

**Н. О. Ефимов**, аспирант, e-mail: n.o.efimov@gmail.com,  
**Е. Г. Жилияков**, д-р техн. наук, проф., zhilyakov@bsu.edu.ru,  
 Белгородский государственный национальный исследовательский университет

## Распознавание фрагментов изображений рукописного текста. Характерные частотные интервалы

*Исследование существующих методов распознавания изображений текста позволяет говорить о том, что в общем случае задача решена только для изображений печатного текста. В случае рукописного текста каждое решение является индивидуальным и нередко требует многочасового обучения либо вмешательства оператора. В статье предложена новая решающая процедура обнаружения идентичных фрагментов текста по заданному образцу, реагирующая на различия нормированных трансформант Фурье в заданных частотных интервалах. Исследована возможность выделения характерных для заданного символа частотных интервалов, использование которых может существенно уменьшить число признаков, необходимых для описания фрагмента.*

**Ключевые слова:** обработка изображений, распознавание текстовых и рукописных изображений, субполосный метод, характерные частотные интервалы, решающая функция, мера близости, трансформанты Фурье

К настоящему времени накопилось множество цифровых изображений текста: сканированные книги, статьи, журналы, документы, как офисные, так и персональные (например, изображения паспорта, ИНН и др.). На многих интернет-ресурсах во избежание копирования и плагиата различного рода документов (например, дипломных и диссертационных работ) интересующая пользователя информация представляется в формате изображений. Однако обработка информации, представленной в подобной форме, затруднена невозможностью осуществить такие операции, как поиск по тексту, обнаружение и выделение интересующих фрагментов.

Разработанный подход позволяет осуществлять поиск интересующих фрагментов на изображениях текста (в том числе и рукописного). Так, можно выделить одно слово на изображении и осуществить поиск этого слова по всему документу, не изменяя формат файла. В случае цифрового документооборота можно найти все документы, подписанные одним и тем же человеком. Также представленный подход позволяет искать на изображениях заранее заданные слова для установления его содержания (например, для обнаружения пропаганды терроризма, наркотиков и т.д.). Предлагаемый метод прецедентного распознавания фрагментов изображений основан на использовании субинтервальных методов в частотной области [1, 2].

В общем случае системы распознавания имеют следующую структуру. Входные данные, подлежащие распознаванию, подаются на вход системы и подвергаются предобработке в целях их преобразования в необходимый для следующего этапа вид или для выделения из них необходимых характерных признаков. Далее на этапе принятия решения над обработанным массивом данных проводится ряд вычислений, и на основе их результатов формируется ответ, содержащий ожидаемые от системы сведения о входных данных. Содержание входных и выходных данных определяется назначением системы.

Цифровое изображение можно определить как двумерную функцию  $f_{ik}$ , где  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  $k = 1, 2, \dots, N$  — координаты в пространстве (конкретно на плоскости), а значение  $f$  в любой точке, задаваемой парой координат, называется интенсивностью изображения в этой точке.

Частотным представлением функции  $f_{ik}$  называется следующее выражение [3]:

$$f_{ik} = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N F(u, v) e^{ju(i-1)} e^{jv(k-1)}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, N,$$

где  $j$  — мнимая единица ( $j^2 = -1$ ), аргументы  $u$  и  $v$  — пространственные частоты, отражающие периодичность (цикличность) изменений исходной функции  $f_{ik}$  с изменением аргументов  $i$  и  $k$ .

Частотной областью называется координатная система, задающая соответствие между аргументами  $F(u, v)$  и частотными переменными  $u$  и  $v$  [4, 5].

Прямоугольную область размера  $M \times N$ , задаваемую при  $u = 0, 1, 2, \dots, M - 1$  и  $v = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ , принято называть частотным прямоугольником. Частотный прямоугольник имеет те же размеры, что и исходное изображение.

Так как изображение является функцией не времени, а координаты, используется термин "пространственные частоты" (волновые числа), который подразумевается под словом "частота" далее по тексту.

