

Определение навигационных параметров подвижных объектов на основе полусферического оптико-электронного преобразователя

А.В. Овчинников, Ч.Х. Фан

Тулский государственный университет

Determination of Navigation Parameters of Moving Objects Based on Hemispherical Optoelectronic Transducer

A.V. Ovchinnikov, T.K. Phan

Tula State University

Рассмотрена задача определения навигационных параметров (координат и ориентации) подвижного объекта с помощью комплексной системы, сочетающей одометр и полусферический оптико-электронный преобразователь. Предложены алгоритмы обработки и комплексирования информации от одометра и полусферического оптико-электронного преобразователя, позволяющие повысить точность определения навигационных параметров. Приведены результаты экспериментальных исследований предложенной системы.

Ключевые слова: навигационные параметры; полусферический оптико-электронный преобразователь; расширенный фильтр Калмана; Unscented Transform.

The problem of determination of the navigation parameters (coordinates and orientation) of a moving object by means of an integrated system, that combines an odometer and hemispherical optoelectronic transducer, has been considered. The algorithms of processing and integration of the information from the odometer and hemispherical optoelectronic transducer, allowing an improvement of the determination of the navigation parameters, have been proposed. The experimental results of the proposed system have been presented.

Keywords: navigation parameters; hemispherical electro-optical converter; extended Kalman filter; Unscented Transform.

Для управления подвижными объектами, такими как промышленный транспорт, бытовые роботы, в автономном режиме главной является задача навигации, позволяющая оценивать текущие навигационные параметры (координаты и ориентацию) объекта с максимально возможной точностью при различного рода шумах и помехах. Традиционно на подвижных объектах в качестве основного источника информации о навигационных параметрах используются одометрические и инерциальные навигационные системы. Однако для данных систем характерны невысокая точность измерений и накапливаемые во времени ошибки.

В последнее время все больший интерес представляет разработка навигационных систем на основе систем технического зрения (СТЗ) [1]. Однако двумерные изображения, формируемые СТЗ, не позволяют полностью решить задачу определения навигационных параметров подвижного объекта ввиду отсутствия информации о дальности. В связи с этим для определения координат интересующих объектов требуются два или более изображений, полученных с различных ракурсов, что влечет за собой использование в СТЗ нескольких камер, разнесенных в пространстве [2]. Данный подход приводит к увеличению количества потоков обрабатываемой информации и росту вычислительных затрат. Альтернативой является использование дополнительных систем получения навигационных параметров. Пример таких систем – комбинированная система, состоящая из СТЗ и лазерного сканера [3].

В системах, включающих в себя монокулярные СТЗ, в подавляющем большинстве при работе используются внешние искусственные ориентиры (метки), местоположение которых заранее известно [4]. Такой подход ограничивает среду эксплуатации и подвержен воздействию шумовых объектов. Один из путей повышения эффективности функционирования таких систем – определение навигационных параметров по естественным ориентирам, в качестве которых могут выступать вертикальные и горизонтальные линии, образованные углами помещений, оконными проемами, мебелью и т.д. Однако такой подход требует расширения поля зрения СТЗ и разработки новых алгоритмов обработки информации.

Расширение поля возможно за счет использования нескольких преобразователей с последующим «сшиванием» данных либо специализированных широкоугольных преобразователей. Вторым вариантом наиболее предпочтителен, так как позволяет строить более компактные системы.

Перспективным широкоугольным преобразователем для СТЗ является полусферический оптико-электронный преобразователь (ПСОЭП), состоящий из фотоэлектронного преобразователя и полусферического зеркального отражателя, обеспечивающий круговой обзор окружающего пространства в реальном масштабе времени. Однако сложные характеристики информации, формируемой ПСОЭП, затрудняют его практическое использование в СТЗ [6] и требуют решения таких дополнительных задач, как:

- разработка новых алгоритмов, методов и методик обработки информации от ПСОЭП для определения местоположения подвижного объекта на основе естественных ориентиров;
- разработка алгоритмов комплексирования информации от СТЗ с ПСОЭП и инерциальных систем.

