

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор

Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Басараб М.А. — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Большаков А.А. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Булдакова Т.И. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)
Зинченко Л.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Зубов Н.Е. — д.т.н., проф., РКК «Энергия»
Кларк Р. — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,
Великобритания)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МИРЭА — РТУ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП
им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Проталинский О.М. — д.т.н., проф., НИУ МЭИ
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное
машиностроение"» (заместитель
главного редактора)
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во
"Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН,
президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т
науки и технологии (КНР)
Чистякова Т.Б. — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.
центр им. В.П. Чкалова

Редакторы — **Мымрина И.Н., Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.
Тел.: 8 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г.
(ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК
при Минобрнауки России изданий для публикации трудов
соискателей учёных степеней, а также в систему Россий-
ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Издаётся с 1947 г.

Том 74

12
2020

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

- Веселовская О.А., Абанин А.Д.** Стенд полунатурного мо-
делирования для проверки функционирования оптико-элек-
тронных систем 531
- Силаев А.А., Григорьев М.С.** Автоматизация непрерывного
стана проката бесшовных труб 534
- Чирков Е.В., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Саблин С.Ю.,
Высоцкая И.А.** Информационная модель зоны варьирова-
ния трассы лесовозной автомобильной дороги 538

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

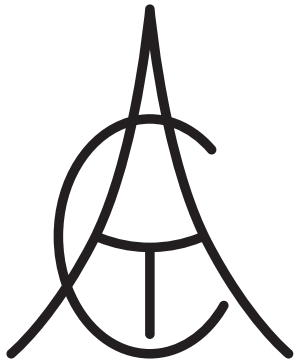
- Рязанова Н.Ю., Жуйян Чжоу.** Алгоритм распознавания сиг-
налов измерительного комплекса беспилотного летательно-
го аппарата 543
- Рязанова Н.Ю., Рыжкова Е.К.** Методы определения поло-
жения беспилотного летательного аппарата на основе изо-
бражений подстилающей поверхности 549
- Ли Юе, Цибизова Т.Ю., Косовский А.В.** Алгоритм обнару-
жения и изоляции отказов линейного фильтра Калмана ... 557

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Пролетарский А.В.** Использование моделей с улучшенными
характеристиками в системе управления ракетами 563
- Воробьёв Е.И., Моргуненко К.О., Конева Е.Е.** Алгоритмы
управления двуруким роботом при сборке цилиндрических
соединений 568

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

- Указатель статей**, опубликованных в журнале «Автомати-
зация. Современные технологии» в 2020 г. 573



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor

Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,
MSTU behalf of N.E. Bauman

EDITORIAL COUNCIL:

Afanasyev V.N. – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE

Basarab M.A. – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Bolshakov A.A. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

Buldakova T.I. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China

Zinchenko L.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Zubov N.E. – dr.en.s., prof., RSC «Energy»

Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK

Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa

Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan

Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE

Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MIREA—RTU

Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS

Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP
behalf of N.A. Pilyugin»

Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Protalinsky O.M. – dr.en.s., prof., NRU MPEI

Putilov V.N. – LLC «Innovative Mashinostroenie»
Publishers» (deputy chief editor)

Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Innovative
Mashinostroenie» Publishers»

Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China

Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China

Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician RAS, President
of MSTU behalf of N.E. Bauman

He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science
and Technology, P.R. China

Chistyakova T.B. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**

Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane — 2a, build. 2

Tel.: +7 (499) 268-41-77.

E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;

http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «INNOVATIVE MASHINOSTROENIE» PUBLISHERS»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 74 $\frac{12}{2020}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Veselovskaya O.A., Abanin A.D. Semi-natural simulation stand
for functional testing of the optoelectronic systems 531

Silaev A.A., Grigor'ev M.S. Automation of continuous rolling mill
for seamless pipe production 534

**Chirkov E.V., Skrypnikov A.V., Borovlev A.O., Sablin S.Yu.,
Vysotskaya I.A.** Information model of the variation zone for the
timber lorry road 538

MODERN TECHNOLOGIES

Ryazanova N.Yu., Zhuyyan Chzhou. Algorithm for signals recog-
nizing of an unmanned aerial vehicle measuring complex 543

Ryazanova N.Yu., Ryzhkova E.K. Methods for determining the
position of an unmanned flying vehicle based on images of the
underlying surface 549

Li Yue, Tsibizova T.Yu., Kosovskiy A.V. Algorithm for detecting
and isolating failures of the linear Kalman filter 557

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Proletarskiy A.V. The use of models with improved characteris-
tics in the missile control system 563

Vorob'ev E.I., Morgunenkov K.O., Koneva E.E. Control algo-
rithms for a two-handed robot at cylindrical joints assembling . . . 568

REVIEW OF THE PERIODICAL PRESS

Index of articles published in the journal «Automation. Modern
technologies» in 2020 573



УДК 62-529

О.А. Веселовская, А.Д. Абанин

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

volga@bmstu.ru; slavyansky88@yandex.ru

СТЕНД ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрен стенд для полунатурного моделирования работы фотоприёмных устройств, в частности оптико-электронных систем. Показаны состав стенда, его программное обеспечение.

Ключевые слова: модель; полунатурное моделирование; оптико-электронная система; фотоприёмное устройство.

A stand for semi-natural simulation of the operation of photoreceiving designs, in particular, optoelectronic systems, is considered. The composition of the stand and this software are shown.

Keywords: model; semi-natural modeling; optoelectronic system; photoreceiving design.

Введение. Полунатурное моделирование (ПНМ) играет особую роль при проектировании сложных систем. Если экспериментальный образец системы уже готов, но особенности работы аппаратуры во всём диапазоне изменения параметров входного воздействия не исследованы, алгоритмы обработки сигналов не отлажены, то необходимо проведение полунатурного моделирования [1].

Математическое моделирование, основанное на использовании реальных алгоритмов работы систем, законов управления, позволяет оперативно и в широких пределах изменять параметры системы, а также корректировать разработанные алгоритмы и условия работы системы и, таким образом, исследовать поведение системы в различных условиях.

Помимо этого, ПНМ незаменимо на стадиях отладки, тестирования и проверки работоспособности, а также слаженности действия основных модулей тестируемого устройства [2]. Появляется возможность снижения финансовых затрат, временных, производственных ресурсов. Работа на стенде ПНМ не требует особой подготовки, достаточно лишь иметь навыки работы на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ).

Среди приборов и систем, использующих оптическое излучение, особое место занимают оптико-электронные приборы и системы, которые характеризуются высокими точностью и быстродействием, возможностью обработки многомерных сигналов и другими ценными свойствами.

Оптико-электронными называются системы, в которых информация об исследуемом или наблюдаемом объекте переносится оптическим излучением или содержится в оптическом сигнале, а при её первичной обработке происходит преобразование энергии излучения в электрическую энергию.

Информация об излучающем объекте содержится в параметрах оптического сигнала: амплитуде, частоте, фазе, поляризации, длительности импульса и др., которые и регистрируются прибором.

В зависимости от решаемой задачи источник излучения может являться объектом наблюдения (целью) или фоном. Оптико-электронные приборы и системы можно классифицировать по следующим признакам:

- область спектра;
- способ использования информации;
- решаемая задача;
- ширина полосы длин волн, на которых работает прибор;
- режим работы.

Таким образом, современная вычислительная техника совместно с возможностями видеооборудования открывает широкие перспективы для использования стенда ПНМ при работе с оптико-электронными системами (ОЭС). Такие стенды могут применяться для проверки автономного функционирования ОЭС, проведения различных видов их испытаний, отладки и тестирования ОЭС.

При этом использование ПНМ требует решения следующих задач:

разработка принципиальной схемы стенда ПНМ;

разработка и отладка математических моделей исследуемых систем или их составных частей;

разработка программы и методики проведения ПНМ;

анализ результатов ПНМ.

В данной статье подробно рассматриваются первые две задачи.

Принципиальная схема и описание компонентов стенда. Начиная с 1970-х гг. развиваются автоматические системы навигации по геофизическим полям [3], в частности оптико-электронные системы навигации на основе корреляционно-экстремального метода. ОЭС регистрирует текущее изображение поверхности Земли, сравнивает его с эталонным изображением, определяет положение летательного аппарата (ЛА) и выдаёт поправку для основной системы навигации ЛА.

ОЭС состоит из оптического блока и блока электроники. Оптический блок может иметь различное техническое оформление, в зависимости от типа применяемой ОЭС и ЛА. Блок электроники состоит из ЭВМ, управляемой операционной системой реального времени с дополнительными модулями, обеспечивающими реализацию корреляционно-экстремального метода и взаимодействие ОЭС с составными частями ЛА.

Состав оборудования, необходимого для имитации работы оптико-электронной навигационной системы:

имитатор фона — цифровая вычислительная система для отображения видеoinформации о поверхности вдоль маршрута движения ЛА в масштабе реального времени, синхронно с движением ЛА. Имитатор фона выдаёт фоно-целевую информацию (ФЦО);

имитатор бортового оборудования (БО) ОЭС — цифровая вычислительная система для имитации работы БО ОЭС. В состав имитатора БО ОЭС входит ОЭС;

имитатор наземного оборудования (НО) ОЭС — цифровая вычислительная система для имитации НО, взаимодействующего с ОЭС. Имитатор НО ОЭС соединяется с имитатором БО ОЭС через штатные интерфейсы ОЭС;

имитатор движения и измерительной системы — проводит имитацию полёта ЛА, работы системы управления ЛА, работы измерительной системы ЛА, управляет работой и синхронизирует в масштабе реального времени имитаторы НО ОЭС и фона;



Рис. 1. Принципиальная схема стенда ПНМ ОЭС

аппаратура приёма измерительной информации — предназначена для приёма и обработки в режиме реального времени телеметрической информации с ОЭС;

комплекс подготовки рабочих версий программного математического обеспечения (ПМО) для полунатурного моделирования — цифровая вычислительная система, позволяющая производить отладку и сборку ПНМ для ОЭС.

На рис. 1 показана принципиальная схема стенда ПНМ ОЭС.

Программное обеспечение стенда ПНМ ОЭС. Программное обеспечение стенда ПНМ состоит из программ имитации ФЦО (ИФЦО) и имитации бортовой системы управления (ИБСУ), образующих единый взаимосвязанный комплекс.

Программа ИБСУ реализует следующие функции:

- информационный обмен ОЭС и бортовой системы управления (БСУ);
- математическое моделирование пространственного движения ЛА;
- имитация работы бортовых систем ЛА;
- получение, запись и первичный анализ телеметрической информации (ТМИ).

Программа ИФЦО реализует следующие функции:

- подготовка визуальной информации для имитации ФЦО;
- определение взаимного расположения областей видимости монитора и фотоприёмных устройств (ФПУ) ОЭС.

В состав программного обеспечения вычислительного комплекса ПНМ входят следующие модули (рис. 2):

- графический интерфейс;
- модуль информационного обмена с ОЭС;
- модуль управления;
- модуль математического моделирования;
- модуль имитации ФЦО.

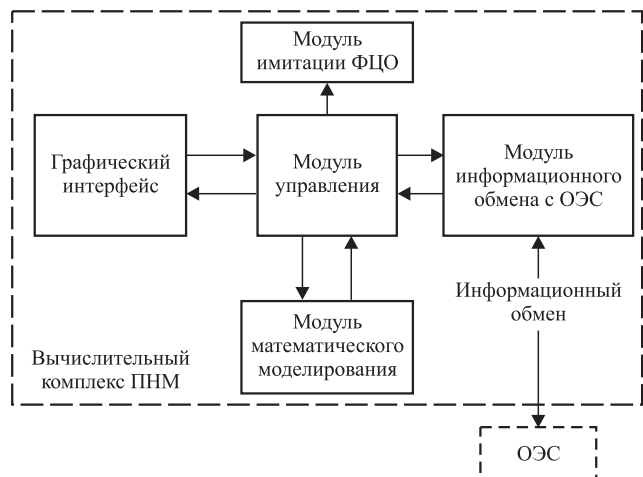


Рис. 2. Структурно-функциональная схема программного обеспечения стенда ПНМ работы ОЭС

Графический интерфейс предназначен для задания оператором исходных данных ПНМ и отображения технологической информации о текущем состоянии ПНМ [4].

Модуль информационного обмена с ОЭС, используя данные математической модели БСУ, организует приём и передачу данных согласно ГОСТ Р 52070—2003 и протоколам информационного взаимодействия ОЭС и БСУ.

В состав отправляемых в ОЭС данных входят данные бесплатформенной инерциальной навигационной системы управления (БИНС), командная информация, массивы полётного задания.

БСУ принимает от ОЭС информацию о состоянии изделия; поправки, корректирующие данные БИНС; массивы ТМИ.

Модуль управления осуществляет организацию процессов и потоков, реализуемых в ходе ПНМ, и информационное взаимодействие между всеми программными модулями.

В состав модуля математического моделирования входят следующие математические модели: пространственного движения ЛА; окружающей среды; БСУ; БИНС.

Математические модели реализованы программным способом с помощью современных средств разработки на языке C++. При программной реализации моделей применена методология объектно-ориентированного программирования.

Цель реализации математической модели пространственного движения ЛА заключается в расчёте параметров движения ЛА. Движение является управляемым, поэтому в математическую модель пространственного движения интегрирована математическая модель

бортового комплекса управления, средствами которой производится расчёт управляющих воздействий органов управления ЛА. На параметры движения и управляющие воздействия существенное влияние оказывает внешнее воздействие со стороны атмосферы. Поэтому в математическую модель пространственного движения также интегрирована математическая модель атмосферных воздействий.

Ядром математического моделирования движения объекта в пространстве является система дифференциальных уравнений, описывающих в общем случае динамику и кинематику движения. При моделировании пространственного движения ЛА рассматривается как твёрдое тело (не учитываются упругие колебания). Для описания пространственного движения ЛА используются уравнения динамики и кинематики движения его центра масс и уравнения движения относительно центра масс.

Математическая модель измерительно-навигационной системы (ИНС) предназначена для моделирования погрешностей измерений параметров состояния ЛА и для расчёта оценок параметров навигации и ориентации. Математическая модель подобной навигационной системы подразделяется на модели измерительной и вычислительной частей. Модель измерительной части ИНС представляет собой модель ошибок измерения угловой скорости и кажущегося ускорения.

Математическая модель БСУ необходима для комплексного управления моделируемым движением ЛА. В процессе моделирования модель БСУ совершает информационный обмен с ОЭС по ГОСТ Р 52070—2003 по средствам протоколов информационного обмена.

Модуль отображения ФЦО. Модуль отображения ФЦО предназначен для воспроизведения визуальных образов, воспринимаемых фотоприёмным устройством ОЭС. Ядром модуля являются реализации алгоритмов работы с геопривязанными изображениями и алгоритмов трассировки лучей для моделирования съёмки изображений из определённой точки в пространстве.

Модуль отображения ФЦО обеспечивает загрузку необходимой эталонной информации, построенной по космическим снимкам, и выдачу данных ФЦО в масштабе реального времени на основе поступающей информации о местоположении ЛА.

Отбор исходных фотоматериалов для ПНМ производится из имеющихся в базе данных аэрофотоснимков (АФС) и космических фото-

снимков (КФС) участков подстилающих поверхностей различных природно-климатических районов с разной ФЦО, соответствующей условиям применения реального ЛА. Для формирования эталонного изображения используются детальные космические снимки. Для формирования текущего изображения используются космические снимки среднего разрешения.

Модуль отображения ФЦО имеет два режима работы: калибровка областей видимости и выдача данных ФЦО.

В режиме калибровки требуется определить области видимости ФПУ ОЭС, в которые впоследствии будет выводиться графическая информация о подстилающей поверхности.

Режим выдачи данных ФЦО начинается при достижении оптической ортодромии. Основываясь на данных математических моделей пространственного движения и окружающей среды, модуль имитации ФЦО формирует графическую информацию о подстилающей поверхности. Эта информация выдается в области видимости монитора, полученные ранее при калибровке.

Вывод. Стенд ПНМ для работы с оптико-электронными системами (ОЭС) позволяет успешно справляться с такими задачами, как проверка автономного функционирования ОЭС; различные виды испытаний ОЭС; отладка и тестирование ОЭС.

Библиографические ссылки

1. **Кучерявый А.А.** Бортовые информационные системы / под ред. В.А. Мишина и Г.И. Ключева. Ульяновск: УлГТУ, 2004.
2. **Программа** и методика полунатурного моделирования работы изделия ОЭС.М.: ЦНИИАГ, 2014.
3. **Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П.** Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 2005.
4. **Запорожец А.В., Костюков В.М.** Проектирование систем отображения информации. М.: Машиностроение, 1992.

Ссылка для цитирования

Веселовская О.А., Абанин А.Д. Стенд полунатурного моделирования для проверки функционирования оптико-электронных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 531—534.

УДК 621.771.28:681.5

А.А. Силаев, канд. техн. наук, доц., **М.С. Григорьев**
(Волжский политехнический институт —
филиал Волгоградского государственного технического университета)

aa_silaev@mail.ru; m.grigoriev@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ПРОКАТА БЕСШОВНЫХ ТРУБ

Статья посвящена управлению процессом горячей бесшовной прокатки труб на непрерывном стане. Рассмотрен процесс прокатки труб на непрерывном стане с удерживаемой оправкой. Показаны этапы технологического процесса. Составлен перечень его регулируемых и контролируемых параметров. Разработаны контуры управления технологическим процессом бесшовной прокатки труб. Дано описание используемых датчиков в данном технологическом процессе.

Ключевые слова: непрерывный стан с удерживаемой оправкой; бесшовное производство труб; управление процессом прокатки труб; технология прокатки труб.

The article is devoted to the process control of hot seamless pipe rolling on a continuous rolling mill. The process of pipes rolling on a continuous rolling mill with a retained mandrel is considered. The stages of the technological process are shown. A list of its regulated and monitored parameters is formulated. The control loops of the seamless pipe rolling technological process are developed. A description of the sensors used in this technological process is given.

Keywords: continuous rolling mill with a retained mandrel; seamless tube production; pipe rolling process control; pipe rolling technology.

Введение. В трубной промышленности бесшовные трубы производят методом непрерывной прокатки [1]. Основным преимуществом

линий с непрерывным станом является их высокая производительность. Оснащение современных агрегатов редукционными станами,

работающими на растяжение, значительно расширяет ассортимент проката как по диаметру, так и по толщине стенки. В старых трубопрокатных агрегатах, не имеющих редуционно-растяжных станов, ассортимент проката более узкий, а его расширение ограничивается необходимостью значительного увеличения парка сменного оборудования: валков и оправок.

Существенной особенностью непрерывной прокатки является деформация трубы сразу в нескольких местах (клетях). Преимущество непрерывного прокатного стана заключается в том, что расположение технологического оборудования позволяет автоматизировать технологические операции.

