

Ежемесячный научно-технический,  
информационно-аналитический  
и учебно-методический журнал

# ТЕЛЕКОМУНИКАЦИИ



**9** 2017

# Telecommunications

Scientific, information-analytical  
and educational methods journal

9 2017

## Editor-in-Chief

Titov V.S.

## Editorial Board

Avdeev V.B.

Agemov A.S.

Alguliev R.M.

Arkhipov N.S.

Bondur V.G.

Dzhigan V.I.

Emel'yanov S.G.

Kalyaev I.A.

Kaperko A.F.

Kluchikov I.A.

Konichenko A.V.

Larkin E.V.

Len'shin A.V.

Mukha Yu.P.

Nazarov A.N.

Novikov D.A.

Obukhovets V.A.

Pustovoyt V.I.

Shishkin N.V.

Sinitsin I.N.

Siryamkin V.I.

Sizov A.S.

Tsytsulin A.K.

Yusupov R.M.

Zotov I.V.

## Executive Secretary

Shirabakina T.A.

## CONTENTS

### DISTRIBUTED INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

*Dobryshin, M.M.* Countermeasure suggestions to computer intelligence and information-technical effects . . . . . 2

### MOBILE RADIO SYSTEM

*Dvornikov, S.V.; Pshenichnikov, A.V.; Manayenko, S.S.* Model of phase-shift keying broadband signal with program operating frequency tuning . . . . . 8

### SATELLITE SYSTEMS OF COMMUNICATION

*Zyornushkin, A.E.; Sizov, A.S.* Structure-functional organization of state assessment system of complex technical-organizational systems by division of competitive intelligence . . . . . 13

*Solovyov, V.V.; Finayev, V.I.; Beloglazov, D.A.* Navigation for communications in group of mobile objects . . . . . 21

*Borodulin, R. Yu.* Effectiveness analysis of in-phase system of immersed vibrators . . . . . 28

### OPTICAL SYSTEMS

*Gayev, V.A.; Yegorov, S.I.* Error correction in high-speed computer interfaces using generalized convolutional LDPC codes . . . . . 36

### COMPUTER SYSTEMS, NETWORKS AND TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT

*Postnikov, I.N.* Influence simulation of periodic monitoring of SDN network on reliability characteristics . . . . . 42

# Телекоммуникации

Ежемесячный научно-технический,  
информационно-аналитический  
и учебно-методический журнал

Издается с июля 2000 г.

9 2017

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

д-р техн. наук, проф. Титов В.С.,  
e-mail: tas\_06@mail.ru

## ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

д-р техн. наук, проф. Сизов А.С.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Авдеев В.Б. — д-р техн. наук, проф.  
Аджемов А.С. — д-р техн. наук, проф.  
Алгулиев Р.М. — д-р техн. наук, академик НАНА  
Архипов Н.С. — д-р техн. наук, проф.  
Бондур В.Г. — д-р техн. наук, академик РАН  
Джиган В.И. — д-р техн. наук, доц.  
Емельянов С.Г. — д-р техн. наук, проф.  
Зотов И.В. — д-р техн. наук, проф.  
Каляев И.А. — д-р техн. наук, чл.-корр. РАН  
Каперко А.Ф. — д-р техн. наук, проф.  
Ключиков И.И. — д-р техн. наук, проф.  
Конищенко А.В. — д-р техн. наук, проф.  
Ларкин Е.В. — д-р техн. наук, проф.  
Леньшин А.В. — д-р техн. наук, проф.  
Муха А.П. — д-р техн. наук, проф.  
Назаров А.Н. — д-р техн. наук, проф.  
Новиков Д.А. — д-р техн. наук, чл.-корр. РАН  
Обуховец В.А. — д-р техн. наук, проф.  
Пустовойт В.И. — д-р физ.-мат. наук, академик РАН  
Синицын И.Н. — д-р техн. наук, проф.  
Сыряжкин В.И. — д-р техн. наук, проф.  
Шишкин Н.В. — д-р техн. наук, доц.  
Хафизов Р.Г. — д-р техн. наук, проф.  
Цыцулин А.К. — д-р техн. наук, проф.  
Юсупов Р.М. — д-р техн. наук, чл.-корр. РАН

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

канд. техн. наук, проф. Ширабакина Т.А.,  
e-mail: tas\_06@mail.ru

При использовании материалов журнала  
в любой форме ссылка на журнал обязательна.

