

16. Manasi J., Arpita M., Kankana D. A secure Image steganography using efficient map based LSB technique // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 2016. Vol. 6, no. 3. P. 657–660.
17. Mamta Y., Amita D. Image steganography techniques: A review // International Journal for Innovative Research in Science & Technology. 2015. Vol. 2, no. 2. P. 243–248.
18. Mehdi K., Husrev T.S., Nasir D.M. Performance study of common image steganography and steganalysis techniques // Journal of Electronic Imaging. 2006. Vol. 15, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2400672>
19. Nazinder K., Amanjot K. Art of steganography // International Journal of Advanced Trends in Computer Applications. 2017. Vol. 4, no. 2. P. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2009.08.010>
20. Johnson N.F., Jajodia S. Exploring steganography: Seeing the unseen // IEEE Computer. 1998. Vol. 31, no. 2. P. 26–34.
21. Nissar A., Mir A. Classification of steganalysis techniques: A study // Digital Signal Processing. 2010. Vol. 20, no. 6. P. 1758–1770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2010.02.003>
22. Шелухин О.И., Канаев С.Д. Стеганография. Алгоритмы и программная реализация. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 592 с.
23. Seyyedi S.A., Ivanov N. A novel secure steganography method based on zero tree method // International Journal of Advanced Studies in Computer Science and Engineering. 2014. Vol. 3, no. 3. P. 1–9.
24. A steganographic technique for highly compressed JPG images / K. Shamsul [et al.] // Computer Science Review. 2013. Vol. 10, no. 5. P. 107–118.
25. An overview of steganalysis methods / V. Sakit [et al.] // Actual Multi-Disciplinary Scientific-Practical Problems of Information Security: Proceedings of The V Republican Conference, Baku. 2019. P. 204–206. DOI: <https://doi.org/10.25045/NCInfoSec.2019.50>
26. Verdiyev S.Q., Nagiyeva A.F. Experimental analysis of steganography // Actual Multi-Disciplinary Scientific-Practical Problems of Information Security: Proceedings of The III Republican Conference, Baku. 2017. P. 51–55. DOI: <https://doi.org/10.25045/NCInfoSec.2017.10>

Получено 20.11.2020

УДК 621.396.01

ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПРОЕКЦИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗИСНЫЕ ВЕКТОРЫ ПРИ СКРЫТНОМ ВНЕДРЕНИИ ИНФОРМАЦИИ

Черноморец А.А., Болгова Е.В., Коваленко А.Н.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, РФ

E-mail: chernomoret@bsu.edu.ru, bolgova_e@bsu.edu.ru, kovalenko_a@bsu.edu.ru

Статья посвящена проблеме разработки методов скрытного контроля за использованием и распространением цифровых изображений на основе модификации коэффициентов разложения (проекции) изображений в различных системах базисных векторов, определяемых используемым двумерным преобразованием. В работе предложено для оценивания искажений изображений-контейнеров при скрытном внедрении информации на основе субполосного анализа в рамках двумерного косинус-преобразования применять оценки искажения значений проекций изображений на собственные векторы субполосных матриц данного преобразования. Сформулирована и аналитически решена задача поиска оптимальных модифицированных значений проекций изображения-контейнера с позиции минимизации его искажения, задаваемого как квадрат евклидовой нормы разности исходного и модифицированного изображений. Для иллюстрации преимуществ разработанного метода оптимальной модификации значений проекций были проведены вычислительные эксперименты. Показано, что применение разработанного метода позволяет получить меньшие искажения анализируемых изображений-контейнеров по сравнению с известными методами скрытного внедрения данных в изображения.

Ключевые слова: *скрытное внедрение, изображение-контейнер, субполосный анализ, косинус-преобразование, субполосные матрицы, собственные векторы, проекции изображения*

Введение

В настоящее время для контроля за использованием изображений, содержащих важные данные, достаточно широко применяются методы

скрытного внедрения контрольной информации в изображения [1–3].