В качестве весовой функции  $F(u, v)$  можно использовать трансформанту Фурье:

$$F(u, v) = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N f_{ik} e^{-ju(i-1)} e^{-jv(k-1)}, \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  $k = 1, 2, \dots, N$ .

На основе равенства Парсевала [5] энергию изображения можно представить в виде суммы:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N f_{ik}^2 = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |F(u, v)|^2 dudv = \sum_{r=1}^{R_1} \sum_{m=1}^{R_2} P_{\Omega_r, m}, \quad (3)$$

где значение доли энергии  $P_{\Omega_r, m}$  двумерного сигнала  $f_{i, k}$  в двумерной частотной области  $\Omega$  равно

$$P_{\Omega_r, m} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{(u, v) \in \Omega} |F(u, v)|^2 dudv, \quad (4)$$

а интервалы  $\Omega_{r_1 r_2}$  определяют разбиение частотной области на интервалы:

$$\begin{aligned} \Omega_{r_1 r_2} : \{ & \Omega(u, v) | (u \in [\sigma_1, \sigma_r], v \in [\gamma_1, \gamma_r]) \cup \\ & \cup (u \in [\sigma_1, \sigma_r], v \in [-\gamma_r, -\gamma_1]) \cup \\ & \cup (u \in [-\sigma_r, -\sigma_1], v \in [-\gamma_r, -\gamma_1]) \cup \\ & \cup (u \in [-\sigma_r, -\sigma_1], v \in [\gamma_1, \gamma_r]) \}. \end{aligned}$$

Для нахождения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах в работах [1, 6—8] был разработан и исследован следующий субинтервальный метод.

Если в правую часть представления (4) подставить определение (2), то после преобразований можно получить соотношение [6]

$$P_{\Omega} = \sum_{i_2=1}^M \left( \sum_{k_1=1}^N \left( \sum_{i_1=1}^M a_{i_1 i_2} f_{i_1 k_1} \right) \left( \sum_{k_2=1}^N b_{k_1 k_2} f_{i_2 k_2} \right) \right), \quad (5)$$

где

$$a_{i_1 i_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\alpha_2(i_1 - i_2)) - \sin(\alpha_1(i_1 - i_2))}{\pi(i_1 - i_2)}, & i_1 \neq i_2, \\ \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\pi}, & i_1 = i_2; \end{cases} \quad (6)$$

$$b_{k_1 k_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\beta_2(k_1 - k_2)) - \sin(\beta_1(k_1 - k_2))}{\pi(k_1 - k_2)}, & k_1 \neq k_2, \\ \frac{\beta_2 - \beta_1}{\pi}, & k_1 = k_2. \end{cases} \quad (7)$$

Введем матрицы  $A = (a_{i_1 i_2})$  и  $B = (b_{k_1 k_2})$  размерностей  $M \times M$  и  $N \times N$  соответственно, в соответствии с выражениями (5), (7). Матрицы  $A$  и  $B$  называются субполосными матрицами [1, 2, 6, 7].

Тогда выражение (5) позволяет записать формулу вычисления точных значений энергии  $P_{\Omega}$  дискретного двумерного сигнала  $\Phi$  в частотной двумерной области  $\Omega$ , используя матричные обозначения, в следующем виде:

$$P_{\Omega} = \text{tr}(A\Phi B\Phi^T), \quad (8)$$

где  $\Phi$  — исходное изображение;  $\text{tr}$  — след матрицы;  $A$  и  $B$  — субполосные матрицы.

Соотношение (8) определяет метод субинтервальной обработки изображений на основе частотных представлений и позволяет для нахождения точных значений энергии двумерного сигнала в любой частотной двумерной области построить вычислительную процедуру, не находя при этом трансформанту Фурье.

### Концептуальные основы процедуры идентификации фрагментов изображений текста

*Исходные условия:* на изображении текста  $\Phi_0$  размерностью  $M \times N$  выделяется прямоугольная область  $\Phi_p$  размерностью  $M_p \times N_p$ , которая в дальнейшем именуется эталонным фрагментом (индекс  $p$  здесь означает прецедент).

