

Разработка программы анализа данных для систем лазерной связи и беззапросных измерений дальности

Development of a data analysis program for laser communication systems and unsolicited range measurements

УДК 004

Получено: 17.07.2025

Одобрено: 20.08.2025

Опубликовано: 25.09.2025

Гуриков С.Р.

Канд. пед. наук, доцент кафедры «Информационные технологии и вычислительные системы»
ФГАОУ ВО «Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»,
г. Москва

e-mail: srgurikov@mail.ru

Gurikov S.R.

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Information
Technologies and Computing Systems, Moscow State Technological University "STANKIN",
Moscow

e-mail: srgurikov@mail.ru

Андреева Е.В.

Студентка, Ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО «Московский технический
университет связи и информатики», г. Москва

e-mail: catherine58@yandex.ru

Andreeva E.V.

Student, Order of the Red Banner of Labor Moscow Technical University of Communications
and Informatics, Moscow

e-mail: catherine58@yandex.ru

Аннотация

Объектом исследования является процесс обработки и анализа телеметрических данных, поступающих с космических аппаратов в составе систем лазерной связи и беззапросных измерений дальности. Данные регистрируются на борту спутника специализированной аппаратурой и передаются на наземный сегмент в виде бинарных логов, подлежащих последующей декодировке, проверке и визуализации. В контексте работы рассматриваются данные, формируемые и передаваемые системой ББКОС (бортовая беззапросная квантово-оптическая система), которая функционирует в составе комплекса БАУС (бортовая аппаратура угломерной системы). Совместно эти устройства обеспечивают фиксацию пространственно-временных характеристик квантово-оптических измерений дальности, которые в дальнейшем используются для навигации, синхронизации и оценки точности траекторных параметров космического аппарата.

Ключевые слова: телеметрические данные, формат .bbkos, квантово-оптическая система, массив измерений, спутниковая телеметрия.

Abstract

The study focuses on the processing and analysis of telemetry data received from spacecraft as part of laser communication systems and unsolicited range measurements. The data is recorded on board the satellite by specialized equipment and transmitted to the ground segment in the form of binary logs, which are subject to subsequent decoding, verification and visualization. In the context of the work, the data generated and transmitted by the BBKOS system (on-board query-free quantum optical system), which operates as part of the BAUS complex (on-board equipment of the angle measuring system), is considered. Together, these devices capture the space-time characteristics of quantum optical range measurements, which are later used for navigation, synchronization, and evaluation of the accuracy of spacecraft trajectory parameters.

Keywords: telemetry data, format .bbkos, quantum optical system, measurement array, satellite telemetry.

АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (НПК «СПП») является ведущей организацией в области разработки и производства прецизионных приборов и систем для различных отраслей промышленности. Основная сфера деятельности корпорации включает проектирование, изготовление и тестирование высокоточных измерительных приборов и электронных систем, применяемых в авиации, космонавтике, оборонной и медицинской промышленности.

Одним из направлений деятельности организации является разработка и сопровождение средств дистанционного сбора и последующего анализа телеметрических данных, поступающих с космических аппаратов. Телеметрической информацией называются сведения, поступающие с борта на наземный комплекс управления [4]. В рамках данной области применяются различные системы, включая бортовую беззапросную квантово-оптическую систему (ББКОС), предназначенную для регистрации и передачи результатов измерения дальности. ББКОС функционирует в составе бортовой аппаратуры угломерной системы (БАУС), которая обеспечивает пространственную привязку и временную синхронизацию получаемых данных. Информация, регистрируемая этими системами, объединяется в более крупные структурные единицы — массивы результатов измерений (МРИ), содержащие как служебные, так и измерительные данные. Следует отметить, что необработанные телеметрические данные, полученные со спутника, нельзя использовать напрямую. В отличие от других наборов данных, спутниковые телеметрические данные содержат шум, пропущенные значения, незначительные выбросы и т.д. Это связано с особенностями спутниковой телеметрии, такими как ограниченная видимость спутника для наземной станции, во время которой необходимо загружать данные [2].

