

# Анализ эффективности алгоритмов сжатия данных в каналах информационного обмена БАС в гибридных орбитально-наземных сетях связи

М. А. Зуйков, А. А. Березкин, Р. В. Вивчарь, А. В. Пачин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

maximz2004@yandex.ru, berezkin.aa@sut.ru, vivchar.rm@sut.ru, pachin.av@sut.ru

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты анализа эффективности функционирования алгоритмов сжатия данных в каналах информационного обмена (КИО) беспилотных авиационных систем (БАС) в гибридных орбитально-наземных сетях связи. Были рассмотрены следующие алгоритмы: алгоритм Deflate; алгоритм LZMA; алгоритм Zstandard и алгоритм Хаффмана. Представлен инструментарий для проведения исследований, а также рекомендации по использованию полученных результатов.

**Ключевые слова:** беспилотные авиационные системы (БАС); алгоритмы сжатия; каналы информационного обмена

## I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается стремительный рост спроса на различные беспилотные авиационные системы (далее – БАС), который обусловлен несколькими факторами, включая прогресс технологий, возрастающую потребность в автоматизации и потребность в эффективных и экономичных решениях в различных отраслях промышленности.

Выполнение БАС своих целевых задач зависит от эффективности функционирования каналов информационного обмена (КИО) для управления этими комплексами. Основу КИО составляют каналы связи, которые обеспечивают прием команд, передачу информации и взаимодействие с оператором в реальном масштабе времени.

Однако, как показывает анализ функционирования КИО для управления БАС, каналы связи часто подвержены различным задержкам, таким как перегрузка сети, помехи и ограничения в расстоянии.

Одной из основных проблем, связанных с задержкой при управлении БАС, является потеря точности и надежности его движений. Задержка может привести к неправильным командам управления, что в свою очередь может привести к авариям или неудовлетворительным результатам выполнения задачи [1].

Для обеспечения эффективной работы БАС крайне важно минимизировать сетевые задержки в каналах связи.

Одним из подходов уменьшения задержки при управлении БАС от первого лица является сжатие данных. Уменьшая размер данных видеопотока,

передаваемого по сети от БАС к оператору, сжатие данных может помочь сократить время передачи и, следовательно, снизить задержку в системе управления в целом [2]. Становится актуальной задача обоснования облика КИО для управления БАС, которые в том числе обеспечивали бы возможность сжатия передаваемого видеопотока с целью уменьшения задержки [3].

Одним из элементов КИО являются алгоритмы сжатия без потерь, которые являются одним из элементов нейросетевых кодеров [4] и декодеров [5], обеспечивающих сжатие FPV (*first person view*, управление от первого лица) видеопотока в низкоскоростных каналах передачи данных от БАС к оператору.

Следовательно, решение задачи обоснования облика КИО заключается в выборе из множества существующих алгоритмов сжатия без потерь такого, который бы обеспечивал минимум величины задержки при требуемом качестве передаваемого изображения [3].

## II. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ БЕЗ ПОТЕРЬ

Среди наиболее распространенных алгоритмов сжатия без потерь выделяют следующие:

- алгоритм *DEFLATE*. Данный алгоритм сжатия без потерь представляет собой комбинацию алгоритмов LZ77 и Хаффмана. Используется в формате *ZIP*, а также в компрессоре/декомпрессоре *gzip* и в *PNG*-изображениях;
- алгоритм *LZMA (Lempel-Ziv-Markov chain-Algorithm)*. Алгоритм используется в архиваторе *7-ZIP* и основан на схеме сжатия данных со словарем, что обеспечивает высокий коэффициент сжатия, а также позволяет использовать словари различного размера (до 4 Гб);
- алгоритм *Zstandard*. Алгоритм сочетает словарный алгоритм сжатия и эффективное кодирование типа *ANS (Finite State Entropy, FSE)*;
- алгоритм Хаффмана. Данный алгоритм представляет собой жадный алгоритм оптимального префиксного кодирования алфавита с минимальной избыточностью.

В качестве критерия эффективности функционирования алгоритмов сжатия был использован объем

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9 в ЕГИСУ НИОКТР.

сжатого изображения  $V$ , так как именно его значение в итоге определяет величину задержки передачи пакета по сети. Для исследования алгоритмов сжатия без потерь была получена выборка объемов изображений, сжатых при помощи указанных алгоритмов. Пример графической интерпретации одной из таких выборок, полученной с помощью алгоритма *DEFLATE*, представлен на рис. 1.

