

В. М. Хоміць, В. С. Глухов

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних обчислювальних машин

## ЗАСОБИ СТИСНЕННЯ БЕЗ ВТРАТ ВІДЕОПОТОКУ ІЗ МІКРОСУПУТНИКА

© Хоміць В. М., Глухов В. С., 2018

Розглянуто особливості побудови пристроїв для стиснення зображень без втрат. Дослідження особливостей побудови дозволяє зрозуміти принципи роботи цих пристроїв та методи стиску, які покладено в основу їх роботи. Як способи стиснення зображень без втрат обрано метод JPEG-LS та стандарт CCSDS121.0-B-2. Розглянуто реалізації цих методів з різними типами архітектур на сучасних ПЛІС. Порівняно результати реалізації розглянутих вузлів на ПЛІС. Враховували різні параметри роботи пристроїв: тактову частоту, заповненість кристала ПЛІС, кількість бітів на один піксель зображення та швидкість стиснення. Аналізом результатів можна визначити найбільш оптимальну організацію роботи пристрою для реалізації подібного вузла стиску, призначеного для використання в складі системи збирання та накопичення наукової інформації мікросупутника.

Ключові слова: стиснення без втрат, ПЛІС, JPEG-LS, CCSDS121.0-B-2, програмна реалізація, апаратна реалізація

V. Khomits, V. Hlukhov

Lviv Polytechnic National University,  
Computer Engineering Department

## TOOLS FOR MICRO-SATELLITE VIDEO STREAM LOSSLESS COMPRESSION

© Khomits V., Hlukhov V., 2018

Features of construction of devices for compression of lossless images are considered. The study of the features of the construction allows you to fully understand the principles of these devices and the methods of compression, which underlie their work. JPEG-LS method and CCSDS121.0-B-2 standard are chosen as ways of compression of lossless images. The implementation of these methods with different types of architectures on modern FPGAs is considered. A comparison of the results of the implemented nodes on the FPGA. Various parameters of the device's operation are taken into account – clock frequency, FPGA crystal filling, number of bits per pixel of image and compression speed. The analysis of results allows to determine the most optimal organization of the device for the implementation of such a compression node intended for use in the system of collecting and accumulation of scientific information of the microsatellite.

Keywords: lossless compression, FPGA, JPEG-LS, CCSDS121.0-B-2, software implementation, hardware implementation

### Вступ

Розглянуто особливості виконання стиснення зображень без втрат методами CCSDS121.0-B-2 та JPEG-LS, а також їхню реалізацію у ПЛІС. Метод стиснення без втрат усуває надлишковість джерела даних, а після декодування дозволяє повністю відновити стиснені дані. У процесі

декодування вихідні дані можуть бути реконструйовані зі стиснутих даних з відновленням усуненої надлишковості; процес декомпресії не вносить до даних жодних спотворень. Цей метод особливо корисний, якщо цілісність даних не повинна бути порушеною.

У роботі порівняно складність реалізацій згаданих алгоритмів стиснення зображень на ПЛІС.

### **Аналіз останніх публікацій**

В основу методу стиснення JPEG-LS покладено алгоритм LOCO-I, який описано в монографіях [1, 2, 33]. Особливості реалізації методу JPEG-LS на ПЛІС, його порівняння з іншими алгоритмами стиснення та шляхи реалізації описано в статті [4]. Детальніша інформація про особливості стандарту CCSDS121.0-B-2 та блок-схема його роботи міститься в ресурсі [6]. У монографіях [5, 7] описано реалізацію методу стиснення JPEG-LS на ПЛІС фірми Xilinx. Дослідженням алгоритму стиснення JPEG-LS для використання його у роботі мікросупутника займались науково-дослідні групи з університету Австралії [8] та Греції [9].

### **Мета роботи**

Метою роботи є визначення особливостей алгоритмів стиснення зображень без втрат JPEG-LS та за рекомендаціями CCSDS121.0-B-2, дослідження особливостей їхньої реалізації на ПЛІС. Також метою роботи є порівняння реалізованих на ПЛІС вузлів стиску інформації без втрат для вибору основи для реалізації подібного вузла для використання в складі системи збирання та накопичення наукової інформації мікросупутника.

