

УДК 621.396

## Использование модели зрительной системы человека для оптимизации параметров передачи изображения<sup>1</sup>

Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю.

*Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)*  
ул. Авиамоторная, 8а, Москва, 111024, Российская Федерация  
asykka@bk.ru, asa@mtuci.ru

Получено: 20 июля 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

**Аннотация:** В современном мире передача изображения, в том числе передача телевизионного и видеосигнала осуществляется с использованием предварительной и восстанавливающей коррекцией по закону, который был обусловлен применением отображающих устройств на электронно-лучевых трубках. Указанный закон отличается от закона зависимости порога заметности изменения зрительного стимула от его величины, но продолжает использоваться по соображениям совместимости. Поэтому в работе вместо линеаризации по ощущениям шкалы квантования телевизионного сигнала предлагается оптимизировать выбор кодовых комбинаций для передачи изображения. Такой подход может быть эффективен в телевизионных системах без сжатия видеoinформации с потерями.

**Ключевые слова:** закон Вебера — Фехнера, гамма-коррекция, передаточная характеристика, эффективное кодирование, матрица рисков, матрица вероятностей.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Использование модели зрительной системы человека для оптимизации параметров передачи изображения // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 4. С. 489—502.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Аджемов, А. С. Использование модели зрительной системы человека для оптимизации параметров передачи изображения / А. С. Аджемов, А. Ю. Кудряшова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 4. — С. 489—502.

---

<sup>1</sup> Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

# Using the human visual system model to optimize image transmission parameters

A. S. Adzhemov and A. Y. Kudryashova

*Moscow Technical University of Communications and Informatics  
8a Aviamotornaya Str., Moscow, 111024, Russian Federation  
asykka@bk.ru, asa@mtuci.ru*

Received: July 20, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

**Abstract:** *In the modern world, image transmission, including television and video, is carried out using preliminary and restoring correction according to the law, which was due to the use of imaging devices on cathode ray tubes. This law differs from the law of dependence of the threshold of visibility of a change in a visual stimulus on its value, but continues to be used for compatibility reasons. Therefore, instead of linearizing the sensations of the quantization scale of a television signal, it is proposed to optimize the choice of code combinations for image transmission. Such an approach can be effective in television systems without lossy video compression.*

**Keywords:** *Weber–Fechner law, gamma correction, transfer characteristic, effective coding, risk matrix, probability matrix.*

**For citation (IEEE):** A. S. Adzhemov and A. Y. Kudryashova, “Using the human visual system model to optimize image transmission parameters,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2019, vol. 2, no. 4, pp. 489—502. (In Russ.).

## 1. Введение

Учитывая то, что закон передачи изображения в телевизионных системах через компенсирующую гамма-коррекцию отличается от закона зависимости порога заметности изменения зрительного стимула согласно восприятию света зрительной системой, но продолжает использоваться по соображениям совместимости с ЭЛТ, предлагается найти новый способ кодирования сигнала для передачи изображения. Данный способ может быть применен к передаче сигнала по закону Вебера — Фехнера, что приведет к максимизации точного восприятия света человеческим глазом.

## 2. Основная часть

Одним из важных параметров при аналогово-цифровом преобразовании (АЦП) является квантование. Как известно, число уровней кванто-

вания зависит от количества символов в кодовой комбинации, которая соответствует каждому уровню, и определяется по формуле:

$$N = 2^n \quad (1)$$

где  $n$  — число символов в кодовой комбинации.

Если мы будем говорить о передаче изображения, то количество уровней квантования необходимо выбирать таким образом, чтобы влияние квантования на изображение было незаметным для получателя. Существует несколько закономерностей качественной передачи изображения, подвергнутому квантованию, которые были выявлены достаточно давно. Придерживаясь их, можно проквантовать изображение так, чтобы человеческий глаз не заметил потери качества изображения [1].

Рассмотрим закономерности квантования изображения (при передаче информации получателю):

1) На мелкоструктурных частях изображения искажения, создаваемые квантованием, менее заметны для человеческого глаза, чем на крупных (почти незаметны).

2) На менее ярких участках изображения (близких к темному) выбирается минимальный шаг квантования, в отличие от областей, близких к белому цвету.