Трубная продукция используется для предприятий топливно-энергетического комплекса, машиностроения, строительной и оборонных отраслей, для создания трубопроводного транспорта и наиболее широко для нефтегазового комплекса. Поэтому исследования, посвящённые управлению процессом прокатки, являются актуальными не только для предприятий трубной промышленности, но и для многих других отраслей.

Анализ литературы показал, что непрерывный стан рассматривают по отдельным составляющим и не рассматривают его комплексную систему управления. Например, в работе [2] описаны только математические модели клеток стана без учёта других узлов. В статье [3] особое внимание уделено принципу работы поджимных устройств. В частности, показаны плюсы и минусы подачи штока, а также проведено сравнение гидравлических и электромеханических устройств управления. В статье [4] уделено внимание влиянию температуры прокатываемой полосы на удерживающее устройство, подробно рассмотрены вопросы, связанные с силой воздействия, и даны варианты создания более точной линии натяжения. Работы [5, 6] посвящены моменту захвата станом прокатываемой полосы и влиянию скорости поджимных устройств на прокатываемый материал. Предложено техническое решение для уменьшения данного влияния. В статьях [7, 8] рассмотрены вопросы, связанные с электроприводом стана. Есть работы, посвящённые возникновению различных дефектов в ходе проката [9, 10].

Целью настоящей статьи является исследование непрерывного стана в целом как объекта автоматизации для проектирования автоматизированной системы управления процессом прокатки.

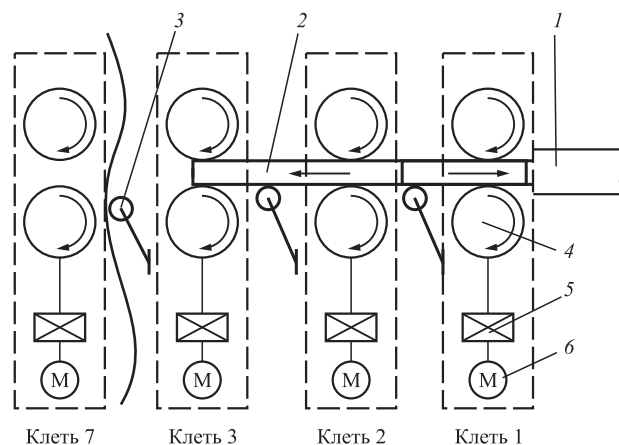


Схема процесса прокатки труб:

1 — оправка; 2 — гильза; 3 — поджимной ролик; 4 — валок; 5 — механическая передача; 6 — электродвигатель

Описание технологического процесса. Рассмотрим технологию прокатки труб на примере обобщённой схемы процесса прокатки труб, приведённой на рисунке.

Гильзу 2 подают без задержки на вход стана, где в неё вводят оправку 1. Вход стана выполнен в виде желобов-приёмников и оборудован специальными тележками для оправки и гильзы. Тележки перемещаются с помощью специальных канатных приводов.

Для уменьшения силы трения между гильзой и оправкой поверхность оправки смазывают технологической смазкой. Гильзу прижимают рычагом к роликам рольганга. Оправку с начальной скоростью подают тележкой в гильзу. По мере продвижения оправки в гильзе её скорость увеличивают.

После того как передний конец оправки выйдет из гильзы, зажим гильзы отключают, скорость движения толкателя оправки уменьшают и включают толкатель гильзы. Гильза вместе с оправкой входит в валки 4.

Непрерывный стан имеет семь двухвалковых клеток, установленных на общей платформе с шагом 1150 мм. Клетки смонтированы перпендикулярно друг к другу, под углом 45° к горизонту. Диаметры валков одинаковы по всем клетям и равны 550 мм, ширина бочки составляет 230 мм. Максимальная скорость оправки достигает 6 м/с [11—13].

После того как конец раскатанной гильзы выходит из стана, оправка возвращается на обработку, а раскатанная гильза движется дальше, на следующую стадию производства.

Для разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом проката труб составлен перечень регулируемых и контролируемых параметров (таблица).

Технологический процесс проката бесшовных труб на непрерывном стане можно разбить на несколько этапов.

На первом этапе происходят подача гильзы на линию непрерывного стана и подготовка оправки к вводу в гильзу. Подготовка подразумевает нанесение на оправку технологической смазки.

Второй этап включает в себя ввод оправки в гильзу и подачу гильзы с оправкой в стан.

На третьем этапе происходит раскатка гильзы в трубу.

Для составленного перечня регулируемых и контролируемых параметров разработаны контуры управления.

1. Для регулирования скорости движения оправки необходимо отслеживать её положение и скорость движения. Для определения положения используются фотодатчики, которые выдают дискретный сигнал о наличии оправки на линии непрерывного стана.

Скорость измеряется через инкрементальный энкодер. Датчик выдает дискретный сигнал, поступающий на контроллер. После этого измеренное значение сравнивается

с текущей уставкой и контроллер формирует управляющий сигнал на частотный преобразователь, который, в свою очередь, изменяет частоту вращения электродвигателя.

2. Для регулирования скорости в клетях стана применяется тот же принцип управления, что и для оправки.

3. Регулирование давления в гидравлической системе стана необходимо осуществлять для регулирования толщины проката. Давление измеряется датчиком, который выдает аналоговый сигнал на контроллер. После сравнения измеренного значения с уставкой контроллер выдает аналоговый управляющий сигнал на гидрораспределитель, который регулирует давление прижимного устройства на линии проката.

4. Отслеживание наличия гильзы в клетях осуществляется с помощью индуктивных или оптических датчиков.

5. Управление межклетевым охлаждением полосы проката и валков. Для измерения расхода воды, используемой для охлаждения, можно применять вихревой расходомер, а для регулирования — электромагнитный клапан. Для контроля температуры валков непрерыв-

Регулируемые и контролируемые параметры

Параметр	Отображение информации			Регулирование	Регулирующее воздействие	Характеристика среды в местах установки			
	Показание	Регистрация	Сигнализация			датчиков		регулирующих органов	
						Агрессивная	Пожаро- и взрывоопасная	Агрессивная	Пожаро- и взрывоопасная
Скорость оправки	+	+	–	+	Изменение скорости вращения вала двигателя	–	–	–	–
Скорость клетей стана	+	+	–	+	Изменение скорости вращения вала двигателя	–	–	–	–
Гидравлическое давление валков	–	+	–	+	Открытие/закрытие гидрораспределителей	–	–	–	–
Температура оправки	+	+	–	–	–	–	–	–	–
Наличие гильзы на каретке	+	+	–	–	–	–	–	–	–
Температура гильзы	–	+	+	–	–	–	–	–	–
Температура роликов	+	+	+	–	–	–	–	–	–
Давление гидравлической системы	+	+	–	–	–	–	–	–	–
Подача охлаждающей жидкости в клетки	+	+	+	–	–	–	–	–	–

ного стана используются инфракрасные датчики температуры (пирометры) [14—17].

Измерительное оборудование. Для измерения температуры предлагается использовать пирометры фирмы IFM TW2000. Принцип действия пирометра основан на измерении уровня электромагнитной энергии, излучаемой контролируемым объектом.

С изменением температуры объекта контроля изменяется уровень излучаемой им энергии. Излучение происходит в диапазоне от инфракрасного до видимого спектра при достижении температур более тысячи градусов Цельсия. Измерения преобразуются в сигнал, который можно передать контроллеру.

Для измерения скорости движения клетей и рейки непрерывного стана предлагается использовать инкрементальные энкодеры Baumer G1355. Инкрементальный энкодер состоит из диска с нанесённой оптической шкалой, жёстко закреплённой на валу, и специального датчика. Вал энкодера вращает диск, а датчик считывает информацию и преобразует её в импульсы. После этого данные изменения передаются в контроллер, где преобразуются в изменения скорости.

Для измерения положения оправки и гильзы предлагается использовать фотодатчик Rygo Light Grid LAN/LSH. Принцип работы данного устройства основан на прерывании светового барьера, который создаётся между излучателем и приёмником.

Для измерения давления в гидравлических системах стана предлагается использовать датчик Bosch Rexroth HM20. Принцип его работы следующий. Датчик имеет мембрану-тензорезистор, которая при воздействии давления вещества деформируется и изменяет своё сопротивление. Изменение сопротивления преобразуется в унифицированный токовый сигнал.

Для измерения расхода воды предлагается использовать вихревой расходомер FLOMIC FL5024. Принцип его работы основан на применении ультразвукового излучения. При движении потока жидкости скорость распространения ультразвуковой волны уменьшается. Расход определяется по разности между временем распространения волны вдоль потока и против потока.

Заключение. Проведено исследование непрерывного стана как объекта автоматизации. Для разработки системы управления процессом прокатки на непрерывном стане составлен перечень регулируемых и контролируемых параметров и разработаны контуры

управления. Предложены варианты реализации контуров управления. Предложены варианты датчиков, которые могут быть использованы в данном процессе. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку проектно-конструкторской документации: функциональную схему автоматизации и принципиальную электрическую схему.

Библиографические ссылки

1. Алешенко А.С., Лубе И.И., Богатырев Д.В. и др. Исследование процесса прошивки на двухвалковом стане винтовой прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 7. С. 20—23.
2. Потапов И.Н., Коликов А.П., Друзян В.М. Теория трубного производства. М.: Металлургия, 1991. 424 с.
3. Селиванов И.А., Петухова О.И., Бодров И.В. и др. Системы регулирования непрерывных станов с многовалковыми калибрами // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2009. Вып. 11. № 15. С. 60—63.
4. Карандаев А.С., Радионов А.А., Храмин В.Р., Гостев А.Н. Способы коррекции скоростей захвата полосы в непрерывной подгруппе клетей широкополосного стана горячей прокатки // Электрические системы и комплексы. 2012. № 20. С. 141—149.
5. Мещеряков В.Н., Диденко Е.Е. Методы идентификации температуры прокатываемой полосы в межклетевом промежутке чистовой группы стана горячей прокатки для коррекции управления электроприводом петледержателя // Электрические системы и комплексы. 2016. № 31. С. 4—8.
6. Бодров Е.Э. Электромеханические и гидравлические нажимные устройства на непрерывных станах // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 1—5.
7. Струнин Д.О., Выдрин А.В., Шеркунов А.В. и др. Совершенствование технологии прокатки труб на непрерывном раскатном стане с удержанием оправки // Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия. 2018. Т. 18. № 2. С. 72—80.
8. Shokhin V.V., Permyakova O.V. The Study of Continuous Rolling Mill Inter-stand Tension Inferential Control Systems // Procedia Engineering. 2016. Vol. 129. P. 231—238.
9. Gao C., Du G., Li R. et al. An analysis on strip vibration coupled with torsional vibration of main drive system of rolling mill // Vibroengineering. 2016. Vol. 19. P. 5679—5690.
10. **Технология** оборудования для производства бесшовных труб [Электронный ресурс] // Компания ENCE GmbH. Режим доступа: <https://ence.ch/ru/> (дата обращения: 4.08.2020).
11. Восканьянц А.А. Автоматизированное управление процессами прокатки: учеб. пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 85 с.
12. Поступаева С.Г., Грязнов И.Е. Работа САУ, основанных на традиционных и нетрадиционных методах настройки регулятора // Известие ВолгГТУ. 2003. № 20. С. 117—121.
13. Schmidtchen M., Rimnac A., Warczok P. et al. Investigation of the influence of the chemical composition

of HSLA steel grades on the microstructure homogeneity during hot rolling in continuous rolling mills using a fast layer model // IOP Conference Ser.: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 119. P. 1—5.

14. **Nekit V., Platov S., Krasnov M.** The nature of the change of the surface temperature of the workpiece during hot rolling of pipe steel // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 224. P. 1—5.

15. **Карандаев А.С., Храмшин В.Р., Радионов А.А.** и др. Согласование режимов скорости электроприводов клетей непрерывной группы прокатного стана // Вестник ИГЭУ. 2013. № 1. С. 1—5.

16. **Pavlov D., Bogatov A., Pavlova E.** et al. Investigation of plug rolling with stub mandrel using the finite

element method // Archives of Metallurgy and Materials. 2018. Vol. 63. P. 1083—1086.

17. **Воронин С.С., Гасияров В.Ш.** и др. Автоматизированные системы управления технологическими процессами // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. Т. 16. № 1. С. 121—136.

Ссылка для цитирования

Силаев А.А., Григорьев М.С. Автоматизация непрерывного стана проката бесшовных труб // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 534—538.

УДК 004.942

Е.В. Чирков

(Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова),

А.В. Скрыпников, д-р техн. наук, проф., **А.О. Боровлев, С.Ю. Саблин**

(Воронежский государственный университет инженерных технологий),

И.А. Высоцкая, канд. физ.-мат. наук

(Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина)

i.a.trishina@gmail.com

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ ВАРЬИРОВАНИЯ ТРАССЫ ЛЕСОВОЗНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Исследовано использование квадратичной и кусочно-квадратичной моделей с разрывами, а также гладкой кусочно-квадратичной модели при проектировании трассы лесовозной автомобильной дороги. На основании результатов исследования сделан вывод об оптимальном использовании критериев при моделировании и автоматизации полученной модели.

Ключевые слова: информационная модель; лесовозная автомобильная дорога; критерии оптимальности.

The use of quadratic and piecewise quadratic models with discontinuities, as well as a smooth piecewise quadratic model at the design of the timber lorry road, is investigated. Based on the research results, a conclusion about the optimal use of the criteria at modeling and automation of the received model is made.

Keywords: information model; timber lorry road; optimality criteria.

Введение. Проектирование оптимальной трассы лесовозной автомобильной дороги в пространстве представляет собой сложную проблему. Исследования, проведенные в этой области в нашей стране [1—3] и за рубежом [4], вносят значительный вклад в развитие данного направления. Вместе с тем анализ этих работ показал, что предлагаемые методы, основанные в большинстве своём на идеях динамического программирования, либо трудно реализуемы при современном уровне вычислительной техники, либо могут быть использованы лишь на этапе предварительного трас-

сирования для выбора направления проектируемой лесовозной автомобильной дороги. На основе анализа задачи проектирования трассы с учётом опыта использования метода аппроксимации последовательности точек и работ [5, 6] выявлена принципиальная возможность применения методов нелинейного программирования для оптимизации трассы в заданной в соответствии с определёнными требованиями зоне варьирования.

Характер математических моделей критерия оптимальности и ограничений существенно зависит от принятых переменных и

в значительной степени влияет на выбор метода оптимизации.

Разработка этих моделей осуществлена исходя из следующих принципов:

1) модели должны наиболее точно учитывать существенные факторы, а решение о допустимости упрощений принимается на основании оценки возникающих ошибок;

2) выбор моделей осуществляется из условия обеспечения возможности применения строгих математических методов оптимизации для нахождения экстремума в задаче с большим числом переменных и ограничений.

При формировании математических моделей критерия оптимальности и ограничений должны учитываться соответствующие данные технико-экономического характера о зоне варьирования трассы, систематизированные в информационную модель. Модель строится на основе эскизной линии или базовой трассы и имеет необходимые для поиска данные о технико-экономических характеристиках проектируемой дороги и зоны варьирования. Информационные модели могут применяться на разных этапах оптимизации, поэтому степень их детализации и учитываемые факторы могут быть различными.

Структуры информационных моделей на разных этапах оптимизации по возможности унифицированы для использования модели и минимизации затрат на её адаптацию при переходе к следующим этапам проектирования.

Информационная модель. В целях установления значимости различных составляющих критерия оптимальности, влияющих на выбор положения трассы, проведён анализ проектов.

Если единовременные затраты являются одноэтапными, а текущие растут по одному закону (линейному или по сложным процентам) в течение всего срока службы, то величина суммарных приведённых затрат определяется по формуле

$$P_{\text{пр}} = K + \frac{C}{E_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где K — единовременные затраты; C — величина текущих годовых затрат расчётного года эксплуатации; $E_{\text{н}}$ — нормативный коэффициент эффективности для уравнения вариантов.

По объектам, расположенным в пересечённой и горной местности, установлено процентное содержание составляющих критерия от величины критерия оптимальности [6, 7] и стоимости строительства.

Исследование структуры критерия (1) показало, что основные его затраты можно систематизировать в четыре вида:

K_1 — затраты, пропорциональные длине трассы в пределах определённого участка (1-й вид);

K_2 — затраты по сосредоточенным объектам (2-й вид);

K_3 — линейно-изменяющиеся в пределах определённого участка удельные затраты на 1 м дороги (3-й вид);

K_4 — прочие затраты (4-й вид).

Тогда $P_{\text{пр}} = K_1 + K_2 + K_3 + K_4$.

Вся зона варьирования разбивается на участки (рис. 1), характеризующиеся такими проектными условиями, при которых удельные затраты 1-го вида U_{1i} на 1 м дороги могут быть приняты постоянными, а удельные затраты 3-го вида U_{3i} линейно изменяющимися в зависимости от кривизны трассы в характерных её точках с учётом рельефа местности, геологических условий, ширины проезжей части (например, дополнительные полосы на подъёмах) и типа конструкции дорожной одежды (например, скальный, нескальный), на границах размещения искусственных сооружений, изменения дорожных условий, определяющих эксплуатационные расходы, и др. Требуемая степень детальности и точности информационной модели устанавливается в зависимости от стадии проектирования этапа оптимизации, особенностей местности и объекта, а также других условий.



Рис. 1. Пример информационной модели участка проектируемой лесовозной автомобильной дороги

Применительно к принятой структуре информационной модели затраты 1-го вида определяются по формуле

$$K_1 = \sum_{i=1}^I L_i U_{1i},$$

где L_i — длина i -го участка оптимизируемой трассы; U_{1i} — удельные затраты 1-го вида на i -м участке.

В общем случае функция длины оптимизируемой трассы

$$L_i = f(X),$$

где X — вектор переменных, не может быть в явном виде выражена относительно принятых переменных, поэтому рассмотрены несколько приближённых способов определения L_i (рис. 2).

С применением численных методов длина трассы на участке может быть определена с любой заранее заданной точностью с учётом криволинейности трассы. В данном случае функция $L_i = f(X)$ не выпуклая, поэтому этот способ можно использовать только для оценки точности моделей.

Допустим, что коэффициенты удлинения трасс K_y на участке между смежными поперечными сечениями для базовой и оптимизируемой трасс одинаковы, т. е.

$$K_y = \frac{L_{b_i}}{L_{pb_i}} = \frac{L_i}{L_{p_i}}.$$

Тогда L_i может быть определено по приближённой формуле

$$L_i = K_y L_{p_i} \approx K_y \left[L_{pb_i} - Z_i \sin \varphi_i - Z_{i+1} \sin \varphi_{i+1} + \frac{(Z_{i+1} + Z_i)^2}{L_{pb_i}} \right]. \quad (2)$$

В случае применения линеаризованных зависимостей $Z = f(X)$, а в качестве переменных Z_i составляющая K_1 будет выпуклой квадратичной функцией относительно принятых переменных. Экспериментальное исследование показало, что максимальная относительная ошибка определения K_1 с использованием формулы (2) составляет 2,3 %, что приемлемо при определении составляющей K_1 критерия оптимальности.

