

Способ визуализации макродефектов динамических периодических структур, основанный на эффекте возникновения муаровых полос

Н.Т. Авласевич¹, С.С. Ануфрик², А.М. Ляликов³

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Беларусь

¹ ORCID: 0000-0002-1525-0526, avlasevichnt@tut.by

² ORCID: 0000-0002-5761-4965, anufrikk@grsu.by

³ ORCID: 0000-0003-2525-6611, amlialikov@grsu.by

Аннотация

Особый интерес представляют объекты, характеризующиеся перестраиваемой периодической структурой. Параметры структуры таких объектов изменяются не только в пространстве, но и во времени. Изучение поведения в пространстве и визуализация дефектов периодических структур является одной из основных задач измерительного контроля.

В работе предложен способ визуализации макродефектов динамических периодических структур, основанный на эффекте возникновения муаровых полос. Простой в техническом исполнении способ визуализации включает регистрацию серии снимков динамической периодической структуры с последующим совмещением выбранной пары снимков. Описаны устройства регистрации серии снимков и формирования муаровых картин. Особенностью реализации данного способа визуализации макродефектов является возможность использования некогерентного света как при регистрации снимков, так и в процессе формирования муаровых полос. При создании устройств реализации способа в качестве источников света были использованы бытовые светодиодные лампы LED A60 с матовой колбой. Предложенный способ визуализации использован для изучения динамики металлической маски, поверхность которой подвергалась переменной механической деформации. Получена серия муаровых картин, визуализирующих пространственное положение макродефекта поверхности маски в различные моменты времени ее механической деформации. Картина муаровых полос, визуализирующая положение макродефекта периодической структуры, регистрировалась цифровой фотокамерой и выводилась на экран монитора персонального компьютера.

Ключевые слова: динамическая периодическая структура, макродефект, муаровый эффект, серия снимков объекта, некогерентное освещение, деформация поверхности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существуют объекты, физические параметры структур которых описываются периодическими функциями. К таким объектам относятся дифракционные элементы интегральной и волоконной оптики, фотонно-кристаллические структуры, прозрачные метаматериалы т.п. [1-5]. Физические параметры таких объектов изменяются как в пространстве, так и во времени. Примерами таких объектов являются фотоиндуцированные доменные структуры, электрически управляемые жидкокристаллические элементы, динамические магнетонные кристаллы и т.п. [6-8]. Кроме создания новых технологий изготовления таких структурированных объектов, стоит задача и по измерительному контролю их параметров. Одними из актуальных задач по контролю качества структурированных объектов являются выявление, визуализация и оценка величины макродефекта периодической структуры.

Под макроскопическим дефектом периодической структуры понимают области объекта, в которых происходит отклонение периода структуры от некоего среднего значения, а также отклонение профиля ее поверхности от некоей эталонной. Размеры этих дефектов значительно превышают период структуры. Вышеотмеченные макродефекты в отличие от случайных образований типа загрязнений или разрывов элементов структуры могут быть определены муаровыми, интерференционными, а также теньевыми методами [9-12]. Реализация вышеперечисленных методик осуществляется с источниками когерентного света для муаровых и интерференционных способов и некогерентных источников для муаровых и теньевых способов. Однако следует отметить, что картины, визуализирующие макродефекты периодических структур, полученные в некогерентном свете, имеют более высокое качество, чем картины, полученные в когерентном свете. Ухудшение качества во втором случае связано с присутствием спекл-шумов в изображениях, сформированных когерентным светом. В этом случае при использовании светочувствительных матриц [13] для регистрации муаровых картин и последующей цифровой обработке желательно использовать источники некогерентного света [14].

В данной статье предложен простой в технической реализации способ визуализации макродефектов пропускающей динамической периодической структуры при использовании некогерентного освещения. Данный способ состоит из двух этапов. На первом этапе регистрируют в различные моменты времени серии снимков динамической периодической структуры при деформации поверхности. На втором этапе реализации способа формируют картину муаровых полос, наблюдаемую на фоне матового экрана при совмещении выбранной пары снимков, и изображение картины выводят на экран персонального компьютера.

2. РЕГИСТРАЦИЯ СЕРИИ СНИМКОВ

Ранее использование некогерентного источника света при визуализации макродефектов периодических структур позволило получать муаровые и интерференционные картины повышенной чувствительности с достаточно высоким качеством [15-17]. Однако, в этих работах для реализации метода требовалось применение эталонного снимка исследуемой периодической структуры, а некогерентное освещение применялось только на конечном этапе процесса оптической обработки.

