных ресурсов, поэтому в них рассматривалось псевдоголографическое кодирование. В соответствии с предложенным методом элементы цифрового двумерного массива равномерно перемешиваются определенным образом, в результате чего по любой части переупорядоченного массива можно реконструировать уменьшенную копию исходного массива. Исследование псевдоголографических методов продолжено в [5–8]. Описанные методы имеют область применения, ограниченную задачами кодирования массивов информации с большой внутренней избыточностью, и являются аналогом метода перемежения (interleaving) [9], используемого в системах связи для борьбы с пакетами ошибок.

Использовать полное голографическое кодирование для исправления ошибок предложено в [10]. Рассмотренный метод основан на моделировании голограммы как интерференционной картины плоского изображения, образованного матричным представлением исходного цифрового блока данных. Операции кодирования и декодирования в этом случае требуют достаточно больших вычислительных ресурсов. Однако сложность вычислений можно значительно сократить, если учесть, что для цифровой голограммы определяющее значение имеет количество точек, а не их взаимное расположение. В [11] показано, что эффективность кодирования сохраня-

ется при переходе от матричной голограммы к линейной с тем же числом точек. Поэтому рационально использовать одномерные массивы данных и одномерные голограммы.

Голографический метод помехоустойчивого кодирования, исправляющий многократные ошибки, заключается в математическом моделировании цифровой голограммы виртуального объекта, представляющего собой блок входных данных. В процессе кодирования k -разрядный двоичный код входного блока данных преобразуется во вторичный блок – единичный позиционный код с числом позиций $n = 2^k$. При этом закладывается информационная избыточность с числом разрядов $r = n - k$. Вторичный блок имеет $(n-1)$ нулей и одну единицу в позиции, заданной исходными данными. Таким образом, входной блок данных используется как адрес позиции единицы в последовательности нулей единичного позиционного кода вторичного блока. Голографическое кодирование заключается в формировании линейной голограммы вторичного блока, рассматриваемого как виртуальный оптический объект. Процедура формирования голограммы и восстановления исходного объекта по голограмме описана в [11; 12]. Использовать голографический способ преобразования информации для повышения устойчивости к ионизирующему излучению систем обработки и хранения информации предложено в [13; 14]. Рассмотрим возможность и эффективность применения голографического метода помехоустойчивого кодирования в устройствах памяти, подверженных воздействию внешних факторов, приводящих к появлению случайных и детерминированных (пакетных) ошибок.

Результаты моделирования

Исследование корректирующей способности голографического кода проведено путем моделирования в среде MATLAB процесса искажения голограммы H_O случайными и пакетными ошибками.

На рис. 1 показан вид линейной голограммы 8-разрядного входного блока данных со значением $X = 99$. При этом размер записываемой в память голограммы – 256 бит, коэффициент избыточности 32.

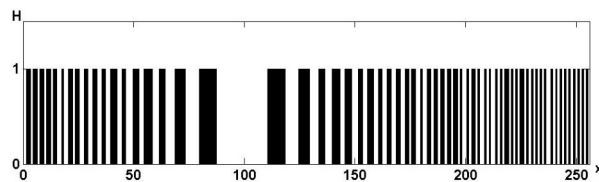


Рис. 1. Голограмма H_O для $X=99$

Fig. 1. Hologram H_O for $X=99$

На рис. 2 приведен результат декодирования A_R , в котором позиция максимума $Y = 99$ несет информацию о закодированном значении. В полученном массиве присутствует небольшой шум декодирования, обусловленный конечным числом дискретных значений голограммы, и не препятствующий выделению информационного значения.