В рассматриваемом случае файлы с результатами измерений поступают на землю в виде бинарных файлов с расширением .bbkos. Эти файлы представляют собой лог-файлы, содержащие последовательности телеметрических записей ББКОС, сгруппированных в пакеты БАУС, а затем в блоки МРИ. Однако из-за особенностей передачи данных через радиоканалы в такие файлы могут попадать лишние или искаженные строки, дубликаты и другие ошибки, что делает невозможным прямое использование полученной информации без предварительной обработки и проверки на целостность.

Таким образом, актуальность разработки была обусловлена необходимостью надежной и быстрой обработки большого объема спутниковых телеметрических данных, поступающих в необработанном виде и содержащих потенциально поврежденные или неинформативные участки. Была выдвинута гипотеза, заключающаяся в том, что повышение степени автоматизации вышеупомянутых процессов позволит сократить трудозатраты, исключить влияние человеческого фактора при анализе информации и обеспечить полноту и достоверность получаемых результатов.

Цель исследования: разработка полнофункционального программного инструмента, позволяющего автоматически обрабатывать файлы формата .bbkos, извлекать из них корректные блоки данных, проверять их целостность, выполнять полную расшифровку

результатов квантово-оптических измерений, что, в конечном итоге, обеспечит автоматизированную обработку телеметрических данных.

Перечислим основные задачи, которые было необходимо решить для достижения поставленной цели:

- 1) Выполнить реализацию алгоритмов фильтрации и группировки строк ББКОС в составные элементы (пакеты БАУС и блоки МРИ).
- 2) Осуществить проверку целостности данных с использованием алгоритма CRC-16 для строк и CRC-32 для блоков.
- 3) Разработать функции расшифровки заголовка блока МРИ в соответствии с документацией.
- 4) Обеспечить автоматическую генерацию отчета в формате программы Microsoft Excel, который содержал бы результаты анализа, графики целостности данных, а также итоговую статистику.

В процессе реализации программного обеспечения для автоматизированной обработки телеметрических данных [3] было проведено обоснование выбора инструментальных средств, обеспечивающих надежную работу с бинарными структурами, проверку целостности, расшифровку данных и формирование отчетной документации. Основным языком программирования выбран Python по следующим причинам:

- обладает наличием широкого спектра встроенных и сторонних библиотек для работы с бинарными файлами, массивами и структурами данных [1];
- содержит поддержку модульной архитектуры и высокоуровневой абстракции, упрощающей реализацию алгоритмов;
- присутствует наличие документации по использованию библиотек для инженерных и научных задач.

Для работы с табличными данными и подготовки отчетной документации в формате .xlsx были использованы специализированные библиотеки:

- pandas — для представления структурированных данных в виде датафреймов, выполнения агрегатных операций, статистического анализа, сортировки и экспорта таблиц;
- openpyxl — для программного создания и форматирования Excel-документов, включая стилизацию ячеек, построение графиков, автоматическую установку ширины колонок и работу с несколькими листами.

Для взаимодействия с пользователем при выборе входных и выходных файлов использовалась стандартная библиотека *tkinter*, что позволило реализовать удобный графический интерфейс без использования внешних зависимостей.

Реализация проверки контрольных сумм потребовала применения:

- библиотеки zlib — для вычисления контрольных сумм CRC-32, необходимых для валидации блоков МРИ;
- встроенного модуля struct — для преобразования байтовых последовательностей в числовые значения и обратно, при интерпретации полей заголовков и результатов измерений;
- стандартного модуля datetime — для обработки бортового времени и преобразования его в необходимый формат;
- модуля collections — для подсчета повторяющихся строк и формирования статистики по структуре входного файла.

Алгоритм CRC-16 для строк ББКОС был реализован в соответствии с технической спецификацией (алгоритм CRC-16-IBM с параметрами: Init = 0xFFFF, Poly = 0x8005, RefIn = True, RefOut = True, XorOut = 0x0000), что обеспечило полную совместимость с требованиями предприятия [5].

В качестве формата выходных документов была выбрана программа Microsoft Excel, обеспечивающая широкую совместимость с существующими средствами инженерного анализа.