Рассмотрим наиболее простой случай динамической периодической структуры, представляющей собой объект в виде тонкого амплитудного транспаранта, пространственное пропускание которого описывается периодической функцией. При этом предположим, что параметры, описывающие периодическую структуру такого объекта изменяются не только в пространстве, но и во времени.

На рис. 1а приведена оптическая схема, поясняющая регистрацию снимка S исследуемой динамической периодической структуры O . Серия снимков регистрируется в оптически сопряженной с исследуемой периодической структурой O посредством объектива L плоскости, в которой устанавливается фотографический материал на прозрачной основе. Для обеспечения равномерности освещения периодической структуры O использовался диффузный рассеиватель D , который освещался посредством расходящегося некогерентного источника света Ls . В качестве элементов L и S можно использовать пленочную фотокамеру.

Выберем направления осей плоской системы координат так, чтобы ось y была параллельна штрихам изображения периодической структуры в плоскости снимка. В этом случае распределение интенсивности света в плоскости снимка исследуемой периодической структуры можно представить в виде ряда Фурье

$$I(x, y, t) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n \cos^2 \left[\frac{\pi x}{T} + \frac{1}{2} \varphi(x, y, t) \right], \quad (1)$$

где a_n – коэффициенты, T – период структуры, $\varphi(x,y,t)$ – функция, определяющая искажения периодической структуры и описывающая макродефект. Эта функция, которую можно представить в виде суммы отдельных составляющих:

$$\varphi(x,y,t) = \varphi_1(x,y,t) + \varphi_2(x,y,t), \quad (2)$$

где $\varphi_1(x,y,t)$ – отвечает за нарушение периодичности элементарной структуры, вследствие отклонения периода штрихов от некоего среднего значения, а также из-за изгиба штрихов и содержит в себе всю информацию о положении штриха [18], $\varphi_2(x,y,t)$ – характеризует отклонение формы поверхности структуры от плоскости и определяет изменение рельефа поверхности в пространстве и времени [19].

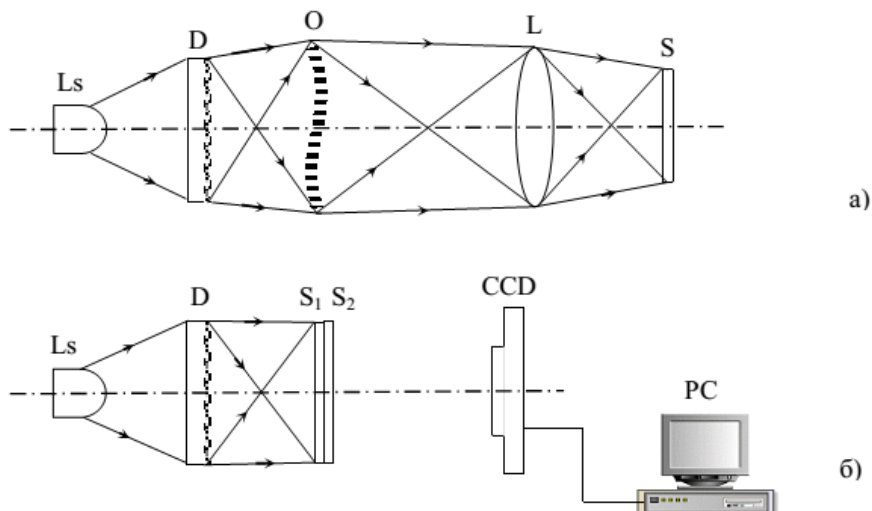


Рис. 1. Оптические схемы, поясняющие: а – регистрацию снимка S исследуемой динамической периодической структуры, б – регистрацию муаровой картины при совмещении пары снимков $S_1 S_2$: Ls – источник белого света, D – диффузный рассеиватель, O – исследуемая периодическая структура, L – объектив, S – регистрируемый снимок, S_1, S_2 – зарегистрированные снимки, CCD – цифровая фотокамера, PC – персональный компьютер

Таким образом, на фоне рассеивателя D в различные моменты времени регистрировалась серия снимков S исследуемой периодической структурой O . После химической обработки фотографического материала амплитудные коэффициенты пропускания серии снимков $T_1(x,y,t_1), T_2(x,y,t_2), \dots, T_N(x,y,t_N)$. Коэффициент амплитудного пропускания k -го снимка

$$T_k(x,y,t_k) = \sum_{n=0}^{+\infty} b_n \cos \left[\frac{2n\pi x}{T} + n\varphi(x,y,t_k) \right], \quad (3)$$

где b_n – коэффициенты.

3. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ МАКРОДЕФЕКТОВ

Для определения поведения динамики функции $\varphi(x,y,t)$ можно использовать оптические методы, основанные на использовании эталонной периодической структуры с периодом близким периоду T исследуемой структуры. Муаровые полосы, визуализирующие поведение функции $\varphi(x,y,t)$ в пространстве и во времени, образуются при наложении изображений исследуемой и эталонной периодических структур [10]. При отсутствии эталонной периодической структуры для образования муаровой картины, визуализирующей макродефекты, можно использовать наложение двух изображений

периодической структуры, сдвинутых друг относительно друга. Ранее такой подход был использован для определения пространственного положения поверхностей, имеющих периодическую текстуру, а также для выявления макро и микродефектов амплитудных масок [19-20].

Для определения изменений функции

$$\Delta\varphi_{ik}(x,y) = \varphi_i(x,y,t_i) - \varphi_k(x,y,t_k), \quad (4)$$

произошедших между регистрацией двух снимков в моменты времени t_i и t_k , можно использовать подход, применяемый в дифференциальной голографической интерферометрии [21]. В дифференциальной голографической интерферометрии восстанавливают интерференционную картину, используя голограмму, записанную на одном носителе по методу двух экспозиций в моменты времени t_i и t_k , или две отдельных голограммы, записанные в соответствующие моменты времени. Однако в отличие от метода дифференциальной интерферометрии регистрация снимков динамической периодической структуры не требует сложных в технической реализации оптических схем записи, а также оптической обработки. На рис. 1б приведена оптическая схема, позволяющая в некогерентном свете формировать муаровую картину, отображающую поведение функции $\Delta\varphi_{ik}(x,y)$ при использовании двух снимков динамической периодической структуры с амплитудными коэффициентами пропускания $T_i(x,y,t_i)$ и $T_k(x,y,t_k)$, зарегистрированных в моменты времени t_i и t_k . Муаровая картина наблюдается при совмещении пары снимков $S_1 S_2$ на фоне рассеивателя D при освещении последним источником света Ls . При совмещении пары снимков, результирующий коэффициент амплитудного пропускания $T_{ik}(x,y)$ определится, как $T_i(x,y,t_i)$ и $T_k(x,y,t_k)$ [22] или

$$T_{ik}(x,y) = \sum_{n=0}^{+\infty} b_n \cos\left[\frac{2n\pi x}{T} + n\varphi(x,y,t_i)\right] \sum_{n=0}^{+\infty} b_n \cos\left[\frac{2n\pi x}{T} + n\varphi(x,y,t_k)\right]. \quad (5)$$

Распределение интенсивности света $I_{ik}(x,y)$ на выходе совмещенных снимков $S_1 S_2$ будет пропорционально коэффициенту амплитудного пропускания $T_{ik}(x,y)$, определяемого выражением (5). Для нахождения уравнения, описывающего середины муаровых полос, соответствующих областям с минимальной видимостью периодической структуры, ограничимся в выражении (5) гармониками, не выше основной. В этом случае

$$\begin{aligned} I_{ik}(x,y) &= \left\{ c_0 + c_1 \cos\left[\frac{2\pi x}{T} + \varphi(x,y,t_i)\right] \right\} \left\{ c_0 + c_1 \cos\left[\frac{2\pi x}{T} + \varphi(x,y,t_k)\right] \right\} = \\ &= c_0^2 + \frac{c_1^2}{2} \cos[\varphi(x,y,t_i) - \varphi(x,y,t_k)] + \frac{c_1^2}{2} \cos\left[\frac{4\pi x}{T} + \varphi(x,y,t_i) + \varphi(x,y,t_k)\right] + \\ &+ \frac{c_0 c_1}{2} \cos\left\{\frac{1}{2}[\varphi(x,y,t_i) - \varphi(x,y,t_k)]\right\} \cos\left\{\frac{2\pi x}{T} + \frac{1}{2}[\varphi(x,y,t_i) + \varphi(x,y,t_k)]\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