В настоящей статье рассмотрена реализация комплексной системы для определения навигационных параметров подвижных объектов на основе СТЗ с ПСОЭП и одометра, в основе которой лежит принцип определения навигационных параметров подвижного объекта с помощью естественных ориентиров среды эксплуатации.

Разработка комплексной системы для определения навигационных параметров подвижных объектов на основе ПСОЭП и одометра. Принцип построения. ПСОЭП, установленный на подвижном объекте, обеспечивает формирование изображения окружающего пространства, на котором могут быть выделены естественные ориентиры (прямые вертикальные и горизонтальные линии, образованные углами помещений, оконными проемами и др.). Отслеживание ориентиров на последовательности изображений позволяет оценить их координаты с помощью информации о навигационных параметрах объекта от одометра. При известном местоположении ориентиров измерение углов до них от ПСОЭП и измерение навигационных параметров объекта от

одометра можно сочетать с помощью оптимальной фильтрации. Блок-схема алгоритма обработки информации в комплексной системе для определения навигационных параметров объекта на основе ПСОЭП и одометра приведена на рис. 1.

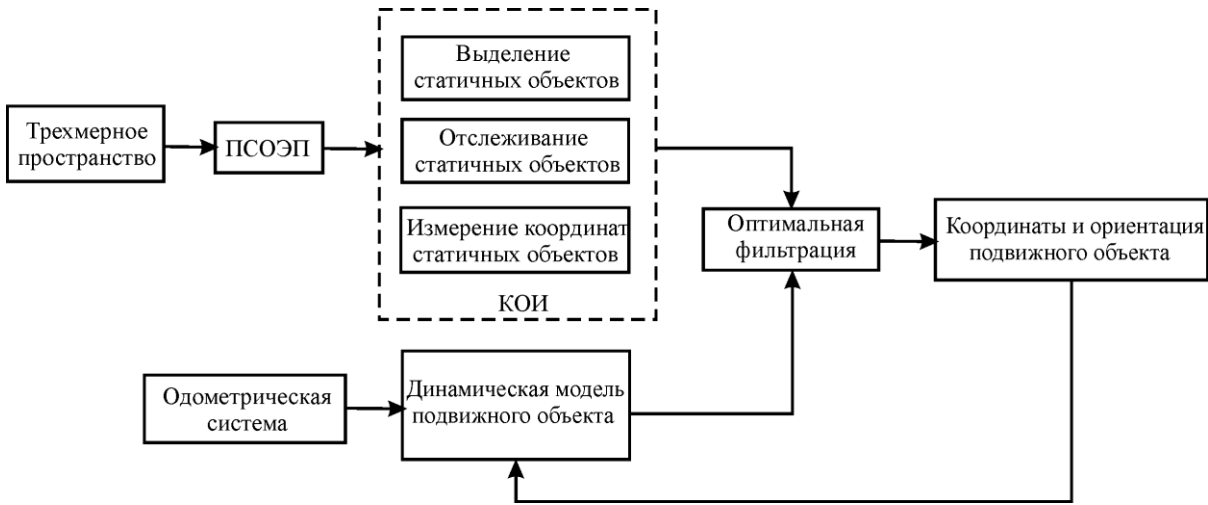


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обработки информации в комплексной системе для определения навигационных параметров подвижного объекта на основе ПСОЭП и одометра

На точность определения навигационных параметров подвижного объекта влияют невысокая точность измерений одометра, появление и исчезновение в поле зрения ПСОЭП ориентиров в процессе движения. Погрешности измерений одометра приводят к неточному определению координат ориентиров, а изменение состава ориентиров в процессе движения объекта – к изменению структуры оптимального фильтра.

Вопросы, связанные с выделением и идентификацией на изображениях формируемых ПСОЭП естественных ориентиров в виде вертикальных линий, подробно рассмотрены в работе [5].

Алгоритм инициализации ориентиров. Под инициализацией ориентиров понимается определение их координат и статистических характеристик. Точность инициализации ориентиров непосредственно влияет на точность комплексирования измерений системы.