За достоверность информации и рекламы от-  
ветственность несут авторы и рекламодатели.

## АДРЕС РЕДАКЦИИ:

105215, Москва,  
9-я Парковая ул., д. 60.  
Тел./факс: (495) 988-98-65,  
тел.: (495) 988-98-67.  
http://www.nait.ru  
e-mail: admin@nait.ru

© ООО «Наука и технологии», 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

*Добрышин М.М.* Предложения  
по противодействию компьютерной разведке  
и информационно-техническим воздействиям . . . . . 2

### СИСТЕМЫ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

*Дворников С.В., Пшеничников А.В.,  
Манаенко С.С.* Модель фазоманипулированного  
широкополосного сигнала с программной  
перестройкой рабочей частоты . . . . . 8

### СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

*Зёрнушкин А.Е., Сизов А.С.* Структурно-  
функциональная организация системы  
оценки состояния сложных организационно-  
технических систем подразделением  
конкурентной разведки . . . . . 13

*Соловьев В.В., Финаев В.И., Белоглазов Д.А.*  
Навигация для обеспечения коммуникаций  
в группе подвижных объектов . . . . . 21

*Бородулин Р.Ю.* Анализ эффективности  
синфазной системы погруженных вибраторов . . . . . 28

### ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

*Гаев В.А., Егоров С.И.* Коррекция ошибок  
в быстродействующих интерфейсах ЭВМ  
с использованием обобщенных сверточных  
низкоплотностных кодов . . . . . 36

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, СЕТИ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

*Постников И.Н.* Моделирование влияния  
периодического контроля сети SDN  
на характеристики надежности . . . . .

БИБЛИОТЕКА  
Научно-техническое  
отделение ЗНБ ЮФУ  
( г.Татарног )



C-23871

УДК 004.896

## Навигация для обеспечения коммуникаций в группе подвижных объектов

В.В. СОЛОВЬЕВ, В.И. ФИНАЕВ, д-р техн. наук, Д.А. БЕЛОГЛАЗОВ

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Институт радиотехнических систем и управления Инженерно-технологической академии, г. Таганрог

E-mail: finaev\_val\_iv@tsure.ru

*Приведено решение задачи навигации подвижного объекта при комплексировании данных навигационных измерителей. Комплексирование осуществляется с применением расширенного фильтра Калмана при обработке данных одометрии, магнитного компаса и инерциальной навигационной системы. Приведена модель с расширенным фильтром Калмана, обеспечивающая повышение точности определения координат подвижного объекта и способствующая эффективному решению задачи коммуникации группы подвижных объектов.*

**Ключевые слова:** навигационная система, подвижной объект, фильтр Калмана, ИНС, одометрия, комплексирование данных.

*A task solution of a mobile object's navigation with aggregation of data received from navigation sensors is discussed. The aggregation is carried out using the advanced Kalman filter for processing data of odometry, a magnetic compass and an inertial navigation system. A model with the extended Kalman filter is presented. It provides a better accuracy of determining the mobile object coordinates and contributes to an effective solution of the communication task in mobile objects' group.*

**Keywords:** navigation system, mobile object, Kalman filter, INS, odometry, data aggregation.

### Введение

**П**ри управлении группами подвижных объектов (ПО) чрезвычайно важной задачей является обеспечение коммуникаций между отдельными ПО и группами ПО в целом. Понимание того, что делает отдельный ПО, остальными ПО способствует выполнению поставленной перед группой ПО задачи. Естественно, что эффективная коммуникация между ПО обеспечивается за счет связи, которая осуществляется по радиоканалам либо системами технического зрения в пределах видимости. Однако более важной задачей является задача определения местоположения каждого ПО, т.е. знание координат в пространстве передвижения. Поэтому точное определение координат ПО является актуальной задачей, а на-

вигационная подсистема в системе управления ПО и в системе телекоммуникаций группы ПО обеспечивает эффективное решение задачи достижения цели.