Применительно к принятой структуре информационной модели формула для опреде-

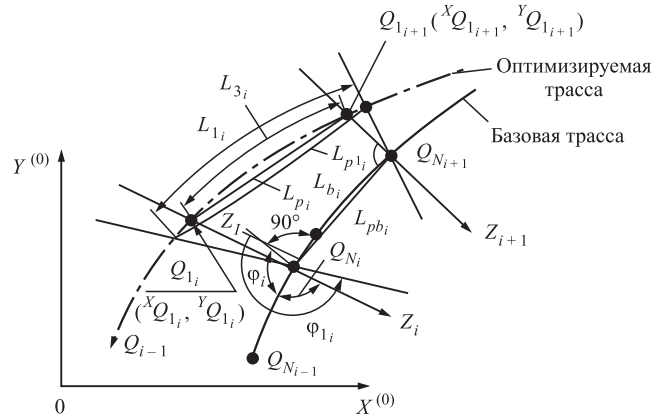


Рис. 2. Схема определения длины оптимизируемой трассы

ления затрат 2-го вида может быть представлена в виде

$$K_2 = \sum_{i=1}^I U_{2i},$$

где U_{2i} — стоимость сооружения в i -м сечении.

Затраты 3-го вида определяют по формуле

$$K_3 = \sum_{i=1}^I \frac{L_i}{2} (U_{3i} + U_{3(i+1)}). \quad (3)$$

При условии параллельности оптимизируемой трассы базовая формула (3) может быть преобразована к виду

$$\begin{aligned} K_3 &= \sum_{i=1}^I \left(\frac{L_{H_i}}{2} U_{3i} + \frac{L_{K_i}}{2} U_{3(i+1)} \right) = \\ &= \frac{L_{H_1}}{2} U_{31} + \frac{L_{K_1}}{2} U_{32} + \frac{L_{H_2}}{2} U_{32} + \frac{L_{K_2}}{2} U_{33} + \dots \\ &+ \frac{L_{H_{I-2}}}{2} U_{3I-2} + \frac{L_{K_{I-2}}}{2} U_{3I-1} + \frac{L_{H_{I-1}}}{2} U_{3I-1} + \\ &+ \frac{L_{K_{I-1}}}{2} U_{3I} + \frac{L_{H_1}}{2} U_{31} + \left(\frac{L_{K_1} + L_{H_2}}{2} U_{32} \right) + \dots \\ &+ \left(\frac{L_{K_i} + L_{H_i}}{2} \right) U_{3i} + \dots + \frac{L_{K_{I-1}}}{2} U_{3I}. \end{aligned}$$

Обозначив множители U_{3i} через T_i , получим

$$T_1 = \frac{L_{H_1}}{2}; T_i = \frac{L_{K_{i-1}} + L_{H_i}}{2}$$

при $(i = 2, \dots, I - 1)$; $T_I = \frac{L_{K_{I-1}}}{2}$,

тогда

$$K_3 = \sum_{i=1}^I T_i U_{3i}.$$

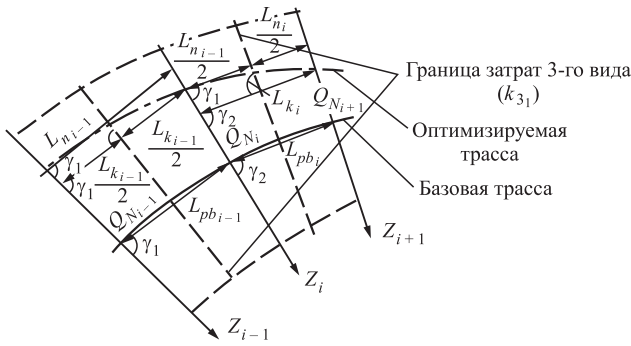


Рис. 3. Схема преобразования затрат третьего вида $U_{2i+1} = f_{(zi+1)}$; $U_{3i+1} = 0$

Здесь T_i — линейная функция относительно Z_i , $T_i = a_5 Z_i + b_5$, где a_5 и b_5 — const.

Обозначим $U_{3i} = T_i U_{3i}$, тогда

$$K_3 = \sum_{i=1}^I U_{3i}, \tag{4}$$

где U_{3i} — затраты 3-го вида на i -м участке.

В этом случае границы участка для затрат 3-го вида принимают, как показано на рис. 3.

Представление затрат K_3 в виде (4) позволяет объединить их с затратами K_2 , что в свою очередь позволяет сократить объём вычислений.

В настоящей работе рассмотрены следующие модели составляющих $(U_{2i} + U_{3i})$ критерия оптимальности:

- квадратичная;
- кусочно-квадратичная с разрывами;
- кусочно-квадратичная гладкая выпуклая.

Квадратичная модель (рис. 4) даёт возможность решения задачи с применением методов квадратичного программирования. В этом случае зависимости $(U_{2i} + U_{3i}) = f(Z_i)$ аппроксимируются квадратичной зависимостью в интервале $\{Z_{\min}, Z_{\max}\}$. На каждом этапе решается задача квадратичного программирования, методы решения которой приведены в работах [5, 7]. Точность аппроксимации в общем случае может оказаться недостаточной.

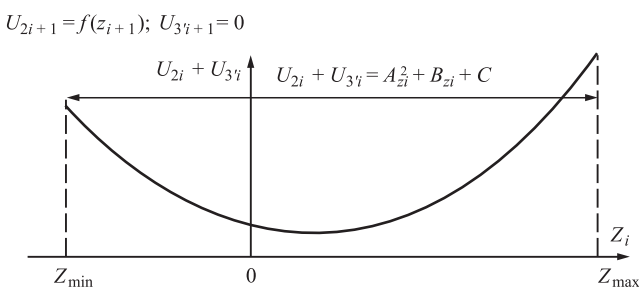


Рис. 4. Квадратичная модель $U_{2i} + U_{3i} = f(Z_i)$

Кусочно-квадратичная модель позволяет наиболее точно описать характер изменения критерия. Для реализации данной модели была рассмотрена возможность решения задачи путём введения дополнительных переменных. В этом случае размерность задачи увеличивается в 3...4 раза, а число ограничений — в 2...3 раза. Кроме того, существенно усложняются методы решения задачи.

При использовании *гладкой кусочно-квадратичной* модели зависимости $(U_{2i} + U_{3i}) = f(Z_i)$ аппроксимируются кусочно-квадратичными моделями так, чтобы значения функции и их первых производных в точках Z_3 и Z_4 (рис. 5) для смежных ветвей парабол совпадали, где A_{ji} , B_{ji} , C_{ji} — коэффициенты зависимостей $(U_{2i} + U_{3i}) = f(Z_i)$, j — порядковый номер параболы.

Для обеспечения выпуклости должно выполняться следующее условие:

$$0 \leq A_{1i}; 0 \leq A_{2i}; 0 \leq A_{3i}.$$

Анализ показывает, что, как правило, для обеспечения требуемой точности достаточно аппроксимировать $(U_{2i} + U_{3i}) = f(Z_i)$ зависимостью, состоящей из трёх парабол (рис. 5 и 6). Для повышения точности можно использо-

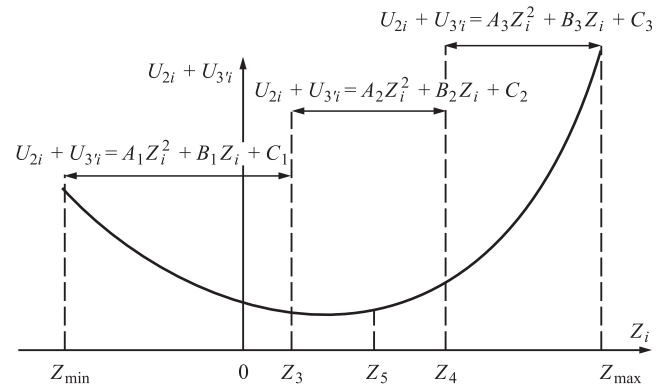


Рис. 5. Модель $U_{2i} + U_{3i} = f(Z_i)$ из трёх парабол

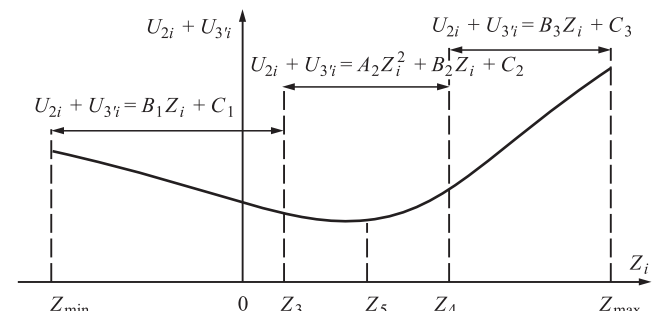


Рис. 6. Модель $U_{2i} + U_{3i} = f(Z_i)$ из парабол и прямых

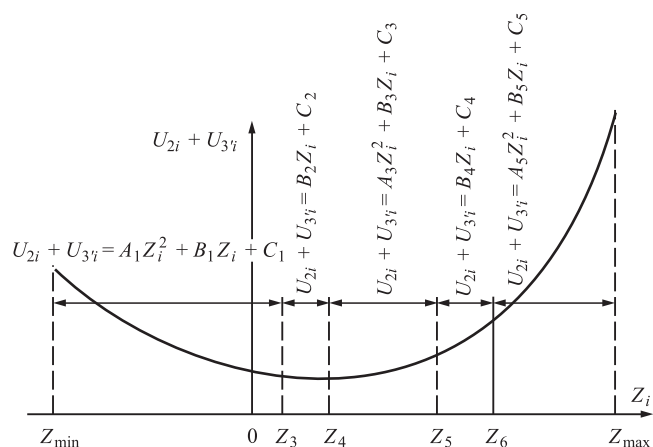


Рис. 7. Модель $U_{2i} + U_{3i} = f(Z_i)$ из пяти парабол

вать зависимости из пяти парабол (рис. 7), но в этом случае потребуется больше оперативной памяти и увеличится время счёта [8].

В экспериментальной программе коэффициенты A_{1i} , B_{1i} , C_{1i} , A_{2i} , B_{2i} , C_{2i} , A_{3i} , B_{3i} , C_{3i} (см. рис. 4 и 5) кусочно-квадратичных моделей находят по методу наименьших квадратов, где предусмотрена возможность задания двухсторонних ограничений величин радиусов и изменения центробежного ускорения, по участкам, границы которых привязаны к номерам поперечных сечений.

Заключение. На основании проведённого исследования можно сделать вывод, что наиболее перспективным является использование выпуклых гладких кусочно-квадратичных моделей. С одной стороны, они довольно точно отражают существенные компоненты критерия оптимальности, а с другой — позволяют применять известные, теоретически обоснованные, методы оптимизации и существенно упрощают дальнейшую программную реализацию проектирования оптимальной трассы лесовозной автомобильной дороги.

Библиографические ссылки

1. Курьянов В.К., Морковин В.А. Модель режимов движения транспортных потоков на лесовозных автомобильных дорогах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 2 (338). С. 61—67.
2. Чернышова Е.В., Скрыпников А.В., Самцов В.В., Абасов М.А. Лесовозные автомобильные дороги в транспортной сети лесопромышленного предприятия // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 2. С. 95—101.
3. Бурмистров Д.В., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Чернышова Е.В. Математическое моделирование оптимизации и управления транспортным потоком посредством применения датчиков регистрации проходящих автомобилей и информационных устройств // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 2 (68). С. 102—109.
4. Phillips W.S. A kinetic Model for Traffic Flow with Continuum implications // Transportation Planning and Technology. 1979. Vol. 3. P. 131—158.
5. Самцов В.В., Абасов М.А. Методы нелинейного программирования, используемые при проектировании трассы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. № 225. С. 131—143.
6. Бурмистров Д.В. Рабочая гипотеза ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог и ее экономико-математическое развитие // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 5. С. 69—76.
7. Быстрянец Е.В. Исследование технологии экспертной оценки качества информационного обеспечения автомобильного транспорта // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 9. С. 429—432.
8. Умаров М.М., Скрыпников А.В., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Расчет плановых элементов клотоидной трассы, подобранной на стереомодели местности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 4 (364). С. 97—106.

Ссылка для цитирования

Чирков Е.В., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Саблин С.Ю., Высоцкая И.А. Информационная модель зоны варьирования трассы лесовозной автомобильной дороги // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 538—542.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций, ищущих новые рынки для реализации своей продукции, услуги по размещению рекламы и объявлений.

Цены за публикацию умеренные.



УДК 681.513

Н.Ю. Рязанова, канд. техн. наук, доц., **Жуйян Чжоу**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

ryaz_nu@mail.ru

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Исследована задача повышения точности измерительного комплекса беспилотного летательного аппарата алгоритмическим путём. Рассмотрены способы реализации алгоритма обработки оптических изображений. Использована комбинация метода FAST для выделения особых точек и метода SURF для формирования дескрипторов, который применяется только к выделенным методом FAST точкам. Результаты математического моделирования подтвердили высокое быстродействие алгоритма и достаточно высокую точность распознавания подстилающей поверхности в условиях полёта над городской застройкой в режиме реального времени.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; оптическая система; особые точки; сопоставление изображений; дескриптор.

The problem of improving the accuracy by algorithmic means for an unmanned aerial vehicle measuring complex is investigated. Methods for implementing the algorithm for processing optical images are considered. A combination of the FAST method for singling out feature points and the SURF method for generating descriptors is used, which is applied only to the points dedicated by the FAST method. The results of mathematical modeling confirmed the high speed operation of the algorithm and a sufficiently high accuracy of the underlying surface recognition in real time flight conditions over urban areas.

Keywords: unmanned aerial vehicle; optical system; special points; image matching; descriptor.

Введение. В процессе полёта и особенно посадки беспилотного летательного аппарата (БПЛА) одной из наиболее важных задач является обеспечение его точной ориентации в пространстве. Для решения этой задачи на БПЛА устанавливаются инерциальные навигационные системы, приёмник GPS и камеры [1]. Совместная обработка информации от этих источников осуществляется с помощью различных алгоритмов [2—4], в частности алгоритмов совмещения изображений на основе особых точек [5].

Для безопасного автономного движения БПЛА необходимо обрабатывать сигналы измерительных систем в масштабе реального времени. Точность обработки информации зависит от различных факторов. В частности, эффективность алгоритмов обработки изображений, поступающих от оптической системы, например таких, как выделение и идентификация особых точек изображения, в значительной степени зависит от типа подстилающей поверхности.

Исследование и разработка алгоритма выделения и идентификации особых точек на изображениях подстилающей поверхности в режиме реального времени при создании измерительного комплекса БПЛА является актуальной задачей.

В статье представлены этапы реализации предлагаемого метода позиционирования БПЛА по выделенным опорным точкам, описаны основные алгоритмы, определены требования к программному обеспечению и выполнена его разработка. Обоснованы выбранные средства, технологии разработки и требования к аппаратному обеспечению. Получены зависимости времени обработки снимков от высоты полёта БПЛА над городской застройкой. Результаты математического моделирования продемонстрировали преимущества разработанного метода по сравнению с существующими.

Последовательность преобразований для определения положения БПЛА (рис. 1).

Алгоритм предобработки входных данных. Так как в алгоритмах FAST и SURF [6, 7] ис-

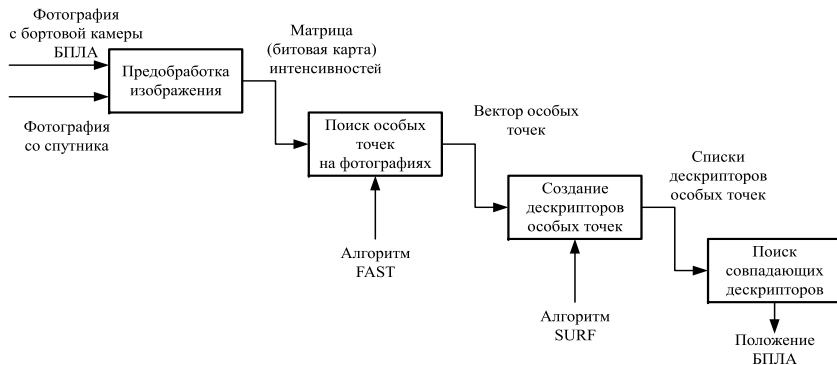


Рис. 1. Последовательность преобразований исходных данных при позиционировании БПЛА

пользуются чёрно-белые изображения, то на начальном этапе работы программы необходимо конвертировать цветные изображения, поступающие в качестве входных данных, в чёрно-белые. Каждое из изображений преобразовывается в матрицу, элементы которой определяют цвета пикселей изображения в формате RGB [5, 8]. Изображение представляется битовой картой пикселей Bitmap1, из которой выделяются компоненты цвета путём наложения битовой маски с последующим сдвигом вправо на нужное число битов [9]. На-

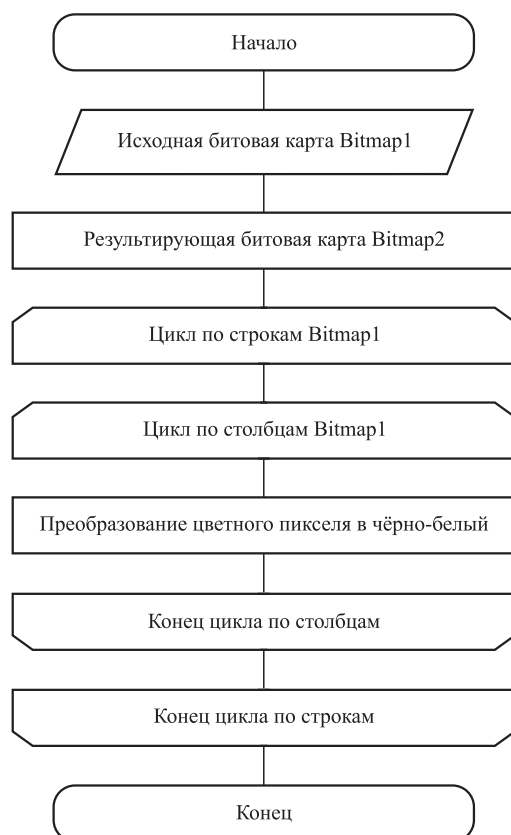


Рис. 2. Схема алгоритма преобразования цветного изображения в чёрно-белое

пример, на красный цвет накладывается битовая маска 0x00FF0000 и выполняется сдвиг на 16 разрядов:

$$\text{float } R = (\text{float})(\text{pixel} \& 0x00FF0000) \gg 16.$$

Затем ищется среднее арифметическое цветов пикселя:

$$R = G = B = (R + G + B) / 3,0$$

и для текущего пикселя новой битовой карты Bitmap2 выполняется преобразование цвета:

$$0xFF000000 | ((\text{UInt32})R) \gg 16,$$

где UInt32 — 32-разрядный тип данных.