Пусть в позициях \mathbf{x}_{R_i} и \mathbf{x}_{R_j} ПСОЭП наблюдает ориентир L и выдает измерения азимутальных углов θ_i и θ_j до него соответственно (рис. 2). Координаты ориентира определяются методом триангуляции [7]:

$$\mathbf{x}_L = \mathbf{g}(\mathbf{x}_{R_i}, \mathbf{x}_{R_j}, \theta_i, \theta_j) = \begin{bmatrix} \frac{x_{r_i} s_i c_i - x_{r_j} s_j c_j + (y_{r_j} - y_{r_i}) c_i c_j}{s_i c_j - s_j c_i} \\ \frac{y_{r_j} s_i c_i - y_{r_i} s_j c_j + (x_{r_i} - x_{r_j}) s_i s_j}{s_i c_j - s_j c_i} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_{R_i} = [x_{r_i}, y_{r_i}, \phi_{r_i}]^T$, $\mathbf{x}_{R_j} = [x_{r_j}, y_{r_j}, \phi_{r_j}]^T$ – векторы состояния подвижного объекта; θ_i и θ_j – измерения азимутальных углов ориентира в двух позициях подвижного объекта; $s_i = \sin(\phi_{r_i} + \theta_i)$, $s_j = \sin(\phi_{r_j} + \theta_j)$, $c_i = \cos(\phi_{r_i} + \theta_i)$, $c_j = \cos(\phi_{r_j} + \theta_j)$.

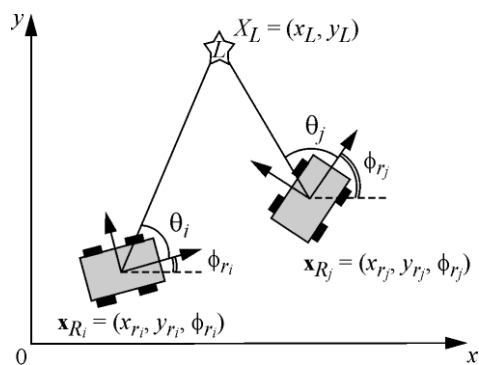


Рис.2. Определение координат ориентира по методу триангуляции

Результаты анализа воздействия шумов измерений, перемещений объекта и расстояния до вертикальных линий на точность измерения координат ориентиров показали, что наибольшее влияние на результат оказывает перемещение, включающее в себя сдвиг и поворот подвижного объекта. При значительных перемещениях неопределенность оценки снижается и форма плотности распределения вероятностей (ПРВ) изменяется от асимметричной к гауссовой, что позволяет предположить следующее: измерение координат ориентира является точным, если его ПРВ приближается к гауссовой.

Таким образом, определение координат ориентира может выполняться при движении объекта в любое время, но инициализацию ориентира необходимо проводить только при выполнении данного условия.

Разработанный алгоритм инициализации ориентиров основан на оценке статистических характеристик ПРВ измерений их координат и ансцентном (Unscented Filter) фильтре Калмана [8].

Пусть μ – вектор измерений одометра и ПСОЭП:

$$\mu = [x_r^T, y_r^T, \theta_i, \theta_j]. \quad (2)$$

Ковариационная матрица (КМ) P вектора измерений μ является диагональной матрицей, ненулевые элементы которой соответствуют дисперсии шумов измерений:

$$P = \text{diag} \{ \sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2, \sigma_{\phi_i}^2, \sigma_{x_j}^2, \sigma_{y_j}^2, \sigma_{\phi_j}^2, \sigma_{\theta_i}^2, \sigma_{\theta_j}^2 \}. \quad (3)$$

Для того чтобы с достаточной точностью описать статистические характеристики ПРВ измерений одометра и ПСОЭП, представляющих собой случайные величины, распределенные по нормальному закону, используется совокупность взвешенных выборок X в пространстве измерений, которая должна удовлетворять следующим требованиям:

$$\sum_1^p W_i = 1, \quad (4)$$

$$M[X] = \sum_1^p W_i X_i = \mu,$$

$$\Sigma = \sum_1^p W_i (X_i - M[X])^2 = P,$$

где W_i – взвешенный коэффициент выборки X_i .