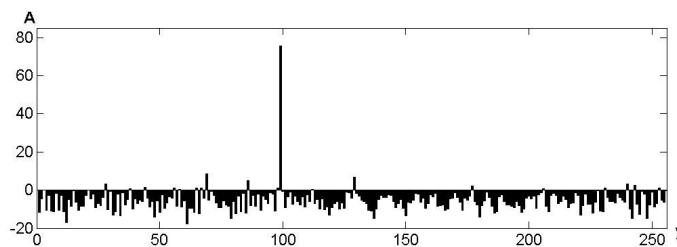


Рис. 2. Восстановленный массив A_R при $n = 256$, $Y = 99$

Fig. 2. Restored A_R array at $n = 256$, $Y = 99$

Рассмотрим устойчивость кода к стираниям, случайным и пакетным ошибкам.

Вид голограммы на входе декодера при стирании (потере) 75 % голограммы размером $n = 256$ приведен на рис. 3.

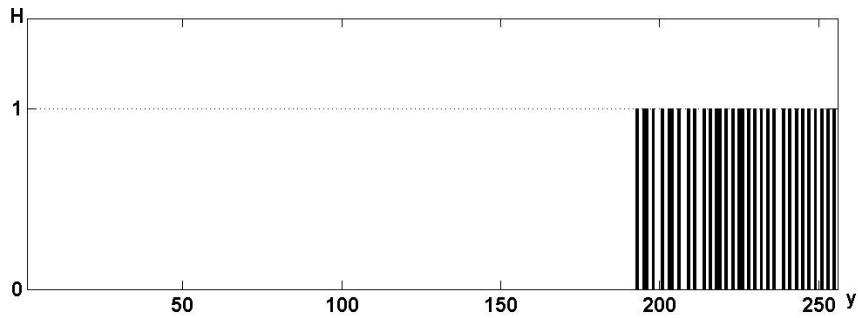


Рис. 3. Голограмма H_R для $X=99$. Потери 75 %

Fig. 3. Hologram H_R for $X=99$. Losses 75 %

Результат восстановления блока данных по оставшимся 25 % приведен на рис. 4. Точка максимума в позиции $Y = 99$ соответствует переданному значению $X = 99$ и однозначно определяет значение кодируемого блока.

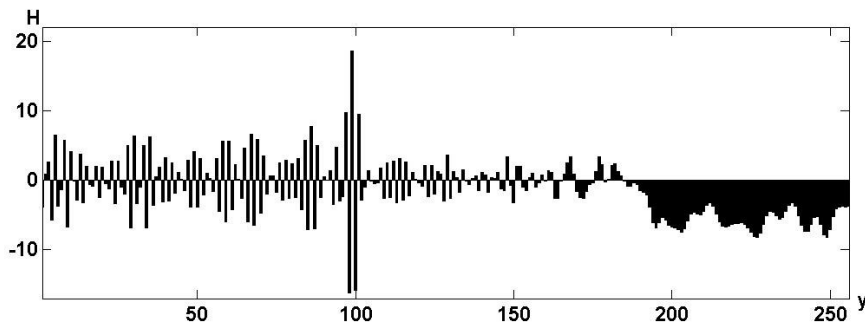


Рис. 4. Восстановленный массив A_R при потерях 75 %, $n = 256$, $Y = 99 = X$

Fig. 4. Restored A_R array with 75 % loss, $n = 256$, $Y = 99 = X$

Голографическое кодирование обеспечивает устойчивость не только к потерям информации, но и к случайным ошибкам. Возникновение ошибок смоделировано путем замены части голограммы двоичной случайной последовательностью (шумом). Массив, восстановленный по голограмме размером $n = 256$, содержащей 75 % шума, приведен на рис. 5.