Все это обусловлено свойствами зрительного аппарата человека. Именно поэтому при передаче телевизионного сигнала используют неравномерное квантование. Его реализация гораздо сложнее, чем реализация равномерного квантования, но оно позволяет обеспечить оптимальную форму передаточной характеристики и уменьшает влияние ошибок квантования при малых уровнях яркости изображения. Заметим, что для его реализации вместо переменного шага квантования выполняется предварительная гамма-коррекция (нелинейное преобразование видеосигнала) с последующей обратной коррекцией уровней сигнала на приемной стороне [2].

Указанная коррекция стала применяться в системах телевидения с первых вариантов реализации электронного телевидения по причине нелинейности передаточной характеристики сигнал — свет электронно-лучевых приемных трубок — вследствие необходимости упрощения приемных телевизионных устройств коррекцию указанной нелинейности было принято реализовывать на передающей стороне в предположении, что все отображающие устройства реализованы на электронно-лучевых трубках и имеют одинаковые характеристики преобразования сигнал — свет. Из соображений совместимости в подавляющем большинстве телевизион-

ных и компьютерных систем принято, что нелинейность характеристики преобразования сигнал-свет соответствует закону:

$$y(x) = x^{2.4} \quad (2)$$

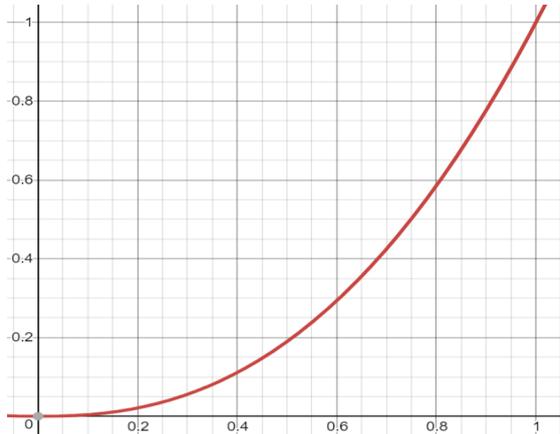


Рис. 1. График передачи сигнала (лучевая трубка).

Fig. 1. Schedule of signal transmission (beam tube)

Гамма-коррекция компенсирует данный процесс, так как ее функция близка к обратной для закона передачи. Передаточная характеристика гамма-корректора описывается соотношением:

$$\frac{U_{вых}}{U_{выхт}} = \left( \frac{U_{вх}}{U_{вхт}} \right)^\gamma, \quad (3)$$

где  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  — напряжения сигнала на входе и выходе гамма-корректора;  $U_{вхт}$  и  $U_{выхт}$  — максимальные значения диапазонов напряжений сигналов на входе и выходе гамма-корректора.

Соответственно,  $\gamma = 0,42 - 0,48$ . На рисунке 2 представлен график передаточной характеристики для случая  $\gamma = 0,45$ .

Запишем функцию отображения передаточной функции данного используемого случая:

$$y(x) = x^{0.45} \quad (4)$$

В системах цифрового телевидения обычно применяется равномерное квантование сигналов, прошедших гамма-коррекцию. Каждый уровень кодируется кодовой комбинацией из 8 символов (следовательно, имеется 256 уровней квантования) от 00000000 до 11111111 в порядке их возрастания при использовании всего динамического диапазона. При

ограниченном динамическом диапазоне для передачи сигнала яркости используются только уровни квантования от 16 (00010000) до 235 (11101011). При этих условиях шум квантования на изображении практически незаметен. Такой способ квантования описан в рекомендации ITU-RBT 601[10] и более поздних [3, 4].

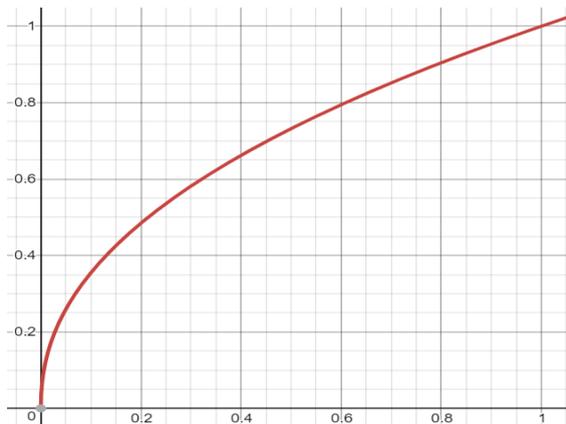


Рис. 2. График передаточной характеристики при  $\gamma = 0,45$ .