Во многих методах для скрытного внедрения в изображения одного бита информации применяется относительная замена (модификация) значе-

ний двух коэффициентов разложения (проекций) изображений в различных системах базисных векторов, определяемых используемым двумерным преобразованием. Суть методов, в которых используется относительная замена проекций, заключается в модификации выбранных исходных проекций и изображения-контейнера таким образом, чтобы модифицированные значения проекций удовлетворяли следующим условиям:

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_0 - T_0 &\geq \tilde{\gamma}_1 \text{ при внедрении } 0, \\ \tilde{\gamma}_0 + T_0 &\leq \tilde{\gamma}_1 \text{ при внедрении } 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где T_0 – некоторое пороговое значение, которое влияет на скрытность внедрения (искажение изображения-контейнера) и устойчивость внедрения к внешним разрушающим воздействиям.

В данной работе исследуется возможность оптимальной модификации проекций изображения-контейнера, полученных на основе субполосного анализа [4; 5] в рамках двумерного косинус-преобразования, с позиций минимизации искажений изображения-контейнера.

Отметим, что субполосный анализ изображений основан на исследовании их свойств с позиций разбиения области определения косинус-преобразования на частотные подобласти (частотные интервалы). Субполосный анализ изображений осуществляется на основе использования субполосных матриц косинус-преобразования, соответствующих заданным частотным интервалам [4–7].

Полученные результаты

В [4–6] показано, что изображение-контейнер Φ_0 размерности $N_1 \times N_2$ пикселей может быть представлено в следующем виде:

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} \gamma_{ik} X_{ik},$$

где γ_{ik} – проекции изображения-контейнера Φ_0 на собственные векторы $\{\vec{q}_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, и $\{\vec{u}_k\}$, $k = 1, 2, \dots, N_2$, субполосных матриц G и H , соответствующих заданному частотному интервалу:

$$\gamma_{ik} = (\vec{q}_i)^T \Phi_0 \vec{u}_k, \quad (2)$$

X_{ik} – базисные изображения двумерного косинус-преобразования, соответствующие собственным векторам \vec{q}_i и \vec{u}_k субполосных матриц G и H :

$$X_{ik} = \vec{q}_i (\vec{u}_k)^T. \quad (3)$$

Учитывая свойство ортонормированности базисных изображений (3) относительно следующей операции:

$$\text{tr}((X_{i_1 k_1})^T X_{i_2 k_2}) = \begin{cases} 1, & i_1 = i_2, \quad k_1 = k_2, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (4)$$

покажем, что искажение изображения-контейнера можно оценить следующим образом. Пусть Φ_0 – исходное изображение-контейнер размерности $N_1 \times N_2$; Φ_1 – изображение, полученное в результате модификации двух проекций γ_0 и γ_1 вида (2) изображения-контейнера Φ_0 ; $\tilde{\gamma}_0$ и $\tilde{\gamma}_1$ – модифицированные значения проекций γ_0 и γ_1 ; X_0 и X_1 – базисные изображения вида (3), соответствующие проекциям γ_0 и γ_1 .

Тогда изображения Φ_0 и Φ_1 можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= \gamma_0 X_0 + \gamma_1 X_1 + Y, \\ \Phi_1 &= \tilde{\gamma}_0 X_0 + \tilde{\gamma}_1 X_1 + Y, \end{aligned} \quad (5)$$

где Y – не модифицированная компонента изображения-контейнера.