Далее из изображения  $\Phi_0$  определенным образом формируется множество фрагментов  $\Phi_k$  размерностью  $M_p \times N_p$ , где  $k$  — число полученных фрагментов, каждый из которых необходимо сопоставить с прецедентом. В случае изображений с текстом процедура поиска фрагментов заключается в перемещении маски по строкам текста с шагом в один пиксель.

На исходном изображении  $\Phi_0$  необходимо найти идентичные фрагменты. Для сопоставления фрагментов  $\Phi_k$  с эталоном  $\Phi_p$  нужно иметь решающую функцию, которая задает меру идентичности, значения которой вычисляются по значениям пикселей в сравниваемых фрагментах. Область значений решающей функции, используемой в данной работе, — положительные вещественные числа.

*Исходная гипотеза* Н0: сравниваемые фрагменты идентичны. Для проверки гипотезы используется решающая функция. Гипотеза отвергается, когда значение решающей функции больше порога, значение которого выбирается исходя из требования обеспечения заданного уровня вероятности ошибок первого рода (ложных тревог). Решающая функция должна отвечать принципу максимизации вероятности правильного принятия противоположной гипотезы, когда она верна (минимизации вероятности ошибок второго рода) (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Для определения порога необходимо провести предварительное обучение системы, превышение порога свидетельствует о неидентичности сравниваемых объектов. Обучение проводится на основе единственного образца, который искусственно трансформируется в соответствии с возможными реальными трансформациями.

### Решающая функция на основе субполосной меры близости спектров двумерных дискретных сигналов

Предлагается использовать расстояние между нормированными спектрами в заданном частотном интервале:

$$S_{rm} = \frac{1}{2\pi} \iint_{\omega_1, \omega_2 \in \Omega} \left| \frac{F_1(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_{rm}^{\Phi_p}}} - \frac{F_2(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_{rm}^{\Phi_k}}} \right|^2 d\omega_1 d\omega_2 =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \iint_{\omega_1, \omega_2 \in \Omega} \left( \left( \frac{F_1(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_{rm}^{\Phi_p}}} \right)^2 - \frac{2F_1(\omega_1, \omega_2)F_2(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_{rm}^{\Phi_p} P_{rm}^{\Phi_k}}} + \left( \frac{F_2(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_{rm}^{\Phi_k}}} \right)^2 \right) d\omega_1 d\omega_2, \quad (9)$$

где  $F_1, F_2$  — трансформанты Фурье эталонного и сравниваемого объектов соответственно;

$$P_{rm}^{\Phi_p} = \text{tr}(A_r \Phi_p B_m \Phi_p^T); \quad (10)$$

$$P_{rm}^{\Phi_k} = \text{tr}(A_r \Phi_k B_m \Phi_k^T), \quad (11)$$

где  $A_r, B_m$  — субполосные матрицы, элементы которых вычисляются согласно выражениям (6), (7).

В основе этой меры используются нормированные субполосные коэффициенты корреляции в частотном интервале:

$$p_{rm}^{pk} = \frac{1}{2\pi} \iint_{\omega_1, \omega_2 \in \Omega} \frac{F_1(\omega_1, \omega_2)F_2(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P_{rm}^{\Phi_p} P_{rm}^{\Phi_k}}} d\omega_1 d\omega_2. \quad (12)$$

Для сопоставления фрагментов цифровых изображений в данной работе используется мера близости следующего вида:

$$S_{pk} = 2 \left( \frac{1}{R_1 R_2} \sum_{j=1}^{R_2} \sum_{i=1}^{R_1} (1 - p_{rm}^{pk}) \right), \quad (13)$$

где

$$p_{rm}^{pk} = \frac{\text{tr}(A_r \Phi_p B_m \Phi_k^T)}{\sqrt{P_{rm}^{\Phi_p} P_{rm}^{\Phi_k}}}. \quad (14)$$

Выражение (13) является используемой в данной работе мерой идентичности фрагментов;  $R_1, R_2$  — число информационных частотных интервалов для каждой координаты.