### **Структура вузла стиснення даних за рекомендацією CCSDS121.0-B-2**

Міжнародний консультативний комітет по космічним системам передавання даних (CCSDS) розробляє рекомендації із стандартизації [10] для:

- зменшення вартості виконання космічних програм;
- забезпечення взаємодії при виконанні програм;
- покращення опрацювання даних, пов'язаних з космосом;
- уніфікації процесів збереження і архівація зібраних даних.

За рекомендаціями CCSDS121.0-B-2 кодер джерела вузла стиснення без втрат складається з двох окремих функціональних частин: препроцесора та адаптивного ентропійного кодера.

Функція адаптивного ентропійного кодера полягає в обчисленні унікально зашифрованих кодованих слів змінної довжини, що відповідають кожному блоку даних, які надходять із препроцесора. Ентропійний кодер реалізує декілька варіантів кодування, кожен з яких є ефективним для різних значень ентропії вхідних даних. Кодер вибирає варіант кодування, який дає найвищий коефіцієнт стиснення окремо для кожного блоку вхідних даних. Оскільки розмір блоку може бути невеликим, а для кожного блоку обирають якнайкращий спосіб стиснення, загальне кодування може адаптуватися до швидких змін у статистиці даних. До стиснених даних додається унікальний ідентифікатор (ID), щоб вказати декодеру, який спосіб необхідно використати для декодування. На рис. 1 показано функціональну схему адаптивного ентропійного кодера разом із препроцесором.

### **Реалізація стандарту CCSDS121.0-B-2 на ПЛІС**

Стандарт стиснення CCSDS121.0-B-2 використовують в апаратних реалізаціях, спрямованих на космічні дослідження. Однією з успішних реалізацій є функціональне ядро (IP Core) ПЛІС виробництва фірми АМВА™. Нижче наведено структуру ядра (рис. 2) та опис його складових.

На попередньому етапі незалежно від режиму роботи ядра для кожної вхідної виборки виконують три основні операції в такій послідовності: формування ознаки продовження попереднього блока, формування прогнозованої величини наступних даних і генерація заповнення для останнього блоку потоку даних (при необхідності).

Блок-перемикач реалізує стиснення без втрат на основі CCSDS-121.0-B-2. Параметри стиснення мають бути відомі декодеру, оскільки вони не вбудовуються в стиснений потік у вигляді заголовків.