В качестве меры искажения σ изображения-контейнера используем квадрат евклидовой нормы разности изображений Φ_0 и Φ_1 :

$$\sigma = \|\Phi_0 - \Phi_1\|^2. \quad (6)$$

Подстановка соотношений (5) в (6) с учетом свойства (4) позволяет получить следующее выражение для вычисления меры искажения изображения-контейнера:

$$\begin{aligned} \sigma &= \|(\gamma_0 - \tilde{\gamma}_0)X_0 + (\gamma_1 - \tilde{\gamma}_1)X_1\|^2 = \\ &= \text{tr}((\gamma_0 - \tilde{\gamma}_0)X_0 + \\ &+ (\gamma_1 - \tilde{\gamma}_1)X_1)^T ((\gamma_0 - \tilde{\gamma}_0)X_0 + (\gamma_1 - \tilde{\gamma}_1)X_1) = \\ &= (\gamma_0 - \tilde{\gamma}_0)^2 + (\gamma_1 - \tilde{\gamma}_1)^2. \end{aligned}$$

Следовательно, для минимизации искажений σ (6) при относительной замене проекций изображения-контейнера на собственные векторы субполосных матриц необходимо найти минимальное значение следующей функции:

$$\sigma = (\gamma_0 - \tilde{\gamma}_0)^2 + (\gamma_1 - \tilde{\gamma}_1)^2 \rightarrow \min_{\tilde{\gamma}_0, \tilde{\gamma}_1 \in Z}, \quad (7)$$

где множество Z определяется условиями (1).

Рассмотрим оптимизационную задачу, соответствующую оптимальной модификации проекций (7) при внедрении нуля:

$$\sigma = (\gamma_0 - \tilde{\gamma}_0)^2 + (\gamma_1 - \tilde{\gamma}_1)^2 \rightarrow \min_{\tilde{\gamma}_0, \tilde{\gamma}_1}, \quad (8)$$

$$\tilde{\gamma}_0 - T_0 \geq \tilde{\gamma}_1. \quad (9)$$

В случае, если значения γ_0 и γ_1 удовлетворяют условию $\gamma_0 - T_0 \geq \gamma_1$, то модификация значений проекций не выполняется, так как при следующих значениях:

$$\tilde{\gamma}_0 = \gamma_0 \text{ и } \tilde{\gamma}_1 = \gamma_1$$

выполняется условие (1), и искажение изображения-контейнера отсутствует.

Рассмотрим задачу (8)–(9) при условии:

$$\gamma_0 - T_0 < \gamma_1. \quad (10)$$



Рисунок 1. Исходные изображения-контейнеры



Рисунок 2. Внедряемое изображение И4

Можно показать, что решение задачи (8)–(10) достигается при следующем условии:

$$\tilde{\gamma}_1 = \tilde{\gamma}_0 - T_0. \quad (11)$$

Для решения задачи (8), (11) рассмотрим задачу минимизации соответствующей функции Лагранжа. В результате получим следующее решение задачи (8), (11):

$$\tilde{\gamma}_0 = \frac{\gamma_0 + \gamma_1}{2} + \frac{T_0}{2}; \quad (12)$$

$$\tilde{\gamma}_1 = \frac{\gamma_0 + \gamma_1}{2} - \frac{T_0}{2}. \quad (13)$$

Аналогичным образом можно получить решение оптимизационной задачи, соответствующей оптимальной модификации проекций (7) при внедрении 1 при условии $\tilde{\gamma}_1 = \tilde{\gamma}_0 + T_0$ в следующем виде:

$$\tilde{\gamma}_0 = \frac{\gamma_0 + \gamma_1}{2} - \frac{T_0}{2}, \quad (14)$$

$$\tilde{\gamma}_1 = \frac{\gamma_0 + \gamma_1}{2} + \frac{T_0}{2}. \quad (15)$$

Для иллюстрации преимуществ предложенного подхода оптимальной модификации значений проекций были проведены вычислительные эксперименты. Целью вычислительных эксперимен-

тов является сравнение искажений изображений-контейнеров, вызванных внедрением данных на основе разработанного подхода (12)–(15) – метод 1, а также следующих известных методов:

– относительная замена модулей пары проекций (метод 2):

