

УДК 621.396.96

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В ИНТЕРЕСАХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ГОРОДСКОЙ МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ КАРТЫ

С. Н. Кириллов, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, д.т.н., профессор; kirillov.lab@gmail.com

В. М. Бердников, доцент кафедры РУС РГРТУ, к.т.н.; bvm1986@mail.ru

Э. В. Акопов, инженер кафедры РУС РГРТУ; akop78195@gmail.com

Обоснованы требуемые характеристики алгоритма обработки изображений системы видеопозиционирования объектов в урбанизированной среде, использующей контуры рельефа местности и цифровую карту. Цель работы – разработка алгоритма обработки видеоинформации в целях позиционирования в городской местности при наличии мешающих объектов с характеристиками, обеспечивающими значения среднеквадратического отклонения ошибки определения местоположения в пределах 3 м. Предложен алгоритм выделения контуров рельефа местности на изображениях урбанизированной среды, полученных с помощью видеокамеры. При этом показано, что средняя угловая ошибка выделения контура рельефа местности составляет менее 2 градусов, что обеспечивает значения среднеквадратической ошибки позиционирования до 3 м при использовании набора видеокамер с суммарным углом обзора по азимуту 360 градусов в отсутствии данных об ориентации системы в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: видеопозиционирование, видеонавигация, городская местность, цифровая карта, контуры рельефа местности.

Введение

Уязвимость глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) к действию различных мешающих факторов (многолучевость, затенение спутников высокими объектами, преднамеренные помехи и т.п. [1]), приводит к необходимости создания альтернативных систем позиционирования на местности. Один из таких способов определения местоположения основан на использовании видеоинформации об окружающей обстановке, полученной с помощью видеокамер [2, 3, 4, 5]. К преимуществам данного подхода можно отнести автономность (не требуются опорные станции, спутники и т.п.), скрытность (т. к. при работе видеоустройств отсутствует излучение во внешнюю среду), широкое распространение и невысокая стоимость видеокамер по сравнению с радиолокационной и лазерной аппаратурой, а также возможность совмещения различных функций видеосистем.

Область применения видеонавигации и видеопозиционирования для роботизированных аппаратов представляет наибольший интерес в связи с общим ростом востребованности роботов, в состав большинства из которых входит одна или несколько видеокамер.

В работах [2, 3] представлена система видеопозиционирования в урбанизированной среде, использующая сигнатуры контуров рельефа местности (СКРМ), полученные из изображения окружающей обстановки и цифровой карты (ЦК). При этом не требуется дополнительной подготовки в виде установки специальных меток [4] или изучения области позиционирования, включающего предварительную съемку видеоданных на местности [5]. Однако представленная система использует алгоритм выделения контуров рельефа местности, основанный на глобальной пороговой обработке, который подвержен отрицательному влиянию неоднородности фона [6]. Также данная система не полностью учитывает действие мешающих объектов (МО), т.е. высоких объектов сцены, искажающих СКРМ, но не представленных на ЦК (столбы, провода, рекламные баннеры и др.).

Наиболее опасными МО являются деревья, что объясняется разнообразием структуры и большими размерами. В ряде случаев действие данных МО столь значительно, что информацию о контурах зданий или их наличии в соответствующей области изображения получить невозможно. В связи с этим при обработке

изображений городской местности необходим учет неинформативных азимутальных направлений.

Наиболее значимой частью системы видеопозиционирования, по большей части определяющей точность вычисления координат, является блок обработки изображений, функции которого заключаются в выделении СКРМ из видеoinформации о городской местности. При этом в современных работах по данному направлению отсутствуют достаточно надежные алгоритмы, обеспечивающие решение данной задачи при наличии МО.

Цель работы: разработка алгоритма выделения контуров рельефа местности (АВКРМ) блока обработки изображений системы видеопозиционирования с характеристиками, обеспечивающими значения среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки определения местоположения в пределах $\sigma_r \leq 3$ м.

Этапы работы системы видеопозиционирования

На рисунке 1 приведена структурная схема предлагаемой системы видеопозиционирования в городской местности, использующей ЦК [2].



Рисунок 1 – Структурная схема системы видеопозиционирования объектов

В работе представленной системы позиционирования можно выделить следующие этапы.

1. Формирование исходных данных для системы, которыми являются изображение I , полученное при помощи видеокамеры/тепловизора, и информация о направлении объектива в вертикальной плоскости, которая может обеспечиваться инклинометром.