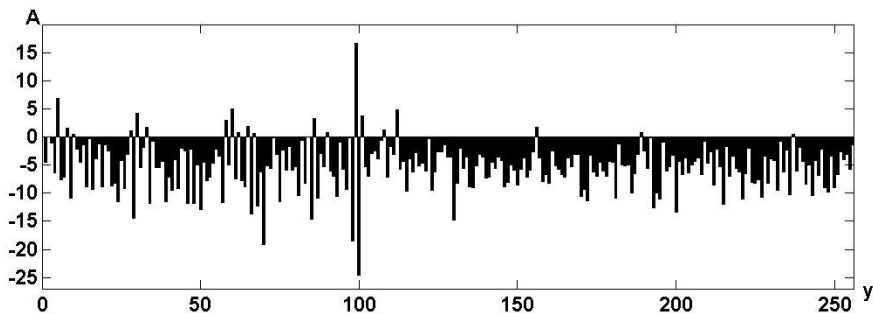


Рис. 5. Восстановленный массив A_R при длине шумовой последовательности 75 %, $n = 256$, $Y = 99 = X$

Fig. 5. Restored A_R array with noise sequence length 75 %, $n = 256$, $Y = 99 = X$

Увеличение размера голограммы приводит к возрастанию помехоустойчивости. При $n = 2^{14} = 16384$ успешное восстановление информации происходит при длине шумовой последовательности до 95 % от размера голограммы.

При замене части голограммы двоичным шумом число возникающих ошибок меньше числа шумовых позиций, так как около половины шумовых позиций совпадут с информационными битами и не создадут ошибок. Поэтому максимальное возможное число независимых случайных ошибок в достаточно большой голограмме составляет 50 % от количества бит в голограмме. Если число ошибок больше 50 %, ошибки являются зависимыми, а 100 % ошибок соответствует полностью детерминированному случаю – побитной инверсии голограммы.

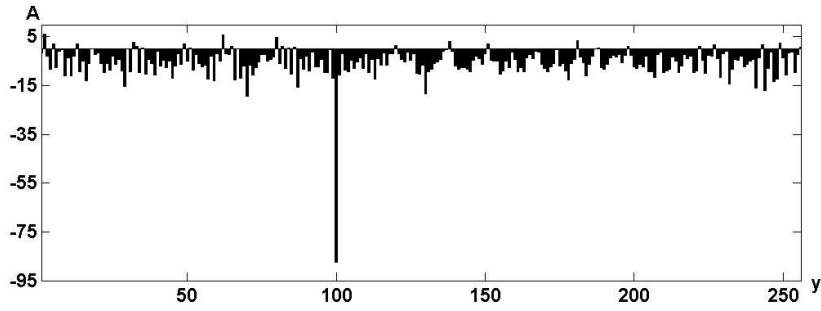
Наиболее сложная для декодирования ситуация – число случайных ошибок, приближающееся к 50 %. Корректирующая способность голографического кода зависит от размера голограммы n . Статистика результатов моделирования показывает, что при $n = 256$ вероятность ошибки декодирования составляет 10^{-3} при количестве ошибок на входе декодера 30 %. При числе ошибок 25 % и количестве испытаний 10 000 ошибки декодирования не зафиксированы. При $n = 1024$ вероятность ошибки декодирования 10^{-3} достигается при 41 % ошибок в голограмме.

Рассмотренные примеры восстановления информации характерны для случаев с независимыми случайными ошибками. В то же время для большинства двоичных информационных систем характерно наличие корреляции между ошибками и объединение их в пакеты [15]. Пакетные ошибки возникают при интенсивном воздействии ионизирующего излучения, при записи информации на носителях данных, а также в каналах связи [16].

Для коррекции ошибок, возникающих при хранении информации широко используются помехоустойчивые коды. Одним из самых эффективных является код Рида-Соломона (РС-код), широко применяемый в системах восстановления данных с компакт-дисков, при создании архивов с информацией для восстановления в случае повреждений, в помехоустойчивом кодировании [17]. Предел корректирующей способности РС-кода определен границей Синглтона [18], в соответствии с которой для исправления ошибок код должен иметь не менее двух проверочных символов на одну ошибку. При большой степени избыточности число исправляемых ошибок приближается к 50 % от длины кодового слова. Особенностью РС-кода является то, что столь высокую исправляющую способность он демонстрирует только для пакетных ошибок [15], уступая, например, коду Рида-Маллера (РМ-код) в исправлении независимых случайных ошибок. РМ-код с длиной кодового слова $n = 2^m$ исправляет $2^{m-2}-1$ ошибок любого вида [18], занимающих почти 25 % кодовой комбинации.