Fig. 2. The graph of the transfer characteristics at  $\gamma = 0,45$

Однако существует и другая закономерность восприятия качества изображения человеком — так называемый закон Вебера — Фехнера. Закон гласит, что интенсивность ощущения чего-либо прямо пропорциональна логарифму интенсивности раздражителя [14]. В математическом представлении закон можно описать через формулу нахождения интенсивности восприятия:

$$y_p = \frac{k \cdot \ln S}{S_0}, \quad (5)$$

где  $S$  — значение интенсивности раздражителя.  $S_0$  — нижнее граничное значение интенсивности раздражителя: если  $S < S_0$ , то раздражитель совсем не ощущается,  $k$  — константа, зависящая от субъекта ощущения.

Доказано, что существующей интенсивности раздражения (или восприятия) требуется достижение некоторого конкретного уровня, чтобы человек имел возможность почувствовать его воздействие. Такое слабое воздействие, которое дает малозаметное ощущение, называют нижним порогом ощущения.

Существует и такой уровень воздействия, после увеличения которого ощущения уже не способны усиливаться. В этом случае речь идет о

верхнем пороге ощущения. Любого рода воздействие человек ощущает исключительно на интервале между этими двумя порогами.

Если говорить о восприятии изображения, то можно привести пример с количеством лампочек в приборе освещения, скажем, люстре. Если в люстре светит 10 лампочек, и мы прибавим к ним еще 10, то восприятие света почти не изменится, глаз человека не увидит разницы в яркости. Однако если в люстре светила только 1 лампочка и мы также добавим к ней еще 1 лампочку, то разница свечения станет заметнее в разы.

Величина, на которую раздражение увеличивается, принято называть порогом различения. Отсюда следует, что раздражение со слишком малой различительной интенсивностью является допороговым, а со слишком сильной — запороговым. При этом уровень этих показателей зависит и от чувствительности в отношении различения — если чувствительность к различению выше, то порог различения, соответственно, ниже [5].

Зависимость ощущения от силы раздражителя для многих анализаторов представляет собой функцию близкую к логарифмической; это представлено на рисунке 2.

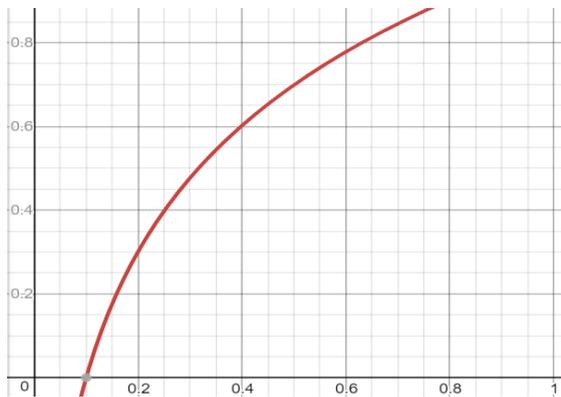


Рис. 3. Графическое отображение закона Вебера — Фехнера.

Fig. 3. Weber–Fechner law

Запишем функцию закона Вебера-Фехнера:

$$y_p(x) = \ln x \quad (6)$$

Видно, что ход кривых графиков рис. 3 и 2 различен, хотя их характер весьма схож, что является причиной, по которой гамма-коррекция в современных системах телевидения сохранена в изначальном виде.