а) при внедрении 0: если $|\gamma_0| < |\gamma_1| + T_0$, то

$$\tilde{\gamma}_0 = (|\gamma_1| + T_0) \text{sign}(\gamma_0),$$

б) при внедрении 1: если $|\gamma_1| < |\gamma_0| + T_0$, то

$$\tilde{\gamma}_1 = (|\gamma_0| + T_0) \text{sign}(\gamma_1);$$

– относительная замена пары проекций (метод 3):

а) при внедрении 0: если $\gamma_0 < \gamma_1 + T_0$, то

$$\tilde{\gamma}_0 = \gamma_1 + T_0,$$

б) при внедрении 1: если $\gamma_1 < \gamma_0 + T_0$, то

$$\tilde{\gamma}_1 = \gamma_0 + T_0;$$

– замена знака отдельной проекции (метод 4):

а) при внедрении 0:

$$\tilde{\gamma}_0 = -|\gamma_0|,$$

б) при внедрении 1:

$$\tilde{\gamma}_0 = |\gamma_0|.$$

В качестве изображений-контейнеров были выбраны три различных изображения: И1, И2 и И3 размерностью 512×512 пикселей (см. рисунок 1) из открытых источников Internet.

Внедряемая информация в вычислительных экспериментах формировалась на основе битового представления значений пикселей изображения И4, приведенного на рисунке 2.

Искажение изображения-контейнера, вызванное внедренными данными, оценивалось на основе среднеквадратического отклонения

$$MSE = \|\Phi_0 - \Phi_1\| / \|\Phi_0\|, \quad (16)$$

где Φ_0 – исходное изображение, Φ_1 – изображение с внедренными данными.

Сравниваемые методы изменения проекций были реализованы в рамках программного ком-

Таблица. Искажения (среднеквадратическое отклонение) изображений-контейнеров И1, И2 и И3 при скрытном внедрении 4096 бит данных

Метод	И1	И2	И3
Метод 1	0,0079	0,0071	0,0187
Метод 2	0,0123	0,0112	0,0296
Метод 3	0,0140	0,0124	0,0333
Метод 4	0,0130	0,0117	0,0313

плекса скрытного внедрения информации в изображения на основе субполосного анализа. Вычислительные эксперименты проведены при следующих значениях параметров. Область определения косинус-преобразования была разбита на 16×16 частотных интервалов. Внедрение осуществлено в частотные интервалы, доля энергии (евклидова норма) изображения-контейнера в которых соответствует следующим пороговым значениям суммарной энергии – 0,99 и 0,999 [8–10].

Пороговое значение T_0 (1) выбрано таким образом, чтобы обеспечить извлечение внедренной информации без искажений с учетом среднего значения проекции в каждом частотном интервале V , выбранном для внедрения:

$$T_0 = t_\gamma \sqrt{E_V / (N_1 N_2)},$$

где E_V – энергия изображения-контейнера [9; 10], соответствующая частотному интервалу V ; $N_1 \times N_2$ – размерность изображения-контейнера; t_γ – предварительно задаваемый параметр.

В ходе вычислительных экспериментов для скрытного внедрения в изображения-контейнеры, приведенные на рисунке 1, выбрано значение $t_\gamma = 30$.

В таблице приведены значения искажений (16) изображений-контейнеров И1, И2 и И3 (см. рисунок 1) при скрытном внедрении 4096 бит данных, полученных на основании значений пикселей изображения И4 (см. рисунок 2), при указанных выше значениях параметров. При внедрении применены описанные выше методы изменения проекций: оптимальное изменение пары проекций (метод 1), относительная замена модулей пары проекций (метод 2), относительная замена пары проекций (метод 3), замена знака отдельной проекции (метод 4).

Для наглядности данные, приведенные в таблице, отображены в виде графиков на рисунке 3.