Базовый декодер голографического кода, так же как и РС-код, устраняет ошибки, занимающие не более 50 % кодового слова. Однако в силу специфики голографического метода представления информации возможно построить универсальный декодер, исправляющий любое количество группирующихся пакетных ошибок вплоть до 100 % размера голограммы, то есть, когда искажены все символы.

Сама по себе задача исправления 100% ошибок является тривиальной – для этого достаточно инвертировать каждый разряд кодового слова. Однако здесь для всех кодов, кроме голографического, возникает проблема выбора одного из двух равновероятных результатов декодирования – прямого или инвертированного. Голографический же код дает совпадающий результат декодирования, как для неискаженного кодового слова, так и для кодового слова, содержащего 100 % ошибок. На рис. 6 приведен результат декодирования инвертированного блока, содержащего 100 % ошибок. Отсюда видно, что пакетные ошибки приводят к инверсии максимума в восстановленном массиве, но позиция его сохраняется, поэтому восстановление информации происходит правильно.

Рис. 6. Восстановленный массив A_R ($Y = 100$), число ошибок – 256 (100 %)Fig. 6. Restored A_R array ($Y = 100$), number of errors – 256 (100 %)

Сложнее происходит восстановление при количестве пакетных ошибок около 50 %. Для решения этой задачи декодируемый блок данных разбивается на две равные части и каждая часть декодируется в прямом и инвертированном виде. Каждый из четырех вариантов декодирования формирует полный выходной массив, при этом все реализации имеют разные уровни шума (рис. 7). Совместный анализ этих массивов позволяет определить значение декодируемого блока данных.

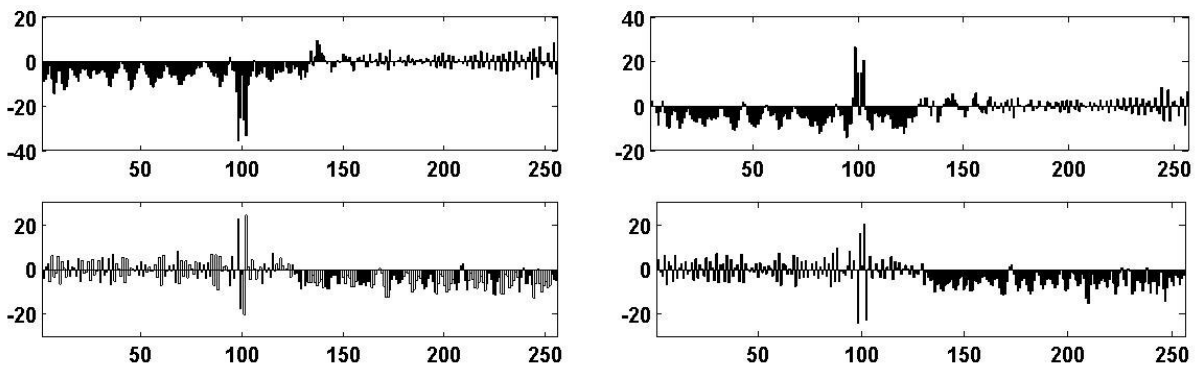
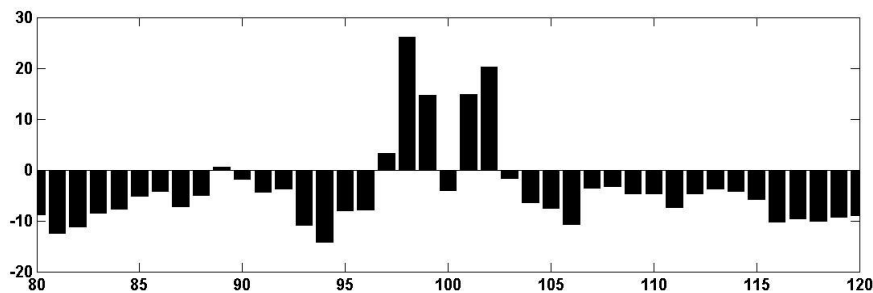