Информационным частотным интервалом будем считать такой интервал, что

$$P_{11} \geq h_1; \quad (15)$$

$$P_{1m} \geq h_2, \quad m = 2, \dots, R_b; \quad (16)$$

$$P_{r1} \geq h_3, \quad r = 2, \dots, R_a; \quad (17)$$

$$P_{rm} \geq h_4, \quad r = 2, \dots, R_a; \quad m = 2, \dots, R_b, \quad (18)$$

где  $R_a, R_b$  — число интервалов по заданным осям.

Порог  $h$  представляет собой среднее значение энергии изображения на единицу частотной полосы.

Рассчитываются четыре значения порога, так как частотные интервалы имеют отличные друг от друга площади:

$$h_1 = \frac{\|F\|^2}{\pi^2} \cdot \frac{\pi}{2Ra + 1} \cdot \frac{\pi}{2Rb + 1}; \quad (19)$$

$$h_2 = \frac{\|F\|^2}{\pi^2} \cdot \frac{2\pi}{2Ra + 1} \cdot \frac{\pi}{2Rb + 1}; \quad (20)$$

$$h_3 = \frac{\|F\|^2}{\pi^2} \cdot \frac{\pi}{2Ra+1} \cdot \frac{\pi}{2Rb+1}; \quad (21)$$

$$h_4 = \frac{\|F\|^2}{\pi^2} \cdot \frac{2\pi}{2Ra+1} \cdot \frac{\pi}{2Rb+1}. \quad (22)$$

Основная гипотеза ( $H_0$  — сравниваемые фрагменты идентичны) отвергается при выполнении неравенства

$$S_{pk} > h_p, \quad (23)$$

где  $h_p$  — граница критической области, которая определяется на этапе обучения.

Представленный выше метод позволяет получить следующие результаты: вероятность

ошибки первого рода равна 0 (обнаружены все искомые фрагменты); вероятность ошибки второго рода равна 0,0052 (к классу искомого неверно отнесены 6788 фрагментов из 1 308 150). Подробно исследование метода представлено в работе [9].

Рис. 2–4 иллюстрируют тот факт, что для разных символов информационными интервалами являются различные частотные интервалы.

Представляет интерес обнаружение таких частотных интервалов, которые будут являться информационными только для одного символа или небольшой группы символов. Присутствие подобной закономерности потенциально позволит повысить качество распознавания с точки зрения уменьшения вероятности ошибки первого рода при фиксированном значении вероятности ошибки первого рода.

*Цель исследования — выделить характерные для данного символа частотные интервалы.*

#### **Условия эксперимента**

1. Набор объектов — заглавные буквы русского алфавита. Их общее число составило 29 символов, так как нет слов, начинающихся с Ъ, Ь, Ы. Размерность каждого символа  $145 \times 145$ . Число субполосных интервалов  $37 \times 37 = 1369$ .

2. Поочередно вычисляются информационные частотные интервалы для каждого из объектов.

3. Определяются такие частотные интервалы, которые являются информационными не более чем для 15 объектов. Назовем их характерными.

На рис. 5, 6 (см. третью сторону обложки) представлены информационные частотные интервалы для символов У, Э соответственно.

Значение по оси аппликат означает число объектов, для которых интервал является информационным. Интервалы, являющиеся информационными для всех объектов (низкочастотная область), для наглядности приравнены к нулю. Для отдельного символа наиболее характерными являются те интервалы, значение которых по оси аппликат менее 5.

Обозначение  $[r, m]$  задает координаты отдельного интервала в двумерной частотной области  $\Omega$ . Так,  $[4, 18]$  — это частотный интервал с координатами  $r = 4, m = 18$ .

Уникальные частотные интервалы — такие частотные интервалы, которые являются информационными только для одного символа (табл. 1).

