

УДК 004.932

**Г. Ю. Щербакова, В. Н. Крылов**, доктора техн. наук,  
**О. Ю. Бабилунга**, канд. техн. наук

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ ЭКСТРЕМУМА С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИСТАРТОВОГО МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

***Аннотация.** Разработан и исследован метод определения диапазонов координат экстремума с помощью мультистартового метода оптимизации на основе вейвлет-преобразования. Применение этого метода в рамках информационно-статистического подхода позволит создавать информационные технологии для систем обработки визуальной информации, которые позволят повысить качество и быстродействие процедур на основе оптимизации при изменении условий получения визуальной информации.*

***Ключевые слова:** оптимизация, вейвлет-преобразование, система обработки визуальной информации, информационные технологии, информационно-статистический подход*

**G. Yu. Shcherbakova, ScD., V. N. Krylov, ScD.,**  
**O. Yu. Babilunga, PhD.**

### INVESTIGATION OF EXTREMUM AREA BY MULTI-STARTING OPTIMIZATION METHOD BASED ON WAVELET TRANSFORM

***Abstract.** The method for determining the diapason coordinate of the extremum based on the multi-starting optimization method is developed and investigated. Application of this method in the framework of information-statistical approach will allow creating information technologies for systems of visual information processing, which will improve the quality and speed of optimization procedures into changing conditions of the obtain visual information.*

***Keywords:** optimization, wavelet-transformation, visual information processing, information technologies, information-statistical approach*

**Г. Ю. Щербакова, В. М. Крилов**, доктора техн. наук,  
**О. Ю. Бабилунга**, канд. техн. наук

### ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАСТІ ЕКСТРЕМУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ МУЛЬТИСТАРТОВОГО МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

***Анотація.** Розроблений і досліджений метод визначення діапазонів координат екстремуму з допомогою мультистартового методу оптимізації на основі вейвлет-перетворення (ВП). Застосування цього методу в рамках інформаційно-статистичного підходу дозволить створювати інформаційні технології для систем обробки візуальної інформації, які зможуть підвищити якість і швидкодію процедур на основі оптимізації при зміні умов отримання візуальної інформації.*

***Ключові слова:** оптимізація, вейвлет-перетворення, система обробки візуальної інформації, інформаційні технології, інформаційно-статистичний підхід*

#### Введение

В настоящее время при автоматизации технологических процессов, в технической диагностике, в системах слежения за движущимися объектами и так далее расширился класс автоматизированных систем (АС) на базе систем обработки визуальной информации (СОВИ) [1 – 5]. Такие АС функционируют на основе информации, для которой характерны многомерность, избыточность, высокая степень неопределенности.

Эффективность и качество процедур этих АС зависит от многих факторов (разрешающей способности, контраста и углового размера изображения, соотношения

яркостей объектов). Система обработки визуальной информации при распознавании объектов на изображениях сталкиваются с выполнением противоречивых требований: необходимостью распознавания объектов, инвариантных к проективным преобразованиям (масштаб и поворот, сдвиг) на изображениях с шумами, то есть с искажениями формы, и необходимостью проведения процесса распознавания в реальном масштабе времени. Эти факторы определяют требуемый для целей обработки уровень помехоустойчивости и быстродействия как отдельных процедур, так и АС в целом.

В связи с необходимостью ускорить процесс разработки и расширить область применения уже разработанных систем в условиях быстрого совершенствования технологий

© Щербакова Г.Ю., Крылов В.Н.,  
Бабилунга О.Ю., 2015

производства, изменения условий наблюдения и др., важным направлением в развитии таких СОВИ является создание систем, способных изменять свои параметры.

В соответствии с работами [6 – 7] целью применения процедур оптимизации при разработке СОВИ является попадание в диапазон семантической (прагматической) достаточности. Потому возникает необходимость в разработке методов оптимизации, результатом которых является определение таких диапазонов. В работе авторов [8] для оптимизации предложен метод мультистартовой оптимизации на основе вейвлет-преобразования (МОВП). Результатом этого метода является точечная оценка координаты экстремума. Однако аппарат вейвлет-анализа позволяет расширить возможности метода и получить результат в виде диапазонов (сужающихся областей), определяемых ограничениями второго рода – в виде неравенств – в которых находится экстремум [10; 11].