Алгоритм предобработки входных данных представлен на рис. 2.

Алгоритм нахождения особых точек. Для нахождения особых точек был реализован алгоритм FAST, представленный на рис. 3. На вход алгоритма поступает чёрно-белое изображение — матрица интенсивностей пикселей. Результатом работы алгоритма является вектор особых точек.

Алгоритм создания дескрипторов особых точек. Сравнение выделенных точек выполняется по их дескрипторам. Для формирования дескрипторов используется метод SURF. Но для сокращения общего времени преобразования метод SURF применяется только к точкам, заранее выделенным методом FAST. Для каждой точки из вектора особых точек формируется дескриптор [10]:

вокруг точки строится квадратная окрестность размером $20s$, где s — масштаб, в котором была найдена особая точка, т. е. получено максимальное значение детерминанта матрицы Гессе. Для первой октавы область имеет размер 40×40 пикселей. Квадрат ориентируется вдоль приоритетного направления, вычисленного для особой точки. Дескриптор считается как описание градиента для 16 квадратов вокруг особой точки;

полученная квадратная область разбивается на 16 более мелких квадратов, как показано на рис. 4. В каждом квадрате берётся регулярная сетка 5×5 , и для точки сетки ищется градиент с помощью фильтра Хаара. Размер фильтра Хаара берётся равным $2s$ и для первой октавы составляет 4×4 ;

несмотря на то, что при расчёте фильтра Хаара изображение не поворачивается, фильтр считается в обычных координатах изображе-

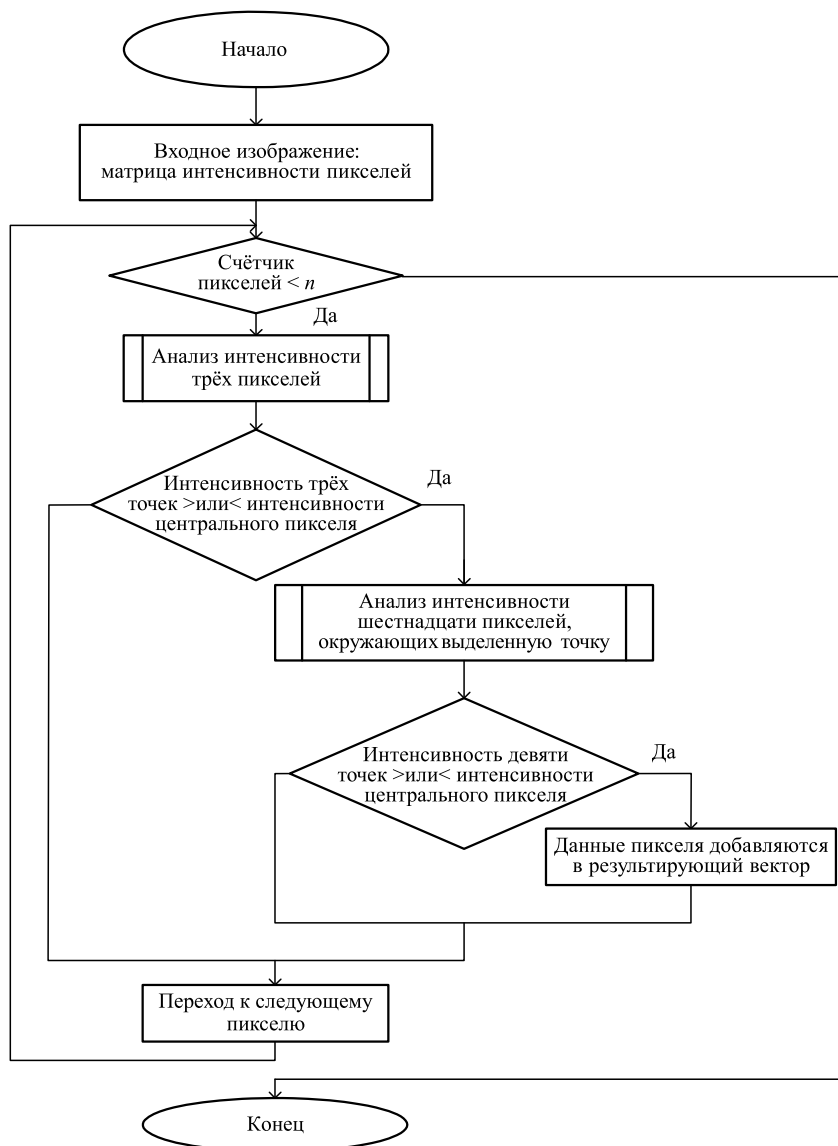


Рис. 3. Схема алгоритма FAST

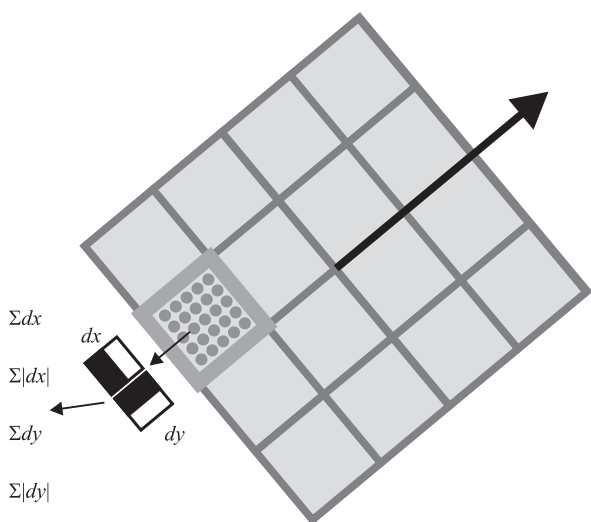


Рис. 4. Область вокруг особой точки, разбитая на 16 квадратов регулярной сеткой 5 × 5

ния, полученные координаты градиента (dx, dy) поворачиваются на угол, соответствующий ориентации квадрата. Для вычисления дескриптора особой точки вычисляются 25 фильтров Хаара, в каждом из 16 квадратов. После нахождения 25 точечных градиентов квадрата вычисляются четыре величины, которые и являются компонентами дескриптора, причём две — это суммарный градиент по квадрату и две — сумма модулей точечных градиентов;

дескриптор формируется из четырёх компонентов на каждый квадрат для 16 квадратов, что даёт 64 компонента дескриптора для всей области особой точки. В массив записываются значения, взвешенные на коэффициенты гауссова ядра с центром в особой точке и сигмой 3,3. Это нужно для большей устойчивости дескриптора к шумам в удалённых от особой точки областях;

дополнительно к дескриптору для описания точки используется знак следа матрицы Гессе. Это необходимо, чтобы различать тёмные и светлые пятна. Для светлых точек на тёмном фоне след отрицателен, для тёмных точек на светлом фоне — положителен. Таким образом, SURF различает светлые и тёмные пятна.

Данная последовательность действий применяется к каждой особой точке из вектора особых точек, и формируется список дескрипторов особых точек.

Алгоритм формирования списка совпадающих точек. Для сравнения изображений, полученных со спутника и от бортовой камеры БПЛА, используется метод, основанный на вычислении расстояний между всеми возможными парами дескрипторов. Для определения расстояний обычно используется евклидова метрика.

Вектор дескрипторов особых точек первого изображения: $L1 = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$. Вектор дескрипторов особых точек второго изображения: $L2 = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$. Дескриптор или вектор признаков имеет размер k . Для данного случая евклидова метрика может быть записана следующим образом:

$$d_{uv} = \sum_{i=0}^k (u_i - v_i)^2.$$

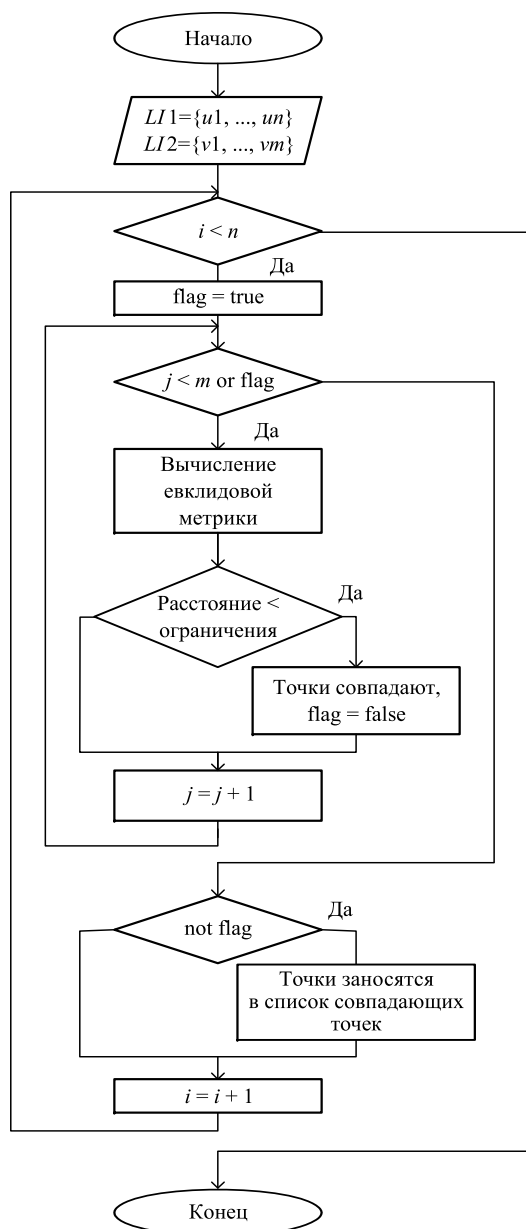


Рис. 5. Алгоритм поиска совпадающих особых точек

Алгоритм формирования списка совпадающих точек приведён на рис. 5.

В результате работы алгоритма формируется список совпавших особых точек, который используется для определения углового положения БПЛА.

Выбор языка и среды разработки. Для написания приложения была выбрана платформа .NET, язык C#. Основные достоинства данной платформы и языка: наличие функции авто-

матического сбора мусора, возможность использования уже готовых форм операционной системы Windows, расширенная возможность выделения синтаксических конструкций.

Разработка выполнялась в среде Microsoft Visual Studio 2015, которая содержит широкий набор инструментов для разработки и отладки приложений на языке C#, а также предоставляет шаблоны для проектирования графического интерфейса.

Требования к программному обеспечению.

Характеристики вычислительной машины, использовавшейся для разработки и тестов: аппаратная составляющая: процессор — Intel Core i7, оперативная память — 8 Гб; программная составляющая: операционная система — Windows 10, платформа — .NET Framework 4.5.2.

Структура программного обеспечения (рис. 6) состоит из пяти модулей: модуля обработки изображений, который конвертирует входные фотографии в чёрно-белый формат, модуля вычисления особых точек, модуля вычисления дескрипторов особых точек, модуля сравнения изображений, модуля определения положения БПЛА.

Результаты экспериментальных исследований. Задачей исследований являлось сравнение методов позиционирования БПЛА: модифицированного (на основе методов FAST и SURF), SURF и FAST. Исследование проводилось на изображениях различных местностей. В частности, анализировались городская застройка (рис. 7) и лесной массив с автомагистралью (рис. 8).

Число объектов на снимке с БПЛА зависит не только от типа подстилающей поверхности, но и от высоты его полёта. Следовательно, число особых точек зависит от высоты полёта, которая определяется характеристиками БПЛА. Зависимости времени поиска особых точек исследуемыми алгоритмами от высоты полёта над городской застройкой приведены на рис. 9.

Основным фактором, влияющим на время работы алгоритмов, является число особых точек. Чем больше число найденных особых точек, тем больше время работы каждого из алгоритмов.

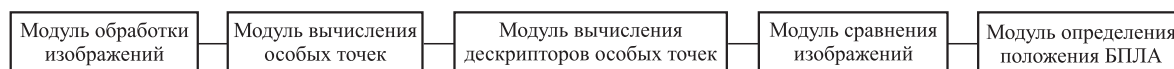


Рис. 6. Структура программного обеспечения

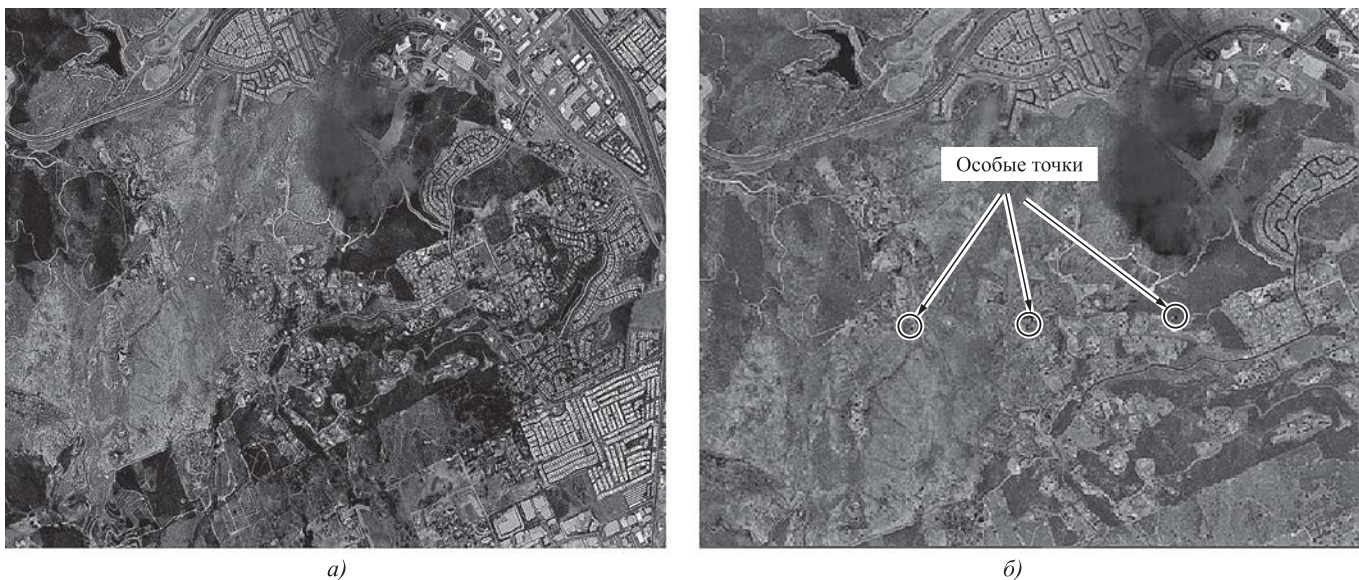


Рис. 7. Выделение особых точек на изображении городской застройки:
a — исходное изображение; *б* — результат поиска особых точек методом FAST

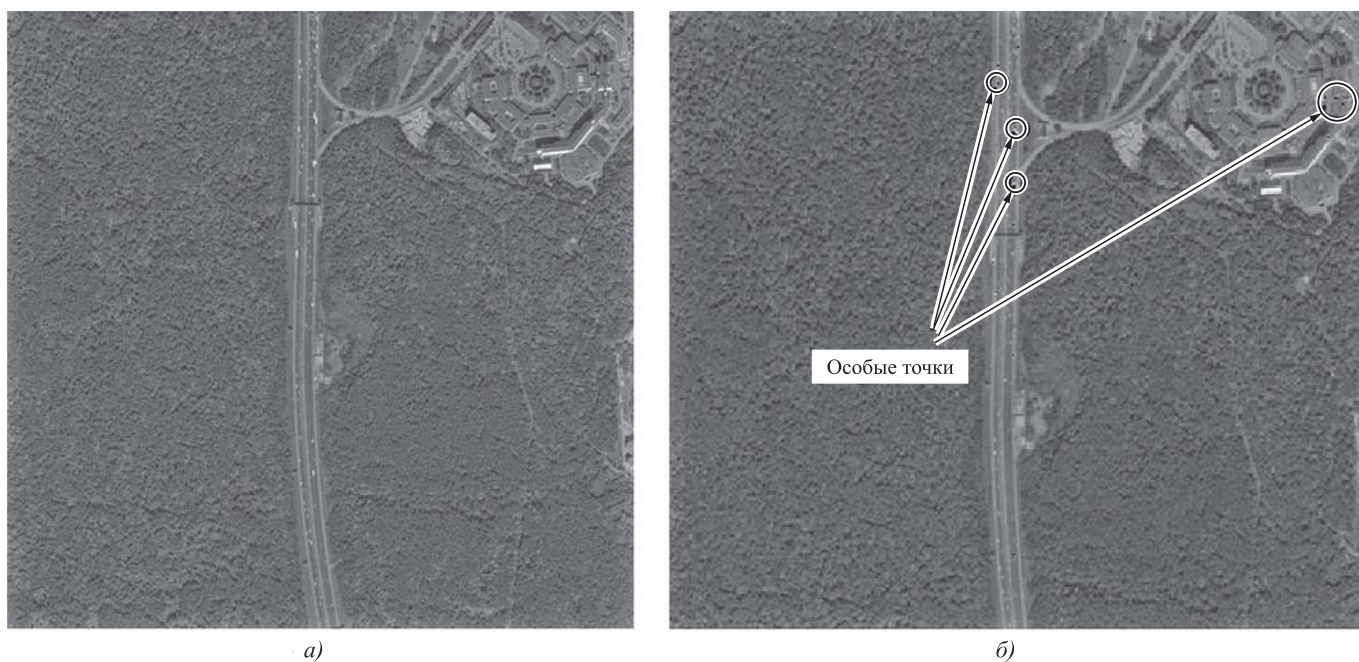


Рис. 8. Выделение особых точек на изображении лесного массива с магистралью:
a — исходное изображение; *б* — результат поиска особых точек методом FAST

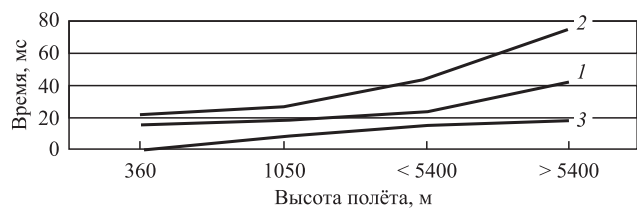


Рис. 9. Время работы разработанного алгоритма и алгоритма SURF:
 1 — разработанный метод; 2 — SURF; 3 — FAST

Из приведенных на рис. 9 графиков следует, что разработанный метод на основе алгоритмов FAST для поиска особых точек и SURF для генерации дескрипторов работает быстрее алгоритма SURF, который самостоятельно выделяет особые точки и строит для них дескриптор, но медленнее алгоритма FAST, который дескрипторов не генерирует, что не позволяет сравнивать изображения по ключевым точкам. Таким образом, разрабо-

танный метод является более эффективным, так как определение положения БПЛА путём сопоставления изображений необходимо осуществлять в режиме реального времени, поэтому значительные затраты времени на работу алгоритма недопустимы.