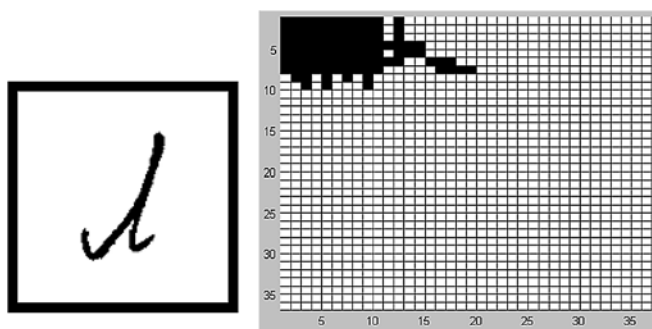


Рис. 2. Изображение символа Л размерностью  $145 \times 145$  и его информационные частотные интервалы

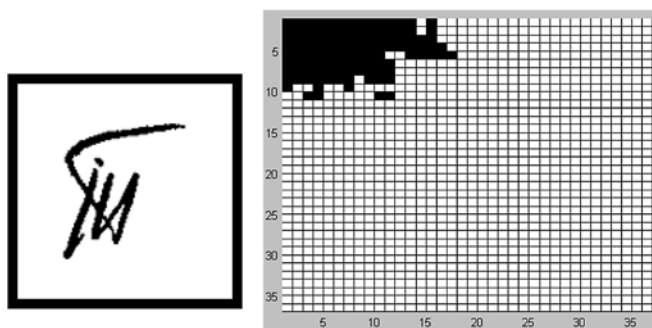


Рис. 3. Изображение символа Т размерностью  $145 \times 145$  и его информационные частотные интервалы

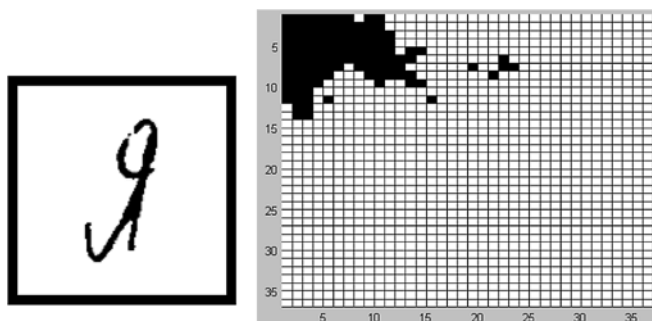


Рис. 4. Изображение символа Я размерностью  $145 \times 145$  и его информационные частотные интервалы

Таблица 1

## Уникальные частотные интервалы

| Символ | Число частотных интервалов | Координаты частотных интервалов                                     |
|--------|----------------------------|---|
| А      | 1                          | [4,18]  |
| Б      | 8                          | [12,1], [12,5], [12,6], [13,4], [13,5], [13,6], [14,5], [15,6]      |
| В      | 3                          | [3,19], [3,21], [5,22]  |
| Г      | 1                          | [12,3]  |
| Е      | 1                          | [3,11]  |
| Ж      | 3                          | [3,10], [9,12], [10,17]   |
| И      | 3                          | [3,17], [4,17], [6,19]  |
| К      | 4                          | [7,5], [10,15], [10,16], [11,18]                                    |
| Л      | 3                          | [6,16], [7,17], [7,18]  |
| М      | 3                          | [7,2], [7,13], [9,11]   |
| Н      | 9                          | [4,7], [5,8], [4,21], [5,21], [5,22], [5,23], [6,7], [6,24], [6,25] |
| О      | 1                          | [7,16]  |
| Т      | 8                          | [1,8], [6,22], [7,22], [7,23], [8,21], [9,13], [11,15], [13,2]      |
| Ф      | 2                          | [11,7], [11,9]  |
| Х      | 1                          | [1,9]   |
| Ц      | 1                          | [6,2]   |
| Ч      | 1                          | [7,1]   |
| Щ      | 1                          | [7,6]   |
| Э      | 2                          | [12,1], [12,2]  |
| Ю      | 2                          | [7,24], [10,8]  |
| Я      | 4                          | [2,15], [3,15], [4,16], [10,11]                                     |

Таким образом, 21 символ из 29 имеет хотя бы один уникальный частотный интервал (табл. 2).

Из 29 символов 27 имеют частотные интервалы, характерные для четырех и менее объектов.

