Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Лаборатория автоматизации научных исследований

Теория и методы построения цифровых программируемых инфокоммуникационных систем

диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

к.т.н. Кулешов С. В.

Научная проблема: диссертационная работа является междисциплинарным исследованием в области современной цифровой технологии импульсно-временной регистрации сигналов, контейнерной транспортировки, согласования межканальных протоколов и семантических методов представления, хранения и передачи информационного контента.

Цель работы: повышение эффективности систем инфокоммуникации за счет применения парадигмы программируемого когнитивного канала передачи данных и разработка на этой основе научно обоснованной методологической базы и программно-технических решений.

Положения, выносимые на защиту

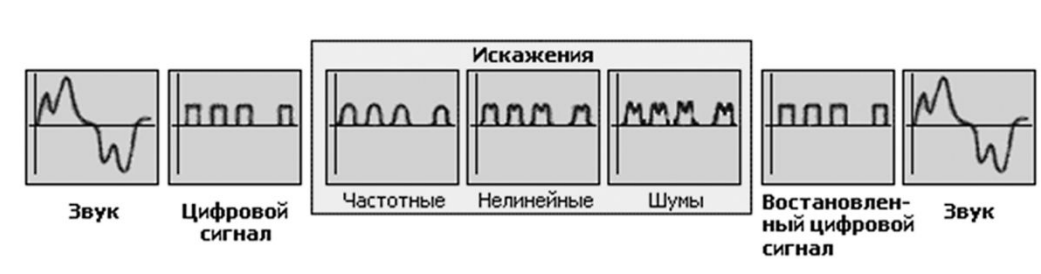
1. Концепция и теоретические основы цифровой программируемой технологии построения инфокоммуникационных систем.
2. Архитектура цифрового коммуникационного канала с процессорными элементами.
3. Методологический подход построения гибридных кодеков с заданными параметрами для компрессии видеоданных.
4. Техническое решение для оптимизации энергетических и информационных характеристик цифровых инфокоммуникационных систем.
5. Совокупность алгоритмов и программ для компрессии видеоданных с использованием их представления в виде 3D-пространства, которая унифицирует анализ и обработку пространственных и временных параметров видеопоследовательности.
6. Программно-аппаратные и технологические решения универсальной коммуникационной платформы на базе ПЛИС с ориентацией на семантику передаваемых данных.

Задачи

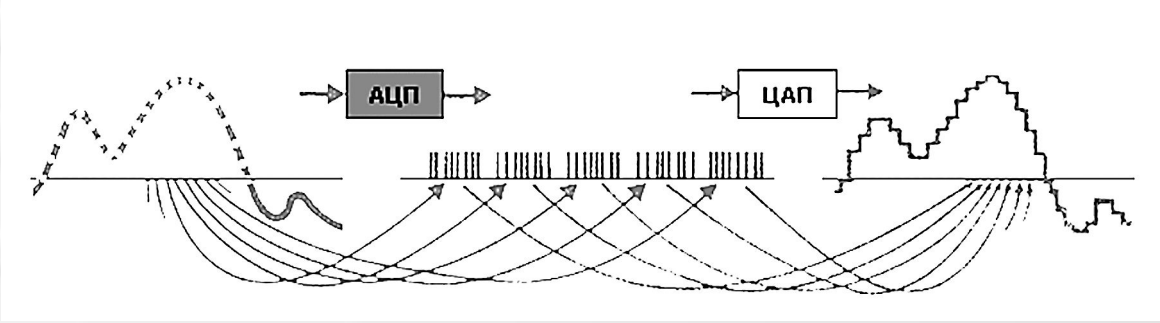
1. Исследование основных направлений в области построения систем передачи цифровых данных.
2. Разработка теоретических основ, архитектуры цифрового коммуникационного канала с процессорными элементами.
3. Разработка методов и программ построения гибридных кодеков с заданными параметрами, определяемыми задачей.
4. Создание формализма терминальных программ для оценки предельной сложности цифрового информационного объекта.
5. Разработка методов и критериев оценки адекватности цифровых программируемых инфокоммуникационных систем. Семантический анализ текстовых, аудио- и видео- данных.
6. Обобщение и оценка результатов исследований по проблеме организации программируемых каналов передачи данных с оценкой эффективности полученных результатов.

Сопоставления парадигм: волновой (аналоговой) и программируемой (цифровой) передачи данных

Тракт волновой (аналоговой) обработки.



Тракт цифровой обработки.