**Целью работы** является разработка и исследование метода определения диапазонов координат экстремума с помощью мультистартового метода оптимизации на основе вейвлет-преобразования.

#### **Исследование метода определения диапазонов координат экстремума**

На практике для определения координат и/или диапазонов координат экстремума применяются итеративные методы оптимизации. Эти методы основаны на оценке градиента или субградиента целевой функции. В указанных приложениях целевая функция при оптимизации часто мультимодальна, может иметь негладкую, кусочно-линейную, зашумленную поверхность. Методы оптимизации, основанные на оценке градиента, в таких условиях отличаются низкой помехоустойчивостью, у субградиентных методов – высокая погрешность. Для снижения влияния этих недостатков авторами предложен мультистартовый метод оптимизации в пространстве вейвлет – преобразования (ВП) [8]. В нем при оценке направления поиска область поиска последовательно обрабатывается с помощью вейвлет-функции (ВФ) Хаара и гиперболического ВП (ГВП) [8], реализованного по лифтинговой схеме [9]. Обработка с помощью ВФ Хаара повышает помехо-

устойчивость, но при асимметричном функционале качества оптимум отыскивается с погрешностью, которую снижают многоэтапной обработкой с ГВП [8]. Из-за многоэтапной оценки направления поиска экстремума с помощью ВФ реализация этого метода требует значительных вычислительных затрат. Это снижает быстродействие метода и ограничивает область его применения.

Однако для ряда приложений быстродействие оптимизации должно быть повышено. Например, при адаптации в системах слежения за движущимися объектами, в системах диагностики с большим количеством контрольных операций в единицу времени, например, при анализе изображений печатных плат и контроле паяных соединений печатных узлов [1 – 5]. Достичь этого можно, определяя диапазон, в котором находится экстремум с требуемой погрешностью, поскольку особенности оптимизации в пространстве ВП позволяют локализовать область поиска при приближении к области минимума функционала на этапе поиска с ВФ Хаара. Метод МОВП реализуется в соответствии с итерационной схемой [8]

$$\mathbf{c}[n] = \mathbf{c}[n-1] - \gamma[n] \mathbf{WT}_k(\mathbf{Q}(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}[n-1])), \quad (1)$$

где  $\gamma[n]$  – шаг;  $n$  – номер итерации;  $k$  – номер старта;  $\mathbf{WT}_k$  – определяет направление движения к экстремуму и вычисляется согласно

$$\mathbf{WT}_k(\mathbf{Q}(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}[n-1])) = \{G_{1k}, G_{2k}, \dots, G_{Nk}\}, \quad (2)$$

$G_{jk}$  – результат обработки по  $j$ -ой переменной:

$$G_{jk} = \frac{1}{s_k} \sum_{\substack{i=-\frac{s_k}{2} \\ i \neq 0}}^{\frac{s_k}{2}} \mathbf{Q}(\mathbf{x}[n], \mathbf{c}_j + ia) \cdot \Psi_k(i), \quad (3)$$

$s_k$  – длина носителя ВФ на  $k$ -м старте ( $s_k$  – четное число);  $a$  – шаг дискретизации ВФ;  $\Psi_k(i)$  – ВФ на  $k$ -м старте (табл. 1);  $j = 1, \dots, N$  – размерность вектора параметров.

В результате исследований помехоустойчивости, скорости сходимости и погрешности был сделан вывод, что для оценки направления поиска координаты экстремума в (2) нужно использовать симметричные и нестационарные вейвлет-функции [9].

В данной работе для оценки направления поиска координаты экстремума (2) на первом этапе выбрано ВФ

$$\Psi_1(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } i = 1, \dots, \frac{s_1}{2} \\ -1, & \text{если } i = -1, \dots, -\frac{s_1}{2} \end{cases}$$

и – на следующих этапах – нестационарные ВФ из указанного класса (рис. 1), которые получены по схеме, приведенной в таблице.