Таким образом, выбор указанных инструментов и технологий был обусловлен необходимостью обеспечения надежной, точной и воспроизводимой обработки телеметрических данных с возможностью дальнейшего инженерного анализа результатов. Разработка программного средства осуществлялась в среде Windows 10 с использованием интегрированной среды разработки PyCharm, обладающей встроенными средствами управления проектами, анализа кода, отладки и контроля версий. Настройка рабочего окружения включала установку всех необходимых компонентов, организацию структуры проекта, настройку виртуального окружения, а также подготовку тестовых данных.

Перейдем к комментарию полученных результатов работы. Одной из ключевых задач разработки стало построение алгоритма извлечения данных из бинарного файла формата .bbkos (рис. 1, 2).

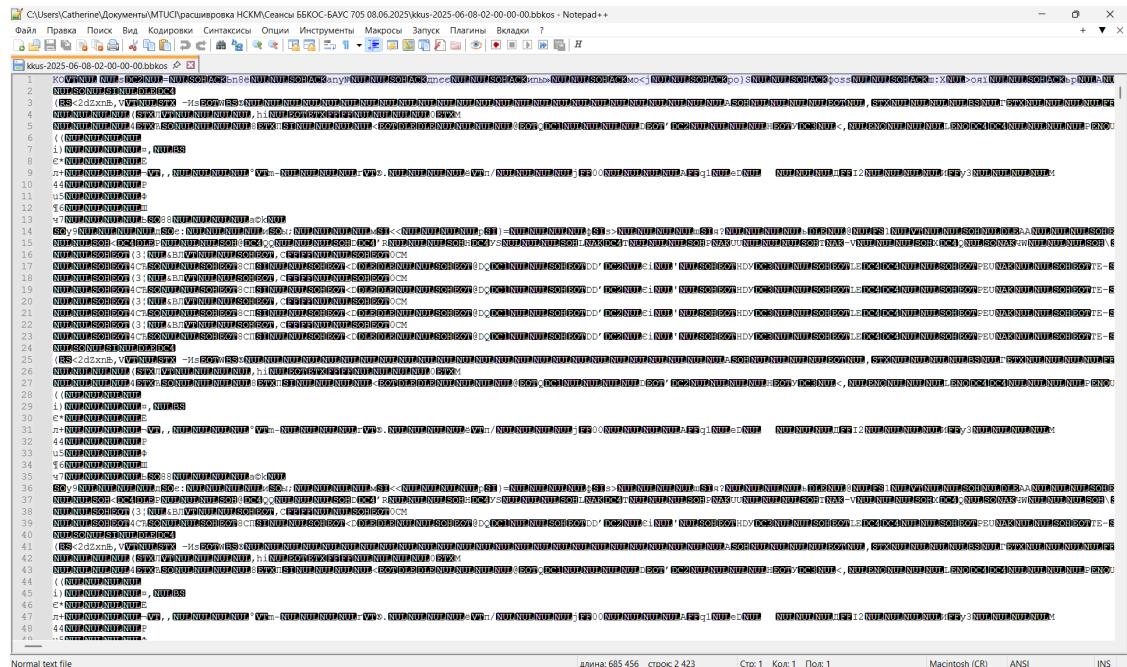


Рис. 1. Содержимое бинарного файла формата .bbkos

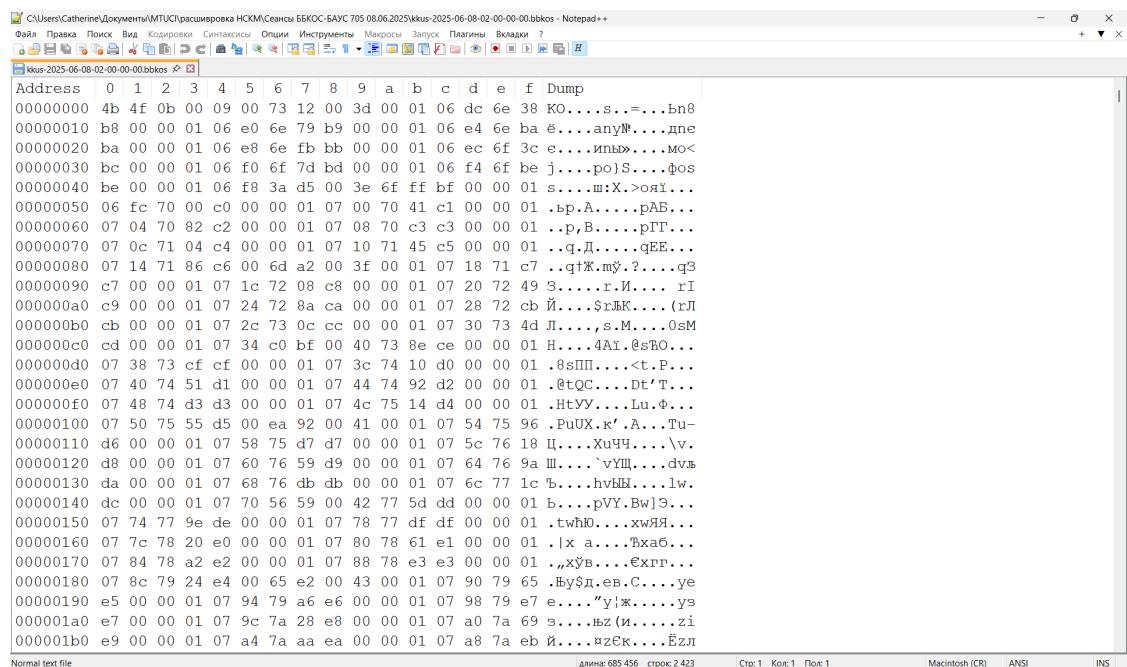


Рис. 2. Демонстрация содержимого файла в 16-ой ССЧ

Указанный формат представляет собой лог-файл, содержащий последовательности строк ББКОС, организованных в пакеты БАУС, а затем в блоки МРИ. В процессе извлечения данных обеспечивается фильтрация, группировка и классификация телеметрических записей, а также исключение недопустимых или искаженных записей.

Алгоритм извлечения данных начинается с поэтапного считывания бинарного файла и преобразования данных в удобный для последующей обработки вид. Входной файл открывается в двоичном режиме с последующим побайтовым чтением и разбивается на массив 16-битных слов с помощью срезов и метода `.hex()`. Каждое слово интерпретируется как 2 байта в формате little-endian. Далее выполняется проход по массиву слов с поиском сигнатуры «`4B4F`», указывающей на начало пакета БАУС. После обнаружения сигнатуры пропускаются 4 служебных слова, и начинается извлечение последовательных блоков по 32 слова (объемом 64 байта), соответствующих одной строке ББКОС.