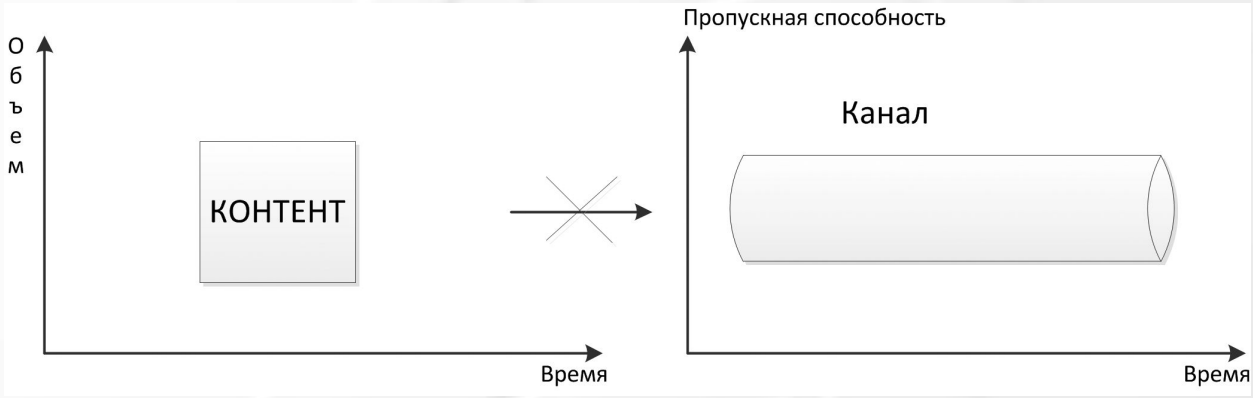
Аналоговые и цифровые каналы связи

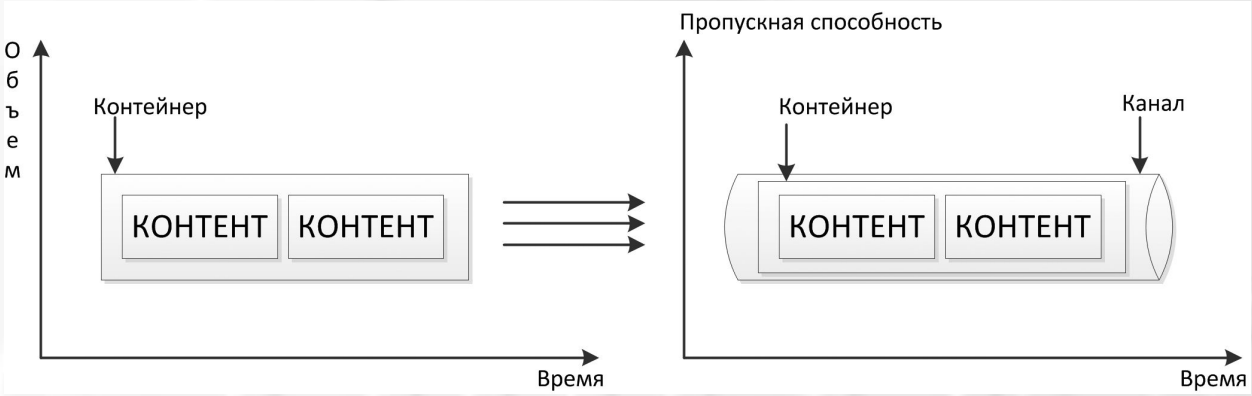
Глоссарий цифровых программируемых инфокоммуникационных систем

- SDR Forum 2011 – объявленные темы:
  - радиотехнологии следующего поколения
  - передовые беспроводные сети и инфраструктура
  - технологии когнитивного радио
  - внедрение коммуникационной архитектуры программного обеспечения
  - разработка систем с использованием коммуникационной архитектуры программного обеспечения
  - стандарты реконфигурируемого радио и компонентов поддержки
  - применение открытых источников в военных системах связи
- Глоссарий, предложенный SDR Forum, предназначен для унификации определений в области программируемого и когнитивного радио на основе сотрудничества SDR форума и рабочей группы IEEE P1900.1.

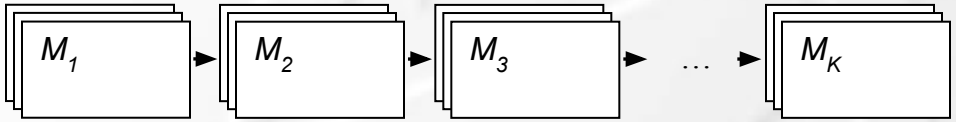
- В данной работе расширено интерпретационное русскоязычное терминологическое соответствие ЦПТ (приложение 4)

Контент, контейнер, канал





Гибридный кодек



Структура гибридного кодека.

$M_1, M_2, ..., M_K$ – функциональные классы модулей

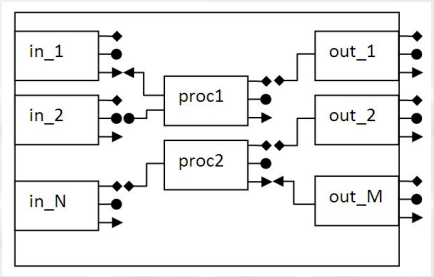
$C := (m_1, m_2, ..., m_K)$ – конфигурация кодека

Условия согласования интерфейсов для функциональных классов модулей:

$$F(M_i^{out}) \equiv F(M_{i+1}^{in})$$

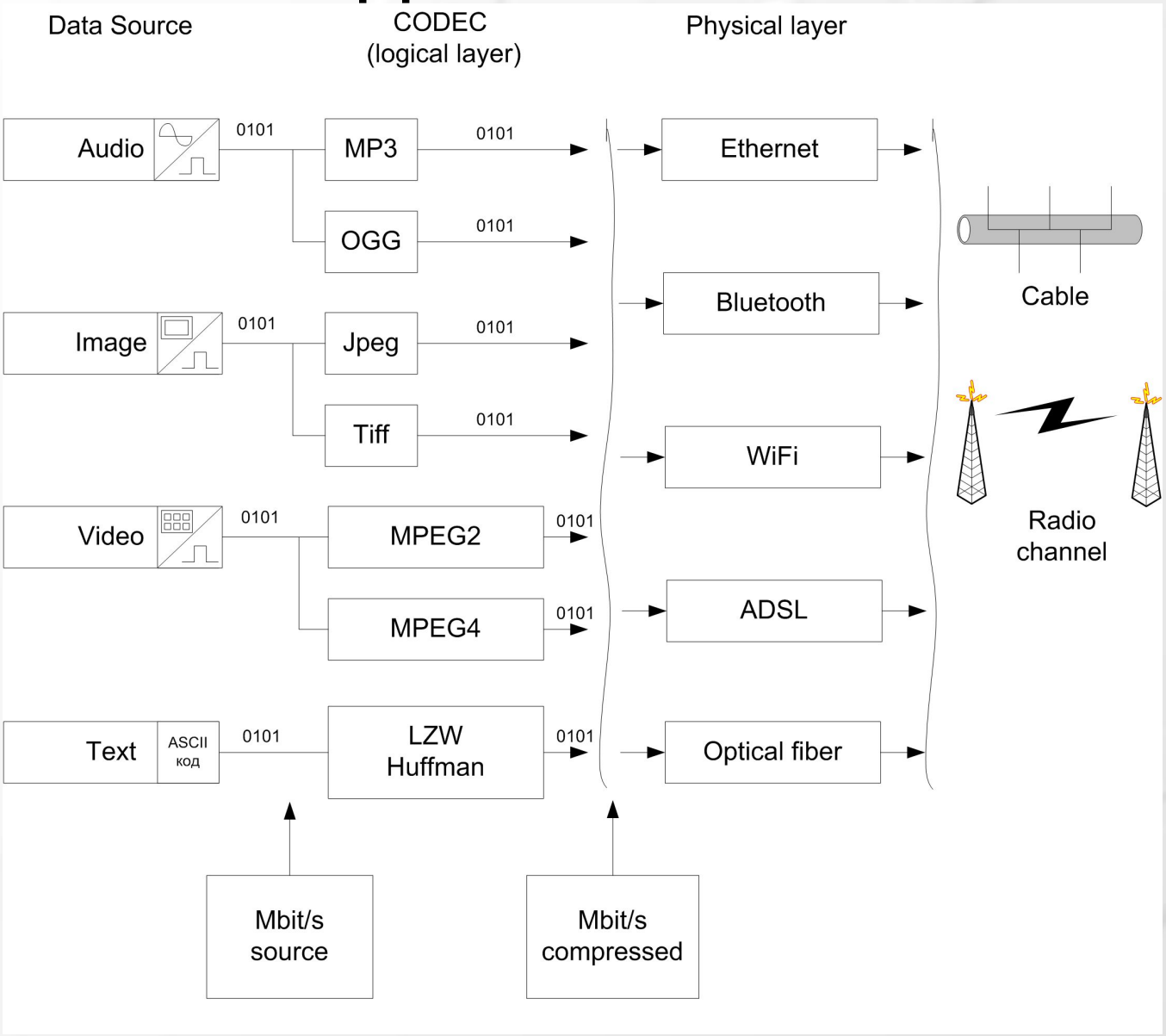
$$F(M_1^{in}) \equiv F(sensor)$$

$$F(M_K^{out}) \equiv F(channel)$$



К понятию согласования интерфейсов в реконфигурируемой среде.