Рис. 7. Результаты работы четырех декодеров

Fig. 7. Results of four decoders

На рис. 8 показан фрагмент одного из четырех массивов при декодировании голограммы, содержащей 128 ошибок при $n = 256$ (50 % ошибок), кодируемое значение $Y = 100$. Из него видно, что, несмотря на отсутствие экстремума в точке $Y = 100$, значение входного блока можно восстановить по характерной комбинации симметрично расположенных четырех боковых максимумов.

Рис. 8. Фрагмент гистограммы восстановленного массива A_R ($Y = 100$)Fig. 8. Fragment of the histogram of the reconstructed A_R array ($Y = 100$)

Моделирование показало, что универсальный декодер, содержащий 4 декодера и блок выделения максимума, исправляет любое количество пакетных ошибок – от 0 до 100 % записанного блока данных. Этот декодер эффективен при устранении случайных и пакетных ошибок. При числе ошибок менее 50 % они являются случайными и декодер обеспечивает восстановление информации при 41 % ошибок в кодовом слове. При числе ошибок более 50 % они являются зависимыми и формируют правую часть графика (рис. 9).

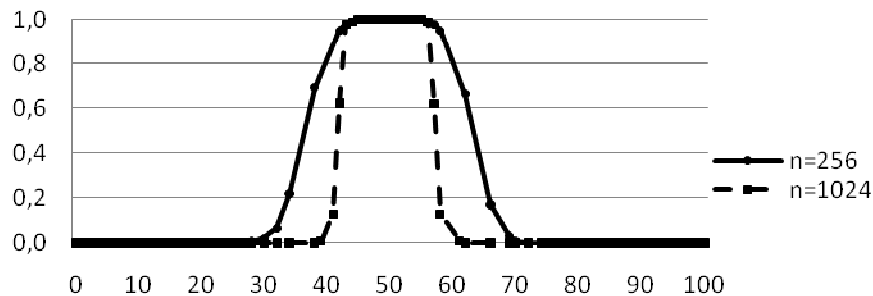


Рис. 9. Вероятность ошибки на выходе декодера в зависимости от числа ошибок на входе декодера для голограмм размером $n = 256$ и $n = 1024$

Fig. 9. Probability of error at the decoder output depending on the number of errors at the decoder input for holograms of size $n = 256$ and $n = 1024$

Таким образом, голографическое кодирование исправляет ошибки, если их количество составляет менее 40 или более 60 процентов от длины кодового слова при $n = 1024$ (рис. 9). Это позволяет повысить надежность восстановления данных в системах хранения информации, подверженных воздействию ионизирующего излучения, температуры и других факторов, вызывающих деградацию параметров элементной базы.

Заключение

Система хранения информации, устойчивая к ионизирующему излучению, представляет собой массив памяти увеличенной емкости с учетом выбранного коэффициента избыточности, и контроллер памяти, осуществляющий голографическое кодирование при записи информации и декодирование с автоматическим исправлением ошибок при чтении информации. Алгоритм работы самого контроллера может быть реализован в виде программируемой логической интегральной схемы, либо хранится в постоянном запоминающем устройстве, не подверженном влиянию ионизирующего излучения.

Использование возможно в компьютере любой архитектуры. Для этого необходимо модифицировать контроллер памяти, установив в нем модуль кодирования/ декодирования.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 24-29-0008, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

Acknowledgements. The study was supported by the grant of Russian Science Foundation № 24-29-00080, <https://rscf.ru/project/24-29-00080/>.