Для каждого набора выборок X_i выполняется вычисление координат X_{L_i} ориентира по выражению (1). В результате формируется совокупность выборок X_L измерений координат ориентира, характеризующая его статистические свойства ПРВ. Затем проводится вычисление математического ожидания КМ и коэффициентов асимметрии по осям для совокупности выборок X_L :

$$\bar{\mathbf{X}}_L = \sum_{i=0}^{2n} W_i \mathbf{X}_{L_i},$$

$$\mathbf{P}_l = \sum_{i=0}^{2n} W_i (\mathbf{X}_{L_i} - \bar{\mathbf{X}}_L) (\mathbf{X}_{L_i} - \bar{\mathbf{X}}_L)^T, \quad (5)$$

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^{2n} W_i (\mathbf{X}_{L_i} - \bar{\mathbf{X}}_L)^3}{\sqrt{\mathbf{P}_l^3}}.$$

Для оценки точности инициализации ориентиров используются вычисленные КМ и коэффициенты асимметрии. Коэффициенты асимметрии определяют форму плотности распределения вероятностей, а КМ – неопределенность оценки координат ориентиров.

Алгоритм комплексной обработки информации. Для комплексирования измерений от ПСОЭП и одометра предлагается использовать расширенный фильтр Калмана. При разработке алгоритма комплексирования измерений системы необходимо учитывать, что появление и исчезновение ориентиров при движении объекта приводит к изменению структуры фильтра Калмана. Поэтому кроме двух основных этапов (экстраполяции и коррекции) расширенного фильтра Калмана в состав блок-схемы алгоритма входит этап прибавления новых инициализированных ориентиров (рис.3).