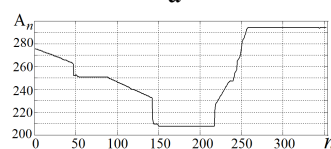
2. Предварительная обработка включает выделение СКРМ на изображении I (рисунок 2, а). При этом цифровому изображению из M на N пикселей (M, N – количество элементов изображения в угломестной и азимутальной плоскости) сопоставляется вектор $\bar{A}$, включающий N элементов (рисунок 2, б), при этом A_n представляет собой номер строки, соответствующий выделенному на изображении контуру в n – м столбце.

Также на этапе предварительной обработки выделяется сигнатура неинформативных направлений (СНН) $\bar{X}$ (X_n – n -й элемент $\bar{X}$), отражающая азимутальные координаты с наиболее выраженным действием МО (рисунок 3), для исключения соответствующих отчетов СКРМ из рассмотрения при последующем вычислении позиции видеокамеры.

Это возможно благодаря тому, что информация, содержащаяся в СКРМ, при наличии кругового обзора имеет некоторую избыточность.



а



б

Рисунок 2 – Определение сигнатур контуров рельефа местности: а – исходное изображение; б – СКРМ

3. Определение местоположения объекта путем построения эталонных СКРМ, представленных в виде сигнатуры B , для различных значений координат из области неопределенности на основе построения перспективной модели [7] объектов сцены. При этом используется ЦК и данные об ориентации объектива в вертикальной плоскости (измерения инклинометра). В каждой точке вычисляется целевая функция $f(x, y)$, имеющая смысл меры различия между фактическими и эталонными СКРМ. Далее в процессе работы алгоритма вычисляются координаты глобального экстремума целевой функции $(\hat{x}_\phi, \hat{y}_\phi)$, которые принимаются в качестве оценки координат объекта.

Для рассматриваемой системы, использующей видеокамеры с суммарным углом обзора по азимуту 360 градусов, с учетом неинформативных направлений предлагается целевая функция следующего вида:

$$f(x, y) = \max_j \left(\sum_{n=0}^{N-1} ((1 - X_n) \cdot (A_n - m_A) \cdot (B_p - m_B)) \right), \quad (1)$$

$$j = \overline{0, N-1}, \quad p = \text{mod}(n - j, N);$$

где m_A, m_B – среднее значение фактической и эталонной СКРМ и $\text{mod}(n - j, N)$ – остаток от деления $n - j$ на N . Данная функция имеет смысл периодической свертки и может вычисляться с помощью БПФ.

Для определения экстремума целевой функции в рассматриваемой системе видеопозиционирования используется многоэтапная процедура поиска с поэтапным уменьшением рассматриваемой области позиционирования и увеличением разрешения используемого изображения [2].

Исследование влияния точности выделения СКРМ на погрешность видеопозиционирования

Для формирования требований к характеристикам АВКРМ системы видеопозиционирования необходимо исследовать зависимости ошибки позиционирования от точности выделения СКРМ и количества неинформативных направлений. Ввиду сложности аналитического вывода этих зависимостей данные характеристики были получены путем имитационного моделирования. При этом рассматривалась система видеопозиционирования, использующая набор видеокамер с суммарным углом обзора по азимуту 360°, без данных об ориентации в горизонтальной плоскости с учетом неинформативных направлений.

Исследование включало определение позиции объекта по изображениям, полученным из восьми точек на территории г. Рязани, при

использовании реальной ЦК данной местности. В целях имитации работы АВКРМ использовались модельные СКРМ $\bar{A}^M$ вида:

$$\bar{A}^M = (\bar{A}^H + \bar{A}^H) \cdot (1 - \bar{X}), \quad (2)$$

где $\bar{A}^H$ – неискаженные СКРМ, $\bar{A}^H$ – искажающая сигнатура из N элементов, которая отражает действие погрешности АВКРМ. При этом в качестве неискаженных контуров $\bar{A}^H$ приняты сигнатуры, полученные с помощью графического редактора.

Математическая модель искажающей сигнатуры вводилась эвристически и имеет вид:

$$A_j^H = \Pi \left(\sum_{l=0}^K A_{(j+l)}^N \right), \quad \Pi(a) = \begin{cases} a, & \text{при } a > 0, \\ 0, & \text{при } a \leq 0; \end{cases} \quad (3)$$

где A^N – случайный процесс с нормальным распределением, a – действительное число. Величина окна усреднения составляла $K = (0.01 \dots 0.05) \cdot N$ и выбиралась в зависимости от характера действия МО.