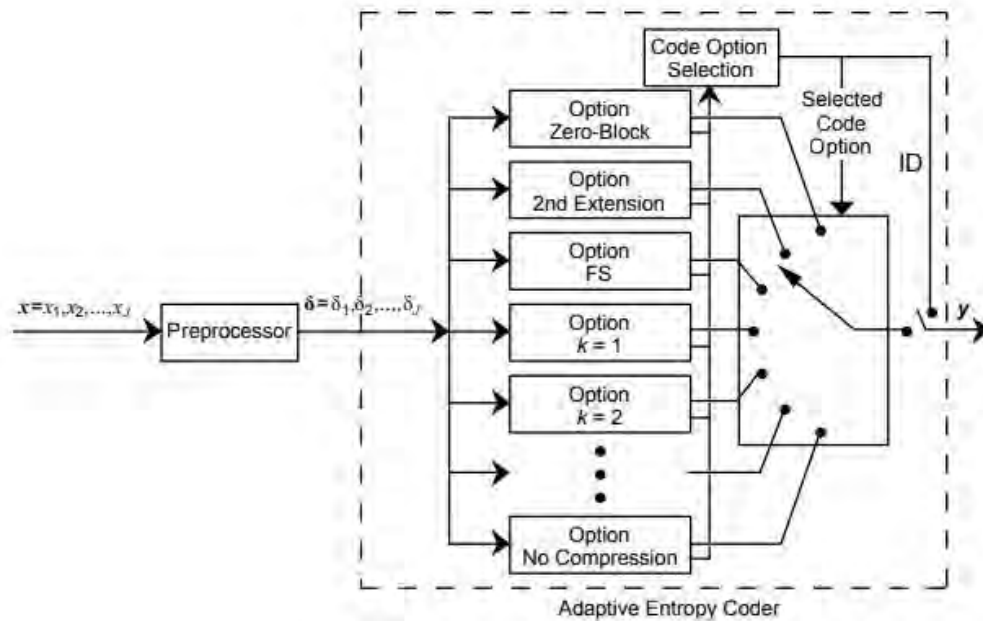


Рис. 1. Адаптивний ентропійний кодер із препроцесором за стандартом CCSDS 121.0-B-2

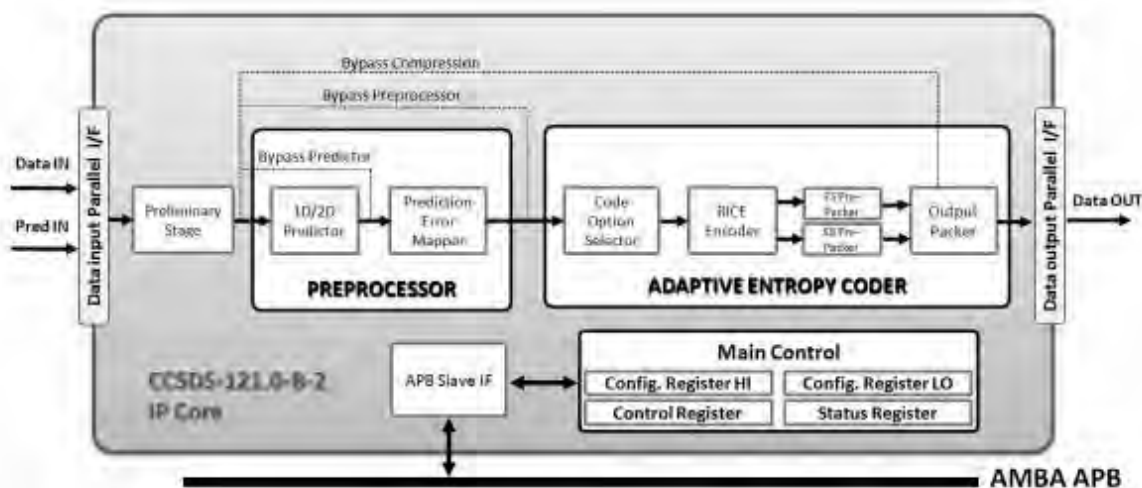


Рис. 2. Структура ядра ПЛІС AMBA™ CCSDS 121.0-B-2

У вузлі препроцесора (Preprocessor) є блок прогнозування (Predictor), який відображає значення помилок прогнозування в невід'ємних цілих числах.

Блок Predictor можна обійти, якщо використовувати зовнішній блок прогнозування. У цьому випадку разом із входом даних використовують окремий вхід External Predictor (XP). Розрядність вибірки вхідних даних  $n$ , а також режим роботи препроцесора налаштовує користувач із використанням системних регістрів.

Елемент прогнозування помилок (Prediction Error Mapper) приймає значення помилки прогнозування та відображає їх у числах, що не є від'ємними, які надходять на адаптивний ентропійний кодер (Adaptive Entropy Coder – AEC). Блок прогнозування помилок може не використовуватися, якщо використовується зовнішній препроцесор.

Адаптивний ентропійний кодер (AEC) версії CCSDS-121-D [6] призначений для стиснення даних, він повністю відповідає AEC, визначеному в рекомендації CCSDS-121.0-B-2. AEC підтримує всі 33 варіанти кодування, визначені в стандарті CCSDS-121.0-B-2. Блок AEC має такі особливості: а) можливий розмір блоку (J): 8, 16, 32 або 64; б) підтримує основний або обмежений набір

параметрів коду; с) еталонний інтервал вибірки ( $r$ ) від 1 до 4096. Ці параметри налаштовує користувач через регістр конфігурації.