Следует отметить, что пользователь имеет возможность корректировать яркость и контраст контролируемого изображения на основе личных

предпочтений или инструментальных измерений. Такие преобразования соответствуют смещению кривой рис. 3 относительно кривой рис. 2. Введем в выражение (6) соответствующие параметры.

$$y_p(x) = a \ln(x + b), \quad (7)$$

где  $a$  соответствует изменению контраста, а  $b$  — изменению яркости изображения. Оптимальные условия видеоконтроля по критерию восприятия максимума градаций яркости изображения соответствуют максимально возможному приближению функций (4) и (6), что можно представить в виде оптимизационной задачи минимизации их СКО:

$$\arg \min_{a,b} \int_0^1 (a \ln(x) + b - x^{0.45})^2 dx \quad (8)$$

Эта задача может быть решена численно. В результате получаем  $a=0,21$ ,  $b=0.9$  с погрешностью 0,001, достаточность которой определяется 8-битным представлением данных и способностью человека различать не более 100 градаций (с учетом их неравномерности). Графически результат оптимизации показан на рис. 4.

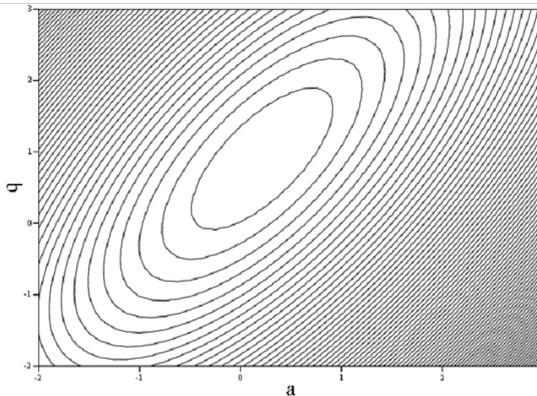


Рис. 4. Поиск оптимальных параметров  $a$  и  $b$ .  
 Fig. 4. Search for the optimal parameters  $a$  and  $b$

На рисунке 5 показаны графики зависимостей (4) (сплошная линия) и (7) с оптимизированными параметрами (пунктир).

Рассматривая закон Вебера — Фехнера, применяемый при передаче изображения, исследуем особенности различных вариантов кодирования уровней квантования. Как показано в [1, 2] возможно  $(2^n)!$  различных вариантов кодирования, при которых уровни кодируются не взвешенным кодом, соответствующим двоичному представлению номера уровня кванто-

вания в порядке их возрастания, а любым другим способом установления взаимно однозначного соответствия уровня квантования и определенной двоичной кодовой комбинации. Из [3, 4] следует, что при определенных условиях «правильный» выбор способа кодирования позволяет заметно уменьшить влияние помех на качество восстанавливаемого сигнала [6, 7].

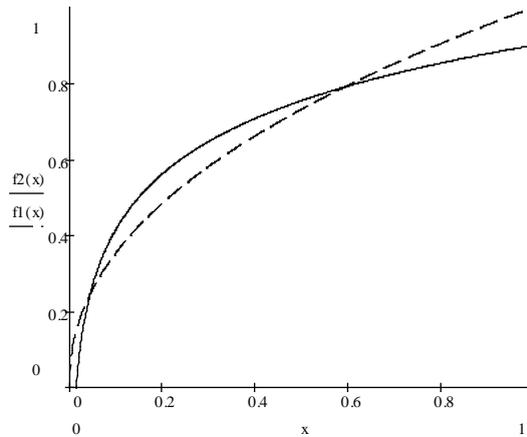


Рис. 5. К сравнению гамма-коррекции и закона Вебера — Фехнера.

Fig. 5. Comparison of gamma correction and the Weber – Fechner law

Для поиска такого варианта с точной количественной оценкой возможного выигрыша воспользуемся следующим алгоритмом:

1) Составить матрицу рисков для квантования по 256 уровням. В результате будут определены наиболее «ценные» элементы сообщения, неверный прием которых может привести к серьезным искажениям исходного сигнала, а также менее «ценные», на сохранность которых можно обратить меньшее внимание. Например, «стоимость» синхросигнала будет выше, чем стоимость одного отсчета [8].

Матрица рисков будет иметь вид:

$$R = \left\{ \begin{array}{ccc} r_{0,0} & \cdots & r_{0,255} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{255,0} & \cdots & r_{255,255} \end{array} \right\}, \quad (9)$$

где элемент  $r_{i,j}$  будет принимать значение риска в том случае, если вместо  $i$ -го значения было принято  $j$ -е. При этом заметим, что на главной диагонали матрицы значения будут нулевые, так как риск при получении значения именно переданного элемента — нулевой.