В связи со случайным характером зависимости факта появления МО от азимута математическая модель СНН имеет вид:

$$X_n = \text{sign}(A_k^p - S_H); \quad n = \overline{0, N-1}; \quad k = \text{mod}(n, \delta); \quad (4)$$

где δ – минимальный азимутальный размер МО (в данном исследовании принято $\delta = 6^\circ$), A_k^p – случайный процесс с равномерным распределением, S_H – имитируемая доля неинформативных направлений. При этом доля неинформативных направлений определяется по формуле:

$$S_x = \left(\sum_{n=0}^{N-1} X_n \right) / N. \quad (5)$$

На рисунке 4 представлены зависимости СКО ошибки σ_r позиционирования (в метрах) от угловой погрешности вычисления СКРМ $\Delta\theta$ (в градусах) для различных значений доли неинформативных направлений.

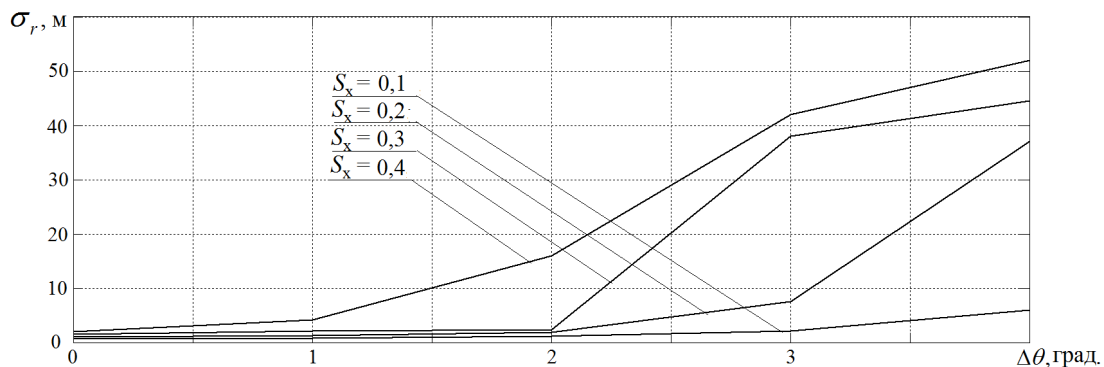


Рисунок 4 – Зависимость ошибки позиционирования от точности выделения СКРМ

Данные зависимости были получены в следующих условиях:

- при съемке применялись шесть видеокамер с параметрами $M \times N = 288 \times 352$ пикселей, угол обзора в горизонтальной и вертикальной плоскостях составлял $\beta = 60$ градусов, $\nu = 49$ градусов соответственно;

- объем статистики оценки ошибки позиционирования для каждой точки $N_{cm} = 100$.

Анализ зависимостей, приведенных на рисунке 4, позволяет сделать следующие выводы:

- при увеличении доли неинформативных направлений для сохранения ошибки позиционирования на фиксированном уровне требуется большая точность выделения СКРМ;

- для получения значений СКО ошибки позиционирования $\sigma_r \leq 3$ м АВКРМ должен обеспечивать выделение СКРМ со средней ошибкой в пределах $\Delta\theta = 2$ градусов (при значениях доли направлений, лежащих в диапазоне $S_x \leq 0,25$).

Алгоритм выделения контуров рельефа местности

При обработке изображений в целях видеопозиционирования возникают проблемы, связанные с наличием крупных областей, соответствующих МО, затеняющих границы зданий (главным образом, кроны деревьев) и создающих неинформативные направления; действием МО с малыми угловыми размерами, искажающих контур рельефа местности; неоднородностью яркости неба (усложняющей применение пороговой обработки при детектировании фона [6]).

Поэтому при выделении СКРМ целесообразно использовать предварительную класси-

фикацию областей изображения, направленную на определение частей снимка, с высокой вероятностью содержащих границы фона и зданий. Это позволит обеспечить следующие преимущества при выделении контуров рельефа местности:

- автоматическое исключение из рассмотрения крупных зон изображения с выраженным действием МО;

- возможность достаточно эффективной локальной пороговой обработки областей, содержащих искомый контур, так как неоднородность фона в небольшой части изображения значительно ниже, чем по всему снимку [6];

- возможность устранения влияния МО с малыми угловыми размерами при морфологической обработке [6].