Если говорить об области применения мобильных ПО, как автономных, так и в составе группы, то существует достаточно много технических приложений, таких как охрана объектов, мониторинг пространства, в медицинских приложениях, в сельском хозяйстве, в военных целях и прочее. При любом техническом применении ПО всегда требования к навигационным системам ПО являются достаточно жесткими.

Навигационные системы (НС), которые применяют при ориентации ПО, делят на глобальные НС и локальные НС [1, 2]. Глобальные НС — спутниковые навигацион-

ные системы [1, 3, 4], а локальные НС — это системы для определения координат и ориентации ПО там, где прием радиосигналов от внешних источников ограничен, например в закрытых помещениях или при существовании помех [5]. В локальных НС применяют инерциальные системы, энкодеры, радары, видеокамеры и прочее [6]. Применение только одного из перечисленных устройств в задаче определения координат ПО не позволит получить требуемую точность работы НС. Для точного определения координат и ориентации ПО следует применить несколько устройств, обеспечивающих получение навигационной информации.

Также необходимо решать задачу информационного обеспечения НС, так как следует обрабатывать с высокой скоростью большие объемы информации, компенсировать погрешности автономных НС, что требует применения соответствующих моделей и математического обеспечения.

Применение в НС нескольких источников навигационной информации и является предметом данной статьи.

### Задача ориентации подвижных объектов

Ориентация ПО должна происходить при отсутствии информации от спутника, а обработка навигационных данных от локальных систем должна осуществляться интегрированным образом (комплексно) [6]. Таким образом, хотя ПО и утратил связь с источниками сигналов GPS/ГЛОННАС, но необходимо

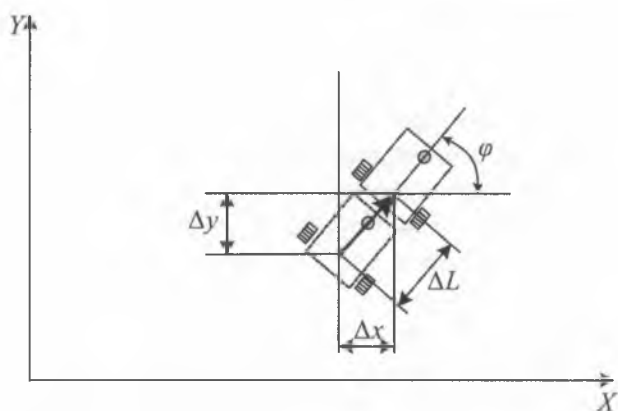


Рис. 1. Положение подвижных объектов на плоскости

определить его настоящее местоположение и направление движения.

Будем считать, что ПО представлен в виде двухколесного мобильного робота [7]. Данный ПО оснащен инерциальной навигационной системой (ИНС) и энкодерами, что позволяет определить его координаты. Кроме этого, ПО имеет цифровой компас для определения направления перемещения.

Передвижение ПО происходит на плоскости (рис. 1) с применением дифференциального привода. Устойчивость ПО обеспечивается шаровой опорой на передней части ПО.

Управление перемещением и оценка состояния ПО происходят в дискретные моменты времени с шагом  $\Delta t$ . Для каждого  $\Delta t$  от ИНС будет получено значение кажущегося ускорения, которые будут интегрированы с показаниями одометра. Такое решение позволит найти координаты и направление перемещения ПО.

### Краткий обзор методов комплексной обработки навигационных данных

Задача локальной навигации ПО рассматривалась во многих работах и многими авторами, поэтому определим основные направления исследований в данной области и рассмотрим полученные результаты.

В работе [8] приведено описание работы алгоритма интегрированного применения одометрии и системы технического зрения для нахождения координат ПО. Система технического зрения реализована с применением видеокамеры, с помощью которой определяются навигационные метки. Абсолютные координаты ПО определяются относительно этих навигационных меток на плоскости. Предложенный авторами алгоритм выполняет интегрирование данных одометрии и системы технического зрения ПО. В алгоритме применен расширенный фильтр Калмана. Недостаток алгоритма состоит в том, что определить координаты ПО можно только при заранее известных координатах найденных видеокамерой меток.