В телевизионных системах, как было сказано выше, используется ограниченный динамический диапазон значений. Уровни 0 и 255 используются для синхронизации. Будем считать, что риск ошибки, приводящей к такому уровню сигнала, максимален. В условиях оптимально настроенного, как показано выше, видеоконтрольного устройства уровни ниже черного и выше белого, находящиеся в резервных зонах, отображаются, соответственно, как черный и белый, что вносит нелинейность в функцию риска. Принимая, что величина шума квантования в гамма-скорректированном сигнале линейна по восприятию, функция стоимости будет иметь вид:

$$S(x, \Delta x) = \begin{cases} 1, & x + \Delta x \geq 255 \\ \frac{|\Delta x|}{255}, & x + \Delta x \geq 16 \wedge x + \Delta x \leq 235 \\ \frac{235 - x}{255}, & x + \Delta x > 235 \wedge x + \Delta x < 255 \\ \frac{x - 16}{255}, & x + \Delta x < 16 \wedge x + \Delta x > 0 \\ 1, & x + \Delta x \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

где  $x$  — номинальное (переданное) значение яркости, а  $\Delta x$  — ошибка. Для вычисления матрицы стоимости следует перейти к функции  $S1(x, y) = S(x, \Delta x - x)$ , где  $y$  — полученное значение яркости. Визуализация матрицы стоимости показана на рис. 6. Сама матрица здесь не приводится ввиду ее размера.

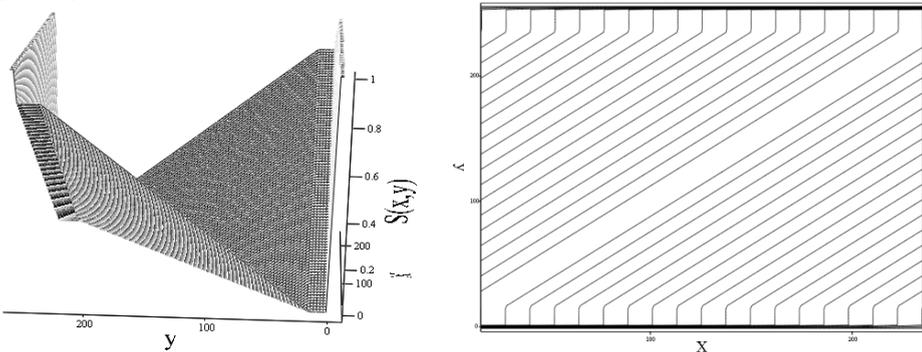


Рис. 6. Визуализация матрицы стоимости в виде 3d графика и линий уровней.

Fig. 6. Visualization of the cost matrix in the form of 3d graphs and level lines

При построении матрицы функции стоимости было сделано предположение, что выполняется квантование с шумом, восприятие которого ли-

нейно (ощущение шума не зависит от уровня сигнала). Выше показано, что при использовании стандартной гамма-коррекции это не выполняется в точности — в области низких значений уровня сигнала яркости шумы квантования несколько заметнее, чем в области высоких значений [9]. Это можно учесть при построении функции стоимости, взвешивая ее значения на отношение функций (7) и (4):

$$S_p(x, \Delta x) = \begin{cases} 1, & x + \Delta x \geq 255 \\ \frac{|\Delta x|}{255} \cdot \frac{y_p(x/255)}{y(x/255)}, & x + \Delta x \geq 16 \wedge x + \Delta x \leq 235 \\ \frac{235 - x}{255} \cdot \frac{y_p(x/255)}{y(x/255)}, & x + \Delta x > 235 \wedge x + \Delta x < 255 \\ \frac{x - 16}{255} \cdot \frac{y_p(x/255)}{y(x/255)}, & x + \Delta x < 16 \wedge x + \Delta x > 0 \\ 1, & x + \Delta x \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Результаты визуализации (11) показаны на рисунке 7.