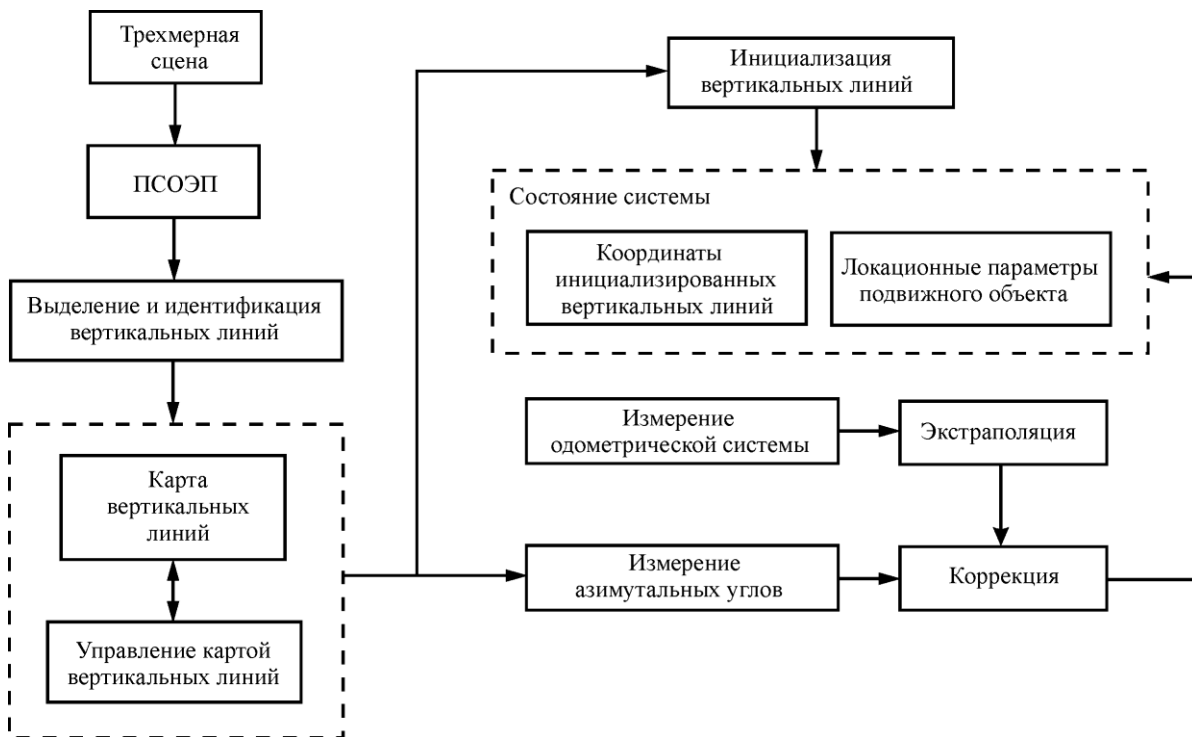


Рис.3. Блок-схема алгоритма комплексирования измерений системы

Пусть состояние объекта описывается вектором $\mathbf{x}_R = [x_r, y_r, \phi_r]^T$, где x_r, y_r, ϕ_r – координаты и направление объекта в глобальной системе координат соответственно; $\mathbf{x}_L = [x_L, y_L]^T$ – координаты ориентира. Вектор состояний системы в шаге k

$\mathbf{x}[k] = [\mathbf{x}_R^T[k] \quad \mathbf{x}_{L_1}^T[k] \quad \cdots \quad \mathbf{x}_{L_n}^T[k]]^T$ описывается состоянием подвижного объекта и координат совокупности наблюдаемых ориентиров. В расширенном фильтре Калмана вектор состояний $\mathbf{x}[k]$ рассматривается как гауссова переменная с КМ $\mathbf{P}[k]$, имеющая следующий вид:

$$\mathbf{P}[\mathbf{k}] = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{rr} & \mathbf{P}_{rl} \\ \mathbf{P}_{lr} & \mathbf{P}_{ll} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где \mathbf{P}_{rr} – КМ состояния подвижного объекта; \mathbf{P}_{ll} – КМ координат совокупности наблюдаемых координат ориентиров; \mathbf{P}_{rl} , \mathbf{P}_{lr} – КМ состояния объекта и координат ориентиров, при этом $\mathbf{P}_{rl} = \mathbf{P}_{lr}^T$.

В шаге k первоначально проводится экстраполяция, формирующая априорную оценку вектора состояний системы $\mathbf{x}^-[k]$ по его апостериорной оценке с предыдущего шага на основе динамической модели системы. Процесс экстраполяции описывается динамической моделью изменения вектора состояний:

$$\mathbf{x}^-[k] = \begin{bmatrix} x_r^-[k] \\ y_r^-[k] \\ \phi_r^-[k] \\ \mathbf{x}_{L_1}^-[k] \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{L_n}^-[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r^+[k-1] + \Delta t[k]V[k]\cos(\phi_r^+[k-1] + \gamma[k]) \\ y_r^+[k-1] + \Delta t[k]V[k]\sin(\phi_r^+[k-1] + \gamma[k]) \\ \phi_r^+[k-1] + \Delta t[k]V[k]\frac{\sin(\gamma[k])}{L} \\ \mathbf{x}_{L_1}^+[k-1] \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{L_n}^+[k-1] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x[k] \\ w_y[k] \\ w_\phi[k] \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}_R^+[k-1], \mathbf{u}[k], \mathbf{w}[k]) \\ \mathbf{x}_{L_1}^+[k-1] \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{L_n}^+[k-1] \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\mathbf{u}[k] = [V[k], \gamma[k]]^T$ – вектор управляющих воздействий, который состоит из скорости движения и угла поворота подвижного объекта; $\mathbf{w}[k] = [w_x[k] \quad w_y[k] \quad w_\phi[k]]^T$ – вектор шумов состояния подвижного объекта; L – длина подвижного объекта.

КМ экстраполированного вектора состояний определяется выражением:

$$\mathbf{P}^-[k] = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{rr}^-[k] & \mathbf{P}_{rl}^-[k] \\ \mathbf{P}_{lr}^-[k] & \mathbf{P}_{ll}^-[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_R \mathbf{P}_{rr}^+[k-1] \mathbf{F}_R^T + \mathbf{F}_U \mathbf{U}[k] \mathbf{F}_U^T + \mathbf{Q}[k] & \mathbf{F}_R \mathbf{P}_{rl}^+[k-1] \\ \mathbf{P}_{lr}^+[k-1] \mathbf{F}_R^T & \mathbf{P}_{ll}^+[k-1] \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\mathbf{U}[k] = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\gamma^2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{Q}[k] = \begin{bmatrix} \sigma_{x_r}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_r}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta_r}^2 \end{bmatrix}$ – КМ шумов управляющих воздействий и

состояния подвижного объекта; $\mathbf{F}_R = \nabla_{x_R} \mathbf{f}$, $\mathbf{F}_U = \nabla_u \mathbf{f}$ – матрицы Якоби векторной функции $\mathbf{f}(\mathbf{x}_R, \mathbf{u}, \mathbf{w})$ относительно состояния подвижного объекта и вектора управляющих воздействий.