Вузол вибору варіанта кодування одночасно підраховує ефект використання кожного з методів стиснення і вибирає той метод, який дає найвищий показник стиснення серед інших на тому самому блоці даних.

Блок кодера RICE Encoder реалізує основний алгоритм адаптивного кодування, який вибирає кращий з декількох варіантів коду для використання в блоці даних.

Формат CDS (Coded Data Set – кодований набір даних) має таку структуру:

- а) послідовність ідентифікаційних бітів;
- б) стиснені дані (коди FS (Fundamental Sequence – фундаментальна послідовність));
- с) об'єднані  $k$  найменш значущі біти (відокремлені біти) з кожного слова вхідних даних.

Модуль передпакувальника Pre-Packer використовують для кожного потоку даних FS і розділених відокремлених бітових кодових рядків для попереднього форматування кожного блоку. FS та розбиті бітові кодові слова (попередньо відформатовані) готують для виведення на 16/32-бітну шину.

Вихідний пакувальник Output Packer отримує та мультиплексує вже попередньо сформовані коди FS і відокремлені біти з FIFO на виході Pre-Packer та виводить готові CDS-пакети на 16/32-бітну шину.

### Дослідження апаратних реалізацій алгоритму JPEG-LS

Кооперативний дослідницький центр супутникових систем у Квінслендському університеті технологій у співпраці з Університетом Джона Хопкіна розробив і виготовив систему високопродуктивного обчислення (HPC-I) для австралійських наукових місій супутника FedSat. HPC-I – це експериментальний пристрій, який демонструє доцільність використання технології FPGA у космосі та можливості зменшення помилок від радіаційного випромінювання. HPC-I, розроблений на основі радіаційно стійкої ПЛІС Xilinx, є першим реконфігуровним комп'ютером, розгорнутим у космічному середовищі. Архітектуру системи HPC-I показано на рис. 3.

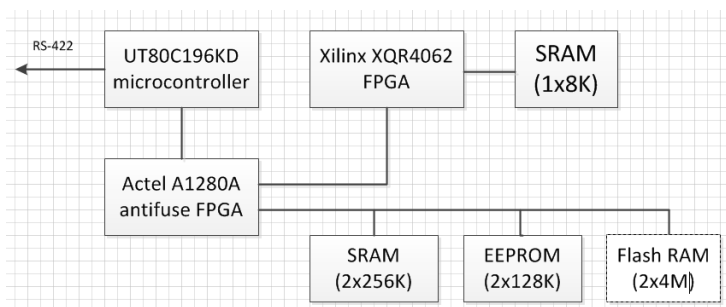


Рис. 3. Архітектура системи HPC-I

На рис. 4 показано схему вузла стиснення.