На основании вышесказанного предложен алгоритм вычисления СКРМ (рисунок 5), включающий следующие этапы:

- разделение исходного изображения I на K областей-сегментов $i_1, i_2, \dots, i_K$ (сегментация, рисунок 5, а-б);

- выделение сегментов $i_1^F, i_2^F, \dots, i_Q^F$, включающих границы фона и зданий (СГФЗ) на изображении (рисунок 5, в-г);

- бинаризация всех СГФЗ с последующим проведением обработки, направленной на уменьшение влияния МО (рисунок 5, д-е);

- вычисление элементов СКРМ $a_1, a_2, \dots, a_Q$ для каждого обработанного бинарного СГФЗ;

- объединение данных элементов в результирующую СКРМ A для всего изображения, а также вычисление СНН X на основе направлений, на которых не определен элемент СКРМ.

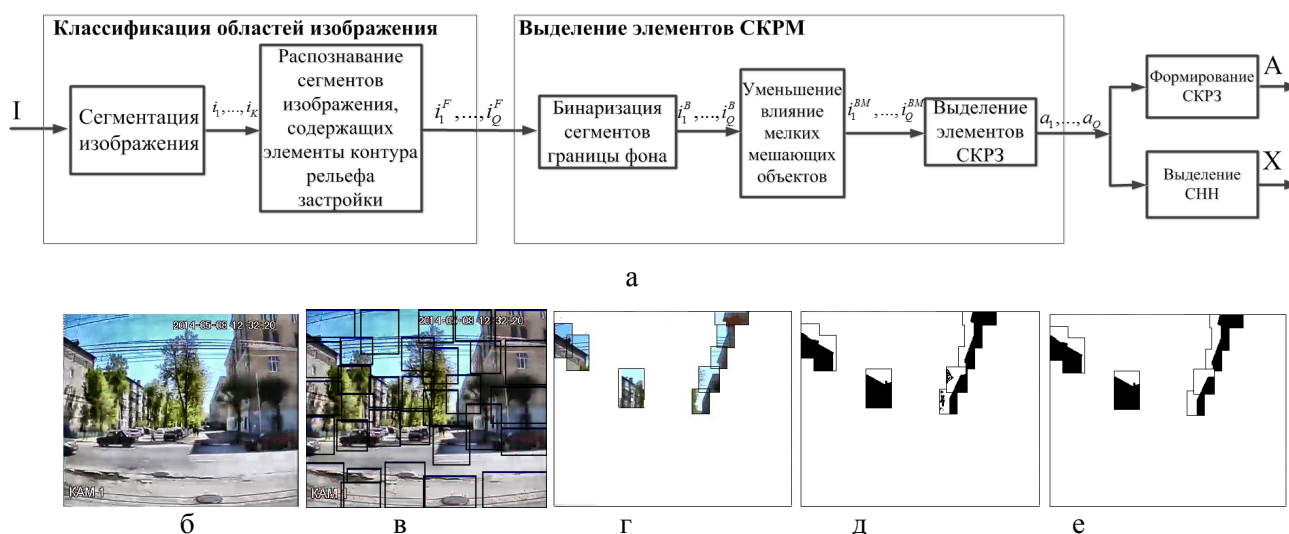


Рисунок 5 –Алгоритм выделения контуров рельефа местности на изображении урбанизированной среды

Сегментация изображения включала обнаружение особых точек изображения, с последующим разделением данных точек на группы по угловым координатам и определением соответствующих прямоугольных областей снимка (сегментов).

В качестве особых точек изображения выделяются точки, определяемые при использовании детектора углов Харриса [7]. Это позволило выделить структурированные области, а также области, соответствующие углам и граням, частично исключив фон. Кроме того, детектор Харриса отличается от других детекторов локальных особенностей относительно невысокими вычислительными затратами на реализацию, а также инвариантностью к поворотам изображения.

Затем производится сегментация особенных точек изображения методом *k*-средних (данный метод выбран благодаря своей вычислительной простоте и широкому распространению [7]), после чего выделяются сегменты, соответствующие полученным группам.