где c_0 и c_1 – коэффициенты. Последний член в выражении (6) описывает муаровые полосы, соответствующие областям совмещенных снимков, в которых видимость периодической структуры минимальна. Приравняв последний член в выражении (6) нулю:

$$\frac{c_0 c_1}{2} \cos\left\{\frac{1}{2}[\varphi(x,y,t_i) - \varphi(x,y,t_k)]\right\} \cos\left\{\frac{2\pi x}{T} + \frac{1}{2}[\varphi(x,y,t_i) + \varphi(x,y,t_k)]\right\} = 0, \quad (7)$$

с учетом (5) получим уравнения, описывающие середины муаровых полос:

$$\varphi_{ik}(x,y) = \pi(2m + 1), \quad (8)$$

где $m=0,1,2,\dots$

Таким образом, муаровые полосы соответствуют областям изображения, в которых видимость периодической структуры с периодом T принимает минимальное значение.

4. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для подтверждения работоспособности данного способа исследования динамических периодических структур в качестве исследуемого объекта была выбрана периодическая металлическая маска, поверхность которой подвергалась механической деформации. При деформировании поверхности металлической маски происходило отклонение ее поверхности от плоскости. Серия снимков данного объекта регистрировалась пленочным зеркальным фотоаппаратом Зенит TTL на фотопленку Микрат 300. В качестве проявителя использовался контрастный проявитель Kodak D-19, обеспечивающий получение высококонтрастного изображения исследуемой периодической структуры.

Восстановление муаровых картин, отображающих динамику развития деформации поверхности исследуемой металлической маски при использовании пары снимков, зарегистрированных в различные моменты времени, производилось в схеме, приведенной на рис. 1б. Муаровые картины регистрировались цифровой камерой CCD при фокусировке на плоскость совмещенных снимков S_1 S_2 , установленных на фоне диффузного рассеивателя D . Следует отметить, что при создании макетов устройств, приведенных на рис. 1а и рис. 1б, использовалась общая осветительная система. В качестве источника света L_s использовалась светодиодная лампа LED A60 с матовой колбой и мощностью 7 Вт. Совмещение снимков S_1 и S_2 осуществлялось в специальном оптическом устройстве, предназначенном для совмещения голограмм. Данное устройство обеспечивало абсолютную погрешность относительного сдвига снимков на уровне 5 мкм [21].

На рис. 2 приведены фотографии муаровых картин, полученных в схеме (рис. 1б) при использовании пар снимков, зарегистрированных в различные моменты времени ($t_1=1с$, $t_2=3с$, $t_3=5с$, $t_4=8с$ и $t_5=12с$ после начала деформации поверхности исследуемой металлической маски).



Рис. 2. Фотографии муаровых картин пар снимков, зарегистрированных в различные моменты времени: а) t_1 и t_3 , б) t_3 и t_5 , в) t_2 и t_4