В шаге k ПСОЭП наблюдает набор ориентиров, которые были инициализированы в предыдущих шагах. Измерения азимутальных углов этих ориентиров используются для вычисления ошибки измерений после экстраполяции вектора состояний системы:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}[k] &= \mathbf{z}[k] - \mathbf{z}^-[k] = \mathbf{z}[k] - \mathbf{h}(\mathbf{x}^-[k], \mathbf{v}[k]); \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}^-[k], \mathbf{v}[k]) &= \arctg\left(\frac{y_r^-[k] - y_L[k]}{x_r^-[k] - x_L[k]}\right) - \phi_r^-[k] + \mathbf{v}[k], \end{aligned} \quad (9)$$

где $\mathbf{h}(\mathbf{x}[k], \mathbf{v}[k])$ – векторная функция наблюдения; $\mathbf{v}[k]$ – вектор гауссовых шумов измерений.

Аналогично КМ вектора ошибки вычисляется с помощью матрицы Якоби функции наблюдения в $\mathbf{x}^-[k]$:

$$\mathbf{S}[k] = \mathbf{H}_R \mathbf{P}_{rr}^- [k] \mathbf{H}_R^T + \mathbf{H}_R \mathbf{P}_{rl}^- [k] \mathbf{H}_L^T + \mathbf{H}_L \mathbf{P}_{lr}^- [k] \mathbf{H}_R^T + \mathbf{H}_L \mathbf{P}_{ll}^- [k] \mathbf{H}_L^T + \mathbf{R}[k], \quad (10)$$

где $\mathbf{H}_R = \nabla_{x_R} \mathbf{h}$, $\mathbf{H}_L = \nabla_{x_L} \mathbf{h}$ – матрицы Якоби векторной функции $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ относительно вектора состояния подвижного объекта и координат ориентиров; $\mathbf{R}[k]$ – КМ шумов наблюдений.

Если инициализированные в предыдущих шагах ориентиры наблюдаются в текущем шаге, априорную оценку вектора состояний системы можно скорректировать на основе КМ имеющейся экстраполяции вектора состояний и полученных измерений. Коррекция ранее полученной априорной оценки вектора состояний текущими измерениями является апостериорной оценкой вектора состояний системы:

$$\mathbf{x}^+[k] = \mathbf{x}^-[k] + \mathbf{K}[k] \mathbf{v}[k]. \quad (11)$$

Матрица коэффициентов усиления Калмана $\mathbf{K}[k]$ определяется по формуле

$$\mathbf{K}[k] = \mathbf{P}^- [k] (\nabla_x \mathbf{h}[k])^T (\mathbf{S}[k])^{-1}. \quad (12)$$

Наконец, КМ апостериорной оценки вектора состояний системы определяется:

$$\mathbf{P}^+[k] = \mathbf{P}^- [k] - \mathbf{K}[k] \mathbf{S}[k] (\mathbf{K}[k])^T. \quad (13)$$

Если в момент времени k имеются новые инициализированные ориентиры, они прибавляются к схеме работы расширенного фильтра Калмана на этапе прибавления новых инициализированных вертикальных линий. Оценка координат ориентиров $\mathbf{x}_{L_n}^+[k]$ прибавляется к вектору состояний системы:

$$\mathbf{x}^+[k] = [\mathbf{x}_r^+[k] \quad \mathbf{x}_{L_1}^+[k] \quad \cdots \quad \mathbf{x}_{L_n}^+[k] \quad \mathbf{x}_{L_n}^+[k]]. \quad (14)$$