В работе [6] показано решение задачи при комбинировании методов глобальной и локальной навигации. Имеется локальная ин-

формация датчиков о внешней среде, информация от глобальной НС в виде градиента относительно цели и расстояния до цели. Применены два вида датчиков: тактильный датчик на бампере ПО и ультразвуковой датчик, направленный перпендикулярно к движению ПО. Данный метод эффективен по критерию минимизации энергетических затрат и небольшой стоимости сенсорной системы. Но если имеется карта местности, то этот способ уступает применению глобальной НС.

В работе [9] рассмотрена оценка положения ПО при комплексировании сенсорных данных одометрии и магнитного компаса с помехами с применением фильтра Калмана. Фильтр Калмана позволяет пошагово определять состояние ПО при зашумленных измерениях. Поскольку измерение магнитным компасом — элемент глобальных методов определения координат ПО, то, в отличие от одометрии, накопление погрешности во времени отсутствует. Следовательно, измерения магнитным компасом обеспечивают возможность компенсации погрешности, накапливающейся при одометрии.

В работе [10] рассмотрено комплексирование навигационных данных от инерциальной и спутниковой НС также с применением нелинейного фильтра Калмана, причем, навигационное решение от спутникового датчика уточняется с помощью фильтра Калмана, согласно данным инерциальной подсистемы.

В работе [11] рассмотрено определение координат ПО в известной среде. Метод комбинирует оценку по данным одометрии с данными мобильной камеры. Ориентиры, как неподвижные объекты, имеются в базе данных. Расширенный фильтр Калмана применен для коррекции координат и ориентации ПО на основе ошибок между наблюдаемым и оцененным углом для каждого ориентира. Недостаток подхода связан с необходимостью применения внешних ориентиров и знанием их координат.

Анализ позволил сделать вывод, что применение расширенного фильтра Калмана для комплексной обработки данных обеспечива-

ет более точное решение задачи локальной навигации ПО, чем определение координат и ориентация по данным одной НС.

### Структура интегрированной системы локальной навигации

Наиболее часто применяют такие схемы комплексирования, как отдельная схема, слабо и жестко связанная схема, а также глубоко интегрированная схема [12].

Отдельная схема — достаточно простой вариант совместного использования ИНС и ГЛОНАСС/GPS, которые работают независимо друг от друга. Поскольку ошибки ИНС растут во времени, то необходима коррекция вычислений ИНС по данным спутниковой навигации. Это выполняется при повторных запусках алгоритма ИНС с новыми начальными условиями координат и курса ПО. Данная схема не может быть использована при автономной работе ПО, при отсутствии спутниковой навигации.

Слабо связанная схема дополняет НС, так как появляется связующий блок с алгоритмом интегрального фильтра Калмана. Функциональному разделению подсистем соответствует их физическое разделение. Вычислительные блоки представляют собой отдельные блоки, между которыми имеются информационные связи, не требующие больших скоростей передачи данных.

В жестко связанной схеме одна из НС измеряет первичные параметры движения. Навигационная система формирует измерения для вычислительного блока с фильтром Калмана. При применении одного фильтра Калмана теряется избыточность системы, так как будет получено одно решение. Кроме этого, нет сложности в синхронизации измерений НС. Нужен только один генератор тактовых частот. Существует недостаток — при отказе одной из НС система откажет в целом.

Глубоко интегрированная схема достаточно сложная и не столь гибкая с позиций структурной организации. Оценки координат и ориентации ПО выполняются в интегральном фильтре Калмана. Навигационная система имеет выходы, сигналы с которых для инте-

грального фильтра Калмана будут входными. В интегральном фильтре Калмана происходит определение ошибок, псевдодальностей и псевдоскоростей, которые затем передаются в приемник, что способствует улучшению характеристик захвата сигнала. Фильтр должен иметь порядок 20—40, т.е. для его построения нужна достаточно быстродействующая бортовая вычислительная машина.

На рис. 2 показана слабо связанная схема комплексирования, которая обеспечивает эффективное решение поставленной задачи.