Результаты, приведенные в таблице и на рисунке 3, показывают, что применение метода оптимального изменения пары проекций (метод 1) позволяет получить меньшие искажения анализируемых изображений-контейнеров по

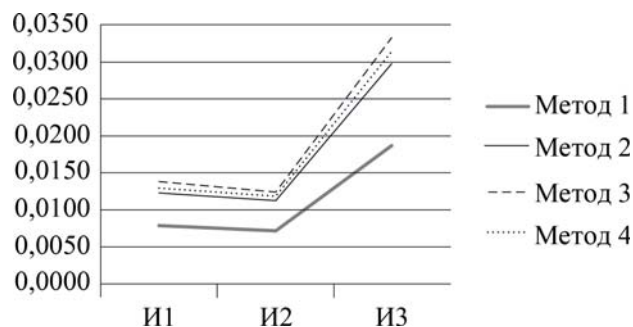


Рисунок 3. Искажения изображений-контейнеров И1, И2 и И3

сравнению с известными методами скрытного внедрения данных в изображения. Наибольшие искажения наблюдаются при применении метода относительной замены пары проекций (метод 3).

Заключение

Таким образом, в работе предложено для оценивания искажений изображений-контейнеров при скрытном внедрении информации на основе субполосного анализа в рамках двумерного косинус-преобразования применять оценки искажения значений проекций изображений на собственные векторы субполосных матриц данного преобразования. Аналитически решена задача поиска оптимальных модифицированных значений проекций изображения-контейнера с позиций минимизации его искажений.

Проведенные вычислительные эксперименты проиллюстрировали преимущество предложенного подхода оптимальной модификации значений проекций по сравнению с известными методами. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00657.

Литература

1. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. М.: Солон-пресс, 2016. 262 с.
2. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: МК-Пресс, 2006. 288 с.
3. Аграновский А.В. Стеганография, цифровые водяные знаки и стеганоанализ. М.: Вузовская книга, 2009. 220 с.
4. Болгова Е.В., Черноморец А.А., Черноморец Д.А. О субполосном анализе изображений в области определения косинус-преобразования // Информационные системы и технологии. 2019. № 6 (116). С. 5–11.
5. Черноморец А.А., Болгова Е.В., Черноморец Д.А. Обобщенный субполосный анализ

- на основе унитарных преобразований // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2015. № 7 (204). С. 97–104.
6. Болгова Е.В., Черноморец А.А. О методе субинтервального скрытного внедрения данных в изображения // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2018. Т. 45, № 1. С. 192–201.
 7. Обобщенный субполосный анализ и синтез сигналов / Е.Г. Жилияков [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. 2019. Т. 17, № 2. С. 139–145.
 8. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А., Голощапова В.А. Реализация алгоритма внедрения изображений на основе использования неинформационных частотных интервалов изображения-контейнера // Вопросы радиоэлектроники. 2011. Т. 4, № 1. С. 96–104.
 9. Болгова Е.В. Свойства субинтервальных матриц двумерного косинусного преобразования // Информационные системы и технологии. 2017. № 6 (104). С. 19–28.
 10. О субполосных свойствах изображений / Е.Г. Жилияков [и др.] // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2013. № 7 (150). С. 175–182.

Получено 25.06.2020

Черноморец Андрей Алексеевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры прикладной информатики и информационных технологий (ПИ и ИТ) Белгородского государственного национального исследовательского университета (НИУ БелГУ). 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-00 * 21-66. E-mail: chernomorets@bsu.edu.ru

Болгова Евгения Витальевна, к.т.н., старший преподаватель кафедры ПИ и ИТ НИУ БелГУ. 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-00 * 21-66. E-mail: bolgova_e@bsu.edu.ru

Коваленко Анастасия Николаевна, старший преподаватель кафедры ПИ и ИТ НИУ БелГУ. 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-00 * 21-66. E-mail: kovalenko_a@bsu.edu.ru

ON THE OPTIMAL MODIFICATION OF IMAGES PROJECTIONS ONTO BASIC VECTORS WITHIN THE INFORMATION HIDDEN EMBEDDING

Chernomorets A.A., Bolgova E.V., Kovalenko A.N.