Определение диапазона изменения координат экстремума производится на базе метода МОВП со следующими исходными данными:

$\delta_1$  – погрешность поиска оптимума старта (определяется на этапе априорных исследований функционала качества);  $\delta_2$  – погрешность поиска оптимума прикладной задачи и  $\delta_3$  – погрешность определения диапазона изменения координат экстремума, на этапе обработки с ВФ  $\Psi_1(i)$  (определяются по показателю семантической (прагматической) достаточности в соответствии с информационно-статистическим подходом [6 – 7]);  $k_{\max}$  – максимальное количество стартов реализуется в приведенной ниже последовательности.

### 1. Параметры ВФ для МОВП

| Название              | Значение параметра  |    |   |   |   |  |
|-----------------------|---|----|---|---|---|--|
|                       | 2   | 3  | 4 | 5 | 6 | 7  |
| Номер старта $k$      | 2   | 3  | 4 | 5 | 6 | 7  |
| Масштаб ВФ $\alpha_k$ | 1   | 2  | 3 | 4 | 5 | –  |
| Длина носителя $s_k$  | 20  | 10 | 6 | 4 | 4 | 2  |
| Вид ВФ $\Psi_k(i)$    | $\begin{cases} \frac{1}{\alpha_k( i +1)}, & \text{если } i > 0, \\ -\frac{1}{\alpha_k( i +1)}, & \text{если } i < 0, \end{cases}$ $i \in \left[-\frac{s_k}{2}, +\frac{s_k}{2}\right],$ $i \neq 0$ |    |   |   |   | $\begin{cases} 1, & \text{если } i = 1 \\ -1, & \text{если } i = -1 \end{cases}$ |

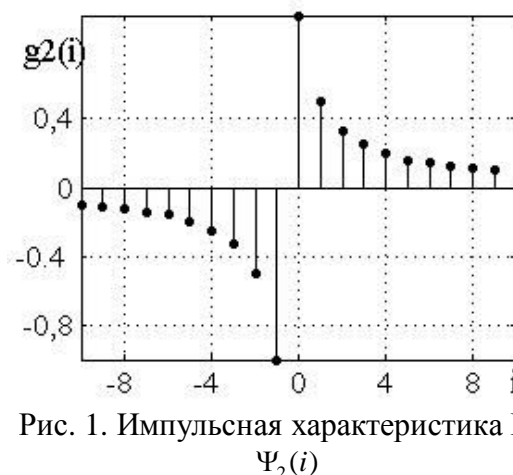


Рис. 1. Импульсная характеристика ВФ  $\Psi_2(i)$

*Шаг 1.* Задаются:  $c[0]$  – начальное приближение к координате оптимума;  $\gamma[1]$  – шаг; вид ВП и ВФ;  $a$  – шаг дискретизации ВФ;  $s_1$  – длина носителя ВФ первого старта  $\Psi_1(i)$ ;  $sk$  – шаг изменения длины носителя ВФ  $\Psi_1(i)$  при определении диапазонов координат экстремума; номер старта  $k = 1$ ; номер итерации  $n = 1$ .

*Шаг 2.* Оценивается направление поиска по (2) в точке приближения к координате оптимума для старта  $k$ . При  $k = 1$  для этого используется взвешенная сумма с ВФ  $\Psi_1(i)$  (в точке  $c[0]$  при  $n = 1$ ). Длина носителя  $s_1$  для ВФ  $\Psi_1(i)$  определяется при анализе целевой функции. Интегральный характер такого ВП позволяет снизить чувствительность к локальным экстремумам и выделить сегмент целевой функции, где, как показали исследования, с высокой вероятностью находится глобальный оптимум, и с высокой погрешностью определить диапазон изменения его координат. На этом этапе проверяется знак оценки по формуле (3). В случае изменения знака, на основании известного свойства оценок направления поиска на базе градиента – менять знак при переходе через оптимум [12], на этом этапе определяется ряд вложенных диапазонов изменения координат экстремума. Максимальный диапазон определяется на старте  $k = 1$  с  $s = s_1$  – длиной носителя ВФ первого старта  $\Psi_1(i)$ , на последующих этапах обработки с  $\Psi_1(i)$  – с длиной носителя ВФ  $\Psi_1(i)$ , изменяющейся, согласно  $s = s - sk$ . Для этого используется обработка