Обобщенная схема передачи цифровых данных



Обобщенная схема компрессии данных

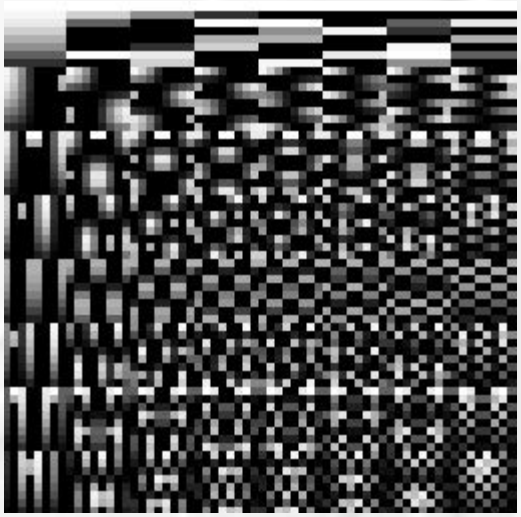
SPIIRAS

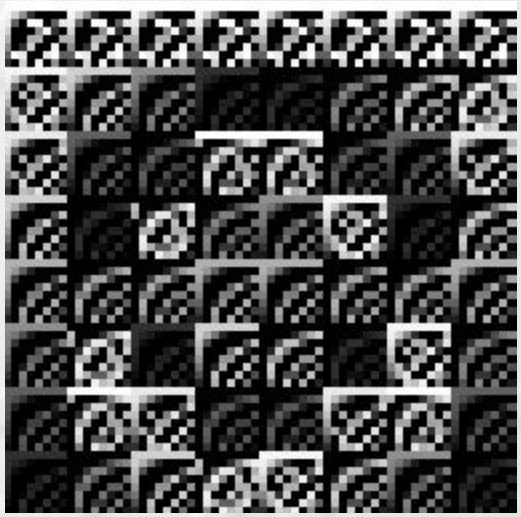
Компрессия двумерных данных

Матрицы преобразования, дающие эффективную компрессию

$$D_{mn} = C_m C_n \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} S_{ij} \cos\left(\frac{\pi(2i+1)m}{2M}\right) \cos\left(\frac{\pi(2j+1)n}{2N}\right)$$

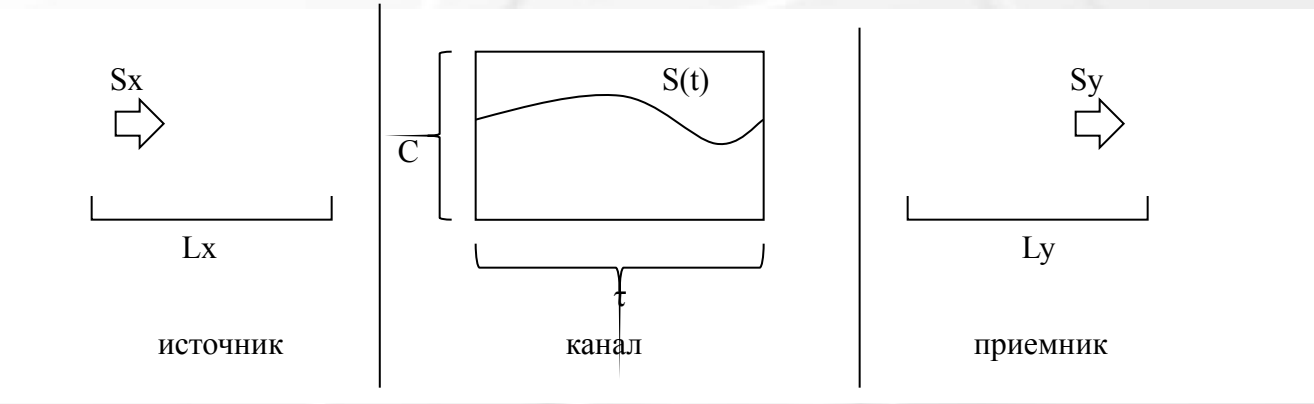
$$C_m = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}}, m = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}}, 1 \le m \le M-1 \end{cases} \qquad C_n = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, n = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, 1 \le n \le N-1 \end{cases}$$





- не требуют вычислений дискретно-косинусного преобразования, постулируемых в традиционном алгоритме JPEG сжатия

Ограничения и возможности пакетной передачи цифровых данных



X, Y – битовая последовательность источника (X) и приемника (Y)
Sx, Sy – скорость потока источника и приемника (бит/с)
Lx, Ly – длина битовой последовательности источника и приемника (бит)
S(t) – величина динамической скорости потока в момент времени t (бит/с)
Ограничение на параметры цифрового канала связи

$$C\tau \geq L_X$$

Основное свойство цифрового канала передачи данных (возможность обмена времени передачи на скорость канала и наоборот)

$$\sum_{\tau} S(t)\Delta t \leq C\tau_C$$

где $\Delta t = \frac{L_X}{S_X}$ – временной отрезок, на котором значение S постоянно.

Учитывая постулат Колмогорова о существовании программы p для передачи последовательности X, причем $L(p) \leq L_X$ (в худшем случае последовательность X будет представлена в виде программы вывода самой себя с накладными расходами δ) получим соотношение:

$$S(t) + \delta \leq S_X \Rightarrow C \leq S_X$$

К понятию сложности данных: терминальные программы

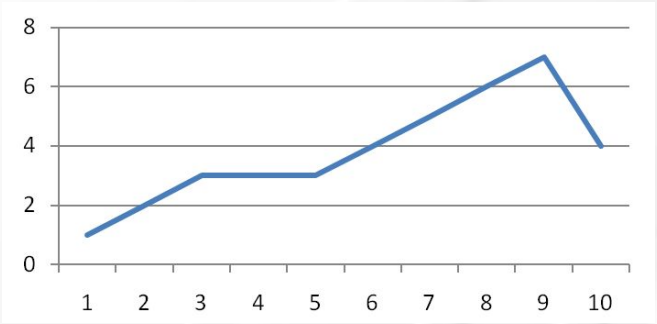
S_{10} =ABBBBABBBB

TP:
C(3,2)
OUT A
C(1,4)
OUT B
min l(P)=4

S_9 =ABBBBABBB

TP:
OUT A
C(1,4)
OUT B
OUT A
C(1,3)
OUT B
min l(P)=6

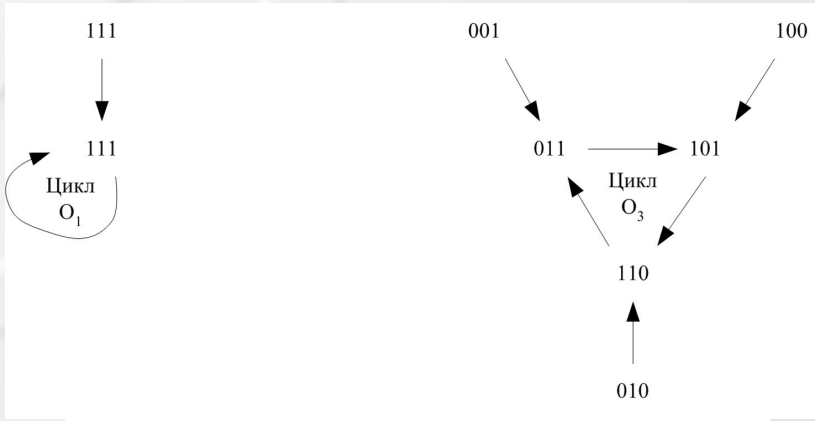
C (x,y) - повтор следующих x операций y раз
OUT x – вывод значения x в выходной поток

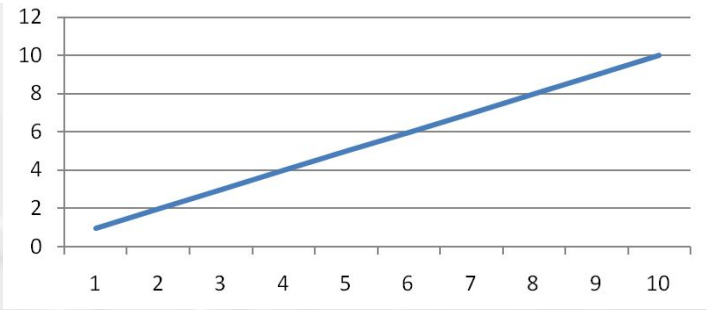


Зависимость длины программы l(P) от длины входной последовательности

S_3 =111

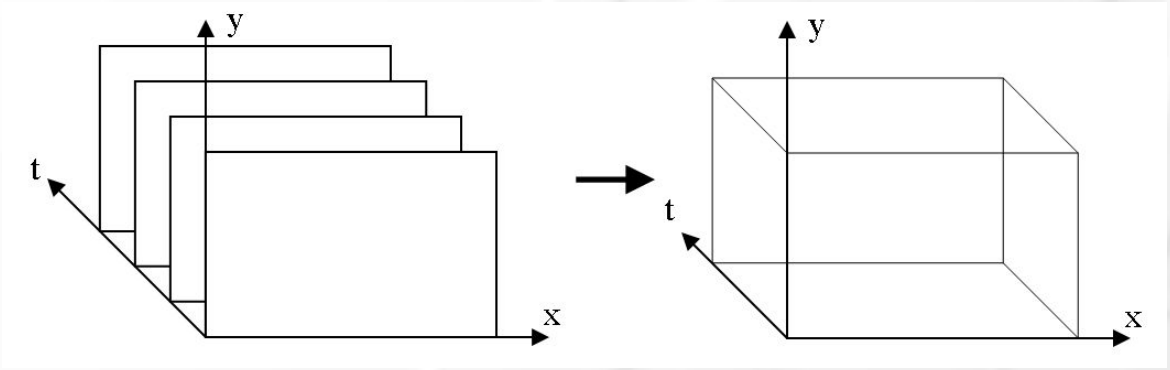
S_3 =001, 011, …

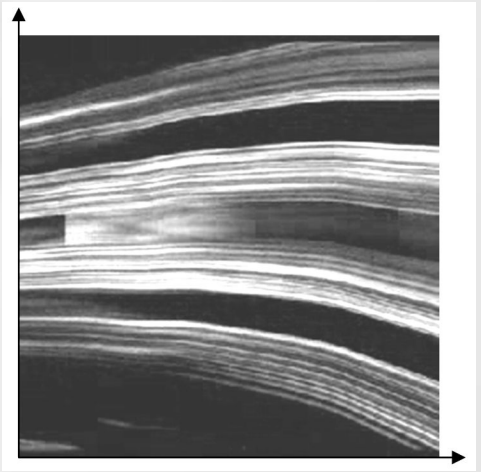




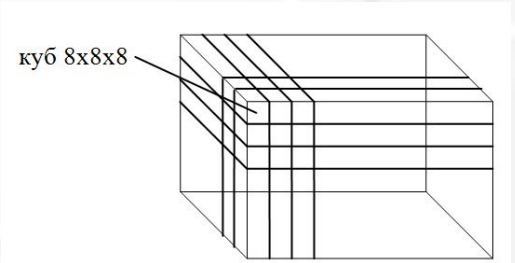
Определение сложности по В.И. Арнольду

Идея представления видеопотка как 3D-пространства

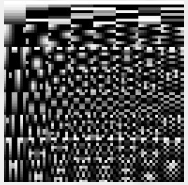




Алгоритм STVC для компрессии видеопотока как 3D-представления



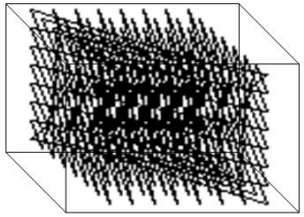
Этап дискретизации.



Этап 3D-ДКП

$$D(x,y,t) = \left\lfloor \frac{S(x,y,t)}{q} \right\rfloor$$

Этап квантования



Этап сканирования.

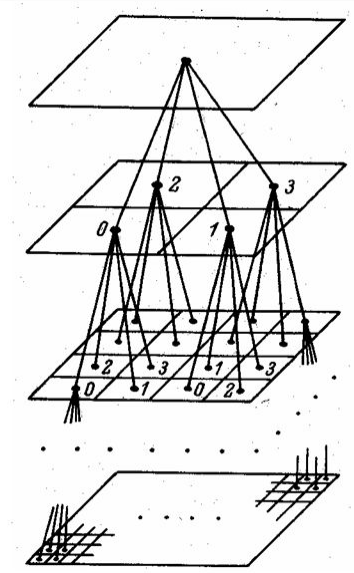
1101011010...
↓
10101..