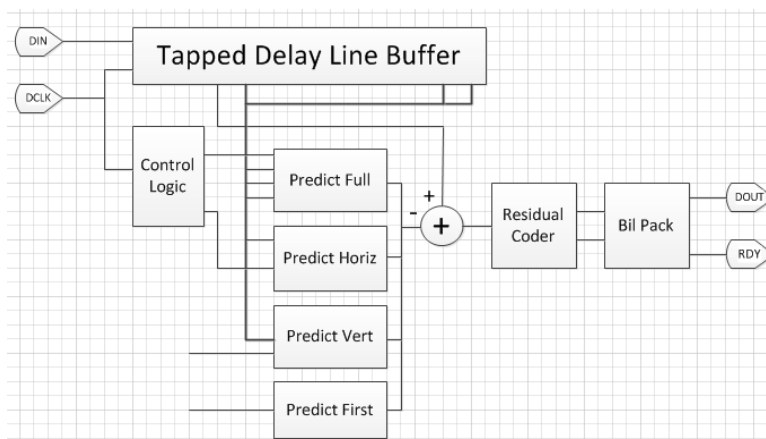


Рис. 4. Архітектура вузла стиснення

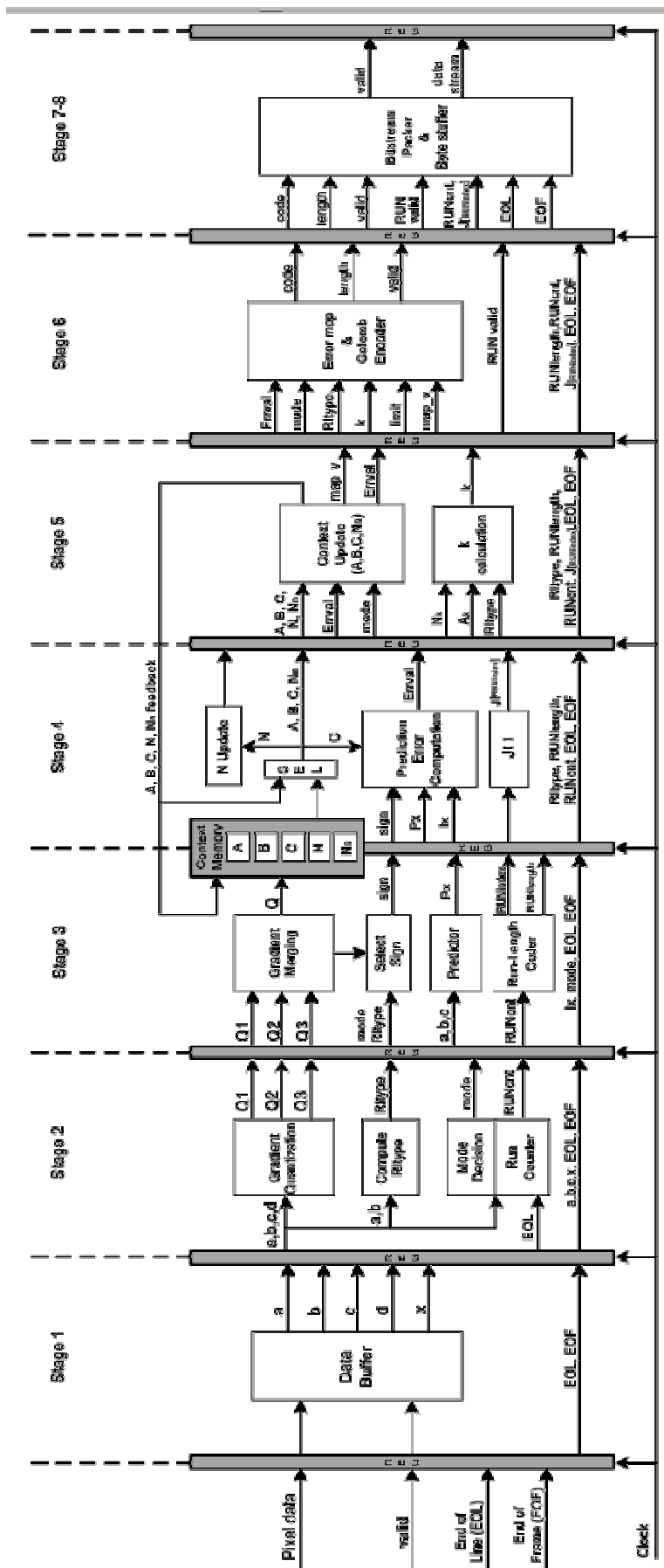


Рис. 5. Архітектура конвеєра кодера JPEG-LS

Для зображень з шириною  $N$  пікселів лінійний буфер зберігає значення  $(N + 2)$  пікселів. Пристрій керування (Control Logic) містить давачі синхронізації для визначення поточного розташування пікселів, які потім використовують для правильного ввімкнення та вимкнення чотирьох різних моделей передбачень. Вузли передбачення “Повний”, “Горизонтальний”, “Вертикальний” і “Перший” реалізують чотири варіанти передбачення.

Ця реалізація, яка застосовується для 8-бітових входних зображень та ненадлишкового JPEG-кодування, потребує близько 1800 CLB або приблизно 78 % ресурсів кристала ПЛІС. Вона здатна стискати відеопотік із частотою 43,8 МГц (пікселів/с)

У [9] запропоновано конвеєрну реалізацію методу JPEG-LS (рис. 5).