с ВФ  $\Psi_1(i)$  как  $c[n] > c^* > c[n-1]$ , если  $c[n] > c[n-1]$  или  $c[n] < c^* < c[n-1]$ , если  $c[n] < c[n-1]$ .

**Шаг 3.** Выполняется поиск диапазона координат оптимума  $Q(x, c)$  по (1) при  $k \leq k_{\max}$ , иначе – останов.

**Шаг 4.** Если на итерации  $n$  выполняется условие  $|c[n] - c[n-1]| \leq \delta_1$ , поиск на текущем старте заканчивается, иначе –  $n = n+1$  и переход к шагу 2.

**Шаг 5.** Если  $k > 1$  и найденная в результате поиска на  $k$ -ом шаге координата оптимума отличается от результата  $k-1$  старта не более, чем на  $\delta_2$  – останов; в противном случае, или если  $k < k_{\max}$ , то увеличивается номер старта  $k = k+1$ , выбирается ВФ для оценки направления поиска (2) (при  $1 < k < k_{\max}$  – ВФ  $\Psi_k(i)$  (см. табл. 1)), при  $k = k_{\max}$  направление поиска оценивается путем дискретного дифференцирования (с  $\Psi_7(i)$ , см. таблицу) и осуществляется переход к шагу 2.

Таким образом, в процессе поиска с помощью ВФ Хаара, определяются диапазоны изменения координат экстремума. Помехоустойчивость оценок в базовом методе МОВП [8] снижается постепенно, по мере увеличения масштаба оценок (с ростом  $\alpha$ ), одновременно, также постепенно, снижается погрешность оценки оптимума. Однако в предложенном методе из-за снижения длины носителя ВФ  $\Psi_1(i)$  снижена помехоустойчивость, по сравнению с базовым методом. При этом повышается быстродействие поиска.

Особенности процедуры определения диапазона изменения координат экстремума были проверены экспериментально (рис. 2) на функции де Ионга  $f(x) = x^2$  при  $x \in (-80; 80)$  с добавлением помехи, распределенной по нормальному закону с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением от 0 до 223, максимальное значение функции было 6400.

Параметры процедуры: шаг  $\gamma = 0,1$ , начальная длина носителя ВФ  $\Psi_1(i)$   $s_1 = 24$ , шаг дискретизации ВФ  $a = 1$ . Диапазоны из-

менения области экстремума и время их определения приведены на рис. 2.

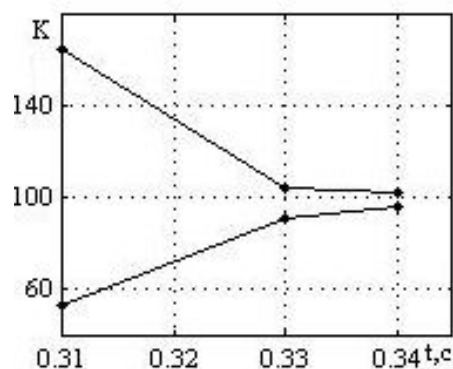


Рис. 2. Результаты оценки диапазона координат экстремума тестовой функции с помощью мультистартового метода оптимизации

Таким образом, в работе разработан метод определения диапазонов координат экстремума с помощью мультистартового метода оптимизации на основе вейвлет-преобразования и оценено быстродействие этого метода.

#### Выводы

Установлено, что при отношении сигнал/помеха тестовой функции по амплитуде от 64 до 28 время определения диапазона координат экстремума составило от 0,3 до 0,4 с.

