

2.5. Математическая модель декодера

В рамках изложенной выше концепции построения модели подсистемы передачи данных со сжатием (ПсПВДС), построение математической модели декодера, в отличие от построения модели кодера, будет проводиться с условием «замороженного» кодера (с фиксированными параметрами модели и входных данных), параметры модели цифрового канала (ЦКПД) также зафиксированы, а декодер идеально реализует алгоритм декодирования кода сжатого изображения. При таких условиях помимо искажений, вносимых кодером, источниками искажений будут ЦКПД и декодер. Поскольку декодер выполняет операцию преобразования кодов (восстановления исходной разрядности ВД), шумы ЦКПД целиком поглощаются декодером и трансформируются в собственные шумы декодера. При этом характер трансформации этих шумов может быть самым разным - от фильтрации до размножения []. При отсутствии шумов в ЦКПД (если пренебречь шумами цифровых вычислительных элементов) декодер не вносит искажений в ВД, поэтому оператор преобразования шумов ЦКПД будет основным и единственным в модели декодера. Построение модели этого оператора аналитическим путем хотя и возможно (поскольку алгоритм декодирования строго детерминирован), однако представляет достаточно трудоемкую задачу, требующую знания множества статистических характеристик всех предполагаемых для сжатия изображений, что, учитывая значительную их нестационарность, практически неосуществимо. Поэтому более целесообразным в рамках проводимого исследования было определено оценка этого оператора на основе статистического эксперимента.

Как было определено в первой главе, в качестве модели ЦКПД выбран бинарный симметричный канал без памяти $K(p_i)$, полностью характеризующийся вероятностью инвертирования бита данных p_i . В ходе статистического

эксперимента ЦКПД моделировался программным модулем, инвертирующим один бит данных на каждые $1/(8 p_{и})$ байт файла данных, обрабатываемых модулем. Для упрощения моделирования сжатые файлы, подаваемые на вход модели ЦКПД имели размер $1/(8 p_{и})$ байт. В частности, моделировался канал с вероятностью инвертирования бита данных $p_{и} = 10^{-4}$. Длина сжатых файлов при этом соответственно была приблизительно равна 1250 байт, а программный модуль модели ЦКПД генерировал инвертирование одного бита в коде сжатого файла. Для получения наиболее полного представления о характере возможных искажений, возникающих при декодировании искаженного сжатого кода адрес инвертированного бита генерировался не по случайному закону, а выбирался последовательно каждый бит данных, таким образом выборка (с целью получения полной группы событий, подчиненной равномерному закону вероятности инвертирования бита) составила соответственно 10000 возможных вариантов искаженных файлов. Результаты моделирования обрабатывались автоматически: изображение полученное декодированием неискаженного сжатого файла попиксельно сравнивалось с изображением, полученным из декодированного искаженного файла, для каждой итерации высчитывался процент искаженных пикселей.

В ходе проведенных исследований было установлено, что для исследуемых алгоритмов существует три основных варианта декодирования искаженного сжатого кода изображения:

- достоверное декодирование изображения (фильтрация ошибки);
- ошибочное декодирование части изображения (целое количество блоков размерностью $w \times w$);
- ошибочное декодирование всего изображения (невозможность декодирования).

На рис.2.5.1. в качестве иллюстрации приведены различные варианты, возникшие при декодировании искаженных файлов, сжатых алгоритмом JPEG-8: а) -

достоверно декодированное изображение; б) - искажен один блок 8×8 , в) - искажена средняя яркость части блоков, г) - недостоверно декодирована часть блоков. При декодировании изображений, сжатых по алгоритму WIC, кроме того, возникают ошибки циклического сдвига блоков изображения. Аналогичные результаты при исследовании помехоустойчивости сжатых кодов получено ранее в работе [].

Безусловно, часть из описанных искажений может быть устранена постобработкой (например искажение средней яркости и циклический сдвиг), однако в *рамках настоящей работы вопросы реконструкции изображений не рассматриваются*, и поэтому любое несоответствие кода яркости пикселя восстановленного изображения по отношению к коду яркости соответствующего пикселя достоверно декодированного изображения будет рассматриваться как недостоверное декодирование пикселя.

Как показали исследования, в процентном отношении описанные выше три варианта декодирования распределены значительно неравномерно. Так, для рассматриваемых алгоритмов, наиболее вероятными исходами декодирования являются либо достоверное декодирование, либо полностью недостоверное. Частичная потеря данных имеет место менее чем в одном проценте исходов. Подобный результат вполне объясним использованием в этих алгоритмах для энтропийного кодирования префиксных кодов (кодов без запятой) и алгоритмов арифметического кодирования. На рис.2.5.1.д показана круговая диаграмма, наглядно демонстрирующая полученные в ходе моделирования результаты. Поэтому в дальнейшем с практической точки зрения целесообразно пренебречь частичными потерями и принять приближенную одноальтернативную модель достоверное-недостоверное декодирование.