Вторичная компрессия

10110111010…

Битовый поток

Пирамидальное представление данных и динамическое управление компрессией



Пирамидальное представление 2-мерных данных

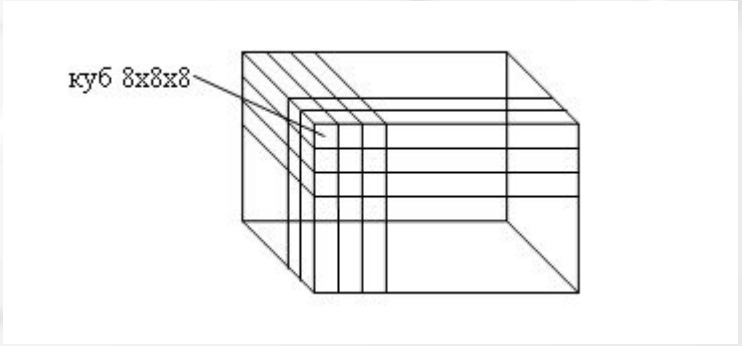
Стандартная компрессия JPEG

Пирамидальная компрессия с динамическим управлением порогом

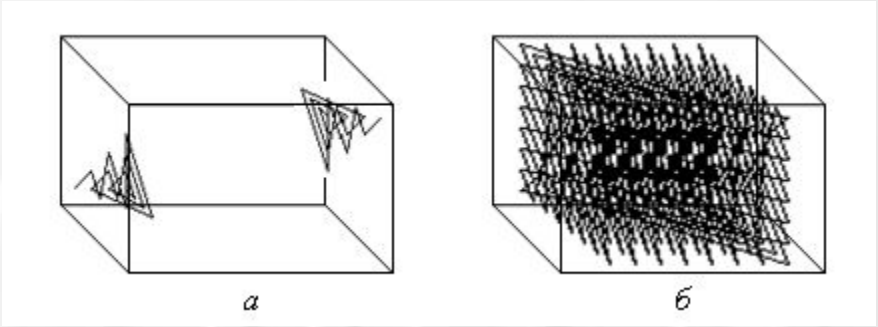
Компрессия многомерных данных

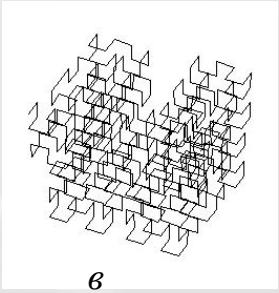
Схема кодирования

Дискретизация 3D-данных

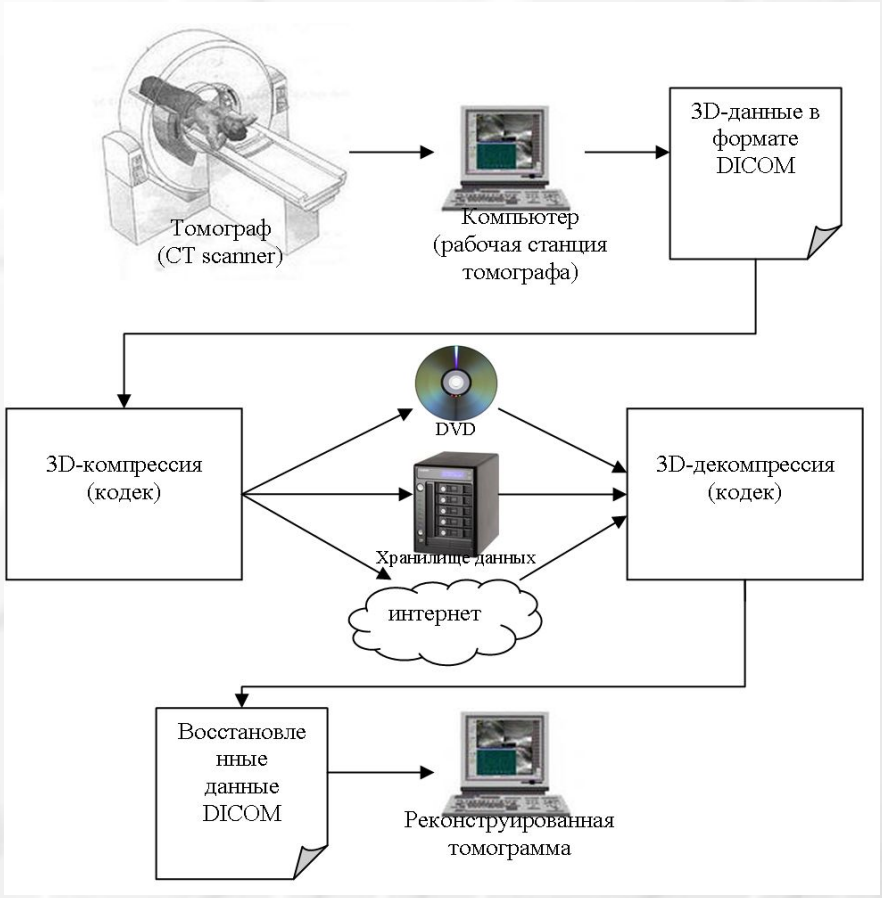


Схемы развертки 3D-данных



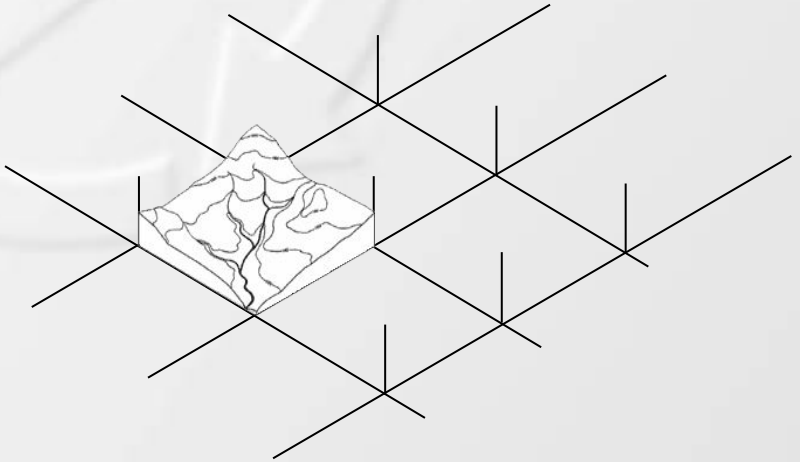


Применение: компрессия данных компьютерной томографии



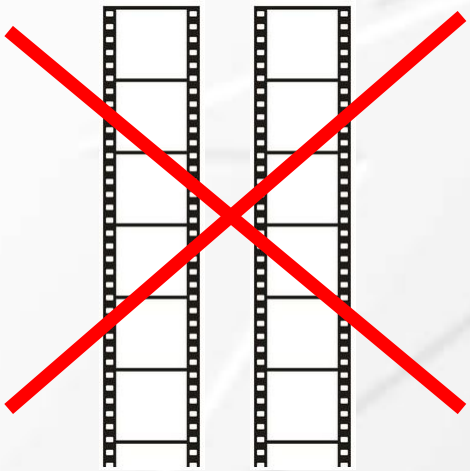
Параметры кодека:
Размер элемента 3D данных: 16x16x16
Нормализация данных: 3D DCT + зигзаг сканирование
Квантование: подбирается экспериментально под задачу
Вторичное сжатие: арифметическое кодирование

Применение: компрессия многомерных данных (рельефы земной поверхности)