Эти результаты позволяют рекомендовать разработанный метод определения диапазонов координат экстремума с помощью МОВП в широком круге практически важных задач при разработке СОВИ, в которых необходимо попадание в диапазон семантической (прагматической) достаточности.

#### Список использованной литературы

1. Абакумов В. Г. Системы отображения в медицине / В. Г. Абакумов, А. Н. Рыбин, Й. Сватос, Ю. С. Синекон. – К. : Юніверс, 2001. – 336 с.
2. Катус П. Г. Системы машинного зрения с интеллектуальными видеодатчиками / П. Г. Катус, Г. П. Катус // Информационные технологии. – 2001. – № 10. – С. 28 – 33.
3. Antoshchuk S., Krylov V., and Shcherbakova G., (2007), The Integrated Circuits photo Masks Images Alignment for Automated Op-

tical Inspection System, *DAAAM International Scientific Book 2007, B. Katalinic (Ed), Published by DAAAM International*, Chapter 26, pp. 287 – 294.

4. Shcherbakova G., Krylov V., Abakumov V., Brovko V., and Kozina I., (2011), Sub Gradient Iterative Method for Neural Networks Training, *The 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing System: Technology and Applications. 15-17 September 2011*, Prague, Czech Republic, pp. 361 – 364.

5. Moganti M., Ercal F., Dagli C., and Tsunekawa S., (1996), Automatic PCB Inspection Algorithms: a Survey, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 63, No. 2, pp. 287 – 313, March 1996, url : <http://citeseer.ist.psu.edu/moganti96automatic.html>.

6. Абакумов В. Г. Распознавание визуальной информации в автоматизированных системах / В. Г. Абакумов, С. Г. Антощук, В. Н. Крылов // *Электроника и связь*. – К. : – 2003. – № 19. – С. 46 – 48.

7. Антощук С. Г. Оценка эффективности систем обработки визуальной информации // *Збірник наукових праць УДМТУ.–Миколаїв: УДМТУ.* – 2003. – № 4 (390). – С. 144 –148.

8. Крылов В. Н. Иерархический субградиентный итеративный метод оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования / В. Н. Крылов, Г. Ю. Щербакова // *Электроника и связь*. – К. : – КПИ – 2008. – № 6 (47). – С. 28 – 31.

9. Krylov V.N., and Polyakova M.V., (2007), Contour Images Segmentation in Space of Wavelet Transform with the use of Lifting, *Optical-electronic Informatively-power Technologies*, No. 2 (12), pp. 48 – 58.

10. Щербакова Г. Ю. Субградиентный метод оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования с ограничениями второго рода при автоматизированном техническом диагностировании / Г. Ю. Щербакова, В. Н. Крылов // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – К. : Техніка. – 2012. – № 7 (83). – С. 127 – 131.

11 Щербакова Г. Ю. Мультистартовый метод оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования с итеративной оценкой ог-

раничений второго рода / Г. Ю. Щербакова, В. Н. Крылов, А. С. Дилевский // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – К. : Техніка. – 2013. – № 09 (85). – С. 180 – 185.

12. Polak E., (1971), *Computational Methods in Optimization. A Unified Approach*, *University of California*, Berkeley, California, New York, London: *Academic Press*.

Получено 24.03.2015

#### References

1. Abakumov V.G., Rybin A.N., Svatosh I., and Sinecop U. *Sistemy otobrageniya v medicine [The Systems of Reflection in the Medicine]*, (2001), Kiev, Ukraine, *Univers Publ.*, 336 p. (In Russian).

2. Katys P.G., and Katys G.P. *Sistemy mashinnogo videniya s intellectualnymi videodatchikami [The Systems of Machine Vision with Intellectual Video Sensors]*, (2001), *Informacionnye Tehnologii*, No. 10, pp. 28 – 33 (In Russian).

3. Antoshchuk S., Krylov V., and Shcherbakova G., (2007), The Integrated Circuits Photo Masks Images Alignment for Automated Optical Inspection System, *DAAAM International scientific book 2007, B. Katalinic (Ed), Published by DAAAM International*, Chapter 26, pp. 287 – 294 (In English).