Муаровые картины отображают изменения профиля поверхности металлической маски, произошедшие из-за деформации ее поверхности, за промежутки времени, соответствующие регистрации пар снимков с амплитудными коэффициентами пропускания: $T_1(x,y,t_1)$ и $T_3(x,y,t_3)$ (рис. 2а); $T_3(x,y,t_3)$ и $T_5(x,y,t_5)$ (рис. 2б); $T_2(x,y,t_2)$ и $T_4(x,y,t_4)$ (рис. 2в).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден сравнительно простой с точки зрения технической реализации способ визуализации макродефектов пропускающей динамической периодической структуры. Способ основан на эффекте образования муаровых полос при совмещении снимков исследуемой структуры, зарегистрированных в различные моменты времени. При макетировании устройств используется доступное в цене оборудование. Для получения количественной информации муаровые картины могут быть обработаны по известным алгоритмам цифровой обработки интерферограмм [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu N. [et al.] Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies // *Nature Materials*. 2008. V.7. P.31-37.
2. Viegas D. [et al.] Long-Period Grating Fiber Sensor With In Situ Optical Source for Remote Sensing // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2010. V. 22, №20. P. 1533-1535.
3. Денисюк И.Ю. [и др.] Оптический узкополосный фильтр на основе брэгговской решетки, записанной в микроканальном волноводе, заполненном фотополимером // *Оптический журнал*. 2013. Т.80, №3. С.87-91.
4. Liao C. R., Wang D. N. Review of Femtosecond Laser Fabricated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Sensing // *Photonic Sensors*. 2013. V. 3, № 2. P. 97-101.
5. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) // *ЖТФ*. 2013. Т.83. В.1. С.3-28.
6. Устинов И.А., Никитин А.А., Устинов А.Б. Динамический магнотонный кристалл на основе феррит-сегнеэлектрической слоистой структуры // *ЖТФ*. 2016. Т.86. В. 3. С. 155-158.
7. Кабанова О.С. [и др.] Электрически управляемые волноводные жидкокристаллические элементы // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т.40., №14. С.30-35.
8. Голенищев-Кутузов А.В. [и др.] Перестраиваемый акустический резонатор на периодических доменных структурах // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т.38. В.18. С. 1-6.
9. Грошенко Н.А., Макалиш О.С., Воляр А.В. Оптические вихри в поле рассеяния магнитных доменных голограмм // *ЖТФ*. 1998. Т.68., №12 С.54-58.
10. Дюрелли А., Паркс В. Анализ деформаций с использованием муара // М.: Мир, 1974. 353 с.
11. Ляликов А.М. Визуализация макроскопических дефектов поверхности объекта с периодической структуры // *Оптический журнал*. 1995. №1. С.28-31.
12. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. Визуализация дефектов отдельной компоненты составного дифракционного оптического элемента // *Проблемы физики, математик и механики*. 2017. №3. С. 7-12.
13. Гусев М.Е. [и др.] Методы цифровой голографической интерферометрии и их применение для измерения наноперемещений // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2011. Т.2, №1. С. 23-39.
14. Schnars U., Jueptner W. *Digital Holography* // Berlin: Springer Verlag, 2004. 164 p.
15. Ляликов А. М. Повышение чувствительности измерений при оптической обработке в реальном времени изображений объектов с периодической структурой // *ЖТФ*. 1999. Т.69, №7. С.138-139.
16. Ляликов А. М. Муаровая дефектоскопия повышенной чувствительности при сравнении композитных периодических структур // *ЖТФ*. 2001. Т.71, №5. С.82-84.
17. Дич Л.З. О точности дифрактометрической сертификации периодических стандартов // *Оптика и спектроскопия*. 1997. Т.83, №3. С. 509-515.
18. Ляликов А. М. Визуализация формы поверхности объектов с периодической структурой // *Оптический журнал*. 1994. № 5. С. 23- 25.
19. Ляликов А. М. Двухэкспозиционная голографическая регистрация информации при исследовании макрорельефа диффузно рассеивающих поверхностей методом проекции полос // *Оптика и спектроскопия*. 1996. Т. 80, № 5. С. 849-855.
20. Ляликов А. М. Определение макродефектов пропускающих периодических структур в белом свете на основе сдвига изображений // *Оптика и спектроскопия*. 2005. Т. 98, № 3. С. 522-527.
21. Голографическая интерферометрия фазовых объектов / А. К.Бекетова [и др.]; под ред. Г. И. Мишина. Л.: Наука, 1979. 232с.
22. Вест Ч. Голографическая интерферометрия . М.: Мир, 1982. 504 с.
23. Malacara D., Servín M., Malacara Z. *Interferogram Analysis for Optical Testing* // Taylor & Francis Group, 2005. 568p.

Method for visualization of macrodefects of dynamic periodic structures, based on the effect of the emergence of moiré strips

N.T. Avlasevich¹, S.S. Anufrik², A.M. Lialikov³

Yanka Kupala State University of Grodno

¹ ORCID: 0000-0002-1525-0526, avlasevichnt@tut.by

² ORCID: 0000-0002-5761-4965, anufrick@grsu.by

³ ORCID: 0000-0003-2525-6611, amlialikov@grsu.by

Abstract

Of particular interest are objects characterized by a tunable periodic structure. The structure parameters of such objects change not only in space, but also in time. The study of behavior in space and visualization of defects in periodic structures is one of the main tasks of measuring control.