Каждый блок содержит 32 слова, из которых первое — индекс строки, последнее — контрольная сумма CRC-16, остальные 30 — полезные данные. Если текущий блок соответствует одному из допустимых типов пакетов, и количество строк соответствует ожидаемому значению (например, 15 строк для типов 1–4), то весь пакет сохраняется как кортеж.

На основе списка всех извлеченных пакетов формируется логическая структура входного файла, сгруппированная по последовательным пакетам БАУС. Эта структура необходима для дальнейшего этапа — агрегации пакетов в блоки МРИ.

Для защиты от поврежденных данных был реализован базовый механизм контроля целостности на уровне строк ББКОС. Таким образом, алгоритм извлечения обеспечивает:

- последовательный проход по файлу с корректной интерпретацией бинарных данных;
- группировку строк в пакеты;
- определение типа пакета на основе служебных значений;
- отбраковку поврежденных или неполных данных;
- подготовку структурированных данных для последующей агрегации в блоки МРИ.

Разработанный алгоритм является критически важным этапом предварительной обработки и обеспечивает достоверность исходной информации для последующей расшифровки, анализа и формирования отчетной документации.

После этапа извлечения пакетов БАУС из бинарного файла данные необходимо было обработать и структурировать для последующего анализа. Основной задачей данного этапа являлась агрегация строк в логические блоки МРИ, валидация их структуры и выделение информативных частей: заголовков, результатов измерений, а также контрольных полей. По ее завершению создается таблица с колонками: номер блока, наличие каждой строки, признак «Целое МРИ» и количество строк. Эти данные впоследствии сохраняются на листе «Анализ блоков» в выходном отчете формата таблицы Excel.