4. Shcherbakova G., Krylov V., Abakumov V., Brovko V., and Kozina I., (2011), Sub Gradient Iterative Method for Neural Networks Training, *The 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing System: Technology and Applications. 15-17 September 2011*, Prague, Czech Republic, pp. 361 – 364 (In English).

5. Moganti M., Ercal F., Dagli C., and Tsunekawa S., (1996), Automatic PCB Inspection Algorithms: a Survey, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 63, No. 2, pp. 287 – 313, March 1996 url: <http://citeseer.ist.psu.edu/moganti96automatic.html> (In English).

6. Abakumov V.G., Antoshchuk S.G., and Krylov V.N., *Raspoznavanie visualnoi informacii v avtomatizirovannih sistemah [Recognition of Visual Information in Automation Systems]*,

(2003), *Electronika i Sviaz*, Kiev, Ukraine, *KPI Publ.*, No. 19, pp. 46 – 48 (In Russian).

7. Antoshchuk S.G. Ocenka effektivnosti sistem obrabotki visualnoi informacii [The Evaluation of the Effectiveness of the Visual Information Processing Systems], (2003), *Zbirnyk Naukovykh Prac UDNTU*, Nikolayev, Ukraine, *UDNTU Publ.*, No. 4 (390), pp. 144 – 148 (In Russian).

8. Krylov V.N., and Shcherbakova G.Yu., Ierarhicheskiy subgradientnyi metod optimizacii v oblasti veivlet preobrazovaniya, [The Hierarchical Sub Gradient Iterative Optimization Method in the Wavelet Transforming Domain], (2008), *Electronika i Sviaz*, Kiev, Ukraine, *KPI Publ.*, No. 6 (47), pp. 28 – 31 (In Russian).

9. Krylov V.N., and Polyakova M.V., Konturnaya segmentacia izobrazheniy v prostranstve veivlet preobrazovaniya s ispolzovaniem lift-inga [Contour Images Segmentation in Space of Wavelet Transform with the use of Lifting], (2007), *Optical-electronic Informatively-power Technologies*, No. 2 (12), pp. 48 – 58 (In Russian).

10. Shcherbakova G., and Krylov V.N. Subgradientnyi metod optimizacii v prostranstve veivlet-preobrasovaniya s ograniceniyami vtorogo roda pri avtomatisirovannom tehničeskom diagnostirovanii [Sub-gradient Optimization Method in Wavelet Transformation Domain with Inequality Constrain in Time of Automation Technical Diagnostics], (2012), *Electrotehnicheskie i Kompiuternie Sistemy*, Kiev, Ukraine, *Tehnika Publ.*, No. 7 (83), pp. 127 – 131 (In Russian).

11. Shcherbakova G., Krylov V.N., and Dilevskiy A.S. Multistartovyi metod optimizacii v prostranstve veivlet-preobrasovaniya s iterativnoi ocenкой ograniceniy vtorogo roda, [Multi-start Optimization Method in Wavelet Transformation Domain with Iterative Inequality Constrain], (2013), *Electrotehnicheskie i Kompiuternie Sistemy*, Kiev Ukraine, *Tehnika Publ.*, No. 09 (85), pp. 180 – 185 (In Russian).

12. Polak E., (1971), Computational Methods in Optimization. A unified approach, *University of California, Berkeley*, California, New York, London: *Academic Press.*, (In English).



Щербакова  
Галина Юрьевна,  
д-р техн. наук, проф. каф.  
Одесского нац.  
политехн. ун-та.  
E-mail:  
galina\_onpu@mail.ru



Крылов  
Виктор Николаевич,  
д-р техн. наук, проф.  
каф. Одесского нац.  
политехн. ун-та.  
E-mail:  
victor\_krylov@inbox.ru



Бабилунга  
Оксана Юрьевна  
канд. техн. наук,  
доц. каф. информаци-  
онных систем Одесского  
нац. политехн. ун-та.  
E-mail: bablunga@mail.ru