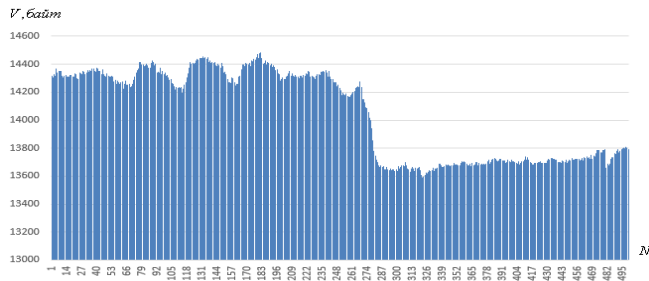


Рис. 1. Графическая интерпретация выборки объемов изображений, сжатых при помощи алгоритма DEFLATE

Далее на основе полученных выборок были определены законы распределения объема сжатого изображения.

Для нахождения представленных плотностей вероятности был использован один из способов непараметрической оценки плотности вероятности – ядерное оценивание плотности вероятности Парзена–Розенблатта [6].

Сущность этого метода заключается в следующем:

Пусть дана выборка данных (рис. 1), представляющая собой множество значений случайной величины – объема сжатого изображения  $V$ , полученная путем измерения объема 500 сжатых изображений с помощью алгоритма сжатия.

$$\{V_1, \dots, V_k, \dots, V_K\}, \quad k = \overline{1, 500}.$$

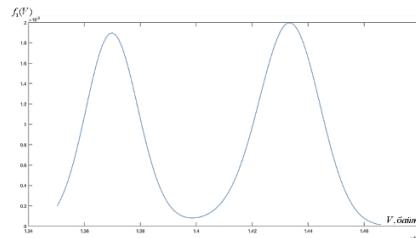
Далее для нахождения плотности вероятности  $V$  необходимо воспользоваться выражением:

$$f(V) = \frac{1}{500} \prod_{k=1}^{500} \frac{1}{h} Y\left(\frac{V - V_k}{h}\right),$$

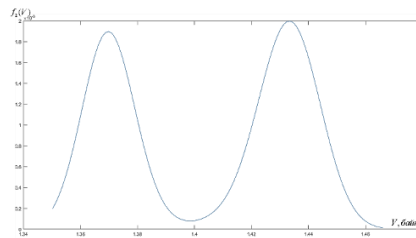
где  $V_k$  – реализация случайной величины в  $k$ -ом опыте,  $h$  – ширина пропускания случайной величины,  $Y(\bullet)$  – ядерная функция (1).

На практике наибольшее распространение нашли такие ядерные функции как равномерная, треугольная, Епанечникова, Гауссова, трикубическая.

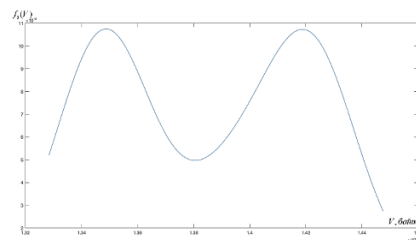
Для получения плотностей вероятности (рис. 2) была использована Гауссова ядерная функция, заданная выражением (1).



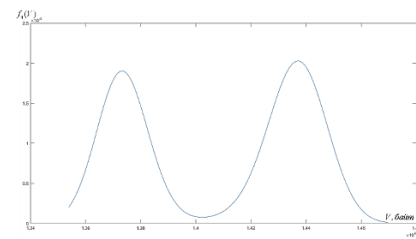
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Плотности вероятности объема сжатого изображения, полученные при использовании алгоритмов DEFLATE (а), Хаффмана (б), LZMA (в), Zstandard (г)

$$Y\left(\frac{V - V_k}{h}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{V - V_k}{h}\right)^2}. \quad (1)$$

Важным моментом при использовании ядерной оценки плотности вероятности является выбор параметра  $h$ , так как неправильный выбор этого параметра может повлиять на адекватность оценки плотности вероятности. При использовании Гауссовой ядерной функции значение ширины пропускания вычисляется по правилу Сильвермана:

$$h = 0.9AK^{-0.2},$$

где  $A$  – величина, вычисляемая по определенному алгоритму.

Из полученных графиков плотностей вероятности  $V$  видно, что законы распределения объема сжатого изображения, полученные с помощью представленных алгоритмов сжатия, относятся к классу бимодальных распределений, особенностью которых является наличие двух мод, которые отображаются в виде отдельных пиков (локальных максимумов) в функции плотности вероятности. Для случая использования алгоритма *DEFLATE* эти моды ( $M_1, M_2$ ) находятся при значениях объемов равных  $V^{M_1} = 1.375 \times 10^4$  и  $V^{M_2} = 1.438 \times 10^4$  (рис. 3).