На выходе фильтра Калмана будут сформированы оценки инструментальных погрешностей ИНС, т.е. оценки ошибки смещения нулей гироскопов и акселерометров, ошибки масштабных коэффициентов и прочее. Эти оценки ошибок применяют для коррекции показаний инерциальных датчиков. Если при поступлении данных от НС возникли некоторые перерывы, то получаемые оценки ошибок ИНС и измерительных элементов обеспечивают увеличение точности ИНС при передвижении ПО в автономном режиме.

Предлагаемая схема позволяет получить достаточную избыточность, уменьшить ошибки при определении координат и скорости ПО, ориентации и угловой скорости. Комплексирование навигационной информации обеспечивает достаточно большую

скорость выдачи информации при требуемой точности и потере спутникового сигнала.

### Модель расширенного фильтра Калмана

Алгоритм комплексной обработки информации содержит два этапа.

Перед работой алгоритма выполняется первичный расчет навигационных параметров. Состояние ПО как колесного мобильного робота определено координатами базовой точки  $(x, y)$  и угловой ориентацией ПО  $\varphi$ . С применением фильтра Калмана оценивается состояние ПО на каждом шаге согласно модели его динамики и данным ИНС, одометрии и компаса, причем эти данные являются зашумленными.

Известны [13] уравнения кинематики и динамики данного вида ПО:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \varphi; \dot{y} = v \sin \varphi; \dot{\varphi} = \omega; \\ v &= \frac{1}{2a_0}(U_1 + U_2); \omega = \frac{1}{2a_0 l}(U_1 - U_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x, y$  — координаты ПО;  $v, \omega$  — линейная и угловая скорости ПО;  $\varphi$  — угловая ориентация ПО относительно оси ординат; коэффициент  $a_0 = nc/r$ ,  $n$  — передаточное число редуктора;  $c$  — коэффициент электромеханического взаимодействия;  $r$  — радиус колес;  $l$  — половина расстояния между колесами ПО;

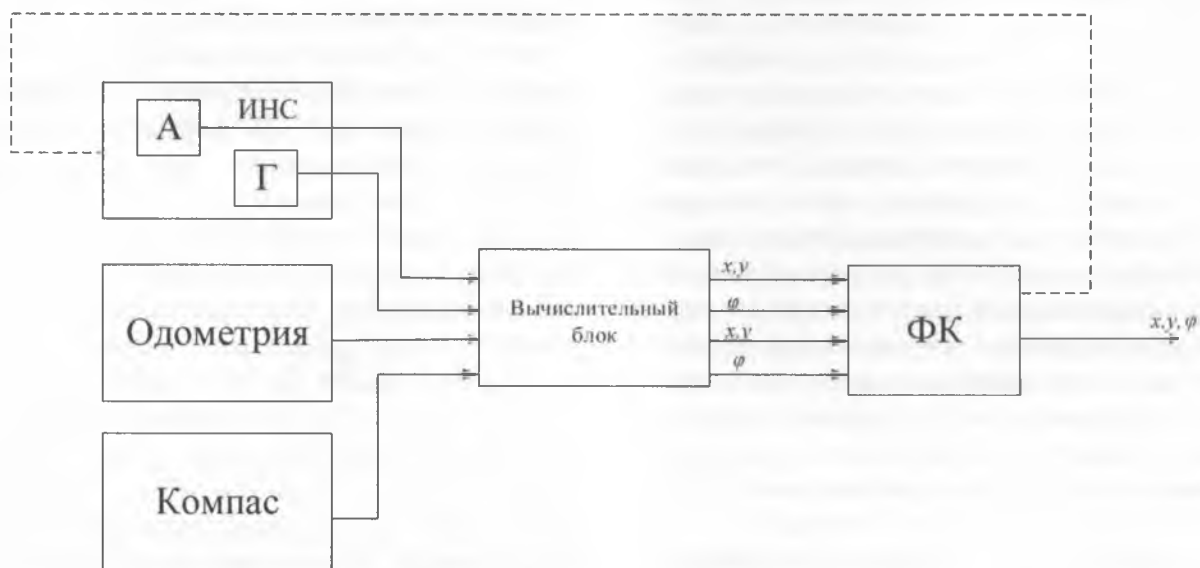


Рис. 2. Схема комплексирования навигационной информации: А — блок акселерометров; Г — блок гироскопов; ФК — фильтр Калмана

$U_1, U_2$  — управляющие воздействия для электродвигателей.