Далее структурированные данные по каждому МРИ записывались в датафреймы, реализованные на основе использования библиотеки `pandas`, осуществлялась подготовка к финальной визуализации и хранению результатов. Таким образом, на этапе обработки и структурирования данных обеспечивалась логическая организация потока измерений в соответствии с внутренней структурой МРИ, строгое соблюдение формата хранения, а также подготовка к последующей визуализации, статистическому анализу и экспорту результатов.

Заключительным этапом обработки телеметрической информации является сохранение полученных результатов в формате, пригодном для инженерного анализа, сопоставления и последующего архивирования. Процесс сохранения данных реализован в несколько этапов. В первую очередь формируется основной файл-отчет, включающий сводную информацию по анализу структуры пакетов и блоков.

На лист «Анализ блоков» (рис. 3) заносится информация о структуре каждого блока МРИ: наличие всех пяти строк, флаг целостности и общее количество строк.

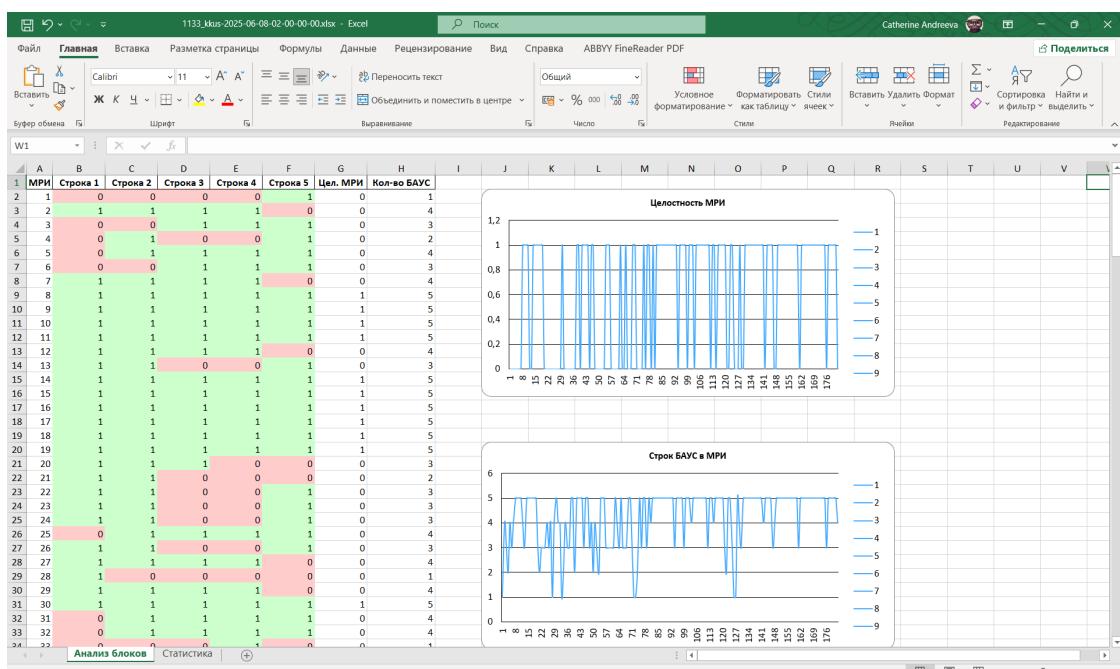


Рис. 3. Внешний вид листа с именем «Анализ блоков»

Для улучшения восприятия данные визуализируются с использованием цветовой заливки ячеек — зеленой при наличии строки, красной при отсутствии.

Дополнительно на лист добавляются линейные диаграммы, иллюстрирующие долю целых блоков и количество строк БАУС в каждом МРИ. На лист «Статистика» (рис. 4) записываются ключевые численные показатели: общее количество строк БАУС, количество дубликатов, число целых блоков МРИ, процент их доли, а также число строк с корректной и некорректной контрольной суммой CRC-16.