Поскольку при реализации конкретных подсистем сжатия с целью повышения помехоустойчивости предполагается сегментация исходного видеокadra на множество субкадров (сжимаемых независимо) меньшей размерности [], кадр,

состоящий из M -субкадров будет иметь блочную структуру и может терять в процессе декодирования целое количество m блоков ($m=0 \div M$). Поскольку искажение каждого субкадра является независимым событием, целесообразно воспользоваться Пуассоновской моделью закона распределения достоверного декодирования сжатого кадра. В этом случае вероятность достоверного декодирования не менее m -субкадров изображения $E(m)$, имеющего общий размер M -субкадров для описанного выше эксперимента будет целиком определяться вероятностью достоверного декодирования одного субкадра - p_w и подчиняться биномиальному закону распределения:

$$(2.5.1) E(m) = \sum_{l=0}^m \varepsilon_l, \text{ где}$$

$$\varepsilon_l = C_M^l p_w^l (1 - p_w)^{M-l}, \text{ где } C_M^l - \text{ биномиальный коэффициент,}$$

$$p_w = \frac{\text{(количество достоверно декодированных субкадров в полной группе событий)}}{\text{(количество субкадров в полной группе событий)}}.$$

Однако необходимо отметить, что оценка p_w , полученная для одного произвольного тест-изображения не будет справедлива для любого другого тест-изображения. Анализ результатов декодирования показал, что показатель p_w зависит от большого числа факторов. Во-первых, наиболее критичны для декодера искажения служебной части сжатого кода - при потере данных в ней как правило недостоверно декодируется все изображение, поэтому поскольку служебная часть сжатого кода как правило имеет фиксированную длину, важен относительный процент длины служебной части кода. В то же время потери декодирования при искажениях в информационной части в основном определяются методом статистического кодирования и опять же от относительной длины информационной части сжатого кода. Длина информационной части в свою очередь зависит, как было установлено в предыдущем разделе, от параметров алгоритма группового преобразования и от статистических характеристик сжимаемого изображения. И наконец, показатель p_w

зависит непосредственно от общей длины сжатого кода и параметров модели ЦКПД. Таким образом, в качестве показателя достоверности декодирования сжатого кода $\bar{\delta}$ целесообразно использовать условную вероятность достоверного декодирования одного субкадра p_w изображения f^* с заданными статистическими характеристиками $\mu(f^*)$ и $S(f^*)$, при заданных значениях параметров алгоритма сжатия $A(\vec{p}_A^*)$ параметрах модели ЦКПД $K(\vec{p}_K^*)$ и длине кода сжатого субкадра.

Поскольку длина кода сжатого субкадра $f \in \mathbf{F}$, (\mathbf{F} - множество изображений с заданными характеристиками $\mu^{\mathbf{F}}$ и $S^{\mathbf{F}}$) при фиксированных параметрах алгоритма сжатия и статистических характеристиках ВД достаточно точно описывается стохастической зависимостью (2.4.11), правомерно вместо нее использовать объем (длину в битах или байтах) субкадров изображения L^f , на которые делится исходный входной поток ВД. Таким образом, в качестве модели декодера (рис.2.5.2) можно использовать стохастический оператор, определяющий вероятность достоверного декодирования одного сжатого субкадра изображения вида (L^f входит в состав \vec{p}_K):

$$(2.5.2) \bar{\delta} \equiv p_w^F = \rho\{\mu^F, S^F, A(\vec{p}_A), K(\vec{p}_K)\}.$$

2.6. Математическая модель ПсПВДС. Комплекс показателей назначения ПсПВДС

На основе полученных выше моделей кодера и декодера, дальнейшее построение модели ПсПВДС возможно после построения математической модели показателя скорости передачи видеоданных по ЦКПД \hat{C}_{Π} (в дальнейшем - математической модели ЦКПД). Построение такой приближенной модели для рассматриваемого случая не представляет особого труда, поскольку скорость передачи видеоданных будет целиком определяться двумя параметрами: скоростью передачи двоичных данных по ЦКПД $C_{\text{ЦКПД}}$ и показателем результативности

кодирования \hat{n} . Если пренебречь служебной информацией, объем которой в передаваемых кадрах на порядки уступает объему непосредственно видеоданных, математическую модель ЦКПД можно представить в следующем виде:

$$(2.6.1.) \hat{C}_{\Pi} = \frac{C_{\text{КПД}} n_{\Pi}}{\hat{n}}, \text{ где } n_{\Pi} - \text{длина двоичного кода исходного пиксела.}$$