The paper proposes a simple method of visualization of macrodefects of dynamic periodic structures based on the effect of the appearance of moiré fringes. An easy-to-use visualization method involves registering a series of snapshots of a dynamic periodic structure followed by combining a selected pair of snapshots. The devices for recording a series of snapshots and forming moiré paintings are described. A feature of the implementation of this method of visualization of macrodefects is the possibility of using incoherent light both when registering snapshots and in the process of forming moiré fringes. When creating a device for implementing the method, household LED lamps A60 with a matte bulb were used as light sources. A series of moiré patterns was obtained, visualizing the spatial position of the macrodefect of the mask surface at various points in time of its mechanical deformation. A pattern of moiré fringes, visualizing the position of a macrodefect of a periodic structure, was recorded by a digital camera and displayed on a personal computer monitor screen.

Keywords: dynamic periodic structure, macrodefect, moiré effect, a series of snapshots of the object, incoherent lighting, surface deformation.

References

1. Szeliski, R. Computer vision. Algorithms and applications / R. Szeliski // Springer US. – 2010. – P. 957.
2. Maggio, E. Video tracking theory and practice / E. Maggio, A. Cavallaro. – Wiley, 2011. – P. 292.
3. Wu, Y. Tracking appearances with occlusions // Y. Wu, T. Yu, G. Hua // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2003. – P. 289-295.
4. Harris, C. A combined corner and edge detector / C. Harris, M. Stephens // Proceedings of 4th Alvey Vision Conference. – 1988. – P. 147-151.
5. Mitiche, A. Computer vision analysis of image motion by variational methods / A. Mitiche, J. K. Aggarwal // Springer US. – 2013. – P. 207.
6. Fleet, D. Mathematical models for computer vision / D. Fleet, Y. Weiss // Springer US. – 2006. – P. 606.
7. Alatan, A. Image sequence analysis for emerging interactive multimedia services / A. Alatan, L. Onural, M. Wollborn, R. Mech, E. Tuncel, T. Sikora // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 1998. – P. 525-538.

8. Cavallaro, T. Interaction between high-level and low-level image analysis for semantic video object extraction / T. Cavallaro // *Journal on Advances in Signal Processing*. – 2004. – Vol. 2008. – № 1. – P. 786-797.
9. Freeman, W. Orientation histograms for hand gesture recognition / W. Freeman, M. Roth // *Proceedings of the Workshop on Automatic Face and Gesture Recognition*. – 1995. – P. 296-301.
10. Gaganov, V. Segmentatsiya dvizhushhikhsya ob'ektov v videopotoke / V. Gaganov, A. Konushin // *Komp'yuternaya grafika i mul'timedia*. – 2004. – № 2 (3). – <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/67> (date of access: 01.02.2017). [In Russian]
11. Heikkila, M. A texture-based method for detecting moving objects / M. Heikkila, M. Pietikainen, J. Heikkila // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2006. – P. 657-662.
12. Tomasi, C. Good features to track / C. Tomasi, J. Shi // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 1994. – P. 593-600.
13. Arulampalam, M. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking / M. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, T. Clapp // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2002. – № 2 (50). – P. 174-178.
14. Del Bimbo, A. Particle filter-based visual tracking with a first order dynamic model and uncertainty adaptation / A. Del Bimbo, F. Dini // *Computer Vision and Image Understanding*. – 2011. – № 6 (115). – P. 771-786.
15. Comaniciu, D. Kernel-based object tracking / D. Comaniciu, V. Ramesh, P. Meer // *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2003. – P. 564-577.
16. Rahimi, L. Reducing drift in differential tracking / L. Rahimi, P. Morency, T. Darrell // *Computer Vision and Image Understanding*. – 2008. – № 2 (109). – P. 97-111.
17. Kakovkin, P.A. Application of artificial neural networks for solving the problem of two-dimensional geofields reconstruction / P.A. Kakovkin, A.A. Druki // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. – 2016. – № 327 (2). – P. 35-43.
18. Viola, P. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / P. Viola, M. Jones // *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – 2001. – P. 511-518.
19. Shapiro, L. *Computer Vision* / L. Shapiro, G. Stockman // Prentice Hall. – 2001. – P. 617.
20. The image processing library OpenCV. Source: <https://opencv.org>.
21. The GUI development library QT. Source: <https://www.qt.io>.
22. Database of images Baker et al. Source: <http://vision.middlebury.edu/flow>.
23. Database of videofiles Boston Head Tracking. Source: <https://www.cs.bu.edu/groups/ivc/HeadTracking/Home.html>.