Таким образом, можно сделать вывод, что большее число символов возможно охарактеризовать небольшим числом определенных частотных интервалов (порядка 5...20, при общем числе интервалов 1359). Также необходимо учитывать, что для каждого почерка характерными могут быть различные частотные интервалы. Дальнейшие исследования направлены на вычисление вероятностей ошибок при распознавании фрагментов рукописного текста с использованием характерных частотных интервалов.

Таблица 2

## Частотные интервалы, характерные для четырех и менее объектов

| Символ | Число частотных интервалов | Координаты частотных интервалов  |
|--------|----------------------------|--|
| А      | 5                          | [1,19], [2,14], [4,20], [5,15], [7,7]  |
| Б      | 12                         | [2,14], [1,14], [6,13], [9,10], [9,14], [10,6], [10,7], [11,1], [11,5], [11,6], [12,4], [13,1] |
| В      | 3                          | [2,14], [4,20], [10,6]   |
| Г      | 4                          | [11,5], [12,4], [1,11], [13,3]   |
| Д      | 3                          | [1,14], [6,13], [1,11]   |
| Е      | 3                          | [9,10], [10,6], [1,10]   |
| Ж      | 5                          | [1,10], [2,11], [6,18], [8,4], [8,13]  |
| З      | 3                          | [11,5], [13,3], [12,3]   |
| И      | 8                          | [5,15], [2,11], [4,15], [5,10], [5,16], [5,17], [5,18], [5,19]                                 |
| К      | 3                          | [9,14], [8,4], [5,10]  |
| Л      | 4                          | [2,11], [6,15], [6,17], [7,19]   |
| М      | 5                          | [6,13], [6,18], [6,17], [5,13], [6,14]   |
| Н      | 9                          | [7,7], [5,10], [5,18], [5,19], [6,9], [5,9], [5,20], [6,20], [6,23]                            |
| П      | 1                          | [10,7]   |
| Р      | 3                          | [1,11], [6,15]   |
| С      | 4                          | [6,13], [9,10], [10,6], [7,21]   |
| Т      | 9                          | [7,7], [11,5], [13,3], [2,11], [8,13], [12,3], [12,2], [7,19], [8,12]                          |
| У      | 4                          | [5,18], [5,19], [5,20], [6,23]   |
| Й      | 3                          | [12,3], [6,9], [12,2]  |
| Ф      | 4                          | [10,7], [1,10], [8,12], [10,9]   |
| Х      | 1                          | [5,13]   |
| Ц      | 7                          | [1,19], [6,18], [5,10], [5,16], [5,18], [6,9], [6,20]  |
| Ш      | 6                          | [4,15], [6,15], [5,13], [6,14], [5,9], [7,21]  |
| Щ      | 7                          | [5,15], [13,1], [8,4], [6,15], [6,17], [6,14], [7,24]  |
| Э      | 2                          | [11,1], [13,1]   |
| Ю      | 10                         | [9,10], [10,7], [11,6], [5,17], [5,13], [6,20], [10,9], [7,24], [1,15], [10,10]                |
| Я      | 6                          | [5,15], [4,15], [5,16], [5,17], [1,15], [10,10]  |

## Список литературы

1. **Жиляков Е. Г., Черноморец А. А.** Вариационные алгоритмы анализа и обработки изображений на основе частотных представлений. М.: ГиК, 2009. 146 с.
2. **Жиляков Е. Г., Черноморец А. А., Лысенко И. В.** Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах // Вопросы радиоэлектроники. 2007. Вып. 4. С. 115–123.
3. **Семенов Ю. А.** Алгоритмы телекоммуникационных сетей. Часть 1. Алгоритмы и протоколы каналов и сетей передачи данных. М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2007. 640 с.
4. **Рабинер Л., Голд Б.** Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978.
5. **Сергиенко А. Б.** Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 603 с.
6. **Жиляков Е. Г., Прохоренко Е. И.** Частотный анализ речевых сигналов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2006. № 2 (3.118), Вып. 3. С. 201–208.
7. **Черноморец А. А., Иванов О. Н.** Метод анализа распределения энергий изображений по заданным частотным интервалам // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 2010. № 19 (90). Вып. 16/1. С. 161–166.
8. **Черноморец А. А., Жиляков Е. Г., Голощапова В. А., Болгова Е. В.** Оценка эффективности субполосного внедрения данных в изображение // Научные ведомости БелГУ. Сер.: История. Политология. Экономика. Информатика. 2014. № 8–1 (179). С. 200–206.
9. **Ефимов Н. О., Жиляков Е. Г.** О субполосном анализе изображений // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 2015. № 1 (198), вып. 33/1. С. 118–124.