Конструкція складається зі восьмиходинкового конвеєра, на перших п'яти ходинках конвеєра здійснюються моделювання контексту, прогноз помилок та кодування довжини. Контекстні адреси обчислюють з локальних градієнтів на третьому етапі. Обчислення помилок прогнозування та схеми змінних оновлень знаходяться на етапах 4 та 5 відповідно, а кодування Голomba помилок прогнозування виконується на стадії 6.

Запропонований кодер JPEG-LS описується мовою Verilog, моделювання здійснювалося пакетом Modelsim. Топологію кристала розроблено для ПЛІС Xilinx XC7VX485-2 у середовищі Xilinx ISE 11.5. Згідно з результатами, розроблений JPEG-LS кодер може стискати потоки із пропускну здатністю до 196.1 Msample/s. Розробку перевірено з відомими зразками зображень, а також із спеціальними моделями для тестів режиму роботи.

### Порівняння характеристик апаратних реалізацій на ПЛІС методу JPEG-LS та рекомендацій CCSDS 121.0-B-2

Метод стиснення без втрат JPEG-LS менш варіативний у виборі параметрів стиснення, ніж вищеописаний стандарт. Детально алгоритм роботи JPEG-LS описано в [9]. Нижче наведено структуру ядра ПЛІС (рис.6) та опис її компонентів.

Вхідний буфер (Line Buffer) складається з модуля пам'яті і зберігає вхідні дані вибірки, які подаються на ядро.

Модуль контекстного моделювання (Context Modeler) здійснює операції обчислення помилки прогнозування. Він звертається до вхідного буфера і читає чотири контекстних значення, необхідні для визначення контексту. Крім того, цей модуль виконує процедури серединного прогнозу, пошук краю зображення і всі обчислення для прогнозування помилки. Також цей модуль оновлює вміст контекстної пам'яті новими значеннями статистичних параметрів обраного контексту.

Модуль кодування Голомба (Golomb Coder) за помилкою передбачення і параметрами стиснення формує код Голомба.

Модуль регістрів стану та контролю містить 4 16-бітні регістри стану та регістри контролю. Регістровий файл забезпечує виконання операцій читання регістрів стану і операції запису регістру управління.

Описану реалізацію можна взяти за основу створення апаратних реалізацій вузлів стиснення спеціального призначення.

Характеристики апаратних реалізацій розглянутих методів стиснення наведено в таблиці.

#### Перспективи подальших досліджень

У подальших дослідженнях, тобто, в розробці ПЛІС стиснення відеопотоку для мікросупутника, планується використовувати отримані результати аналізу обох алгоритмів стиснення для створення вузла стиснення без втрат на базі ПЛІС, який якнайкраще задовольняє вимоги замовника.

#### Апаратні реалізації методів стиснення без втрат інформації

	JPEG-LS (AMBA)	JPEG-LS (HPC-I)	CCSDS 121.0-B-2	JPEG-LS (конвеєрна реалізація)
Тип ПЛІС	Kintex -7	XQR4062	Virtex 5	XC7VX485-2
Біт на піксель (max)	16	8	32	16
Логічних комірок використано, LUTs	5600	1800	5809	1554
Msamples/sec	180	180	175	196.1