Библиографические ссылки

1. Максимов И. А., Кочура С. Г., Авдюшкин С. А. Основные положения методологии обеспечения стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов к воздействию радиационных эффектов космического пространства // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 116–125. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-116-125.
2. Collier R. J., Burckhardt C. B., Lin L. H. Optical Holography. Murray Hill, New Jersey. 1971.
3. Bruckstein A.M., Holt R.J., Netravali A.N. Holographic image representations: the subsampling method // IEEE Int. Conference on Image Processing. Santa Barbara. California, USA. 1997. Vol. 1. P. 177–180.
4. Bruckstein A. M., Holt R. J. Netravali A. N. Holographic representation of images // IEEE Transactions on Image Processing. 1998. No. 7. P. 1583–1587.
5. Bruckstein A. M., Holt R. J., Netravali A. N. On Holographic Transform Compression of Images // Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition ICPR-2000. John Wiley & Sons Inc. 2001. P. 244–252. Doi: 10.1109/ICPR.2000.903528.
6. Dovgard R. Holographic image representation with reduced aliasing and noise effects // Image Processing. IEEE Transactions. 2004. No. 13(7). P. 867–872.
7. Колесов В. В., Залогин Н. Н., Воронцов Г. М. Метод псевдоголографического кодирования // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 2, № 5. С. 583–588.
8. Барина Д. А. Разработка и исследование алгоритмов обработки цифровых изображений, представленных в псевдоголографических кодах // Компьютерная оптика. 2005. Т. 27. С. 149–154.
9. Clark G. C. Jr., Cain J. B. Error-Correction Coding for Digital Communications // Plenum Press. New York. Second printing, 1982.
10. Тимофеев А. Л. Использование голографического кодирования для повышения помехоустойчивости каналов связи // ИТпортал. 2018. Т. 18, № 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://itportal.ru/science/tech/ispolzovanie-golograficheskogo-kodi> (дата обращения: 02.01.2024).
11. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Holographic method of error-correcting coding // Optical Technologies for Telecommunications. 2018. Proceedings Vol. 11146, 111461A. 2019. Doi: 10.1117/12.2526922.
12. Тимофеев А. Л., Султанов А. Х. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 6. С. 978–984. Doi: 10.18287/2412-6179-CO-739.
13. Тимофеев А. Л., Султанов А. Х. Применение помехоустойчивых позиционных делимых кодов // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций-2020 : сб. тр. XXII Междунар. науч.техн. конф. Самара: ПГУТИ, 2020. С. 12–15.
14. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Filatov P. E. Holographic method for storage of digital information // Proc. SPIE 11516, Optical Technologies for Telecommunications. 2019. Vol. 1151604. N. Y.: SPIE, 2020. Doi: 10.1117/12.2566329.
15. Gallager R. Information Theory and Reliable Communication. New York: Wiley, 1968.
16. Anderson J. B., Mohan S. Source And Channel Coding An Algorithmic Approach // Springer Science+Business Media. New York. 1991.
17. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. Second Edition // Prentice Hall P T R Upper Saddle River. New Jersey. 2001.
18. Mac Williams F. J., Sloane N. J. A. The Theory of Error-Correction Codes // Bell Laboratories. Murray Hill. NJ 07974. U.S.A. 1977.