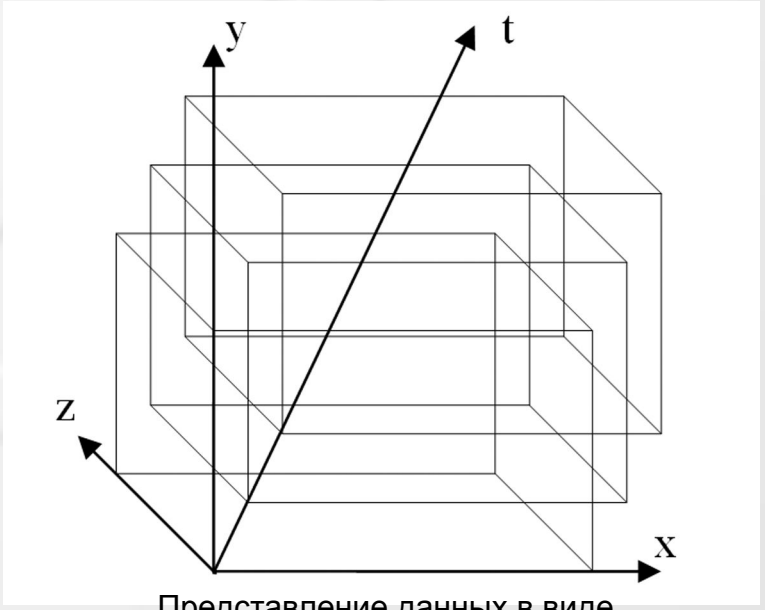


Параметры кодека:
Размер элемента 3D данных: 16x16x16, 8x8x8
Нормализация данных: 3D DCT + зигзаг сканирование, пирамидальное представление
Квантование: подбирается экспериментально под задачу
Вторичное сжатие: арифметическое кодирование, кодирование Хаффмана

Применение: представление реального трехмерного видео (True3D Vision)

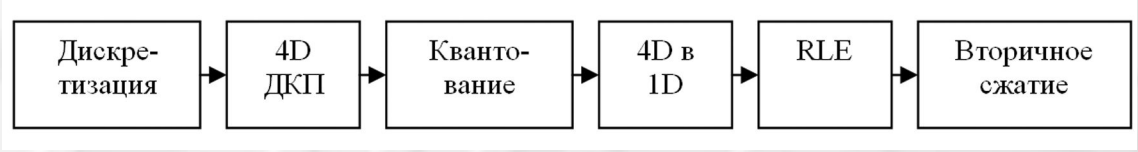


Стереопара с фиксированной точкой съемки

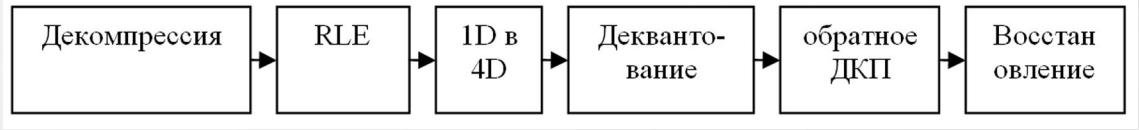


Представление данных в виде последовательности изменяющихся трехмерных пространств

Кодирование



Декодирование



Задача оптимизации энергопотребления при организации удаленного присутствия

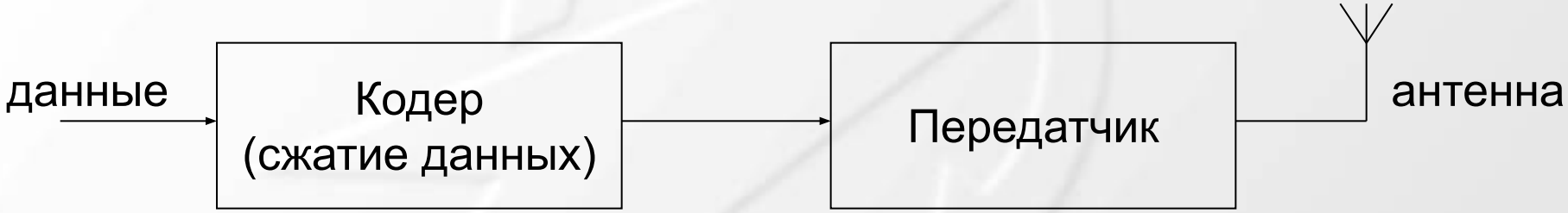
Автономный удаленный объект (ДПЛА)

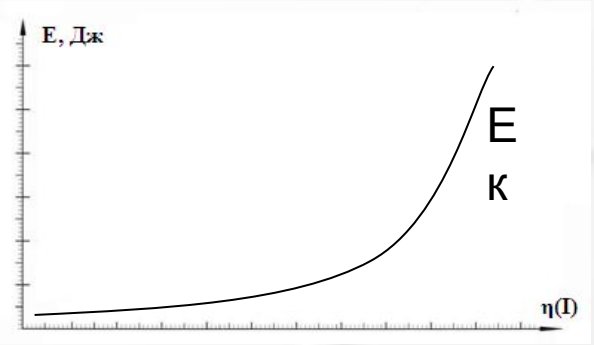
Пул каналов передачи данных

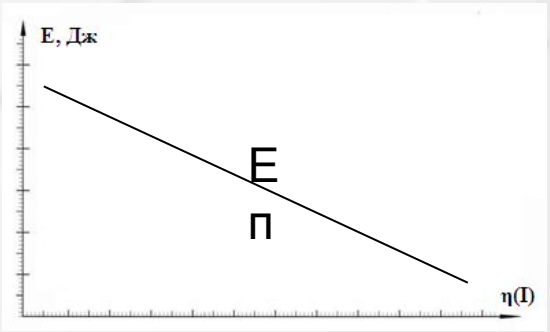
Стационарный объект

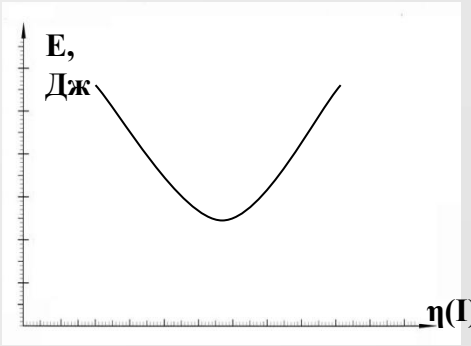
Цель – увеличение времени работы от автономного источника питания путем оптимизации канала передачи данных