КМ предшествующего состояния системы, дополненная информацией о новой инициализации ориентиров, определяется выражением

$$\mathbf{P}^+[k] = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{rr}^+ & \mathbf{P}_{rl}^+ & \mathbf{P}_{rl_h}^+ \\ \mathbf{P}_{lr}^+ & \mathbf{P}_{ll}^+ & \mathbf{P}_{ll_h}^+ \\ \mathbf{P}_{l_{hr}} & \mathbf{P}_{l_{hl}} & \mathbf{P}_{l_{hh}}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{rr}^+ & \mathbf{P}_{rl}^+ & \mathbf{P}_{rr}^+ \mathbf{F}_R^T \\ \mathbf{P}_{lr}^+ & \mathbf{P}_{ll}^+ & \mathbf{P}_{lr}^+ \mathbf{F}_R^T \\ \mathbf{F}_R \mathbf{P}_{rr}^+ & \mathbf{F}_R \mathbf{P}_{rl}^+ & \mathbf{P}_{l_{hh}}^+ \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где $\mathbf{P}_{l_{hh}}^+$ определяется формулой (5).

Экспериментальные исследования. Для апробации предлагаемого алгоритма разработано программное обеспечение для пакета MatLab, моделирующее среду размера 80 x 80 м с заданными вертикальными линиями и траекторией движения подвижного объекта. Линейная скорость движения объекта по траектории 3 м/с. Среднеквадратическое отклонение (СКО) шумов одометра, установленного на объекте, составляет $\sigma_v = 0,1$ м/с, $\sigma_\gamma = 3^\circ$, шума измерений ПСОЭП – $\sigma_\theta = 1^\circ$. Время движения подвижного объекта 500 с, шаг дискретизации по времени – 0,025 с.

На рис.4 приведены вычисленные зависимости ошибки измерений координат и ориентации объекта от времени. Очевидно, что при повышении накапливаемой погрешности одометра алгоритм корректирует погрешность одометра, адаптируя коэффициенты усиления Калмана для ошибки измерений. Результирующая ошибка измерений координат и ориентации составляет менее 0,5 м и 1° соответственно.

На рис.5 представлены расчетные СКО оценки координат и ориентации объекта для предложенного алгоритма и одометра.

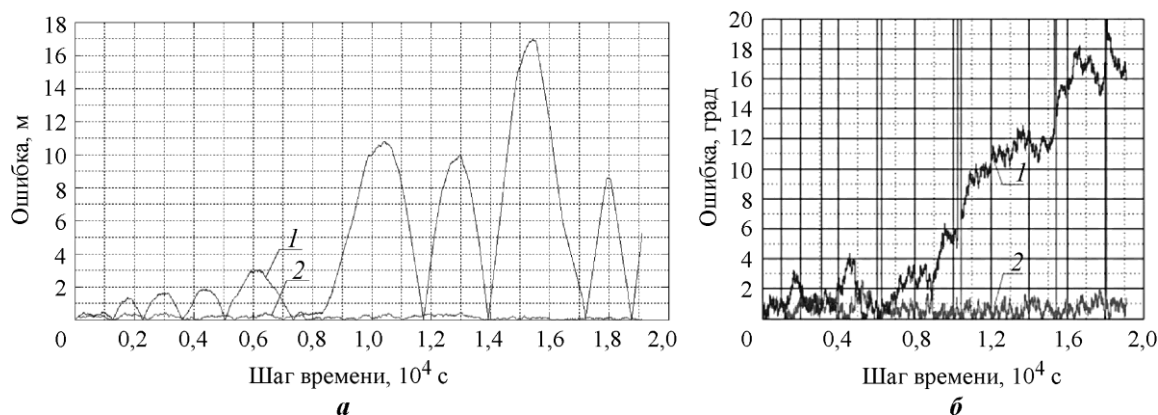


Рис.4. Зависимость ошибки измерений координат (а) и ориентации подвижного объекта (б) от времени одометрической (кривая 1) и комбинированной (кривая 2) систем