Таким образом, на основе полученных моделей кодера, декодера и ЦКПД нетрудно синтезировать математическую модель ПсПВДС, определяющую зависимость показателей назначения ПсПВДС от входных данных, условий функционирования и параметров модели. Вектор показателей назначения $\vec{X} = \langle \bar{\eta}, \bar{\delta}, \hat{C}_{\Pi} \rangle$ в ходе исследований был уточнен и трансформировался в четырехкомпонентный вектор:

$$(2.6.2) \vec{X} = \langle \overline{\text{ЭФРГ}}(i, j), \bar{\sigma}_{\text{БШ}}, p_w^F, \hat{C}_{\Pi} \rangle.$$

Также был уточнен вектор статистических характеристик входных видеоданных, оказывающих существенное влияние на показатели назначения ПсПВДС $\vec{D}_f = \langle \mu^F, S^F \rangle$, таким образом вектор параметров ПсПВД и условий функционирования имеет вид:

$$(2.6.3) \vec{U} = \langle A_j(\bar{p}_{\Lambda_j}), C_{\text{ЦКПД}}, K(\bar{p}_K), C_{\Pi}, n_{\Pi}, \mu^F, S^F \rangle.$$

Таким образом, математическую модель ПсПВДС в общем виде можно представить в схемы (рис.2.6.1), наглядно демонстрирующей экспериментально и аналитически оцениваемые зависимости показателей назначения от параметров и условий функционирования $\{A_j(\bar{p}_{\Lambda_j}), C_{\text{ЦКПД}}, K(\bar{p}_K)\}$ и характеристик входных данных $\{C_{\Pi}, n_{\Pi}, \mu^F, S^F\}$.

ВЫВОДЫ ПО II ГЛАВЕ

1. Для различных алгоритмов сжатия с преобразованием (WIC, JPEG, FIF) связь между распознаванием штриховой миры и вероятностью распознавания простых объектов ВВТ до различной степени подробности является значительно неоднозначной - таким образом, *вероятность распознавания штриховой миры нельзя применять в качестве собственного показателя степени искажений (погрешности сжатия) для сравнительной оценки эффективности сжатия различными алгоритмами.* Однако, для отдельно взятого алгоритма наблюдается монотонная зависимость между распознаванием штриховой миры и вероятностью распознавания простых объектов ВВТ - таким образом, *вероятность распознавания штриховой миры можно применять в качестве собственного показателя качества (погрешности сжатия) для сравнительной оценки эффективности сжатия одним алгоритмом при различных параметрах.*
2. Статистическая оценка вероятности опознавания простых объектов не является однозначной функцией от СКО и ОСШ сжатия для различных алгоритмов. Таким образом, *СКО и ОСШ погрешности сжатия не могут быть использованы в качестве показателей погрешности сжатия при оценке различных алгоритмов.* В то же время *наблюдается монотонная зависимость вероятности распознавания для отдельно взятого алгоритма, что позволяет использовать эти показатели в качестве показателей погрешности в рамках одного конкретного алгоритма.*
3. Обобщенная *аддитивно-шумовая модель* алгоритмов сжатия также *не является адекватной* вследствие выводов по п.2.

4. Наблюдается монотонная зависимость средней удельной плотности кодирования от ОСШ и СКО шума сжатия для каждого отдельно рассматриваемого из алгоритмов.
5. Рассматриваемые алгоритмы сжатия-восстановления видеоданных в строго математическом смысле не являются линейными пространственно инвариантными преобразованиями.
6. Для фиксированных параметров алгоритма сжатия $A(\bar{p} = const)$ плотность кодирования существенно зависит от статистических и контрастных характеристик сжимаемого изображения. Для рассматриваемого ограничения $A(\bar{p} = const)$ плотность кодирования с достаточной точностью описывается случайным гауссовским процессом с независимыми значениями. В качестве показателя, характеризующего средний контраст произвольного изображения f для предложенной модели целесообразно использовать параметр $\mu(f)$ аппроксимации экспоненциальным законом распределения плотности распределения модуля нормированного к средней яркости градиента изображения (2.4.8), а в качестве величины, характеризующей статистические свойства произвольного изображения f - показатель степени автокорреляции элементов изображения $S(f)$ (2.4.6). Таким образом, в качестве вектора статистических характеристик ВД целесообразно использовать двухкомпонентный $\vec{D}_f = \langle \mu(f), S(f) \rangle$.
7. В качестве показателей точности передачи ВД (погрешности сжатия) целесообразно использовать параметры линеаризованной модели оператора преобразования ВД кодером - $\vec{\eta} = \langle \bar{\sigma}_{\text{БШ}}, \overline{\text{ЭСФРТ}} \rangle$.
8. В качестве показателя достоверности передачи ВД $\vec{\delta}$ целесообразно использовать вероятность достоверного декодирования одного блока группового преобразования сжатого изображения p_w^F .

9. Скорость передачи видеоданных является случайной величиной и равна частному скорости передачи двоичных данных по ЦКПД $S_{\text{цкпд}}$ и показателя результативности кодирования \hat{n} .