Классификацию сегментов изображения предлагается производить на основе набора признаков [5], которые определяются исходя из следующих эмпирических правил:

- а) фон светлее зданий, представленных на изображении;
- б) фон располагается в верхней части изображения;
- в) фон представляет область без темных пятен;
- г) области изображений с преобладающей зеленой составляющей соответствуют деревьям;
- д) области изображений с большим количеством особых точек на выходе детектора Харриса соответствуют растительности.

Таким образом, можно сформулировать следующий набор признаков сегментов изображений:

- нормированная разница между средней яркостью верхней и нижней строки сегмента ΔS_L (на основании предположения «а», «б»);

- относительный вес участка гистограммы $\bar{H}$, соответствующего низким значениям яркости (предположение «в»):

$$k_h = \sum_{g=1}^{G_1} H_g / \sum_{g=1}^{255} H_g, \quad (7)$$

где G_1 – порог яркости выбирается из диапазона 30...70;

- нормированное к размеру сегмента общее количество пикселей с преобладанием зеленой составляющей $k_{gr} = Q_{gr} / (N_s \cdot M_s)$, где Q_{gr} –

количество таких пикселей, N_s, M_s – соответственно ширина и длина сегмента (предположение «г»);

- координаты нижней строки сегмента изображения (предположение «б»).

Для классификации СГФЗ среди сегментов изображения на основе представленных признаков предлагается использовать искусственную нейронную сеть (ИНС) прямого распространения [6]. При этом благодаря использованию ИНС при обучении классификатора отсутствует необходимость построения функции многомерной плотности распределения вероятностей признаков, а также не требуется формирование эталонных опорных объектов классов [6]. В то же время сети прямого распространения отличаются среди других ИНС такими преимуществами, как отсутствие риска самовозбуждения классификатора, наличие широко известных и изученных алгоритмов обучения, относительно небольшие вычислительные затраты на реализацию, интуитивная простота структуры сети.

Для обучения ИНС данной структуры применялся алгоритм обучения с учителем основанный на обратном распространении ошибки. При этом использовалась обучающая выборка, содержащая 800 сегментов изображения, полученных, из 50 изображений городской местности, соответствующих различным погодным условиям, временам года и разному характеру застройки. Экспериментально определена оптимальная структура ИНС, состоящая из 3-х слоев, содержащих соответственно 4, 5 и 1 нейрон, при чем во входном и скрытом слое используются нейроны с сигмоидальными функциями активации, а в выходном – с пороговыми.

Исследовалась эффективность классификации разработанной ИНС с использованием тестовой выборки, содержащей 3200 сегментов из 200 изображений городской местности. При этом значение вероятности правильной классификации СГФЗ достигло 82% (вероятность ошибки первого рода 18%) при вероятности ошибки второго рода 9%.

Бинаризация изображения производится при использовании порога, вычисляемого по формуле:

$$\Theta = m_l - \xi_1 \cdot \sigma,$$

где m_l, σ – соответственно среднее значение яркости и СКО верхней строки сегмента, $\xi = 4...6$ – коэффициент, определяемый опытным путем.

После бинаризации сегмента производилась морфологическая обработка: двукратное размыкание с квадратным ядром угловыми размерами $\delta/4$, а затем закрытие изображения, после чего вычисляются элементы СКРМ. При этом СНН формировалась на основе азимутальных направлений, на которых не определены границы зданий.

Исследование точности алгоритма выделения контуров рельефа местности

При исследовании работы алгоритма выделения контуров рельефа местности был использован набор из 143 изображений городской местности, в который входили как снимки территории г. Рязани, полученные при использовании различных видеокамер, так и изображения урбанизированной среды, находящиеся в открытом доступе в сети Интернет.

Все используемые изображения приводились к масштабу разрешения 290 пикселей по вертикали.

Изображения сегментировались методом k -средних (количество сегментов $k=32$ при использовании евклидовой меры). При классификации применялась описанная выше ИНС. Морфологическая обработка производилась с квадратным ядром 6×6 .

Средняя ошибка выделения СКРМ составила $\Delta\theta=1.74$ градуса при среднем относительном количестве неинформативных направлений $S_x \leq 0,16$. При этом представленные выше требования к алгоритму вычисления СКРМ выполнялись для 84% изображений местности, что говорит о возможности использования представленного алгоритма выделения контуров рельефа местности для видеопозиционирования.

Выводы

На основе выше изложенного можно сделать следующие выводы.