References

1. Maximov I. A., Kochura S. G., Avdyushkin S. A. [The main provisions of the methodology for ensuring the resistance of the onboard equipment of spacecraft to the effects of the radiation effects of outer space]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 116–125. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-116-125 (In Russ.).
2. Collier R. J., Burckhardt C. B., Lin L. H. Optical Holography. Murray Hill, New Jersey, 1971.
3. Bruckstein A. M., Holt R. J., Netravali A. N. Holographic image representations: the subsampling method. *IEEE Int. Conference on Image Processing*. Santa Barbara. California, USA. 1997, Vol. 1, P. 177–180.
4. Bruckstein A. M., Holt R. J., Netravali A. N. Holographic representation of images. *IEEE Transactions on Image Processing*. 1998, No. 7, P. 1583–1587.
5. Bruckstein A. M., Holt R. J., Netravali A. N. On Holographic Transform Compression of Images // Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition ICPR-2000. *John Wiley & Sons Inc*. 2001, P. 244–252. Doi: 10.1109/ICPR.2000.903528.
6. Dovgard R. Holographic image representation with reduced aliasing and noise effects. *Image Processing. IEEE Transactions*. 2004, No. 13(7), P. 867–872.
7. Kolesov V. V., Zalogin N. N., Vorontsov G. M. [Pseudo-holographic coding of digital information]. *Radiotekhnika i elektronika*. 2002, Vol. 2, No. 5, P. 583–588 (In Russ.).
8. Barinova D. A. [Development and algorithm for studying the processing of digital images presented in pseudo-holographic codes]. *Komp'yuternaya optika*. 2005, No. 27, P. 149–154 (In Russ.).
9. Clark G. C. Jr., Cain J. B. Error-Correction Coding for Digital Communications. *Plenum Press*. New York. Second printing, 1982.
10. Timofeev A. L. [The use of holographic coding to increase noise immunity of communication channels]. *ITportal*. 2018, No. 2 (18). (In Russ). Available at: <http://itportal.ru/science/tech/ispolzovanie-golograficheskogo-kodi> (accessed 02.01.2024).
11. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. Holographic method of error-correcting coding. *Optical Technologies for Telecommunications*. 2018, Proceedings Vol. 11146, 111461A, 2019. Doi: 10.1117/12.2526922.
12. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. [Building a noise-tolerant code based on a holographic representation of arbitrary digital information]. *Komp'yuternaya optika*. 2020, Vol. 44(6), P. 978–984 (In Russ). Doi: 10.18287/2412-6179-CO-739.
13. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh. [Application of noise-resistant positional divisible codes]. *Problemy tekhniki i tekhnologii telekommunikatsiy-2020 : sb. tr. XXII Mezhdunar. nauch.tekhn. konf.* [Proceedings of the XXII International Scientific and Technical Conference Problems of Engineering and Technologies of Telecommunications-2020]. Samara, 2020, P. 12–15 (In Russ.).
14. Timofeev A. L., Sultanov A. Kh., Filatov P. E. Holographic method for storage of digital information. *Proc. SPIE 11516, Optical Technologies for Telecommunications*. 2019, Vol. 1151604. N.Y.: SPIE, 2020. Doi: 10.1117/12.2566329.
15. Gallagher R. Information Theory and Reliable Communication. New York: Wiley. 1968.
16. Anderson J. B., Mohan S. Source And Channel Coding An Algorithmic Approach. Springer Science+Business Media. New York. 1991.
17. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. Second Edition. Prentice Hall P T R Upper Saddle River. New Jersey. 2001.
18. Mac Williams F. J., Sloane N. J. A. The Theory of Error-Correction Codes. Bell Laboratories. Murray Hill. NJ 07974. U.S.A. 1977.

Тимофеев Александр Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Уфимский университет науки и технологий. E-mail: a_l_t@inbox.ru .

Султанов Альберт Ханович – доктор технических наук, профессор, Уфимский университет науки и технологий. E-mail: tks@ugatu.ac.ru.

Мешков Иван Константинович – кандидат технических наук, доцент, Уфимский университет науки и технологий. E-mail: mik.ivan@bk.ru.

Гизатулин Азат Ринатович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий. E-mail: azat_poincare@mail.ru.

Timofeev Aleksandr Leonidovich – Cand. Sc., Docent, Ufa University of Science and Technology. E-mail: a_l_t@inbox.ru .

Sultanov Albert Khanovich – Dr. Sc., Professor, Ufa University of Science and Technology. E-mail: tks@ugatu.ac.ru.

Meshkov Ivan Konstantinovich – Cand. Sc., Docent, Ufa University of Science and Technology. E-mail: mik.ivan@bk.ru.

Gizatulin Azat Rinatovich – Cand. Sc., Junior researcher, Ufa University of Science and Technology. E-mail: azat_poincare@mail.ru.