**N. O. Efimov**, Graduate Student, e-mail: n.o.efimov@gmail.com,

**E. G. Zhiljakov**, D. Sc., Professor, department of Information and telecommunication systems and technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, 308000, Russian Federation

## Handwritten Text Fragment Recognition. Typical Subband Intervals

*The research of existing methods of identification scanning text images allow to draw a conclusion, what in general case problem solve only for printed text images. In case of handwritten text each solution is individual, and frequently need a long time education or operator inspection. In the article introduce new decision procedure of precedential identical fragment detection, which react on normalized Fourier transform differences in defined frequency intervals. Possibility of detection typical subband intervals for specified symbol is analyzed. Using typical subband intervals can appreciably decrease number of features, necessary for fragment description.*

**Keywords:** image processing, image recognition, HWR, OCR, substrip method, subband method, typical subband intervals, decision procedure, measure of proximity, Fourier transform

DOI: 10.17587/it.24.481-486

### References

1. **Zhiljakov E. G., Chernomorec A. A.** *Variacionnye algoritmy analiza i obrabotki izobrazhenij na osnove chastotnyh predstavlenij* (Variational algorithms for analysis and image processing based on frequency representations), Moscow, GiK, 2009, 146 p. (in Russian).
2. **Zhiljakov E. G., Chernomorec A. A., Lysenko I. V.** *Metod opredelenija tochnyh znachenij dolej jenerгии izobrazhenij v zadannyh chastotnyh intervalah* (The method of determination the exact values of the image energy in frequency intervals), *Voprosy Radiojelektroniki*, 2007, iss. 4, pp. 115–123 (in Russian).
3. **Semenov Ju. A.** *Algoritmy telekommunikacionnyh setej. Chast' 1. Algoritmy i protokoly kanalov i setej peredachi dannyh* (Algorithms of telecommunication networks. Part 1. Algorithms and protocols of channels and data networks), Moscow, Binom. Laboratorija znaniy, 2007, 640 p. (in Russian).
4. **Rabiner L., Gold B.** *Teoriya i primenenie tsifrovoi obrabotki signalov* (Theory and application of digital signal processing), Moscow, Mir, 1978 (in Russian).
5. **Sergienko A. B.** *Cifrovaja obrabotka signalov* (Digital signal processing), SPb, Piter, 2002, 603 p. (in Russian).
6. **Zhiljakov E. G., Prohorenko E. I.** Chastotnyj analiz rechevyh signalov, *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2006, no. 2 (3.118), iss. 3. pp. 201–208 (in Russian).
7. **Chernomorec A. A., Ivanov O. N.** Metod analiza raspredelenija jenerгии izobrazhenij po zadannyh chastotnym intervalam, *Nauchnye vedomosti BelGU*. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika, 2010, no. 19 (90), iss. 16/1, pp. 161–166 (in Russian).
8. **Chernomorec A. A., Zhiljakov E. G., Goloshhapova V. A., Bolgova E. V.** Ocenka jeffektivnosti subpolosnogo vnedrenija dannyh v izobrazhenie, *Nauchnye vedomosti BelGU*. Ser.: Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika, 2014, no. 8–1 (179), pp. 200–206 (in Russian).
9. **Efimov N. O., Zhiljakov E. G.** O subpolosnom analize izobrazhenij, *Nauchnye vedomosti BelGU*. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika, 2015, no. 1 (198), iss. 33/1, pp. 118–124 (in Russian).