Переменные состояния НС определены вектором:

$$Z_{\text{ИНС}k} = [x_k \ y_k \ \varphi_k]^T. \quad (2)$$

Поскольку функционирование НС происходит непрерывно во времени, то сигналы на входе системы определены суммой полезного сигнала и случайной помехи измерения:

$$y_{\text{ИНС}} = Z_{\text{ИНС}} + \Delta Z_{\text{ИНС}}; \quad (3)$$

$$y_{\text{одометр}} = Z_{\text{одометр}} + \Delta Z_{\text{одометр}}; \quad (4)$$

$$y_{\text{компас}} = Z_{\text{компас}} + \Delta Z_{\text{компас}}. \quad (5)$$

Помеха измерений определена корреляционной функцией. Значения  $\Delta Z_{\text{ИНС}}$ ,  $\Delta Z_{\text{одометр}}$  и  $\Delta Z_{\text{компас}}$  — не коррелированы.

Алгоритм фильтра Калмана имеет фазы экстраполяции и коррекции [14]. На фазе экстраполяции определяется априорная оценка состояния системы  $Z_{\text{ИНС}}$ . На фазе коррекции определяется апостериорная оценка состояния системы, дополненная текущими измерениями  $Z_{\text{компас}}$  или  $Z_{\text{одометр}}$ . Изменение состояния системы определено нелинейным разностным уравнением:

$$Z_{\text{ИНС}(k+1)} = f(Z_{\text{ИНС}(k)}, u_k), \quad (6)$$

где  $u$  — вектор управлений.

Измерение по состоянию системы определено нелинейным уравнением:

$$Z_{\text{одометр}(k+1)} = h_1(Z_{\text{ИНС}(k)}), \quad (7)$$

$$Z_{\text{компас}(k+1)} = h_2(Z_{\text{ИНС}(k)}), \quad (8)$$

где  $h_i$  — матрицы наблюдения.

Произведем дискретизацию модели:

$$Z_{\text{ИНС}(k)} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \varphi_k \end{bmatrix} = f(Z_{\text{ИНС}(k-1)}, u_{k-1}) = \begin{bmatrix} x_{k-1} + \Delta t v_{k-1} \cos(\varphi_{k-1}) \\ y_{k-1} + \Delta t v_{k-1} \sin(\varphi_{k-1}) \\ \varphi_{k-1} + \Delta t w_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Вектор измерений является полным вектором состояния.

В качестве  $\hat{Z}_{0|0}$  берется первое измерение. В качестве  $P_{0|0}$  — ковариационная матрица  $R_0$  шумов измерений, которая является диагональной:  $\hat{Z}_{0|0} = HZ_{\text{ИНС}(0)}$ ,  $P_{0|0} = R$ , причем

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{\text{хсенс}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{усенс}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\text{фсенс}}^2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

**1 этап алгоритма.** Экстраполяция происходит постоянно и независимо от измерений. Предсказание вектора состояния определено зависимостью:

$$\hat{Z}_{k|k-1} = f(\hat{Z}_{k-1|k-1}, u_{k-1}).$$

Предсказание ковариационной матрицы ищется в виде:

$$P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q, \\ F_{k-1} = \left. \frac{df}{dx} \right|_{\hat{Z}_{k-1|k-1}, u_{k-1}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\Delta t v_{k-1} \sin(\varphi_{k-1}) \\ 0 & 1 & \Delta t v_{k-1} \cos(\varphi_{k-1}) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где  $F_{k-1}$  — матрица Якоби дискретной системы.