Выводы. Разработан метод определения положения БПЛА на основе комбинации методов SURF и FAST. В основе решения лежит сопоставление снимков по особым точкам. Метод FAST используется для выделения особых точек, но он не позволяет формировать дескрипторы особых точек. Для формирования дескрипторов выбран метод SURF, который применяется только к выделенным методом FAST особым точкам. Такой подход позволяет объединить достоинства обоих методов: быстрдействие метода FAST и дескрипторы метода SURF. Проведённый анализ подтверждает правильность предлагаемого решения. Полученные характеристики метода отвечают требованию обеспечения режима реального времени.

Библиографические ссылки

1. **Shakhtarin B.I., Shen K., Neusybin K.A.** Modification of the nonlinear Kalman filter in a correction scheme of aircraft navigation systems // J. of communications technology and electronics. 2016. Vol. 61. No. 11. P. 1252.
2. **Selezneva M.S., Neusybin K.A.** Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. No. 9. P. 916—922.
3. **Кай Ш., Селезнёва М.С., Неусыбин К.А.** Разработка алгоритма коррекции инерциальной навига-

ционной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.

4. **Цзянфен И., Рязанова Н.Ю.** Анализ современного состояния развития интеллектуальных систем управления / Будущее машиностроения России. XII Всероссийская конф. молодых учёных и специалистов: сб. докл. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2019. С. 829—833.

5. **Жуйян Чжоу, Рязанова Н.Ю.** Алгоритм распознавания цветных сигналов при посадке беспилотного летательного аппарата авианосного базирования // Инженерная физика. 2020. № 1. С. 51—60.

6. **In-So Hwang, Il Kyu Eom, Yong-Ho Moon.** A Fast Interest Point Detection Method in SURF Algorithm. DOI: 10.14372/IEMEK.2015.10.1.49. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/277644810_A_Fast_Interest_Point_Detection_Method_in_SURF_Algorithm (дата обращения: 30.06.2020).

7. **Harris C., Stephens M.** A combined corner and edge detector / Proc. of Fourth Alvey Vision Conference, 1988. P. 147—151.

8. **Otsu N.** A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.: journal. 1979. Vol. 9. P. 62—66.

9. **Преобразование** цветного изображения в черно-белое C#. Machine Learning Papers. Режим доступа: <https://vscode.ru/prog-lessons/preobrazovanie-tsvetnogo-izobrazheniya-v-chno-beloe.html> (дата обращения: 30.06.2020).

10. **Обнаружение** устойчивых признаков изображения: метод SURF. 2012. Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/103107/> (дата обращения: 12.07.2020).

Ссылка для цитирования

Рязанова Н.Ю., Жуйян Чжоу. Алгоритм распознавания сигналов измерительного комплекса беспилотного летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 543—548.

Требования к оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.

УДК 681.5.015

Н.Ю. Рязанова, канд. техн. наук, доц., **Е.К. Рыжкова**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
ryaz_nu@mail.ru

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследованы наиболее распространённые методы определения положения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на основе изображений подстилающей поверхности. Выделены перспективные методы обработки изображений и на их основе разработаны оригинальный алгоритм сопоставления изображений, полученных со спутника и бортовой камеры БПЛА, и алгоритм определения углового положения БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; техническое зрение; особые точки; сравнение изображений.

The most common methods for determining the position of an unmanned flying vehicle (UAV) based on images of the underlying surface are investigated. The promising methods of image processing are highlighted and, on their basis, an original algorithm for comparing images obtained from the satellite and the UAV's onboard camera and an algorithm for determining the angular position of the UAV are developed.

Keywords: unmanned flying vehicle; technical vision; special points; comparison of images.

Введение. Разработка робастных систем автономной навигации и управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) является одним из приоритетных направлений современной науки и техники, имеющим большое теоретическое и практическое значение. Актуальность разработки состоит в широком использовании различных навигационных систем (например, GPS и ГЛОНАСС). Однако следует заметить, что радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС имеют существенные недостатки, среди которых можно назвать нарастание погрешностей с течением времени функционирования, потеря сигнала, отсутствие автономности, и особенно, подверженность помехам, спровоцированным определёнными погодными условиями и особенностями рельефа местности, что делает их непригодными и малоэффективными для использования на некоторых видах БПЛА [1, 2]. Кроме того, необходимо отметить, что несмотря на возможность автономной работы инерциальных навигационных систем при их использовании возникают ошибки, и в первую очередь, в вычислении положения и ориентации летательного аппарата. Также отметим, что данные ошибки со временем накапливаются, что может привести к серьёзным отклонениям в определении их положений. В этих условиях альтернативным способом навигации является использование мето-

дов машинного зрения [3, 4]. Как известно, на многих современных БПЛА установлены бортовые фото- или видеокamеры, используемые для мониторинга или картографической съёмки. Эти камеры обычно либо снимают видео в реальном времени, либо делают фотоснимки с определённой частотой. Полученные с камер изображения подстилающей поверхности можно использовать для решения задачи позиционирования БПЛА.

Определение положения и ориентации БПЛА. Исследован метод определения положения БПЛА на основе изображений подстилающей поверхности, полученных с искусственного спутника Земли (ИСЗ) и с бортовой камеры БПЛА.

Для разработки метода позиционирования БПЛА необходимо решить следующие задачи:

- 1) исследование предметной области;
- 2) анализ существующих методов позиционирования, сравнительный анализ и выбор метода, наиболее полно отвечающего поставленной задаче;
- 3) разработка модифицированного метода определения положения БПЛА на основе снимков подстилающей поверхности;
- 4) разработка алгоритмов, реализующих поставленную задачу, и структуры ПО;
- 5) исследование разработанного метода.

Для определения положения БПЛА необходимо иметь снимок подстилающей поверх-

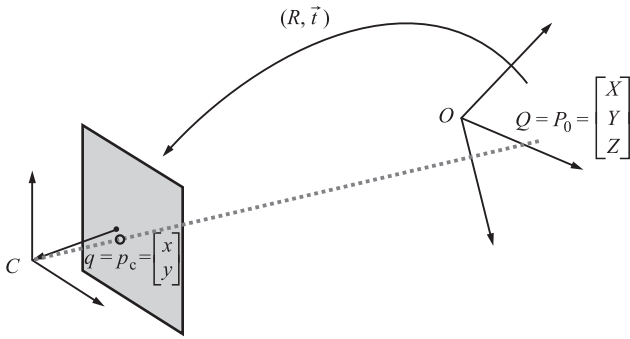


Рис. 1. Проекция точки P_0 на плоскость изображения бортовой камеры

ности, сделанный с ИСЗ, а также серию снимков, сделанных бортовой камерой БПЛА.

Положение камеры в пространстве фактически определяет положение летательного аппарата.

На рис. 1 показано проецирование точки P_0 , наблюдаемой камерой, на плоскость изображения. Точка C (центр проекции) — начало системы координат, связанной с камерой. Координаты точки p_c — проекции точки P_0 — можно вычислить с помощью следующих матричных уравнений [5]:

$$P^* = \begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = RP_0 + T; \quad (1)$$

$$p_c^* = \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = MP^*; \quad (2)$$

$$p_c = \frac{1}{w} p_c^*. \quad (3)$$

Матрица M содержит внутренние параметры камеры, не зависящие от её положения. Точка с координатами (c_x, c_y) — главная точка, в которой оптическая ось пересекается с плоскостью изображения. F — фокусное расстояние камеры, а s_x, s_y — ширина и высота одного элемента светочувствительной матрицы, фокальная длина вычисляется по формулам $f_x = \frac{F}{s_x}, f_y = \frac{F}{s_y}$. Внешние параметры камеры (матрица R — операции поворота и вектор T — перенос) задают ориентацию и положение камеры относительно глобальной системы координат и используются для перехода в систему координат камеры посредством операций поворота и параллельного переноса. Поворот

вокруг произвольной оси в трёхмерном пространстве можно представить в виде комбинации трёх поворотов вокруг каждой из координатных осей на некоторые углы φ, ψ и θ . Существует взаимно однозначное соответствие между тремя углами и матрицами поворота.

Положение БПЛА можно определить по положению снимка в момент фотографирования камерой БПЛА. Положение снимка в пространстве можно найти по элементам внешнего ориентирования, которые определяются по опорным точкам методом обратной фотограмметрической засечки. При этом известны матрица внутренних параметров камеры, положение и ориентация спутника относительно мировой системы координат, связанной с Землёй (с её центром). Центр проекции камеры — точка O . Пусть в трёхмерном пространстве задана точка P , которой на снимке, полученном с камеры ИСЗ, соответствует точка q_1 .

Камера, установленная на БПЛА, имеет такие же внутренние параметры. Центр проекции камеры расположен в точке O' , а образ точки P — в точке q_2 (рис. 2).

Требуется вычислить матрицу R и вектор T , которые связывают системы координат ИСЗ и БПЛА посредством поворота и параллельного переноса. Если найти эти параметры, то будет возможно вычислить положение и ориентацию БПЛА относительно мировой системы координат. Привяжем глобальную систему координат к камере на ИСЗ. В этом случае пиксельные координаты точек q_1 и q_2 выражаются следующим образом (w — некоторый масштабирующий множитель):

$$Zq_1 = MP; \quad (4)$$

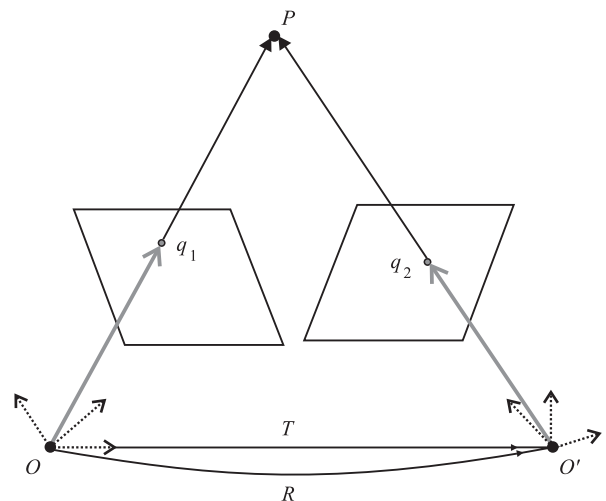


Рис. 2. Наблюдение одной и той же точки пространства двумя разными камерами

$$P = ZM^{-1}q_1; \quad (5)$$

$$wq_2 = M(RP + T). \quad (6)$$

Наложим ограничения на матрицу R и вектор T . Пусть ИСЗ, и БПЛА всегда остаются на одной и той же высоте над уровнем моря (значение аппликаты остаётся постоянным), а их камеры всегда направлены строго перпендикулярно поверхности Земли, т. е. оба аппарата могут менять свою ориентацию, поворачиваясь только относительно оси OZ на некоторый угол θ (два остальных угла, определяющих ориентацию, равны нулю). При таких допущениях матрица R и вектор T имеют следующий вид:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$RP + T = \begin{bmatrix} X \cos \theta - Y \sin \theta + T_x \\ X \sin \theta + Y \cos \theta + T_y \\ Z \end{bmatrix} \Rightarrow w = Z. \quad (9)$$

Вычислим, как связаны между собой координаты точек q_1 и q_2 :

$$Zq_2 = M(RP + T) = M(RZM^{-1}q_1 + T) = \\ = Z(MRM^{-1})q_1 + MT; \quad (10)$$

$$q_2 = (MRM^{-1})q_1 + \frac{1}{Z}MT. \quad (11)$$

Введём матрицу \hat{R} и вектор \hat{T} :

$$\hat{R} = MRM^{-1} = \\ = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\frac{f_x}{f_y} \sin \theta - \cos \theta c_x + \frac{f_x}{f_y} \sin \theta c_y + c_x \\ \frac{f_y}{f_x} \sin \theta & \cos \theta & -\frac{f_y}{f_x} \sin \theta c_x - \cos \theta c_y + c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$\hat{T} = \frac{1}{Z}MT = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$T = ZM^{-1}\hat{T}. \quad (14)$$

Тогда координаты точек q_1 и q_2 связываются уравнением $q_2 = \hat{R}q_1 + \hat{T}$, которое можно представить следующим образом:

$$q_2 = Hq_1;$$

$$H =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta & -\frac{f_x}{f_y} \sin \theta - \cos \theta c_x + \frac{f_x}{f_y} \sin \theta c_y + c_x + dx \\ \frac{f_y}{f_x} \sin \theta & \cos \theta & -\frac{f_y}{f_x} \sin \theta c_x - \cos \theta c_y + c_y + dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Анализ задачи сопоставления снимков.

Задача сопоставления снимков решается на основе сопоставления опорных точек, выделенных на этих снимках. На первом этапе необходимо выделить особые точки на снимке.

В качестве ключевых выбираются точки, которые имеют признаки, существенно отличающие её от основной массы точек изображения [6]. Для сопоставления изображений применяется следующая методика. На первом шаге детектируются особые области-точки (точка и некоторая её окрестность) на изображении. Метод выделения ключевых точек на изображении часто называется детектором. Для области каждой особой точки строится свой дескриптор, представляющий собой вектор интенсивности пикселей внутри данной области изображения. В идеале этот дескриптор должен быть инвариантен к изменениям точки зрения, масштабированию и аффинным преобразованиям, изменениям освещённости, шумам, что даст возможность различать области между собой в рамках одного изображения и сопоставлять выделенные области на разных изображениях независимо от различий в положении и ориентации камеры. В таком случае соответствующие области в двух изображениях будут иметь подобные (в идеале идентичные) дескрипторы. Рассмотрим более подробно основные методы определения положения БПЛА.

Метод Моравца. Суть метода заключается в измерении яркости пикселя (x, y) путём смещения. Метод предполагает измерение изменения яркости пикселя (x, y) посредством смещения квадратного окна с центром в (x, y) на один пиксель в каждом из восьми направлений (вверх, вниз, вправо, влево и в четырёх направлениях по диагонали). Размер окна чаще всего выбирается равным 3×3 , 5×5 или 9×9 пикселей.

Детектор работает следующим образом: сначала для каждого из направлений вычисляется изменение яркости; затем строится

карта вероятности нахождения углов и определяется порог значений карты вероятности.

Достоинствами данного метода являются устойчивость к масштабированию и низкая вычислительная сложность. Основными недостатками детектора являются неустойчивость к повороту камеры и возникновение ошибок детектирования при наличии большого количества диагональных рёбер.

Метод Харриса. Алгоритм Харриса основан на определении особых областей на изображениях с помощью детектора Харриса [7].

Детектор Харриса — один из наиболее распространённых алгоритмов обнаружения углов на изображении, которые являются очень информативными составляющими изображения.

Первый шаг метода заключается в вычислении Евклидовой метрики для точек (x, y) и $(\delta x, \delta y)$ чёрно-белого изображения I , где $I(x, y)$ задаёт интенсивность пикселя (x, y) . Далее необходимо определить частные производные I_x и I_y , чтобы $I(x + \delta x, y + \delta y) \approx I(x, y) + I_x(x, y)\delta x + I_y(x, y)\delta y$ для вычисления аппроксимации функции $f(\delta x, \delta y)$:

$$f(\delta x, \delta y) \approx \sum_{(x,y) \in W} [I_x(x, y)\delta x + I_y(x, y)\delta y]^2. \quad (16)$$

Данное уравнение может быть записано в матричной форме:

$$f(\delta x, \delta y) \approx (\delta x, \delta y)M \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \end{pmatrix}; \quad (17)$$

$$M = \sum_{(x,y) \in W} \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Из формулы (18) можно найти основные изменения изображения вокруг выбранной точки (x, y) , которые определяются как собственные значения матрицы M . В данном методе особыми являются точки, для которых оба изменения существенны в ортогональных направлениях. Таким образом, точка является вершиной угла. Для определения особых точек необходимо для каждой точки (x, y) на изображении определить функцию отклика по следующим формулам:

$$R = \det(M) - k[\text{tr}(M)]^2; \quad (19)$$

$$\det(M) = \lambda_1 \lambda_2; \quad (20)$$

$$\text{tr}(M) = \lambda_1 + \lambda_2. \quad (21)$$

Если для точки (x, y) функция отклика превышает некоторое пороговое значение, то точка (x, y) является особой.

В методе используется детектор Харриса—Лапласа, который представляет собой модификацию детектора Харриса. Преимуществами детектора Харриса—Лапласа является инвариантность к масштабированию, так как в нём применяется масштабируемое пространство Гаусса, т. е. множества вариантов исходного изображения, размытых гауссовым фильтром. Тогда матрица M может быть представлена в виде

$$M = \mu(x, y, \sigma_I, \sigma_D); \quad (22)$$

$$\mu(x, y, \sigma_I, \sigma_D) = \sigma_D^2 g(\sigma_I) \begin{bmatrix} L_x^2(x, y, \sigma_D) & L_x L_y(x, y, \sigma_D) \\ L_x L_y(x, y, \sigma_D) & L_y^2(x, y, \sigma_D) \end{bmatrix}; \quad (23)$$

$$g(x, y, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}. \quad (24)$$

Суть метода заключается в выборе характеристического масштаба локальной структуры, для которого μ достигает экстремума. Размер области для каждой точки выбирается независимо от разрешения изображения.

Основным достоинством алгоритма является высокая устойчивость к масштабированию и размытию изображения. Недостатки алгоритма — низкая повторяемость особых точек, средняя устойчивость к поворотам камеры, низкая точность и относительно низкая эффективность.

Метод Ши-Томаси. Метод Ши-Томаси основан на методе Харриса. Различие состоит лишь в определении меры отклика: алгоритм напрямую вычисляет собственные значения матрицы M , так как предполагается, что поиск углов стабилен.

Достоинство данного алгоритма — устойчивость к масштабированию и размытию изображения, но как и у алгоритма Харриса, время его работы достаточно велико, так как алгоритм отличается высокой вычислительной сложностью.

Метод SUSAN. В данном алгоритме углы определяются сегментацией круговых окрестностей в схожие и непохожие участки. Углы находятся там, где относительная площадь схожих участков достигает локального минимума ниже определённого порога. Для каждого пикселя рассматривается круговая область фиксированного радиуса. Центр пикселя называется ядром, значение его интенсивности запоминается. Все остальные пиксели разделяются на две категории: схожие и несхожие

участки (в зависимости от схожести значений интенсивности ядра). Там, где под круговой областью имеется участок изображения под круговой областью без изменений, схожие участки занимают почти всю площадь, на гранях это отношение уменьшается до 50 %, а на углах — ещё приблизительно до 25 %. Углы находятся там, где относительная площадь схожих участков (similar USAN) достигает локального минимума ниже определённого порога. Для повышения устойчивости работы алгоритма авторы присваивают ближайшим к ядру пикселям более высокие весовые коэффициенты.