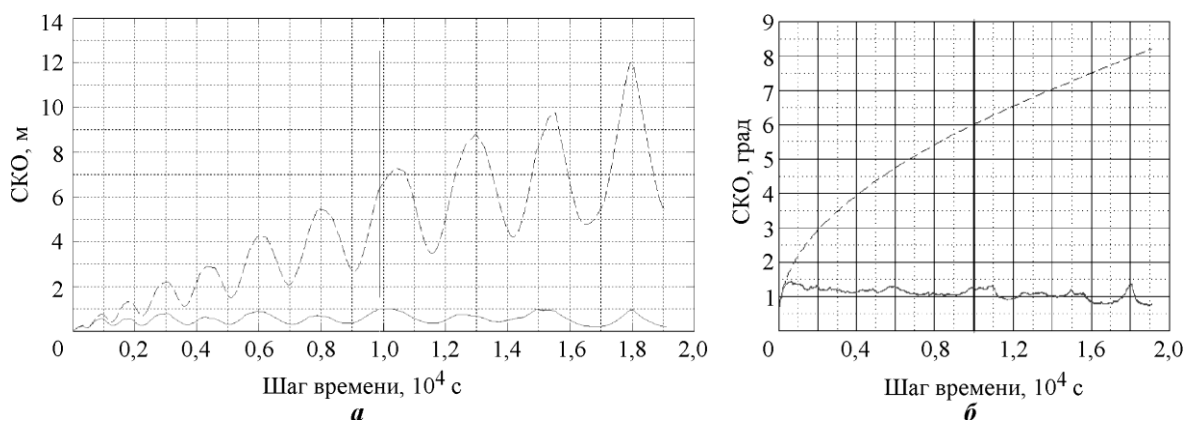


Рис.5. Зависимость СКО измерений координат (а) и ориентации подвижного объекта (б) от времени одометрической (пунктирная линия) и комбинированной (сплошная линия) систем

Как видно из рис.5, с помощью предложенного алгоритма неопределенность оценки координат и ориентации объекта стабильна после некоторого периода установления. В то же время СКО измерений от одометра непрерывно накапливается и неограниченно растет. СКО измерений координат и ориентации с помощью предложенного алгоритма составляют менее 1 м и 1°.

Результаты вычислительных экспериментов подтвердили эффективность предложенных алгоритмов, позволяющих повысить точность определения навигационных параметров подвижных объектов. В дальнейшем планируется оптимизация вычислительной схемы для повышения скорости обработки информации и проведение реальных экспериментов.

Литература

1. **Бархоткин В.А., Петров В.Ф., Кочетков М.П., Корольков Д.Н.** Обработка изображений для идентификации наземной обстановки мобильными роботизированными комплексами // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2014. – №3. – С. 77–86.
2. **Бобков В.А.** 3D SLAM по стереоизображениям // Труды XXIII Международной конференции по компьютерной графике и зрению. – Владивосток, 2013. – С. 114–117.
3. **Лапцов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В.** Опыт создания автономных мобильных робототехнических комплексов специального назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. Спецвыпуск: Специальная робототехника и мехатроника. – М., 2011. – С. 7–24.
4. **Андреев В.П.** Система технического зрения с круговым обзором для мобильного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – №6. – С. 8–14.
5. **Овчинников А.В., Фан Ч.Х.** Алгоритм выделения характерных элементов на изображениях полусферических видеокамер // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 233–245.
6. **Макарецкий Е.А., Овчинников А.В., Фан Ч.Х.** Полусферические камеры прикладных телевизионных систем: получение и преобразование полусферических изображений // Компоненты и технологии. – 2010. – №9. – С. 30–32.
7. **Bailey T.** Constrained initialisation for bearing-only SLAM // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2003. – P. 1966–1971.
8. **Simon J.J., Uhlmann J.K.** New extension of the Kalman filter to nonlinear systems // In Proc. of AeroSense: The 11th Int. Symp. on Aerospace/Defence Sensing, Simulation and Controls, 1997.

Статья поступила
26 сентября 2014 г.

Овчинников Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (ТулГУ). *Область научных интересов:* оптические и оптико-электронные измерительные системы, цифровая обработка изображений, компьютерное зрение.

Фан Чан Данг Хоа – аспирант кафедры радиоэлектроники ТулГУ. *Область научных интересов:* цифровая обработка изображений, компьютерное зрение, телевизионные измерительные системы, робототехника. **E-mail: phdkhoa.dng@gmail.com**