**2 этап алгоритма.** Коррекция происходит при наличии данных от измерительного устройства. Расхождение с измерениями определено в виде

$$\Delta y_k = y_k - H \hat{Z}_{k|k-1}.$$

Матрица усиления определена в виде

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}.$$

Обновление вектора состояния определено зависимостью:

$$\hat{Z}_{k|k} = \hat{Z}_{k|k-1} + K_k \Delta y_k.$$

Обновление ковариационной матрицы определено зависимостью:

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}.$$

### Результаты моделирования

Для проверки эффективности функционирования системы с расширенным фильтром Калмана разработана программа в среде MatLab, содержащая функциональные модули: генератор эталонного сигнала, модуль



ИНС, модуль энкодера, модуль компаса, модуль фильтра Калмана. Генератор эталонного сигнала выдает идеальные координаты  $x, y$  нахождения ПО. На координаты генератора в модуле ИНС накладывался случайный шум с амплитудой 0,5 м. Модуль энкодера — модель расчета координат ПО по количеству поступающих импульсов, причем в этом модуле через каждые 15 тактов моделирования накладывался случайный шум с амплитудой 0,3 м. В модуле компаса на основе идеальных координат рассчитывался текущий угол  $\varphi$  ориентации ПО. В модуле фильтра Калмана реализован алгоритм расширенного фильтра Калмана. Считается, что шумы некоррели-

руемые и стационарные, что позволяет для определения воздействия шумов выбрать диагональную стационарную ковариационную матрицу  $R$ . Таким образом, зашумленные показания ИНС корректировались с помощью показаний энкодера и компаса.

При имитационном моделировании были получены графики, определяющие ошибку позиции ПО с течением времени (рис. 3—5).

При выполнении первого эксперимента (см. рис. 3) ПО проходит 15 кругов по окружности радиусом 5 м со скоростью 0,25 м/с. Показания навигационных параметров считываются каждый такт с интервалом  $\Delta t = 1$  с на протяжении 2000 тактов. Длина пройденного пути МР составила 499,9 м.

Максимальное отклонение ПО от идеальной траектории по показаниям комплексированной системы с использованием расширенного фильтра Калмана составило 0,8 м, следовательно, навигация только по показаниям ИНС дает неудовлетворительные результаты.

При выполнении второго эксперимента (см. рис. 4) ПО движется по прямой со скоростью 1,41 м/с. Длина пройденного пути составила 2892 м, а максимальное отклонение от идеальной траектории с применением расширенного фильтра Калмана составило 1,25 м.

При выполнении третьего эксперимента (см. рис. 5) ПО движется по синусоиде со скоростью 1,42 м/с. Длина пройденного пути составила 2829 м, а максимальное отклоне-