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation

E-mail: chernomorets@bsu.edu.ru, bolgova_e@bsu.edu.ru, kovalenko_a@bsu.edu.ru

This work is devoted to the problem of developing methods for hidden control over the use and distribution of digital images based on the modification of the decomposition coefficients (projections) of images in various systems of basic vectors, determined with the use of two-dimensional transform. In this work, it was proposed to apply the evaluation of the distortion values of the projection on the subband matrices eigenvectors of given transform for estimating of the image-containers distortion within an information hidden embedding on the basis of the two-dimensional cosine transform subband analysis. The problem of searching for the optimal modified values of the projections is formulated and analytically solved from the position of minimizing the image-container distortion, which is set as the square of the Euclidean norm of the difference between the original and modified images. Computational experiments were performed to illustrate the advantages of the developed method of projection values optimal modification. It is shown that the application of the developed method allows to obtain smaller distortions of the analyzed image-containers in comparison with the known methods of hidden data embedding into images.

Keywords: *hidden embedding, image container, subband analysis, cosine transform, subband matrices, eigenvectors, image projections*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.4.07

Chernomorets Andrey Alekseevich, Belgorod State National Research University, 85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; Associate Professor, Professor of Applied Informatics and Information Technologies Department, Doctor of Technical Science. Tel. +7 472 230-13-00 * 21-66. E-mail: chernomorets@bsu.edu.ru

Bolgova Evgenia Vitalievna, Belgorod State National Research University, 85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; Senior Teacher of Applied Informatics and Information Technologies Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 472 230-13-00 * 21-66. E-mail: bolgova_e@bsu.edu.ru

Kovalenko Anastasia Nikolaevna, Belgorod State National Research University, 85, Pobedy Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; Senior Teacher of Applied Informatics and Information Technologies Department. Tel. +7 472 230-13-00 * 21-66. E-mail: kovalenko_a@bsu.edu.ru

References

1. Gribunin V.G., Okov I.N., Turintsev I.V. *Digital Steganography*. Moscow: Solon-press, 2016, 262 p. (In Russ.)
2. Konahovich G.F., Puzyrenko A.Yu. *Computer Steganography. Theory and Practice*. Kiev: MK-Press, 2006, 288 p. (In Russ.)
3. Agranovskij A.V. *Steganography, Digital Watermarking and Steganoanalysis*. Moscow: Vuzovskaja kniga, 2009, 220 p. (In Russ.)
4. Bolgova E.V., Chernomorets A.A., Chernomorets D.A. On subband image analysis in the domain of cosine transform. *Informatsionnye sistemy i tehnologii*, 2019, no. 6 (116), pp. 5–11. (In Russ.)
5. Chernomorets A.A., Bolgova E.V., Chernomorets D.A. Generalized subband analysis based on unitary transformations. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Ekonomika. Informatika*, 2015, no. 7 (204), pp. 97–104. (In Russ.)
6. Bolgova E.V., Chernomorets A.A. On the method of subinterval covert data injection into images. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Ekonomika. Informatika*, 2018, vol. 45, no. 1, pp. 192–201. (In Russ.)
7. Zhiljakov E.G. et al. Generalized subband signal analysis and synthesis. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 139–145. (In Russ.)
8. Zhiljakov E.G., Chernomorets A.A., Goloschapova V.A. Implementation of the image embedding algorithm based on the use of non-informational frequency intervals of the container image. *Voprosy radioelektroniki*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 96–104. (In Russ.)
9. Bolgova E.V. Properties of subinterval matrices of two-dimensional cosine transform. *Informatsionnye sistemy i tehnologii*, 2017, no. 6 (104), pp. 19–28. (In Russ.)
10. Zhiljakov E.G. et al. About subband image properties. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Ekonomika. Informatika*, 2013, no. 7 (150), pp. 175–182. (In Russ.)

Received 25.06.2020