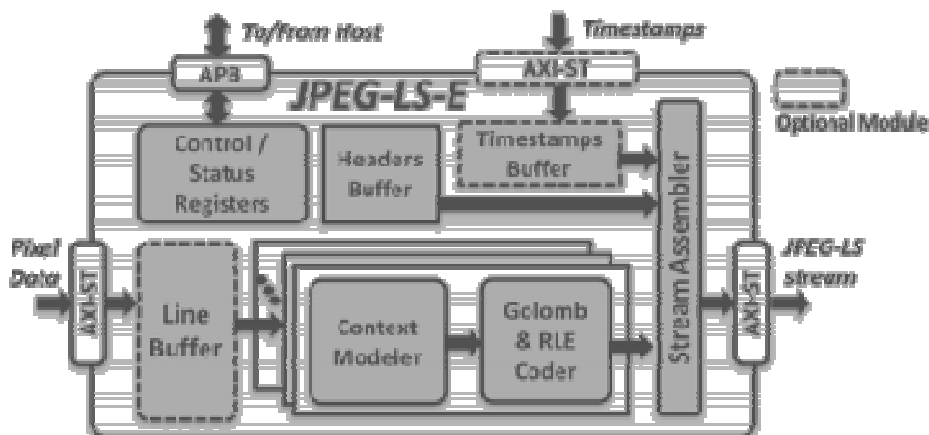


Рис. 6. Структура ядра ПЛІС AMBA™

Для досягнення поставленої задачі планується виконати такі кроки:

- ґрунтуючись на розглянутих структурах ядер ПЛІС для стиснення зображень, розробити власну реалізацію для стиснення відеопотоку системи збирання наукової інформації мікросупутника, яка якнайкраще задовольняє вимоги замовника;
- дослідити характеристики моделі розробленої системи.

### Висновки

Досліджено алгоритми стиснення зображень без втрат CCSDS 121.0-B-2 і JPEG-LS та особливості їх реалізації на ПЛІС. Також порівняно характеристики їхніх апаратних реалізацій. На основі цих досліджень створено план подальшого розвитку та розроблення власного ядра ПЛІС стиснення без втрат відеопотоків для його використання в складі системи збирання наукової інформації мікросупутників.

1. M. Vaynberher, H. Seroussi, H. Sapiro, "The Loco-I stysnennya zobrazhen bez vtrat Alhorytm: Pryntsyppu i standartyzatsiyi v JPEG-LS", Hewlett-Packard Laboratories Technical Report No. HPL-98-193R1, lystopad 1998 pereroblene zhovtnya +1999 . IEEE Trans. Obrobka zobrazhen, Vol. 9 serpnya 2000 roku, pp. 1309–1324. 2. M. Vaynberher, H. Seroussi, H. Shapiro, "LOKO-I: Nyzka skladnist, zasnovana na konteksti, stysnennya zobrazhen bez vtrat Alhorytm" Proc. Konferentsiya IEEE Data Compression, Snowbird, shtat Yuta, berezen-kviten 1996 roku. 3. Dyskretnaya matematyka: alhorytmy. Jpeg, jpeg2000, jpeg-ls. Szhatyte yzobrazhenyy s poteryamy y bez [Elektronnyy resurs] : [Veb-sayt]. – Elektronni dani. – Rezhym dostupu <http://rain.ifmo.ru/cat/view.php/theory/data-compression/jpeg-2006> 4. Hlukhov V. S., Khomits V. M "Stysnennya zobrazhen bez vtrat metodom jpeg-ls na PLIS", Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" Kompyuterni systemy ta merezhi 2017r., 32–41 st. 5. JPEG-LS Encoder Core (Numerically and Near Lossless Compression) Design Specification. 2007 – 2013 ALMA Technologies. 6. CCSDS 121.0-B-2 "RECOMMENDED STANDARD FOR LOSSLESS DATA COMPRESSION" Blue Book, May 2012 7. CAST XILINX "JPEG-LS-E Lossless & Near-Lossless JPEG-LS Encoder", May 2018. 8. Anwar S. Dawood, John A. Williams and Stephen J. Visser "On-board Satellite Image Compression Using Reconfigurable FPGAs" The Cooperative Research Centre for Satellite System Queensland University of Technology, Brisbane, QLD 4001, Australia. 9. Yakup Murat MERT "FPGA Based JPEG-LS Encoder for Onboard Real-time Lossless Image Compression" TBİTAK-İLTAREN, Şehit İlhan TAN kİyası, 06800 mitktsy, Ankara, TURKEY Conference Paper. April 2015. 10. Spacecraft Onboard Interface Services Area [Elektronnyy resurs]: [Veb-sayt]. – Elektronni dani. – Rezhym dostupu <https://public.ccsds.org/Publications/default.aspx>