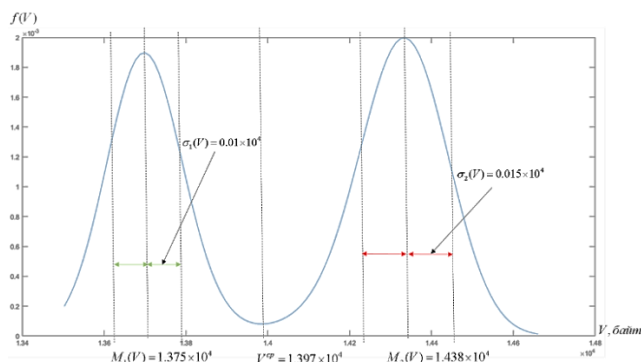


Рис. 3. Плотность вероятности объема сжатого изображения, полученного с помощью алгоритма сжатия DEFLATE

Анализ графика (рис. 3) показывает, что закон распределения объема сжатого изображения представляет собой смесь двух нормальных распределений с параметрами  $M_1=1.375 \times 10^4$ ,  $\sigma_1=0.01 \times 10^4$  и  $M_2=1.438 \times 10^4$ ,  $\sigma_2=0.015 \times 10^4$ , соответственно.

Исходя из этого, при анализе эффективности работы алгоритмов сжатия становится нецелесообразным использование в качестве критерия среднего значения и дисперсии объема сжатого изображения, потому что они не отражают реальную картину. По факту количество случаев реализации среднего значения  $V^{cp}=1.397 \times 10^4$  значительно уступает количеству случаев, когда объем сжатого изображения принимал значения  $V^{M_1} = 1.375 \times 10^4$  и  $V^{M_2} = 1.438 \times 10^4$ .

Анализ выборок и законов распределения  $V$  (рис. 2) позволяет предположить, что причиной бимодальности закона распределения является то, что при последовательном прогоне определенного числа изображений (для данного случая примерно 250 штук) эффективность алгоритма сжатия изменяется скачкообразно в сторону уменьшения объема сжатого изображения (например, с  $V^{M_2} = 1.438 \times 10^4$  до  $V^{M_1} = 1.375 \times 10^4$  для случая использования *DEFLATE*), вследствие определенной «поднастройки» алгоритма, а наличие воздействия различных нежелательных факторов, обуславливает незначительный разброс значений объема сжатого изображения в окрестностях двух мод.

Исходя из вышесказанного наиболее целесообразно в качестве критерия эффективности алгоритмов сжатия использовать не среднее значение и дисперсию, а вероятность не превышения требуемого объема сжатого изображения, которая может быть получена путем интегрирования полученной плотности вероятности  $V$ :

$$P = \int_0^{V_{mp}} f(V) dV.$$

В табл. I представлены вероятности не превышения требуемого значения объема сжатого изображения, равного 14,5 кб, при использовании сравниваемых алгоритмов сжатия.

ТАБЛИЦА I.

Алгоритм сжатия	Вероятность, P
Алгоритм DEFLATE	0,91
Алгоритм Хаффмана	0,84
Алгоритм LZMA	0,99
Алгоритм Zstandard	0,83

Полученные значения вероятности позволяют сделать вывод, что наиболее эффективным алгоритмов сжатия без потерь является алгоритм *LZMA*.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье результаты исследований эффективности функционирования алгоритмов сжатия без потерь в системе сжатия *FPV* видеопотока позволили сделать следующие выводы:

- законы распределения объема сжатого изображения, полученные с помощью представленных алгоритмов сжатия, относятся к классу бимодальных распределений, поэтому в качестве критерия эффективности алгоритмов сжатия целесообразно использовать не среднее значение и дисперсию, а вероятность не превышения требуемого объема сжатого изображения;
- наиболее эффективным алгоритмом сжатия без потерь, с точки зрения значения вероятности не превышения требуемого объема сжатого изображения, является алгоритм *LZMA*.

Полученные результаты могут быть использованы при обосновании облика каналов информационного обмена для управления БАС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Артеменко М.Н., Корчагин П.А., Тетерина И.А. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. Опыт отечественных и зарубежных производителей // Вестник СибАДИ, №4. 2019. С. 416-430.
- [2] Балобанов А.В., Балобанов В.Г. «Метод сжатия цифрового видеосигнала в прикладном телевидении для управления и контроля БПЛА // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт, № 1, Т.13, 2019, С. 16-20.
- [3] Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Модель системы управления мобильными роботизированными комплексами различного назначения // Электросвязь, №6. 2023. С. 2-4.
- [4] Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Слепнев А.В., Киричек Р.В., Захаров А.А. Метод сжатия видеопотока при управлении беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи // Электросвязь, 2023. №10. С. 48-56.
- [5] Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В., Захаров А.А. Метод декомпрессии *FPV*-видеопотока от беспилотных систем на основе латентной диффузионной нейросетевой модели // Электросвязь, 2024. №1. С. 42-53.
- [6] Вивчарь Р.М. Методика многокритериального оценивания эффективности функционирования стохастических сложных технических систем / Р.М. Вивчарь, Б.В. Соколов, А.И. Птушкин // Авиакосмические приборостроение, 2022. № 7. С. 3.