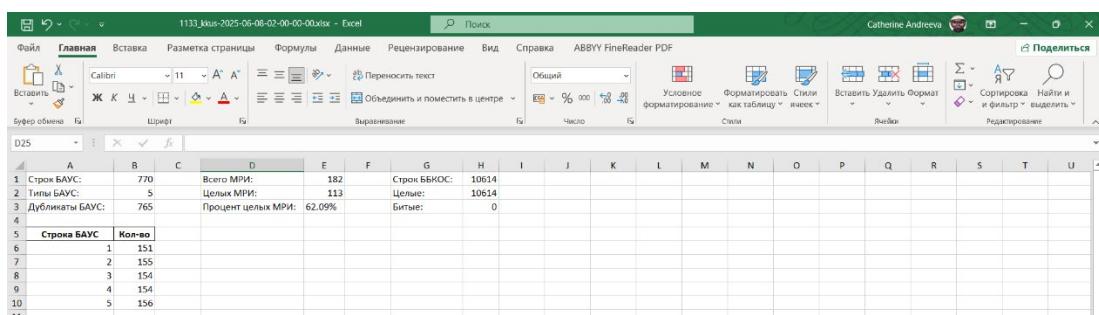


Рис. 4. Внешний вид созданного листа «Статистика»

При наличии целых блоков МРИ автоматически создается директория MRI, в которую поочередно сохраняются отдельные Excel-файлы, каждый из которых содержит полную расшифровку одного блока. Структура каждого такого файла включает три листа:

- «Данные» — таблица строк ББКОС, сгруппированных по типу (рис. 5);
- «Заголовок» — расшифрованные параметры заголовка блока (рис. 6);
- «Результаты измерений» — декодированные импульсы с временными характеристиками (рис. 7).

1 БАУС ББКОС Слово 1 Слово 2 Слово 3 Слово 4 Слово 5 Слово 6 Слово 7 Слово 8 Слово 9 Слово 10 Слово 11 Слово 12 Слово 13 Слово 14 Слово 15 Слово 16 Слово 17 Слово 18 Слово 19 Слово 20

2 1 10001 0096 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000

3 1 20002 0096 C8BE 0457 08AE 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000

4 1 30003 0000 0010 0145 0500 0000 0014 0186 0600 0000 0018 01C7 0700 0000 001C 0208 0800 0000 0020 0249 091

5 1 40004 030C 0C00 0000 0030 034D 0000 0000 0034 038E 0E00 0000 0038 03CF 0F00 0000 003C 0410 1000 0000 0000

6 1 50005 0000 004C 0514 1400 0000 0050 0555 1500 0000 0054 0596 1600 0000 0058 05D7 1700 0000 005C 0618 181

7 1 60006 060A 1800 0000 006C 071C 1C00 0000 0070 0750 1000 0000 0074 079E 1E00 0000 0078 07DF 1F00 0000 0000

8 1 70007 0000 0088 08E3 2300 0000 008C 0924 2400 0000 0090 0965 2500 0000 0094 09A6 2600 0000 0098 09E7 271

9 1 80008 AAAA 2A00 0000 0048 04E8 2B00 0000 00AC 082C 2C00 0000 0080 0860 2D00 0000 0084 08AE 2E00 0000 0001

10 1 90009 0000 00C4 0CB2 3200 0000 00C8 0C13 3300 0000 00CC 0D34 3400 0000 0075 3500 0000 0004 00B6 361

11 1 10000 0000 0079 3900 0000 00E4 0E8A 3A00 0000 00E8 0EFB 3B00 0000 00EC 0F3C 3C00 0000 00F0 0F7D 3000 0000 001

12 1 110008 0000 0100 1041 4100 0000 0104 1082 4200 0000 0108 10C3 4300 0000 010C 1104 4400 0000 0110 1145 451

13 1 12000C 1208 4800 0000 0120 1249 4900 0000 0124 128A 4A00 0000 0128 12CB 4B00 0000 012C 1300 4C00 0000 01:

14 1 13000D 0000 013C 1410 5000 0000 0140 1451 5100 0000 0144 1492 5200 0000 0148 14D3 5300 0000 014C 1514 541

15 1 14000E 1507 5700 0000 015C 1618 5800 0000 0160 1659 5900 0000 0164 169A 5A00 0000 0168 16D8 5B00 0000 011

16 1 1500F 0000 0178 17DF 5F00 0000 017C 1820 6000 0000 0180 1861 6100 0000 0184 18A2 6200 0000 0188 18E3 631

17 2 1'0010 19A6 6600 0000 0198 19E7 6700 0000 019C 1A28 6800 0000 01A0 1A69 6900 0000 01A4 1AAA 6A00 0000 01

18 2 2'0011 0000 0184 1BAE 6E00 0000 01B8 1BEE 6F00 0000 01BC 1C30 7000 0000 01C0 1C71 7100 0000 01C4 1CB2 721

19 2 3'0012 1075 7500 0000 01D4 1B86 7600 0000 01D8 1DF7 7700 0000 01DC 1E38 7800 0000 01E0 1E79 7900 0000 011

20 2 4'0013 0000 01F0 1F7D 7000 0000 01F4 1FBE 7E00 0000 01F8 1FFF 7F00 0000 01FC 2000 8000 0000 0200 2041 811

21 2 5'0014 2104 8400 0000 0210 2145 8500 0000 0214 2186 8600 0000 0218 21C7 8700 0000 021C 2208 8800 0000 02:

22 2 6'0015 0000 022C 230C 8C00 0000 0230 234D 8800 0000 0234 238E 8E00 0000 0238 23CF 8F00 0000 023C 2410 901

23 2 7'0016 24D3 9300 0000 024C 2514 9400 0000 0250 2555 9500 0000 0254 2596 9600 0000 0258 25D7 9700 0000 02:

24 2 8'0017 0000 0268 260B 9800 0000 026C 271C 9900 0000 0270 275D 9000 0000 0274 279E 9E00 0000 0278 27DF 9F1

25 2 9'0018 28A2 A200 0000 0288 28E3 A300 0000 028C 2924 A400 0000 0290 2965 A500 0000 0294 29A6 A600 0000 02:

26 2 10'0019 0000 02A4 2AA4 AA00 0000 02A8 2AB8 ABB0 0000 02AC 2B2C AC00 0000 02B0 2B6D AD00 0000 02B4 2BAE AE1

27 2 11'001A 2C71 B100 0000 02C4 2C82 B200 0000 02C8 2CF3 B300 0000 02CC 2D34 B400 0000 02D0 2D75 B500 0000 021

28 2 12'001B 0000 02E0 2E79 B900 0000 02E4 2EBA BAA0 0000 02E8 2EBF BB00 0000 02EC 2F3C BC00 0000 02F0 2F7D BD

29 2 13'001C 3'000 0000 0300 3'030 3'041 C100 0000 0304 3'082 C200 0000 0308 3'0C3 C300 0000 030C 3'104 C400 0000 03:

30 2 14'001D 0000 031C 3'208 C800 0000 0320 3'249 C900 0000 0324 3'28A CA00 0000 0328 3'2C8 CB00 0000 032C 3'30C CC

31 2 15'001E 33CF CF00 0000 033C 3'410 D000 0000 0340 3'451 D100 0000 0344 3'492 D200 0000 0348 3'4D3 D300 0000 03:

32 3 1'001F 0000 0358 3507 D700 0000 035C 3'618 D800 0000 0360 3'659 D900 0000 0364 3'69A DA00 0000 0368 3'6D8 36DB DB

33 3 2'0020 379E DE00 0000 0378 37DF DF00 0000 037C 3'820 E000 0000 0380 3'861 E100 0000 0384 3'8A2 E200 0000 03:

Рис. 5. Лист с данными

1 Параметр Значение

2 Размер информативных данных 4080

3 Бортовое время 00:00:00 01.01.2000

4 Тест. параметр к.1 1

5 Тест. параметр к.2 2

6 Тест. параметр к.3 3

7 Тест. параметр к.4 4

8 Тест. параметр к.5 5

9 Тест. параметр к.6 6

10 Порог ФПУ к.1 (мВ) 1,1

11 Порог ФПУ к.2 (мВ) 1,2

12 Порог ФПУ к.3 (мВ) 1,3

13 Порог ФПУ к.4 (мВ) 1,4

14 Порог ФПУ к.5 (мВ) 1,5

15 Порог ФПУ к.6 (мВ) 1,6

16 Нач. темп. ФПУ к.1 -90

17 Нач. темп. ФПУ к.2 -80

18 Нач. темп. ФПУ к.3 -70

19 Нач. темп. ФПУ к.4 -60

20 Нач. темп. ФПУ к.5 -50

21 Нач. темп. ФПУ к.6 -40

22 Нач. темп. СВУ -10

23 Нач. темп. МП 0

24 Кон. темп. ФПУ к.1 10

25 Кон. темп. ФПУ к.2 20

26 Кон. темп. ФПУ к.3 30

27 Кон. темп. ФПУ к.4 40

28 Кон. темп. ФПУ к.5 50

29 Кон. темп. ФПУ к.6 60

30 Кон. темп. СВУ 90

31 Кон. темп. МП 100

32 Версия ПО 1111

33 Номер СВУ 2222

Рис. 6. Расшифрованные параметры заголовка блока

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "1133_mri_block_8.xlsx". The main menu bar includes "Файл", "Главная", "Вставка", "Разметка страницы", "Формулы", "Данные", "Рецензирование", "Вид", "Справка", and "А". The ribbon tabs include "Шрифт" (Font), "Выравнивание" (Orientation), and "Число" (Number). The table consists of approximately 40 rows of data. The first few rows show measurements for channels 1 through 10. Rows 11 through 20 show measurements for channels 11 through 20. Rows 21 through 30 show measurements for channels 21 through 30. Rows 31 through 33 show measurements for channels 31, 32, and 32 respectively. The last row (row 34) contains two entries: "22" and "22 00000076320.716". The table has a header row with columns labeled "№", "Канал", "Сек. стрелка", "Время M", "Время N", "Время прихода импульса", "Параметр", and "Значение". The "Параметр" and "Значение" columns for rows 11-20 contain statistical values: Значений (499), Минимум (1), Максимум (499), Среднее (250), and СКО (144,193). Row 10 also includes "Нулевое поле" and "OK" status information.

Рис. 7. Результаты измерений

В заключение следует отметить, что результаты, полученные в ходе исследования, подтвердили возможность автоматизации рутинных процессов анализа телеметрии и их интеграции в инженерные рабочие процессы. Начиная с этапа загрузки входного файла и до получения структурированного отчета пользователь полностью освобождается от необходимости ручной расшифровки данных. После внедрения программы, среднее время обработки одного файла формата .bbkos составило менее 20 сек. (при среднем объеме нескольких тысяч строк), в то время как ручная расшифровка данных могла занимать несколько рабочих дней.

Таким образом, разработанный программный инструмент обеспечивает полный цикл автоматизированной обработки телеметрических данных — от чтения бинарного файла и проверки целостности до визуализации и формирования отчетной документации.

Литература

1. Аль-Хазраджи Х.А., Хуссейн Х.А., Аль-Саади С.А. Одномерный поисковый анализ данных спутниковой телеметрии // Международный журнал спутниковой связи и сетей. – 2023. – Том 41, № 2. – С. 1498. – DOI: 10.1002/сб.1498.
2. Гуриков С.Р. Основы алгоритмизации и программирования на Python: учебное пособие / С.Р. Гуриков. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2025. – 343 с.
3. Попов А.М. Анализ задачи верификации алгоритмов обработки телеметрической информации / А.М. Попов, В.В. Шмелев, В.В. Ткаченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 3-8.
4. Телеметрическая система для высокоскоростных летательных аппаратов боевого назначения / Г. Ермолдина, А. Бердібеков, А.Аден [и др.] // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2022. – № 4(123). – С. 572-583.
5. Microchip Technology Inc., США. Создание и проверка CRC: Инструкция по применению AN730A. – Чандлер, Аризона: Microchip Technology Inc., 2000. – 12 с. – URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00730a.pdf> (дата обращения: 30.10.2025).