Принцип энергоинформационной оптимизации







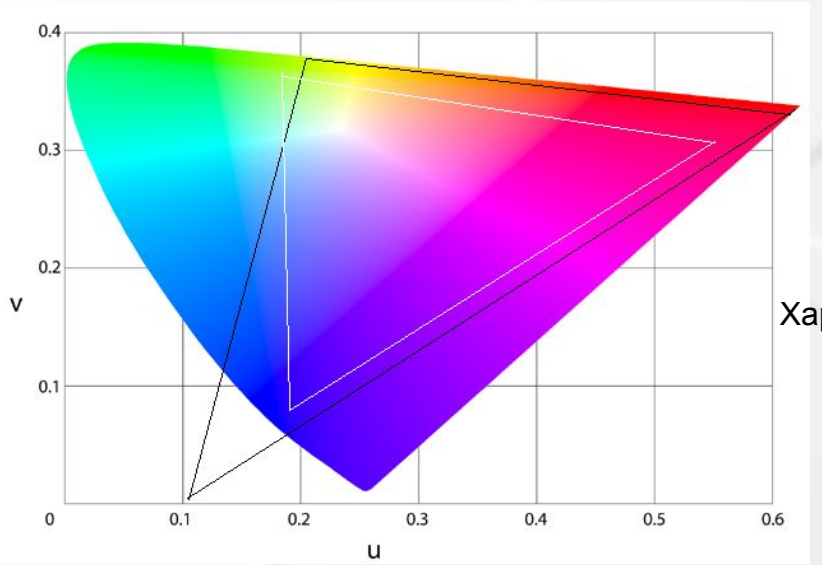


Общая энергия при передаче цифрового потока

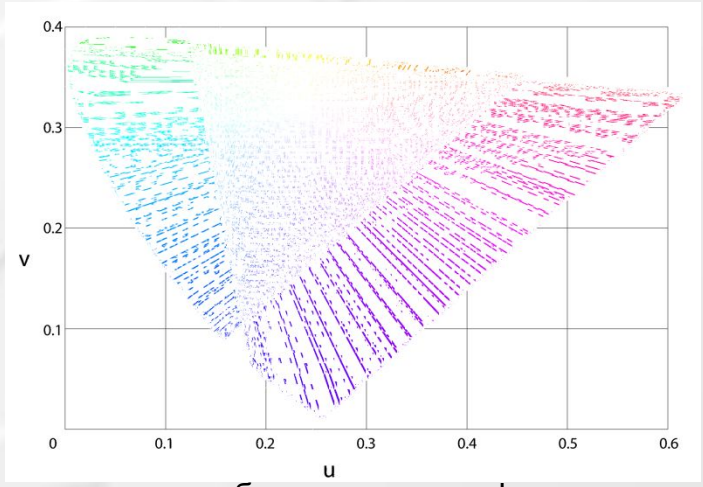
$$E = E_к + E_п$$

Ек – энергопотребление кодера;
Еп – энергопотребление передатчика;
η(I) – величина компрессии информационного сообщения *I*

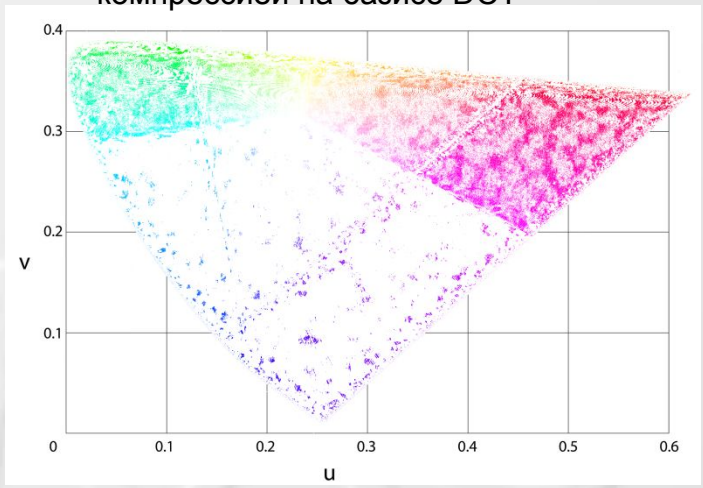
Критерий адекватности цифровых трактов передачи данных



Несоответствие цветовых диапазонов камеры (черная линия) и устройства отображения (белая линия).

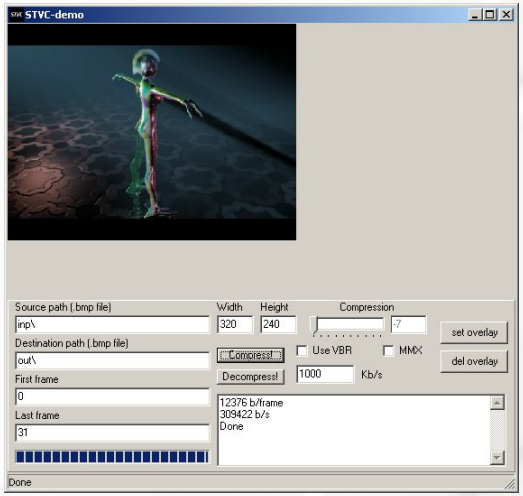


Характеристическое изображение для цифрового тракта с компрессией на базисе DCT



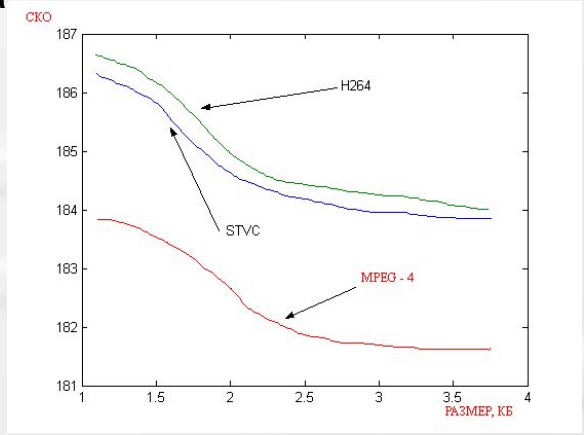
Характеристическое изображение для цифрового тракта с компрессией на базисе DWT