Алгоритм может быть представлен следующим образом:

- 1) поместить центр круговой маски в ядро;
- 2) внутри круговой маски вычислить количество пикселей, которые имеют схожую интенсивность с ядром по следующей формуле (найденные пиксели определяют USAN):

$$c(\vec{r}, \vec{r}_0) = e^{-\left(\frac{I(\vec{r}) - I(\vec{r}_0)}{t}\right)^6}, \quad (25)$$

где \vec{r} — точка внутри маски; \vec{r}_0 — центр ядра; $I(\vec{r})$ — интенсивность точки \vec{r} ; t — разностный порог интенсивностей; $c(\vec{r}, \vec{r}_0)$ — результат сравнения;

- 3) определить разность размера USAN и геометрического порога по следующей формуле (принцип USAN: чем меньше область USAN, тем больше «отклик» края):

$$R(\vec{r}_0) = \begin{cases} g - n(\vec{r}_0), & \text{если } n(\vec{r}_0) < g, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (26)$$

где $R(\vec{r}_0)$ — начальное значение отклика края; g — геометрический порог; $n(\vec{r}_0) = \sum_{\vec{r}} c(\vec{r}, \vec{r}_0)$ — количество пикселей в USAN, т. е. область USAN;

- 4) найти центроиды областей USAN, их близость друг относительно друга и определить ложноположительные;

- 5) выбрать особые точки путём поиска локальных максимумов функции отклика.

Достоинство метода — высокая точность ко всем видам углов. Основной недостаток — неустойчивость к размытию на изображениях.

Метод Trajkovic. Тряковиц и Хедли ввели новый тип детектора — оператор Тряковица, который должен был обладать минимальной вычислительной стоимостью. Сначала был разработан 4-соседний алгоритм Trajkovic4.

Детектор проверяет область около пикселя путём изучения близлежащих пикселей: пусть

s является пикселем, подлежащим рассмотрению, а P — точка на окружности S_N в центре в точке N . Точка P' является точкой, противоположной P по диаметру. Функция отклика (авторы называют её CRN, Corner Request Function) определяется как

$$R_N = \min_{P, P' \in S_N} [(I_P - I_N)^2 + (I_{P'} - I_N)^2], \quad (27)$$

где N — центральная точка; P и P' — две противоположные по диаметру точки вокруг точки N ; S_N — дискретизированная окружность на изображении радиусом 3, 5, 7 пикселей.

Значение CRN будет большим, когда нет направления, в котором центральный пиксель похож на два близлежащих пикселя по диаметру. Поскольку расчёт в любом направлении даёт верхнюю границу min, то горизонтальное и вертикальное направления проверяются в первую очередь для определения, имеет ли смысл переходить к полному вычислению R_N .

В сравнении с детектором Харриса частота повторяемости алгоритма Trajkovic4 хуже, однако локализация сравнима с определением L-связных углов и превосходит на других видах углов. Также к недостаткам следует отнести то, что 4-соседний оператор ложно реагирует на диагональные края и чувствителен к шуму. Поэтому используют 8-связную версию этого алгоритма Trajkovic8, который отличается от Trajkovic4 тем, как он вычисляет угловатость. Однако Trajkovic8 всё ещё находит ложные углы на некоторых диагональных гранях объекта (плохо проявляет себя на искусственных изображениях).

Таким образом, главным недостатком алгоритма является нахождение лишних углов, что может привести к увеличению времени работы алгоритма.

Достоинство алгоритма — низкая вычислительная сложность.

Метод FAST. Метод FAST является детектором углов [8, 9]. Он заключается в рассмотрении окружности из 16 пикселей для каждой точки чёрно-белого изображения. Рассматриваемая точка является особой, если для неё существуют N пикселей на окружности, интенсивности которых больше $I_p + t$ или интенсивности всех меньше $I_p - t$, где I_p — интенсивность точки P ; t — пороговая величина. Для ускорения работы метода принято сначала сравнивать интенсивности в вертикальных и горизонтальных точках на окружности с интенсивностью в точке-кандидате. Если

интенсивность 3 точек на окружности больше или меньше интенсивности в точке-кандидате с пороговым значением, то проводится полный анализ 12 оставшихся точек. Экспериментально определено, что наименьшее значение, при котором особые точки начинают стабильно обнаруживаться, равно 9. Такой вариант алгоритма называется *FAST9* (также существуют версии *FAST12* и *FAST16*).

Главным преимуществом метода является низкая вычислительная сложность, однако вблизи некоторой окрестности может обнаружиться несколько особых точек. Эффективность алгоритма зависит от порядка обработки изображения и распределения пикселей. Недостаток алгоритма — неустойчивость к перемещению камеры и вращению изображения.

Метод SURF. Данный метод состоит из двух этапов: поиск особых точек и создание их SURF-дескрипторов, которые состоят из основного направления точки и информации о её окрестности. Особые точки определяются с помощью определителя матрицы Гессе второго порядка [10].

Для начала выполнения метода необходимо преобразовать исходное изображение в интегральный вид. Данная операция проводится для сокращения времени работы метода:

$$I(x, y) = \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^y I(i, j), \quad (28)$$

где $I(x, y)$ — интенсивность исходного изображения в точке (x, y) .

Это позволяет быстро фильтровать изображение с помощью оконных фильтров. SURF использует матрицу Гессе для определения особых точек. Её определитель, или гессиан, используется для вычисления локального изменения градиента в окрестности рассматриваемой точки. Определение матрицами Гессе и её гессиана:

$$H(f(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix}; \quad (29)$$

$$\det(H) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2. \quad (30)$$

Значение гессиана используется для нахождения локального минимума или максимума яркости изображения.

Так как матрица Гессе инвариантна относительно вращения изображения, но не инвариантна к изменению масштаба, то для вычисления детерминанта необходимо использовать фильтры разных размеров. Для каждой особой точки вычисляются градиент и масштаб. Градиент в точке вычисляется с помощью фильтров Хаара.

После того как были найдены особые точки, необходимо вычислить их дескрипторы. Дескриптор представляет собой набор из 64 или 128 чисел для каждой особой точки. Каждое число отображает разницу градиента вокруг особой точки. Каждая особая точка представляет собой максимум гессиана. Таким образом, обеспечивается различие дескрипторов для разных особых точек, вследствие чего образуется инвариантность дескриптора относительно вращения. Размер области, на которой считается дескриптор, определяется масштабом матрицы Гессе.

Достоинство метода SURF — устойчивость к вращению и масштабированию изображения. Недостаток — высокая вычислительная сложность нахождения особых точек.

Метод GLOH. Дескриптор GLOH (Gradient location-orientation histogram) основан на методе SIFT, который построен для повышения надёжности. По факту вычисляется SIFT-дескриптор, но используется полярная сетка разбиения окрестности на бины: 3 радиальных блока с радиусами 6, 11 и 15 пикселей и 8 секторов. В результате получается вектор, содержащий 272 компоненты, который проецируется в пространство размерности 128 посредством использования анализа главных компонент (PCA).

Достоинство алгоритма — высокая точность. Недостаток — высокая вычислительная сложность.

Метод SIFT. Для формирования дескриптора SIFT (Scale Invariant Feature Transform) сначала вычисляются значения магнитуды и ориентации градиента в каждом пикселе, принадлежащем окрестности особой точки размером 16×16 пикселей. Магнитуды градиентов при этом учитываются с весами, пропорциональными значению функции плотности нормального распределения с математическим ожиданием в рассматриваемой особой точке и стандартным отклонением, равным половине ширины окрестности (веса Гауссова распределения используются для того, чтобы уменьшить влияние на итоговый дескриптор градиентов, вычисленных в пикселях, находящихся дальше от особой точки).

В каждом квадрате размером 4×4 пикселя вычисляется гистограмма ориентированных градиентов путём добавления взвешенного значения магнитуды градиента к одному из 8 бинов гистограммы. Чтобы уменьшить различные «граничные» эффекты, связанные с отнесением похожих градиентов к разным квадратам (что может возникнуть вследствие небольшого сдвига расположения особой точки), используется билинейная интерполяция: значение магнитуды каждого градиента добавляется не только в гистограмму, соответствующую квадрату, к которому данный пиксель относится, но и к гистограммам, соответствующим соседним квадратам. При этом значение магнитуды добавляется с весом, пропорциональным расстоянию от пикселя, в котором вычислен данный градиент, до центра соответствующего квадрата. Все вычисленные гистограммы объединяются в один вектор, размер которого равен 128 и определяется как 8 (число бинов) $\times 4 \times 4$ (число квадратов).

Полученный дескриптор преобразуется, чтобы уменьшить возможные эффекты от изменения освещённости. Изменение контраста изображения (значение интенсивности каждого пикселя умножается на некоторую константу) приводит к такому же изменению в значениях магнитуд градиентов. Поэтому очевидно, что данный эффект может быть нивелирован путём нормализации дескриптора таким образом, чтобы его длина стала равна единице. Изменения яркости изображения (к значению интенсивности каждого пикселя прибавляется некоторая константа) не влияют на значения магнитуд градиентов. Таким образом, SIFT-дескриптор

является инвариантным по отношению к аффинным изменениям освещённости. Однако могут возникать и нелинейные изменения в освещённости вследствие, например, различной ориентации источника света по отношению к поверхностям трёхмерного объекта. Данные эффекты могут вызвать большие изменения в отношениях магнитуд некоторых градиентов (при этом оказывают незначительное влияние на ориентацию вектора градиента). Чтобы избежать этого, используют отсечение по некоторому порогу (по результатам экспериментов показано, что оптимальным является значение 0,2), которое применяют к компонентам нормализованного дескриптора. После применения порога дескриптор вновь нормализуется. Таким образом, уменьшается значение больших магнитуд градиентов и увеличивается значение распределения ориентаций данных градиентов в окрестности особой точки.

Достоинство алгоритма — устойчивость к поворотам и масштабированию изображения. Основной недостаток — высокая вычислительная сложность.

Сравнительный анализ методов определения положения БПЛА. Сравнение методов производится по следующим критериям: время работы метода (скорость выполнения), инвариантность, т. е. стабильность результатов работы метода при изменении угла поворота изображения, точность, т. е. стабильность результатов работы метода при изменении масштаба изображения, и повторяемость, т. е. независимость от изменения точки обзора и освещённости. В табл. 1 представлены характеристики исследованных методов.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов определения положения БПЛА

Метод	Формирование дескриптора	Скорость выполнения	Инвариантность	Точность	Повторяемость
Моравеца	Нет	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя
Харриса	Нет	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя
Ши-Томаси	Нет	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя
SUSAN	Нет	Средняя	Высокая	Высокая	Средняя
Trajkovic	Нет	Высокая	Средняя	Низкая	Низкая
FAST	Нет	Высокая	Средняя	Высокая	Средняя
SURF	Да	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
GLOH	Да	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя
SIFT	Да	Низкая	Средняя	Средняя	Низкая

Таблица 2

Время действия методов

Метод	800 × 600	1280 × 960	1920 × 1440	4000 × 3000
SURF	1,511	2,975	3,023	4,630
Harris	0,385	0,982	2,127	10,344
SIFT	4,399	10,109	24,506	94,746
FAST	0,012	0,034	0,071	0,237

В табл. 2 представлен анализ времени действия методов на изображениях разного разрешения [11].

Выводы. Решение поставленной задачи предполагает необходимость сопоставления снимков подстилающей поверхности. Для сопоставления снимков на них должны быть выделены особые точки. В настоящее время существует широкий ряд методов выделения особых точек на снимках. Для управления полётом БПЛА задача его позиционирования на основе снимков подстилающей поверхности должна решаться в реальном масштабе времени. Таким образом, время выполнения алгоритмов является определяющим фактором для выбора метода выделения особых точек.

Из сравнительного анализа быстродействия методов (см. табл. 2) следует, что выделение точек методом FAST выполняется значительно быстрее, чем другими рассмотренными методами. Однако метод FAST не позволяет сформировать дескриптор особой точки, необходимый для процесса сопоставления. Для формирования дескриптора предлагается использовать метод SURF. Как следует из табл. 2, метод SURF требует значительно больших временных затрат по сравнению с методом FAST, но в процессе его выполнения формируется необходимый для сопоставления дескриптор. В работе предлагается использовать метод SURF только для предварительно выделенных методом FAST точек, что значительно сократит время его выполнения.

Библиографические ссылки

1. Selezneva M.S., Neusyypin K.A. Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. No. 9. P. 916—922.

2. Кай Ш., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.

3. И Цзянфен, Рязанова Н.Ю. Анализ современного состояния развития интеллектуальных систем управления / Будущее машиностроения России. XII Всерос. конф. молодых учёных и специалистов: сб. докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 829—833.

4. Жуйан Чжоу, Рязанова Н.Ю. Алгоритм распознавания цветковых сигналов при посадке беспилотного летательного аппарата авианосного базирования // Инженерная физика. 2020. № 1. С. 51—60.

5. Степанов Д.Н., Тищенко И.П. Задача моделирования полёта беспилотного летательного аппарата на основе системы технического зрения // Программные системы: теория и приложения. 2011. Т. 2. Вып. 4. С. 33—43.

6. Lowe David G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Key points // Int. J. Comput. Vision. 2004. Vol. 60. No. 2. P. 91—110.

7. Harris Chris, Stephens M. A combined corner and edge detector / In Proc. of Fourth Alvey Vision Conference. 1988. P. 147—151.

8. Стокман Дж., Шапиро Л. Компьютерное зрение / пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2006.

9. In-So Hwang, Il Kyn Eom, Yong-Ho Moon. A Fast Interest Point Detection Method in SURF Algorithm. URL: https://www.researchgate.net/publication/277644810_A_Fast_Interest_Point_Detection_Method-in-SURF_Algorithm (дата обращения: 23.07.2020).

10. Rosten, Edward. FAST Corner Detection. — 2009. URL: <https://www.edwardrosten.com/work/fast.html> (дата обращения: 23.07.2020).

11. Хмара Б.М. Совершенствование метода MSER для выделения особых точек и построения дескрипторов их окрестностей на цифровых изображениях [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://dSPACE.spbu.ru/bitstream/11701/10601/1/VKR_Xmara_Egor_24.pdf (дата обращения: 25.07.2020).

Ссылка для цитирования

Рязанова Н.Ю., Рыжкова Е.К. Методы определения положения беспилотного летательного аппарата на основе изображений подстилающей поверхности // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 549—556.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:
«Пресса России» — индекс 27838.

УДК 681.51

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-12-557-562

Ли Юе, Цибизова Т.Ю., д-р пед. наук, Косовский А.В.
 (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
 vesta952006@yandex.ru

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗОЛЯЦИИ ОТКАЗОВ ЛИНЕЙНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Рассмотрен навигационный комплекс летательного аппарата в составе инерциальной (ИНС) и спутниковой (СНС) навигационных систем. Предложен алгоритм повышения точности обнаружения и устойчивости при отказах навигационного комплекса летательного аппарата в режиме совместной работы ИНС и СНС, а также при отсутствии сигнала от СНС. В линейном фильтре Калмана использован тест Хи-квадратов. Результаты математического моделирования показали высокую эффективность алгоритмического решения.

Ключевые слова: летательный аппарат; инерциальная навигационная система; спутниковая навигационная система; линейный фильтр Калмана; отказоустойчивость; тест Хи-квадратов.

The aircraft navigation complex consisting of the inertial (ANC) and satellite (SNS) navigation systems is considered. An algorithm for the detection accuracy and stability increasing at the failures of the aircraft navigation complex in the mode of joint operation of the ANS and SNS, as well as in the absence of a signal from the SNS is proposed. In the linear Kalman filter the Chi-square test is used. The results of mathematical modeling have shown the high efficiency of the algorithmic solution.

Keywords: aircraft; inertial navigation system; satellite navigation system; linear Kalman filter; fault tolerance; Chi-square test.

Введение. Современные навигационные комплексы (НК) летательных аппаратов (ЛА) состоят из инерциальной навигационной системы (ИНС), приёмника GPS-сигналов и спецвычислителя, в котором реализуются алгоритмы обработки информации ИНС и GPS [1—3]. НК имеет погрешности, связанные с незащищённостью радиоканала и особенностями ИНС. В условиях активных и пассивных помех сигнал GPS становится нестабильным.

Повышение точности НК целесообразно проводить алгоритмическим путём. Обычно алгоритмическое обеспечение НК включает линейный фильтр Калмана (ФК) [4—6] или его адаптивные модификации [7, 8], оценивающие погрешности ИНС и компенсирующие их в выходном сигнале системы. Погрешности GPS, аномальные выбросы в измерениях и пропадание сигналов приводят к искажению навигационных определений НК ЛА. Статья посвящена модификации линейного ФК с помощью алгоритмических тестов на обнаружение и изоляцию отказов.

Линейный фильтр Калмана. Наиболее распространённые методы компенсации погрешностей навигационных систем предполагают использование различных алгоритмов оценивания. Учитывая специфику реализации алгоритмического обеспечения на борту динамического

объекта в условиях дефицита объёма машинной памяти, среди многообразия алгоритмов выделим лишь компактные и робастные алгоритмы. Достаточно высокой точностью и в то же время простотой реализации в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) отличаются адаптивные алгоритмы оценивания, являющиеся прямыми модификациями фильтра Калмана.

Рассмотрим дискретное линейное уравнение, описывающее динамический объект, например, измерение погрешностей ИНС:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_{k+1,k} \mathbf{w}_k, \quad (1)$$

где \mathbf{x}_k — вектор состояния; \mathbf{w}_k — вектор входного возмущения; $\Phi_{k+1,k}$ — матрица объекта; $\mathbf{G}_{k+1,k}$ — матрица входа.

Входные возмущения предполагаются дискретным аналогом гауссового белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей \mathbf{Q}_k .

Часть вектора состояния измеряется

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}, \quad (2)$$

где \mathbf{z}_{k+1} — вектор измерений; \mathbf{v}_{k+1} — вектор ошибок измерений; \mathbf{H}_{k+1} — матрица измерений.

Ошибки измерений предполагаются дискретным аналогом гауссового белого шума

с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей \mathbf{R}_k .

Оптимальная оценка вектора состояния определяется из уравнения

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{v}_{k+1}, \quad (3)$$

где \mathbf{K}_{k+1} — матрица усиления фильтра; $\mathbf{v}_{k+1} = \mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \Phi_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_k$ — обновляемая последовательность.

Уравнение (3) имеет следующий физический смысл. На основе оценки вектора состояния и матрицы объекта разрабатывается прогноз для следующего шага вычисления оценки. Одновременно проводится коррекция этого прогноза использованием обновляемой последовательности, которая представляет собой сумму ошибки прогноза и измерительного шума.