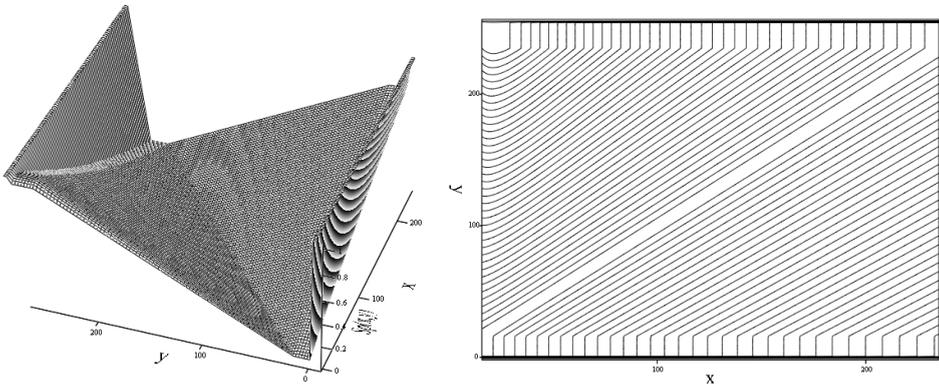


Рис. 7. Визуализация матрицы стоимости, учитывающей закон Вебера — Фехнера в виде 3d графика и линий уровней.

Fig. 7. Visualization of the cost matrix, taking into account the law of Weber–Fechner in the form of 3d graphics and level lines

По линиям уровней можно видеть, что максимальные отличия графиков рис. 5 и рис. 6 локализованы в области максимальной стоимости (максимальной разности принятых-переданных значений). Кроме того, следует отметить, что стоимость ошибки несколько снижается для больших яркостей, поскольку при квантовании с использованием  $\gamma=0,45$

разрешающая способность квантования, как видно из рис. 5, несколько избыточна.

2) Учтем, что каждый риск должен возникать с какой-то вероятностью. Для удобства отражения вероятностей появления каждого риска введем матрицу вероятностей. Будем учитывать, что сумма вероятностей в каждой строке матрицы должна быть равна единице [10].

В общем случае матрица вероятностей возникновения рисков искажений имеет вид:

$$P = \begin{Bmatrix} P_{0,0} & \dots & P_{0,255} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{255,0} & \dots & P_{255,255} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

3) Также необходимо учесть вероятность появления элемента в канале передачи. Для записи этих вероятностей используем вектор вероятностей появления значения сигнала в канале [11]. Вектор для квантования по 256-ти уровням выглядит как:

$$P_c = \begin{Bmatrix} P_0 \\ \dots \\ P_{255} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

4) После введения всех характеристик кодирования можно вычислить коэффициент рисков искажений (формула указана для 256-ти уровней квантования):

$$K = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} (r_{i,j} \cdot p_{i,j}) \cdot P_i \quad (14)$$

Заметим, что согласно формуле, коэффициент рисков равен математическому ожиданию величины риска [12].

5) Вычислим дисперсию величины риска варианта кодирования. Формула дисперсии имеет вид:

$$D(R) = M(R^2) - (M(R))^2 \quad (15)$$

где  $M(R)$  — математическое ожидание величины риска.

Ранее было отмечено, что  $M(R) = K$ , значит формулу можно представить в виде:

$$D(R) = M(R^2) - K^2 \quad (16)$$

Формула математического ожидания квадрата величины риска:

$$M(R^2) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n ((r_{i,j})^2 \cdot P_{i,j}) \cdot P_i \quad (17)$$

Если уровни квантования кодировать другим способом, то значения дисперсии будут меняться [13].

Всего существует  $(2^n)!$  вариантов кодирования, где  $n$  — количество символов в кодовой комбинации. Например, в рассматриваемом случае существует  $(2^8)! = 256!$  вариантов кодирования. Это число очень большое для ручных расчетов, однако при автоматизации расчетов «наилучший» вариант кодирования найти достаточно легко [14].

### 3. Заключение

Таким образом, в результате работы был предложен алгоритм выбора варианта кодирования при передаче изображения, исходя из заданных входных характеристик (вероятностей передачи тех или иных кодовых комбинаций и рисков их ошибочной передачи). В работе вместо линеаризации по ощущениям шкалы квантования телевизионного сигнала предлагается оптимизировать выбор кодовых комбинаций для передачи изображения по данному алгоритму.