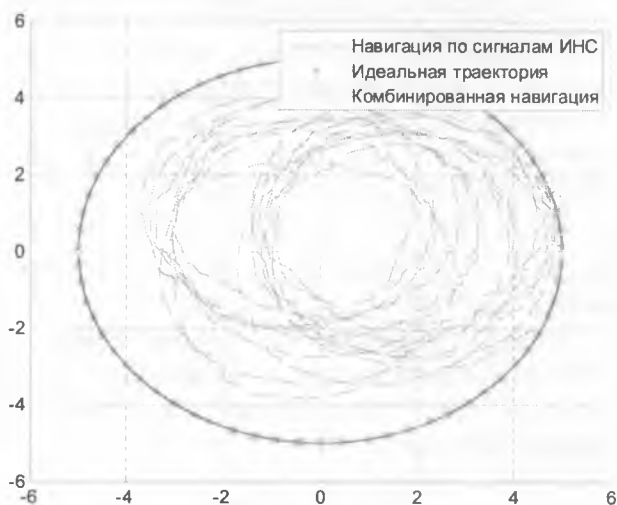


Рис. 3. Движение подвижных объектов по окружности

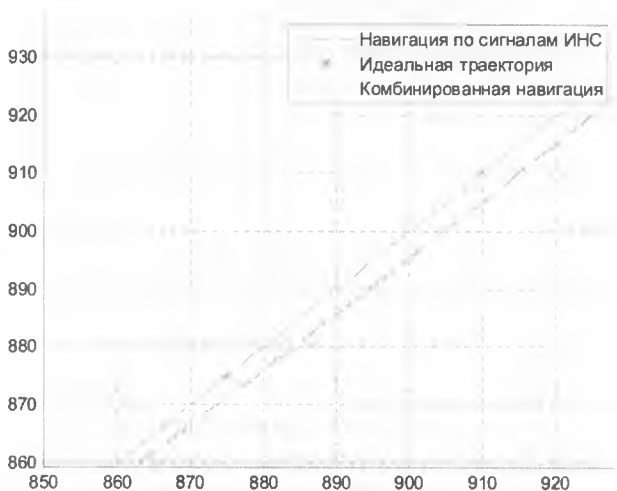


Рис. 4. Прямолинейное движение подвижных объектов

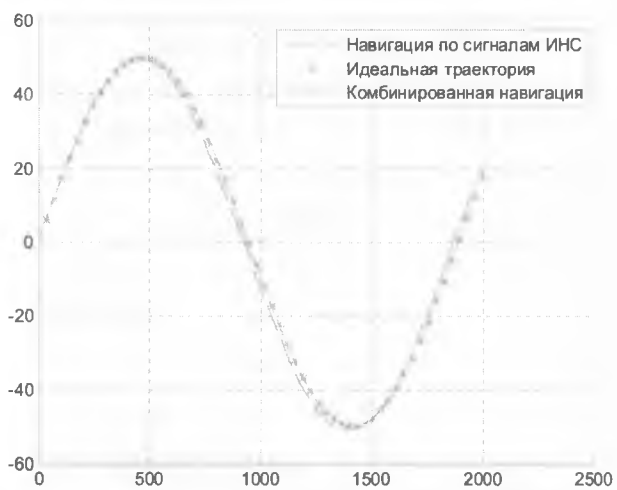


Рис. 5. Движение подвижных объектов по синусоиде

ние позиции ПО от идеальной траектории с использованием разработанного фильтра Калмана составило 1,26 м.

### Выводы

Предложен и исследован алгоритм комплексирования данных ИНС, энкодера и компаса для решения задачи локальной навигации автономного ПО. Отличие системы комплексирования состоит в применении расширенного фильтра Калмана. Выполнено имитационное моделирование, которое показало эффективность применения алгоритма комплексирования навигационной информации не только на прямолинейных, но и на криволинейных траекториях движения ПО. Применение данного алгоритма позволяет решать важную техническую задачу навигационного обеспечения в данном случае двухколесного ПО, на примере мобильного робота.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ 16–19–00001 в Южном федеральном университете.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор глобальных навигационных систем [Электронный ресурс]: <http://www.vspcenter.ru/glonass/system/>. Дата доступа 27.03.2017.
2. Shahida Khatoon and Ibraheem. Autonomous Mobile Robot Navigation by Combining Local and Global Techniques // International Journal of Computer Applications (0975–8887). 2012. V. 37. N 3.
3. Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.

4. Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews. Global Positioning, Inertial Navigation and Integration. SBN: 978-0-470-09971-1. August 2007. 416 p.
5. Черноожкин В.А., Половко С.А. Система локальной навигации для наземных мобильных роботов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 57.
6. Защелкин К.В., Калинин В.В., Ульченко Н.О. Реализация комбинированного способа навигации автономного мобильного робота // Электротехнические и компьютерные системы. 2013. № 09 (85). Компьютерные системы и компоненты. С. 102–109.
7. Soloviev V.V., Pshikhovop V.K., Shapovalov I.O., Finaev V.I., Beloglazov D.A. Planning of the mobile robot motion in non-deterministic environments with potential fields method // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. V. 10. N. 21. P. 41954–41961.
8. Котов К.Ю., Мальцев А.С., Соболев М.А., Филиппов М.Н. Совместное использование одометрии и системы технического зрения для оценки координат мобильного робота // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». 2011. С. 230–236.
9. Меркулов В.В., Носенков Д.А. Метод оценки позиции мобильного робота на основе комплексирования сенсорных данных одометрии и магнитного компаса с использованием фильтра Калмана // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Вып. 2. Т. 1. С. 83–87.
10. Грибовский А.В., Козадаев К.В., Красовский С.П. Комплексирование данных навигационных систем на основе нелинейного фильтра Калмана // Информатика: Ежеквартальный научный журнал 2012. № 1. С. 106–114.
11. Chenavier F., Crowley J. Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France. 1992. May 12–14. P. 2588–2593.
12. Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.
13. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов / Под ред. Пшихопова В.Х. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 300 с.
14. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science Chapel Hill. Course 8. SIGGRAPH 2001.