Реализация: программные продукты



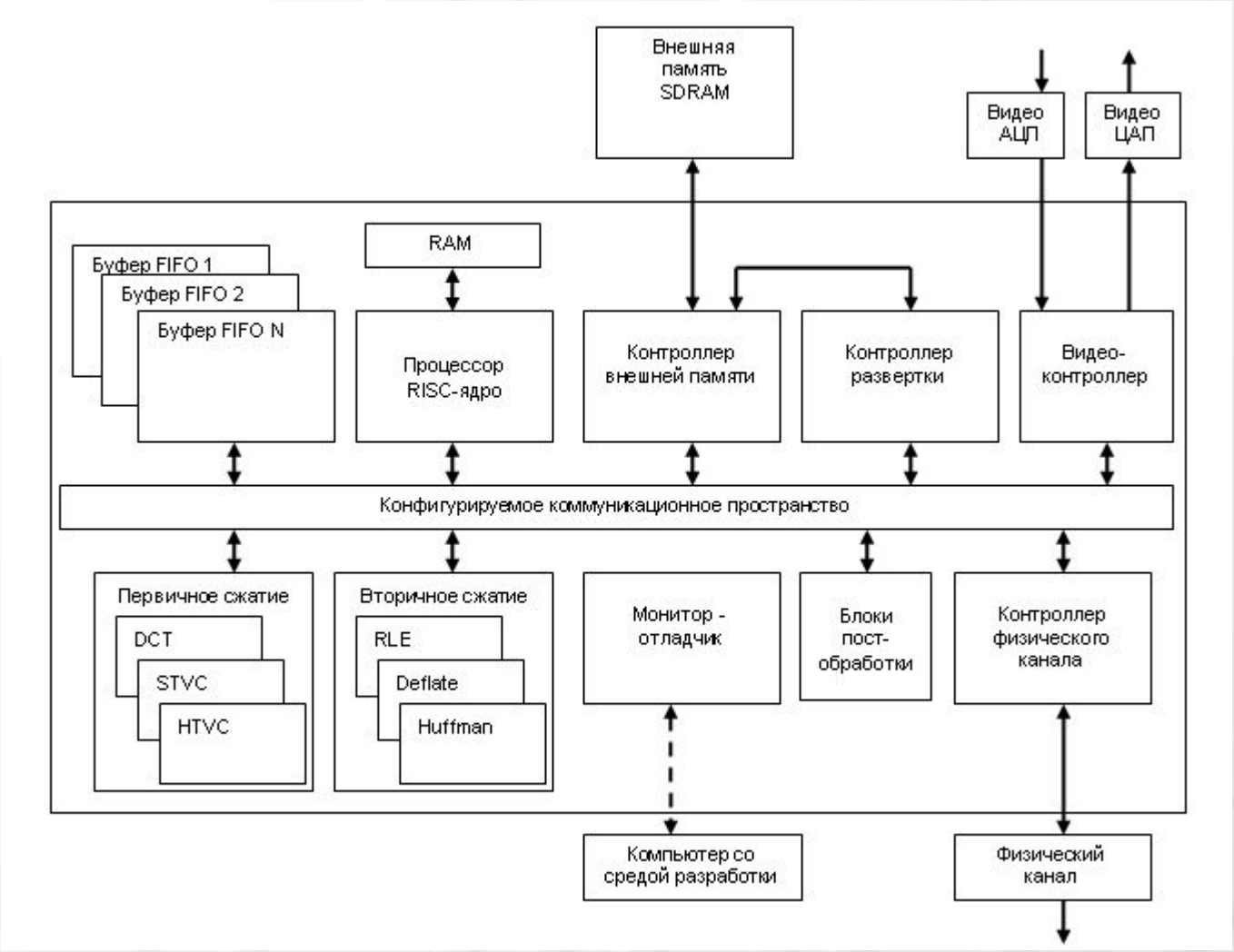
Референсная реализация кодера-декодера видеопотка

Программный декодер видеопотка (плейер)



Сравнение параметров видеокодеков

Структура универсальной цифровой платформы передачи видеоданных



Оценочная плата универсальной цифровой платформы

Экспериментальная летающая платформа на базе ДПЛА вертолетного типа

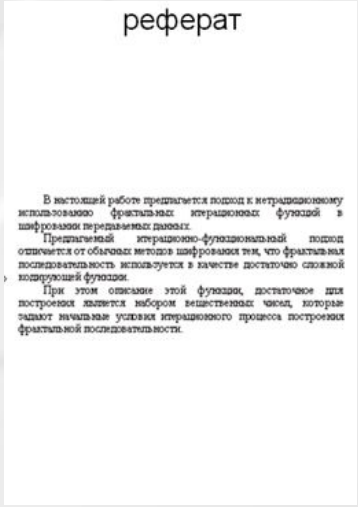
GPS

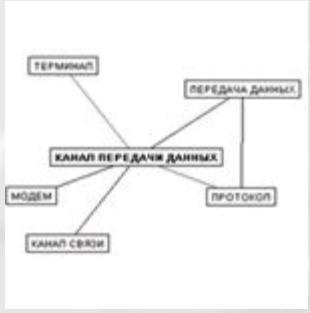
Камера

Коммуникационное оборудование

Оборудование телеуправления

Приложение к задачам обработки текстовых данных





Основные публикации

17 статей в журналах из перечня ВАК, 1 монография, 1 учебно-методическое пособие

- Кулешов С.В. Пространственно-временное представление, обработка и компрессия видеопотока. — "Информационно-измерительные и управляющие системы", №4, т.6, 2008. — С. 33-37.
- Александров В.В., Кулешов С.В. Этерификация и терминальные программы — "Информационно-измерительные и управляющие системы", №10, т.6, 2008. — С. 50-53.
- Кулешов С. В. Терминальные программы "цифровой" передачи и обработки данных, энергетическая и информационная эквивалентность. // "Информационно-измерительные и управляющие системы", №9, т.5, 2007. С. 10-15
- Кулешов С. В. Потенциальные свойства цифровых каналов передачи данных — Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 11, с. 16–19
- Кулешов С.В., Аксенов А.Ю., Зайцева А.А. О критерии адекватности цифровых трактов передачи данных — "Информационно-измерительные и управляющие системы", №4, т.7, 2009. — С. 75-77
- Александров В.В., Кулешов С.В. Цифровая программируемая технология управления робототехническими комплексами — "Мехатроника. Автоматизация. Управление" №2, 2011 — стр. 21 – 24
- Кулешов С.В. Реконфигурируемая коммуникационная платформа передачи радиолокационных данных. Вопросы радиоэлектроники. — Вып. 1., 2010. стр.173-177
- Кулешов С.В. Оптимизация энергоинформационной передачи данных. — "Информационно-измерительные и управляющие системы" №11, т.7, 2009. – С.16-21.

Основные результаты

- Предложена концепция и теоретические основы цифровой программируемой технологии построения инфокоммуникационных систем.
- Введено понятие цифрового информационного объекта и его свойств. На основе предложенного подхода показана независимость компонентов цифрового информационного объекта (канала, контейнера, контента).
- Предложен принцип сепарации представления цифрового контента на транспортный битовый поток и порождающую программу. Показана эквивалентность представления битового потока как в виде данных, так и в виде терминальной программы.
- Предложена архитектура цифрового коммуникационного канала с процессорными элементами. Сформулированы базовые свойства цифровых каналов с процессорными элементами и ограничения на возможности их применения.
- Введено понятие гибридного кодека как реконфигурируемого элемента в рамках технологии программируемых инфокоммуникационных систем. Предложена методология построения гибридных кодеков с заданными параметрами для компрессии видеоданных.
- Разработан метод, алгоритм, программы для 3D-представления видеоданных, унифицирующие анализ и обработку пространственных и временных параметров видеопоследовательности. Разработаны алгоритмы и программы для компрессии видеоданных с использованием такого представления.

Спасибо за внимание!