1 Для получения значений СКО ошибки позиционирования $\sigma_r \leq 3$ м алгоритм выделения СКРМ должен обеспечивать:

– определение неинформативных направлений;

– выделение СКРМ со средней ошибкой в пределах $\Delta\theta=2$ градусов (при относительном количестве неинформативных направлений, лежащем в диапазоне $S_x \leq 0,25$).

2 Значение средней ошибки определения СКРМ представленного алгоритма выделения контуров рельефа местности составило $\Delta\theta=1.74$ градуса при среднем относительном количестве неинформативных направлений $S_x \leq 0,16$.

3. Предложенный алгоритм выделения контуров рельефа местности можно использовать для видеопозиционирования объектов, так как представленные требования к алгоритму вычисления СКРМ выполнялись для 84% изображений местности, используемых в эксперименте.

Библиографический список

1. Kaplan D. Understanding GPS Principles and Applications, ARTECH HOUSE, Norwood, 2006. P. 706.
2. Кириллов С. Н., Бердников В. М., Акопов Э. В. Алгоритм видеопозиционирования объектов в городской местности на основе цифровой карты // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 3-9.
3. Кириллов С. Н., Бердников В. М., Акопов Э. В. Система видеопозиционирования в условиях урбанизированной среды с использованием цифровой карты местности // Доклады 16-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2014». В 2-х томах. Т.1. Москва, 2014. С. 503-507.
4. Bonin-Font F., Ortiz A., Oliver G. Visual Navigation for Mobile Robots: a Survey Department of Mathematics and Computer Science, University of the Balearic Islands, Palma de Mallorca, Spain, 2006. P. 25.
5. Hayet J. B., Lerasle F., Devy M. A Visual Landmark Framework for Mobile Robot Navigation, Toulouse Cedex (France), 2009. P. 20.
6. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. С. 1070.
7. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. С. 925.

UDC 621.396.96

ALGORITHM OF VIDEOINFORMATION PROCESSING IN THE INTERESTS OF POSITIONING IN URBAN AREA BASED ON DIGITAL MAP

S. N. Kirillov, PhD (technical sciences), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan; kirillov.lab@gmail.com

V. M. Berdnikov, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; kirillov.lab@gmail.com

E. V. Akopov, engineer, RSREU, Ryazan; akop78195@gmail.com

Required characteristics of an image processing algorithm of videopositioning system for the objects in urban environment, using the contours of area relief and a digital map are substantiated. The aim is to design the algorithm of video processing for the purpose of positioning in urban areas with the characteristics providing positioning error within 3 m. An algorithm of area relief contour detection in an urban environment image obtained by camera is offered. It is shown that the average angular edge detection error of urban area relief is less than 2 degrees, providing positioning error RMS in 3 m limits using the set of cameras with a summary angle of view equal to 360 degrees, without using data about orientation system in horizontal plane.

Key words: videopositioning, videonavigation, urban area, digital map, area relief contours.

References

1. **Kaplan D.** Understanding GPS Principles and Applications, ARTECH HOUSE, Norwood, 2006. P. 706.
2. **Kirillov S. N., Berdnikov V. M., Akopov E. V.** Algoritm videopozitsionirovaniya ob"ektov v gorodskoj mestnosti na osnove tsifrovoj karty. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 47, pp. 3-9 (in Russian).
3. **Kirillov S. N., Berdnikov V.M., Akopov E.V.** Sistema videopozitsionirovaniya v usloviyakh urbanizirovannoy sredy s ispol'zovaniem tsifrovoj karty mestnosti. *Doklady 16-j MNTK «TSifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie – DSPA-2014»*, v 2-kh tomakh. T.1, Moskva, 2014. pp. 503-507 (in Russian).
4. **Bonin-Font F., Ortiz A., Oliver G.** Visual Navigation for Mobile Robots: a Survey Department of Mathematics and Computer Science, University of the Balearic Islands, Palma de Mallorca, Spain, 2006. P. 25.
5. **Hayet J. B., Lerasle F., Devy M.** A Visual Landmark Framework for Mobile Robot Navigation, Toulouse Cedex (France), 2009. P. 20.
6. **Gonsales R., Woods R.** *TSifrovaya obrabotka izobrazhenij* (Digital image processing). Moscow: Tekhnosfera, 2005, pp. 1070 (in Russian).
7. **Forsajt D., Pons ZH.** *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podkhod* (Computer vision. The modern approach). Moscow: Vil'yams, 2004, p. 925 (in Russian).