Одним из возможных дальнейших направлений работы является учет наличия нескольких каналов передачи видеoinформации, например, трех для цветного телевидения или большего количества для спектрально-анализных систем. Даже для первого случая при передаче сигналов применяется несколько цветовых моделей, например, *RGB* или *YCrCb*. При этом, с одной стороны, в каналах *R*, *G*, и *B* применяется не являющаяся оптимальной с позиции минимизации числа уровней квантования при визуальном контроле изображения гамма-коррекция, а с другой стороны, известно, что указанные модели не являются равноконтрастными, то есть, изменение, например, цветового тона или насыщенности на определенную величину будет в разной степени заметно в зависимости от выбора начальных значений координат выбранного цвета. Изложенное дает предпосылки к оптимизации способов кодирования таких сигналов, однако и число вариантов кодирования резко возрастает, например, для цветного изображения число вариантов кодирования составляет уже  $2563!$ , что без определенной предварительной оптимизации делает задачу выбора оптимального набора кодовых комбинаций не решаемой в разумные сроки современными вычислительными средствами.

### Список литературы

1. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Особенности оценки качества передачи сигналов в различных метрических пространствах // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2017. Т. 17, № 4. С. 886—888.
2. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. About features of evaluation of the quality of generation and signal processing at stage transformations in wiring and optical communication systems // *IEEE International Scientific Conference Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow, 2018. Pp.1—4.
3. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Features rate estimation options binary codewords with the digitalization of the signal // *IEEE International Scientific Conference Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*. Minsk, 2018. Pp. 1—5.
4. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Building an Algorithm for Estimating the Effective Coding of a Source when Converting Signals in Various Metric Spaces // *IEEE Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. S.-Petersburg, 2018. Pp. 1—4.
5. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Об особенностях оценки качества преобразования сигналов при последовательных преобразованиях в различных метрических пространствах // *Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества»*. 2018. С. 211—213.
6. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю. Особенности оценки мощности множества вариантов выбора двоичных кодовых комбинаций при цифровизации сигнала // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. 2018. Т. 9, № 1. С. 5—8.
7. Кудряшова А. Ю. Особенности оценки кодирования при различных конфигурациях пространства источника // *DSPA : Вопросы применения цифровой обработки сигналов*, 2018. Том 8, № 3. С. 228—232.
8. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y., Application of Weber-Fechner Law in Image Transmission in the Field of Onboard Communications // *IEEE International Scientific Conference Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (ON BOARD 2019)*. Moscow, 2019. Pp. 1—6.
9. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Evaluation program of an efficient source coding algorithm under the condition of converting metric spaces // *IEEE Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. S.-Petersburg, 2019. Pp. 1—5.
10. Аджемов А. С., Кудряшова А. Ю., Долгопятова А. В. Построение эффективного алгоритма оценки кодирования источника при преобразовании метрических пространств // *Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества»*. 2019. С. 195—198.
11. Fenchuk M. M., Sineva I. S., Bott A. V. Preliminary genetic-like coding of random and deterministic message source's structures // *T-comm : Telecommunications and Transport*. 2016. Vol. 10, No. 10. Pp. 60—65.
12. Баталов А. Э., Синева И. С. Алгоритмы генетического кодирования при различных конфигурациях пространства источника // *T-COMM : телекоммуникации и транспорт*. 2015. Т. 9, № 7. С. 53—59.
13. Фенчук М. М., Синева И. С. Оптимизация алгоритма генетического кодирования для пространств произвольных размерностей // *T-COMM: телекоммуникации и транспорт*. 2015. Т. 9, № 7. С. 74—79.

14. Adzhemov A. S., Kudryashova A. Y. Model of Effective Color Image Coding Taking into Account the Peculiarities of Colorimetry System // IEEE International Scientific Conference Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Yaroslavl, 2019. Pp. 1—4.

### **Информация об авторах**

**Аджемов Артем Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кафедры общей теории связи Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-1616-323X.

**Кудряшова Анастасия Юрьевна**, аспирант, ассистент кафедры общей теории связи Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), г. Москва, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-3673-7667.

### **Information about the authors**

**Artem S. Adzhemov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the General Theory of Communications of the Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-1616-323X.

**Anastasiya Y. Kudryashova**, graduate student, assistant at the Department of General Theory of Communications, Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russian Federation. ORCID 0000-0002-3673-7667.