Матрица усиления фильтра определяет вес, с которым обновляемая последовательность входит в оценку вектора состояния. В случае проведения идеальных измерений, т. е. когда измерительный шум отсутствует, матрицу усиления выбирают максимальной. Чем больше измерительный шум, тем с меньшим весом учитывается обновляемая последовательность при формировании оценки вектора состояния. Фильтр Калмана имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{k+1} &= \Phi_{k+1,k} \hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{v}_{k+1}; \\ \mathbf{P}_{k+1/k} &= \Phi_{k+1,k} \mathbf{P}_k \Phi_{k+1,k}^T + \mathbf{Q}_k; \\ \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1/k} \mathbf{H}_{k+1}^T (\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1/k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1})^{-1}; \\ \mathbf{P}_{k+1} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \mathbf{P}_{k+1/k}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{P}_{k+1/k}$ и \mathbf{P}_{k+1} — априорная и апостериорная ковариационные матрицы ошибок оценивания соответственно; \mathbf{I} — единичная матрица.

С помощью фильтра Калмана осуществляется не только восстановление всего вектора состояния системы, но и подавляется влияние измерительного шума. Уравнения фильтра Калмана очень удобны для реализации на БЦВМ, так как просты в вычислительном плане и не требуют большого объёма машинной памяти. Однако при незапланированном изменении коэффициентов матрицы Φ точность оценивания снижается.

Алгоритм обнаружения и изоляции отказов. Рассмотрим дискретное линейное уравнение, описывающее динамический объект, например, измерение погрешностей ИНС [9—11]:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} \mathbf{W}_k, \quad (5)$$

где \mathbf{X}_k — вектор состояния; \mathbf{W}_k — вектор входного возмущения; $\Phi_{k,k-1}$ — матрица объекта; $\Gamma_{k,k-1}$ — матрица входа.

Входные возмущения предполагаются дискретным аналогом гауссового белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей \mathbf{Q}_{k-1} .

Часть вектора состояния измеряется

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k + f_{k,\phi} \gamma. \quad (6)$$

Здесь \mathbf{Z}_k — вектор измерений; \mathbf{V}_k — вектор ошибок измерения; \mathbf{H}_k — матрица измерений; γ — случайный вектор, означающий значение неисправности; $f_{k,\phi}$ — функция вида

$$f_{k,\phi} = \begin{cases} 1, & k \geq \phi; \\ 0, & k < \phi, \end{cases}$$

где ϕ — момент, в который возникает неисправность.

Ошибки измерений предполагаются дискретным аналогом гауссового белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей \mathbf{R}_k .

Тест Хи-квадратов для состояния системы.

В тесте состояния Хи-квадратов используется разница между двумя оценками состояния: матрица $\hat{\mathbf{X}}_k$ получена из измеренного вектора \mathbf{Z}_k через фильтр Калмана, а матрица $\hat{\mathbf{X}}_k^S$ — из последовательного вычисления априорной информации. Первая оценка связана с информацией измерения, поэтому на неё влияет неисправность внешнего датчика. Две оценки вычисляются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_k &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{Z}_k; \\ \hat{\mathbf{X}}_0 &= \mathbf{X}^0; \\ \mathbf{P}_{k,k-1} &= \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k,k-1};$$

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}^0;$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1};$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k^S = \Phi_{k,k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}^S;$$

$$\hat{\mathbf{X}}_0^S = \mathbf{X}^0;$$

$$\mathbf{P}_k^S = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1}^S \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T;$$

$$\mathbf{P}_0^S = \mathbf{P}^0,$$

где $\mathbf{P}_{k,k-1}$ и \mathbf{P}_k — априорная и апостериорная ковариационные матрицы ошибок оценивания соответственно.

В связи с тем, что \mathbf{X}^0 является гауссовым случайным вектором, \mathbf{X}_k , $\widehat{\mathbf{X}}_k$ и $\widehat{\mathbf{X}}_k^S$ также являются гауссовыми случайными векторами.

Определим ошибки оценивания e_k^K и e_k^S :

$$e_k^K = \mathbf{X}_k - \widehat{\mathbf{X}}_k; \tag{9}$$

$$e_k^S = \mathbf{X}_k^S - \widehat{\mathbf{X}}_k^S, \tag{10}$$

а также сочетание векторов

$$\beta_k = e_k^K - e_k^S = \widehat{\mathbf{X}}_k - \widehat{\mathbf{X}}_k^S, \tag{11}$$

где β_k — линейное сочетание гауссовых случайных векторов, поэтому оно совпадает с гауссовым случайным вектором, математическим ожиданием 0 и дисперсией T_k :

$$\begin{aligned} T_k &= E\{\beta_k \beta_k^T\} = E\{e_k^K (e_k^K)^T - e_k^K (e_k^S)^T - \\ &\quad - e_k^S (e_k^K)^T + e_k^S (e_k^S)^T\} = \\ &= \mathbf{P}_k + \mathbf{P}_k^S - \mathbf{P}_k^{KS} - (\mathbf{P}_k^{KS})^T. \end{aligned} \tag{12}$$

При возникновении неисправностей $\widehat{\mathbf{X}}_k^S$ остаётся несмещённой оценкой, т. е. $E\{e_k^S\} = 0$. На оценку $\widehat{\mathbf{X}}_k$ влияет неисправность, она становится смещённой оценкой, т. е. $E\{e_k^K\} \neq 0$. Отсюда можно узнать, что происходит с навигационной системой и выявить неисправности путём анализа среднего значения β_k .

Подставив формулы (5), (7) и (8) в выражения (9) и (10), получим

$$\begin{aligned} e_k^K &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Phi_{k,k-1} e_{k-1}^K + \\ &\quad + [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{V}_k; \\ e_k^S &= \Phi_{k,k-1} e_{k-1}^S + \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1}. \end{aligned} \tag{13}$$

Допустив, что \mathbf{W}_{k-1} и \mathbf{V}_k независимы, получим

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k^{KS} &= E\{e_k^K (e_k^S)^T\} = \\ &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Phi_{k,k-1} E\{e_{k-1}^K (e_{k-1}^S)^T\} \Phi_{k,k-1}^T + \\ &\quad + [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T. \end{aligned}$$

То есть

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \\ &\quad + [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T. \end{aligned} \tag{14}$$

Из выражений (3) и (4) получим

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \\ &\quad + [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T. \end{aligned} \tag{15}$$

При $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}_0^{KS} = \mathbf{P}^0$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^{KS}. \tag{16}$$

Поставив выражения (16) в формулу (12), получим

$$\mathbf{T}_k = \mathbf{P}_k^S - \mathbf{P}_k. \tag{17}$$

Определим функцию обнаружения неисправностей:

$$\lambda_k = \beta_k^T T_k^{-1} \beta_k. \tag{18}$$

Можно доказать, что λ_k имеет распределение Хи-квадратов с n степенями свободы, т. е. $\lambda_k \sim \chi^2(n)$, а n является размером вектора β_k .

Критерий неисправностей запишем следующим образом:

- $\lambda_k > T_D, (H_1)$ присутствие неисправности;
- $\lambda_k \leq T_D, (H_0)$ отсутствие неисправности.

Здесь T_D — порог по умолчанию, который определяет способность контроля неисправностей. По критерию Неймана—Пирсона при ограничении ложной тревоги $P_f = \alpha$ полученный порог T_D из выражения $P_f = P[\lambda_k > T_D / H_0] = \alpha$ позволяет минимизировать вероятность промаха $P[\lambda_k \leq T_D / H_1]$ так, что порог T_D определяется ложной тревогой P_f .

Порог T_D , полученный из распределения Хи-квадратов с n степенями свободы, показан в табл. 1.

Таблица 1

Порог, полученный из распределения Хи-квадратов, с n степенями свободы

α	n		
	1	2	3
10^{-1}	2,71	4,61	6,25
10^{-2}	6,63	9,21	11,34
10^{-3}	10,83	13,82	16,27
10^{-4}	15,14	18,42	21,11
10^{-5}	19,51	23,03	25,90
10^{-6}	23,93	27,63	30,66
10^{-7}	28,37	32,24	35,41
10^{-8}	32,84	36,84	40,13
10^{-9}	37,32	41,45	44,84

На практике отсутствие обновления информации измерений в пролонгаторе состояния ошибки приведёт к тому, что значение состояния будет всё больше и больше отклоняться от истинного значения. Поэтому при отсутствии неисправностей значения β_k и T_k также возрастают. Это уменьшает чувствительность алгоритма к неисправностям. В специальной литературе рассмотрен метод с двумя пролонгаторами состояния, которые работают поочерёдно. Один предназначен для обнаружения неисправностей, а второй скорректирован выходным сигналом фильтра Калмана. В следующем цикле они действуют наоборот.

Тест Хи-квадратов для остатка. Тест Хи-квадратов для состояния требует вычисления двух оценок состояния. Это, бесспорно, увеличит нагрузку бортовых ЭВМ. Чтобы преодолеть этот недостаток, приведён тест Хи-квадратов для остатка для обнаружения и изоляции системных неисправностей.

Остаток каждого локального фильтра Калмана определяется по формуле

$$r_k = Z_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}, \quad (19)$$

где $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$ — прогноз,

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}. \quad (20)$$

Можно доказать, что при отсутствии неисправностей r_k является белым шумом с математическим ожиданием 0 и дисперсией A_k :

$$A_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k. \quad (21)$$

При возникновении неисправностей $r_k \neq 0$. В результате можно узнать, что происходит с системой, и выявить неисправности путём анализа среднего значения r_k .

Определим функцию обнаружения неисправностей следующим образом:

$$\lambda_k = r_k^T A_k^{-1} r_k, \quad (22)$$

где λ_k имеет распределение Хи-квадратов с m степенями свободы, т. е. $\lambda_k \sim \chi^2(m)$, а m является размером вектора измерений Z_k .

Критерий неисправностей запишем следующим образом:

$$\begin{cases} \lambda_k > T_D, (H_1) \text{ присутствие неисправности;} \\ \lambda_k \leq T_D, (H_0) \text{ отсутствие неисправности.} \end{cases}$$

Порог T_D также определяется ложной тревогой P_f .

Поскольку локальный фильтр предназначен для каждого набора данных измерений, указанный алгоритм обнаружения и изоляции неисправностей может быть добавлен в локальный фильтр, чтобы определить ненужные данные измерений и соответствующую оценку ошибки локального состояния. Используя оставшиеся правильные оценки локального оценивания и алгоритм федеративного фильтра Калмана, можно вычислить надёжную оценку состояния системы. Тест Хи-квадратов для остатка не очень эффективен при обнаружении пассивных отказов.

Результаты моделирования алгоритмов оценивания в условиях исчезновения сигналов GPS. Рассмотрим схемы коррекции ИНС в выходном сигнале с помощью алгоритмов и прогноза. Для проверки работоспособности алгоритмов использована линейная математическая модель погрешностей ИНС [12—14]

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1}, \quad (23)$$

где

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \varphi_n \\ \omega_N^{dr} \end{bmatrix}_k; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -Tg & 0 \\ T & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 - T\beta \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w}_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w_{k-1} \end{bmatrix}.$$

Здесь δv_E — ошибки ИНС в определении скорости; φ_n — углы отклонения ГСП от сопровождающего трёхгранника; ω_N^{dr} — скорость дрейфа ГСП; g — ускорение свободного падения; R — радиус Земли; T — период дискретизации.

Предполагается, что для обеих моделей измеряется только первый компонент вектора состояния, т. е.

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (24)$$

где $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]$; \mathbf{z}_k и \mathbf{v}_k — скалярные величины.

Для сравнения алгоритма оценивания, основанного на ФК, с использованием прогнозирующих моделей на основе подхода самоорганизации с алгоритмом оценивания без использования прогнозирующих моделей проведём математическое моделирование в среде MatLab с помощью алгоритма обнаружения и изоляции неисправностей.

При моделировании зададим следующие начальные параметры:

$$\begin{aligned} \delta V_e(0) &= 0,1 \text{ м/мин}; \varphi_n(0) = 1 \cdot 10^{-5} \text{ рад/мин}; \\ \varepsilon_n(0) &= 1 \cdot 10^{-6} \text{ рад/мин}; \\ M(\delta V_e^2) &= 0,1 \text{ м}^2/\text{мин}^4; T_D = 11,34. \end{aligned}$$

Сигнал от СНС представлен на рис. 1.

Результаты моделирования показаны на рис. 2—4 и в табл. 2. На рисунках представле-

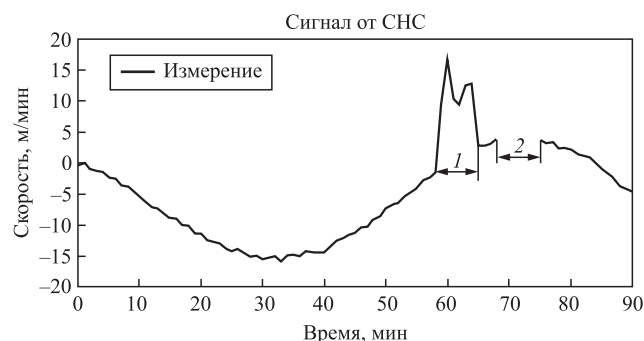


Рис. 1. Сигнал измерения:

1 — интервал времени возникновения неисправностей; 2 — интервал времени исчезновения сигнала

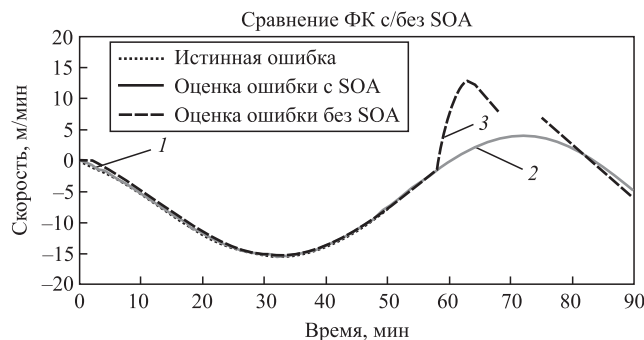


Рис. 2. Оценки ошибки по скорости δV_e :

1 — истинная ошибка ИНС; 2 — оценка погрешности ИНС с использованием подхода самоорганизации (SOA); 3 — оценка ошибки ИНС без использования подхода самоорганизации

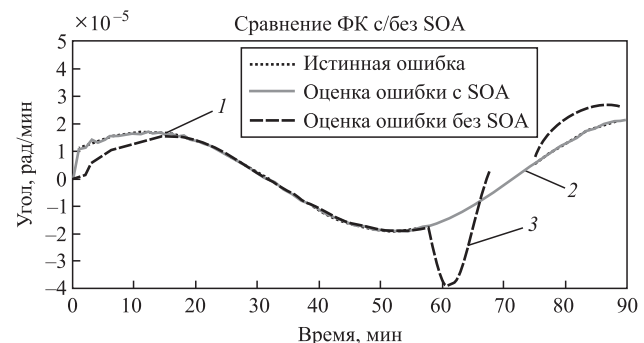


Рис. 3. Оценки ошибки по углу отклонения φ_n :

1 — истинная ошибка ИНС; 2 — оценка погрешности ИНС с использованием подхода самоорганизации; 3 — оценка ошибки ИНС без использования подхода самоорганизации

ны оценки ошибки по скорости δV_e , углу отклонения φ_n и скорости дрейфа ГСП ε_n , даваемые алгоритмом оценивания ФК с использованием прогнозирующих моделей на основе подхода самоорганизации и без использования прогнозирующих моделей.

На рисунках видно, что при возникновении неисправностей внешнего датчика в процессе навигации классический ФК совсем не может исправлять неисправности, что сильно влияет на качество и точность его оценивания. При исчезновении сигнала из внешнего источника классический ФК совсем не работает (даже оценка ошибки не задаётся), так как при возникновении неисправностей точная информация не получена на следующем шаге из-за отсутствия данных. Благодаря тесту Хи-квадратов для остатка и состояния системы, неточная информация не может входить в блок оценивания немедленно после возникновения неисправностей, и оценивание данного момента задаётся прогнозирующей моделью. Такой режим в значительной степени защищает информацию от погрешностей. Моделирование показало, что алгоритм оценивания с использованием прогнозирующих моделей имеет хорошую устойчивость к отказам. При этом качество оценивания значительно улучшается.

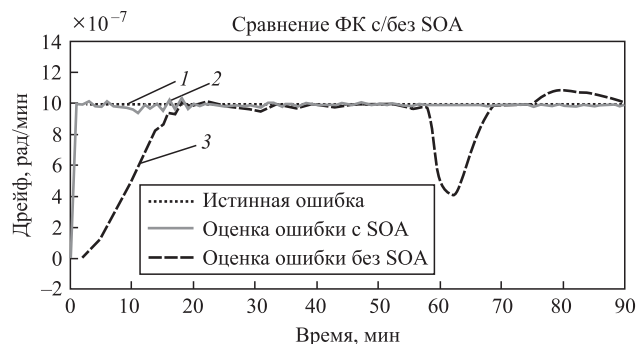


Рис. 4. Оценки ошибки по скорости дрейфа ГСП ε_n :

1 — истинная ошибка ИНС; 2 — оценка погрешности ИНС с использованием подхода самоорганизации; 3 — оценка ошибки ИНС без использования подхода самоорганизации

Таблица 2

Точности оценивания погрешностей

Метод	RMS δV_e , м/мин	RMS φ_n , рад/мин	RMS ε_n , рад/мин
ФК с использованием модификации	0,0701	$1,0908 \cdot 10^{-6}$	$1,0684 \cdot 10^{-7}$
Классический ФК	2,3351	$6,7358 \cdot 10^{-6}$	$2,7998 \cdot 10^{-7}$

В табл. 2 приведены результаты расчёта точности ($\text{RMS } \delta V_e$, $\text{RMS } \varphi_n$, $\text{RMS } \varepsilon_n$ — средне-квадратическое значение погрешностей скорости, угла отклонения и скорости дрейфа ГСП) только с учётом возникновения неисправностей внешнего датчика.

На основе анализа представленных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что модифицированный ФК имеет хорошую отказоустойчивость.

Выводы. Проведён анализ результатов математического моделирования и приведены его результаты. Показано, что ФК с использованием прогнозирующих моделей на основе подхода самоорганизации имеет хорошую устойчивость к отказам. Точность оценивания с использованием прогнозирующей модели на основе подхода самоорганизации выше по сравнению с линейным фильтром Калмана без процесса прогноза в заданных условиях.

Таким образом, ФК с использованием прогнозирующей модели на основе подхода самоорганизации имеет высокую точность, хорошую устойчивость к отказам и высокую общую производительность по сравнению с классическим ФК. Он обеспечивает стабильную работу комплексирования измерительных систем летательных аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Цибизова Т.Ю., Шэнь К., Неусыпин К.А. Исследование алгоритмов оценивания в задаче коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-2. С. 301—305.
2. Селезнева М.С., Шэнь К., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Динамический системный синтез алгоритмического обеспечения навигационного комплекса летательного аппарата // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 36—42.
3. Цибизова Т.Ю., Нгуен Д.Т. Алгоритмические способы коррекции навигационных систем в выходном сигнале // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 3 (28). С. 127.
4. Чжао С. Повышение точности оценивания погрешностей систем навигации с помощью фильтра Калмана в навигационных системах гибридной природы // Политехнический молодежный журнал. 2019. № 6. С. 11.
5. Пролетарский А.В., Чжан Л., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном

фильтре Калмана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 8. С. 9—18.

6. Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 428—432.

7. Иванов М.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Применение фильтра Калмана и генетического алгоритма для активной системы мониторинга содержания газовой фазы во флотационном аппарате // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 11. С. 503—509.

8. Шахтарин Б.И., Шэнь К., Неусыпин К.А. Модификация нелинейного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1065—1072.

9. Цибизова Т.Ю., Пью С., Селезнева М.С. Математическое моделирование динамических систем с использованием параметрической идентифицируемости // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 1. С. 54—60.

10. Ху Ц., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Моделирование алгоритмов оценивания погрешностей инерциальных навигационных систем по данным лабораторного эксперимента // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 524—528.

11. Neusyypin K.A., Selezneva M.S., Tsibizova T.Yu. Diagnostics algorithms for flight vehicles navigation complex / В сб.: 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon. 2018. С. 1—6.

12. Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2012. № 3 (3). С. 44.

13. Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 18—24.

14. Кай Ш., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2 (107). С. 28—39.

Ссылка для цитирования

Ли Юе, Цибизова Т.Ю., Косовский А.В. Алгоритм обнаружения и изоляции отказов линейного фильтра Калмана // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 557—562. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-12-557-562.



А.В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
rav-mipk@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ РАКЕТАМИ

Исследована принципиальная схема системы управления ракетами различного класса. Для аэродинамических ракет большого радиуса действия и возвращающихся в атмосферу разработана функциональная схема системы управления с интеллектуальной компонентой. Предложено в контуре управления использовать ансамбль априорных моделей ракет и моделей внешних воздействий.

Повышение точности систем управления с интеллектуальной компонентой предложено осуществлять путём повышения степени управляемости переменных состояния априорных моделей. Представлен наиболее удобный численный критерий степени управляемости переменных состояний моделей. Результаты математического моделирования продемонстрировали незначительное повышение эффективности управления ракетой при повышении степени управляемости угла тангажа путём изменения коэффициентов матрицы управления.

Ключевые слова: ракета; система управления; интеллектуальная компонента; акцептор действия; априорная модель; управляемость; степень управляемости; эффективность управления.

A fundamental diagram of a control system for missiles of various classes is investigated. A functional diagram of a control system with an intelligent component for long-range aerodynamic rockets returning to the atmosphere is developed. It is proposed to use in the control loop an ensemble of a priori missile models and models of external influences. It is proposed to improve the accuracy of control systems with an intelligent component by increasing the degree of controllability of the state variables for a priori models. The most convenient numerical criterion of controllability degree for of the state variables of the models is presented. The results of mathematical modeling showed a slight increase in the efficiency of missile control with an increase in the degree of controllability of the pitch angle by changing the coefficients of the control matrix.

Keywords: rocket; control system; intelligent component; an action acceptor; a priori model; controllability; degree of controllability; management efficiency.

Введение. Эффективное функционирование ракет различных классов зависит от многих факторов и конструктивных особенностей, в частности от типов используемых систем управления (СУ). Например, манёвры ракеты с незначительным изменением высоты полёта на сверхзвуковой скорости меняют атмосферные условия внешней среды, внешние воздействия, аэродинамические характеристики, эффективность рулей и другие (важные для управления ракетой) параметры её движения. Эти изменения влияют на устойчивость ракеты, а следовательно, и на её управляемость.

Управление полётом ракеты — это управление пространственным положением упругого тела переменной массы, находящегося под действием гравитационных, инерционных, аэродинамических сил, моментов и силы тяги дви-

гательной установки, которое обычно описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, зависящими от конструкции ракеты, параметров полёта и характеристик атмосферы.

Одной из многочисленных задач управления ракетами является её выведение с требуемой точностью в заданную область пространства.

Основным требованием при решении данной задачи является обеспечение максимально возможной точности приведения ракеты в область для осуществления конечного наведения.

Как правило, ракеты функционируют в сложных условиях окружающей среды, пассивных и активных помех, а также активного противодействия. Поэтому их СУ должна обеспечивать высокую точность полёта, эффективное маневрирование и др.

В современных СУ ракет применяются корреляционно-экстремальные системы [1, 2], подходы синтеза терминального управления с учётом априорной статистической информации [3, 4], специфики многокритериальных задач и особенностей управления с перенастраиваемой в полёте целью [5].

Развитие терминальных регуляторов связано с разработкой адаптивных подходов [6, 7], алгоритмов управления с эталонной моделью и самооптимизируемых регуляторов.

В рамках адаптивного подхода осуществляется идентификация параметров и структуры модели исследуемого объекта в полёте, которая используется при формировании терминального управления.

В перспективных СУ ракет применяются разнообразные интеллектуализированные системы управления и СУ с интеллектуальными компонентами [8, 9]. Одной из интеллектуальных компонент СУ является акцептор действия, принцип работы которого базируется на теории функциональных систем П.К. Анохина [10].

Общим признаком современных возвращающихся в атмосферу ракет (баллистические ракеты), а также атмосферных ракет дальнего радиуса действия является использование в СУ математических моделей.

Математические модели обладают различными свойствами [11, 12]. Качественные характеристики моделей одного и того же объекта могут существенно отличаться. Для оценки характеристик моделей разработано множество критериев [13—15], наиболее актуальными из которых являются критерии степени управляемости переменных состояния модели [16—18].

Таким образом, рассмотрен наиболее перспективный тип СУ с интеллектуальной компонентой, который целесообразно применять для управления перспективными баллистическими и атмосферными ракетами.

Представлен численный критерий степени управляемости переменных состояния моделей СУ, который является наиболее удобным для бортовой реализации.

Структура системы управления. Синтез СУ обычно осуществляется с использованием программного директивного управления. Недостатком такого способа управления является его незащищённость от несанкционированного доступа. Использование в СУ алгоритмов случайного выбора траектории полёта существенно повышает эффективность ракеты, но снижает точность выполнения поставленных задач. Наиболее перспективным типом СУ ракет являются

СУ с интеллектуальной компонентой (ИСУ) в виде акцептора действия. В ИСУ выбор траектории осуществляется в процессе полёта ракеты с учётом влияния конкретных текущих (меняющихся) внешних условий и параметров движения. Структура ИСУ разработана на основе теории функциональных систем П.К. Анохина [10].

Алгоритмы исследуемой ИСУ реализуются в спецвычислителе, поэтому к вычислительным параметрам алгоритмического обеспечения предъявляются довольно жёсткие требования. Имеющиеся вычислительные ресурсы позволяют реализовать компактные алгоритмы самоорганизации и генетические алгоритмы [19]. Упрощение алгоритмов осуществляется путём сокращения количества базисных функций, ужесточения отбора, использования специального ансамбля критериев селекции. Однако при использовании в СУ ракет моделей, построенных на борту в процессе полёта, необходимо решать вопрос об устойчивости системы на всём интервале полёта. Упрощение алгоритмического обеспечения СУ достигается путём использования априорных моделей. Преимуществами такого подхода являются возможность решения задачи обеспечения устойчивости в условиях предполётной подготовки и упрощение реализации алгоритмов в спецвычислителе. К недостаткам следует отнести, в частности, низкую точность СУ из-за отсутствия учёта конкретных условий функционирования ракеты в процессе полёта.

Частично компенсировать этот недостаток можно путём использования набора моделей внешней среды функционирования ракеты. В схему ИСУ включаются несколько типовых моделей внешней среды, построенных на различных участках полёта ракеты. Таким образом, появляется возможность использовать сценарии управления ракетой. Функциональная схема ИСУ с учётом различных моделей изменения внешней среды представлена на рис. 1.

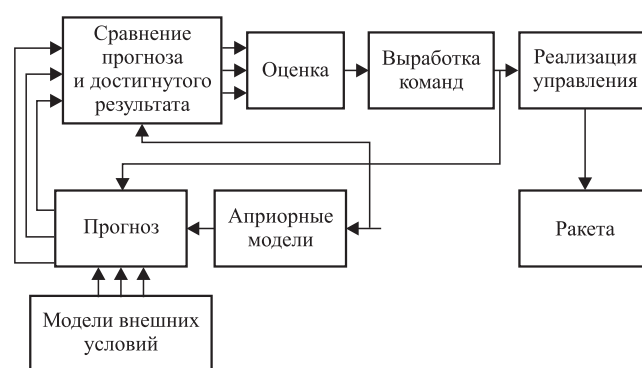


Рис. 1. Функциональная схема системы управления ракетой с учётом моделей внешней среды

В приведённой на рис. 1 ИСУ в блоке прогноза осуществляется прогнозирование состояния ракеты с помощью априорных моделей и с учётом различных моделей изменения внешней среды функционирования. Априорные модели выбираются в зависимости от режима полёта ракеты. Несколько вариантов прогноза периодически сравниваются с реальным состоянием ракеты и оцениваются в соответствии с выбранными критериями в целях выявления наилучшей стратегии управления.

Управляемость априорной модели динамики полёта. Используемые в ИСУ априорные модели описывают динамические свойства ракеты на различных интервалах полёта. Априорная математическая модель в пространстве состояний представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику ракеты.

Линеаризованная модель в пространстве состояния представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= Ax(t) + Bu(t); \\ Y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где A, B, C — $(n \times n)$ -матрица модели; B — $(n \times r)$ -матрица управления; C — $(l \times r)$ -матрица измерений; $x(t)$ — n -вектор состояния; $u(t)$ — p -вектор управления; $y(t)$ — вектор выхода системы ($p, 1 < n$).

Общее решение линейного неоднородного уравнения (1) при начальном условии $x(t_0) = x_0$ имеет следующий вид:

$$x(t) = e^{A(t-t_0)} \left[x_0 + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} Bu(\tau) d\tau \right],$$

где e^{At} — условное обозначение матрицы размером $(n \times n)$, определяемой по формуле

$$e^{At} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A^k t^k}{k!}. \quad (2)$$

Если матрица A имеет n попарно различных собственных чисел $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, n линейно независимых правых $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ и левых v_1, v_2, \dots, v_i собственных векторов, то выражение (2) можно представить в виде

$$e^{At} = \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i t} \omega_i v_i^T.$$

Одной из важных характеристик линейной системы управления (1) является понятие управляемости.

Система (1) называется *полностью управляемой*, если только существует управление $u(t)$, переводящее её из любого заданного начального состояния $x(t_0)$ в любой заданный начальный момент времени $t_0 > 0$ к любому заданному конечному состоянию $x(t_1)$ за конечное время $t_1 - t_0$.

Условие управляемости для линейной стационарной системы может быть получено в результате рассмотрения дискретного аналога системы дифференциальных уравнений (1):

$$\begin{aligned} x(1) &= Ax(0) + Bu(0); \\ x(2) &= Ax(1) + Bu(1) = A^2x(0) + ABu(0) + Bu(1); \\ &\dots \\ x(l) &= A^l x(0) + A^{l-1}Bu(0) + \dots + Bu(l-1). \end{aligned} \quad (3)$$

Если число l совпадает с размерностью вектора x , то система (3) рассматривается как система уравнений, позволяющая определять необходимые значения координат вектора управления, переводящего систему (1) из состояния с номером (0) в состояние с номером (l). Условие управляемости будет выполнено, если эта система алгебраических уравнений будет иметь решение относительно координат вектора управления, т. е. определитель матрицы $(A^{l-1}B, \dots, B)$ не будет равен нулю:

$$\text{ранг } Z = \text{ранг}[B, AB, \dots, A^{n-1}B] = n, \quad (4)$$

где Z — матрица $(n \times n)$ управляемости пары матриц A, B .

В противном случае система называется *неуправляемой*. В такой системе возможно перевести лишь ряд состояний в любые конечные состояния или все состояния можно перевести не в любые, а в определённые области пространства состояний.

Критерии степени управляемости. Качественные характеристики управляемости определяются с помощью различных критериев [20, 21]. При исследовании аэродинамических аппаратов обычно используют понятия продольной и боковой статической управляемости (балансировка и балансировочная диаграмма по отклонению рулей) [22]. В процессе испытаний исследуются реакции летательного аппарата на управляющие воздействия. Оценивается эффективность управляющих воздействий, результат оцифровывается и представляется в виде диаграммы. Однако составление диаграмм требует длительных под-

робных и дорогостоящих экспериментов, поэтому при проектировании ракет используют численные критерии степени управляемости переменных состояния. Каждая компонента вектора состояния оценивается с точки зрения эффективности управления с помощью выбранного вектора управления.

Например, степень управляемости можно определить, исследовав систему канонического вида, т. е. систему уравнений, в которой отсутствует связь по переменным состояния.

Запишем первое уравнение системы (1) в канонической форме:

$$\dot{x}_c^k(t) = A^k x_c^k(t) + H^k u_c^k(t), \quad (5)$$

где $A^k = -V^{-1}A^T V$; $H^k = -V^{-1}H^T$; $V = [v_1, \dots, v_n]$; V — матрица канонического преобразования; v_i — собственные векторы исследуемой системы.

Система является полностью управляемой, если матрица канонической системы (5) не содержит строк, все элементы которых равны нулю. Следует отметить, что данный критерий можно применять лишь при отсутствии кратных собственных значений системы. Степень управляемости характеризуют модули элементов строк матрицы H^k . Представленный критерий позволяет проводить сравнительный анализ управляемости и определять, лучше или хуже управляемы компоненты вектора состояния по сравнению друг с другом. Лучше управляемы те компоненты вектора состояния, у которых модули элементов строк матрицы больше модулей соответствующих элементов у других строк.

Описанный в работе [7] критерий позволяет получить численную оценку степеней управляемости компонент вектора состояния. Используется каноническая матрица управляемости и формируются суммы модулей элементов каждой её строки.

Максимальной степенью управляемости обладает компонента вектора состояния с наибольшей суммой модулей элементов соответствующей строки канонической матрицы управления h_{\max} . Степени управляемости других компонент вектора состояния определяются путём сравнения сумм модулей элементов строк канонической матрицы, соответствующих исследуемым компонентам вектора состояния с максимальным значением сумм модулей элементов канонической матрицы. Критерий степени управляемости переменных состояния имеет вид [7]

$$\gamma = \frac{h_i}{h_{\max}}, \quad (6)$$

где h_i — модуль суммы элементов, которые находятся в i -й строке матрицы B^* ; h_{\max} — максимальное значение h_i .

Критерий степени управляемости позволяет определить степень управляемости каждой конкретной компоненты вектора состояния в численном виде γ .

Критерий (6) включают в ансамбль критериев селекции алгоритмов самоорганизации [11], используют при автоматизированном проектировании СУ. Модели, построенные алгоритмическим путём в процессе полёта, используют для прогноза и коррекции систем в выходном сигнале. При реализации в СУ такие модели требуют дополнительной проверки на устойчивость. В ракетной технике потеря устойчивости на отдельном этапе полёта недопустима, поэтому использовать такие алгоритмические решения не представляется возможным. Повысить эффективность управления ИСУ (см. рис. 1) можно путём формирования априорных моделей с улучшенными свойствами. Использование в контуре ИСУ моделей с повышенными характеристиками управляемости позволяет увеличить точность выполнения манёвров и эффективность ракеты.

Запишем линеаризованную систему дифференциальных уравнений, описывающих продольное движение объекта управления, а также закон управления и рулевой привод в следующем виде [21]:

$$\begin{cases} \ddot{J} = \bar{M}_z^\alpha \alpha + \bar{M}_z^{\delta_B} \delta_B; \\ \dot{\Theta} = \bar{Y}^\alpha \alpha; \\ J = \Theta + \alpha; \\ \sigma = K_J J + K_j \dot{J}; \\ \frac{T}{D} \ddot{\delta} + \frac{1}{D} \dot{\delta} + \delta = \sigma, \end{cases} \quad (7)$$

где δ — угол отклонения руля высоты; J — угол тангажа; α — угол атаки; Θ — угол наклона траектории; \bar{M}_z^α — коэффициент, характеризующий статическую устойчивость ракеты; $\bar{M}_z^{\delta_B}$ — коэффициент, характеризующий эффективность рулей высоты и представляющий собой приращение углового ускорения ракеты, создаваемое отклонением органов управления; \bar{Y}^α — коэффициент приращения угловой скорости касательной к траектории, вызванного отклонением угла атаки; D — добротность рулевого привода; T — постоянная времени; $\sigma = K_J J + K_j \dot{J}$ — закон управления; K_J и K_j — передаточные коэффициенты по углу тангажа; ω — частота.

Коэффициенты K_j и K_j зависят от ω .

На рис. 2 и 3 представлены реакции ИСУ на ступенчатое воздействие для пар коэффициентов закона управления $K_J = 20$, $K_j = 2$ и $K_J = 20$, $K_j = 3$.

Степень управляемости во втором случае выше, чем в первом случае. Поэтому для априорной модели в ИСУ целесообразно выбрать значения коэффициентов, при которых система будет эффективнее поддаваться управлению: $K_J = 20$, $K_j = 3$.

В исследуемом примере варьировались параметры управления, так как полагалось, что параметры самой ракеты неизменны. На

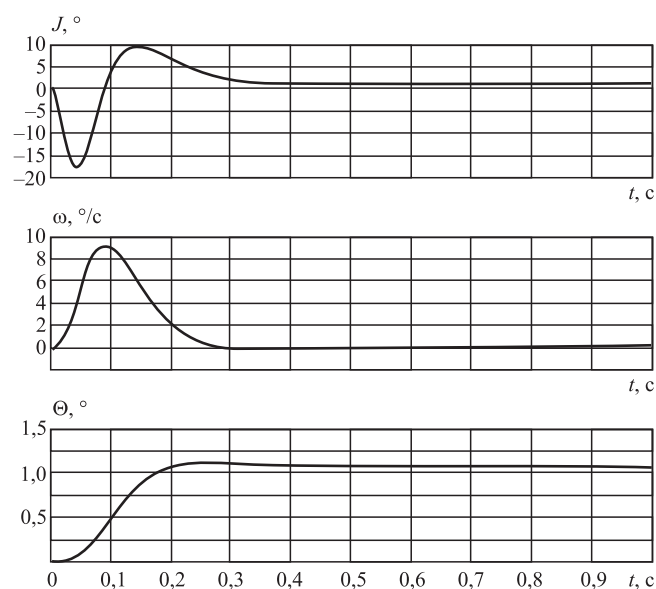


Рис. 2. Реакция ИСУ на воздействие ($J_{\text{прогр}} = 1^\circ$ при $K_J = 20$, $K_j = 2$)

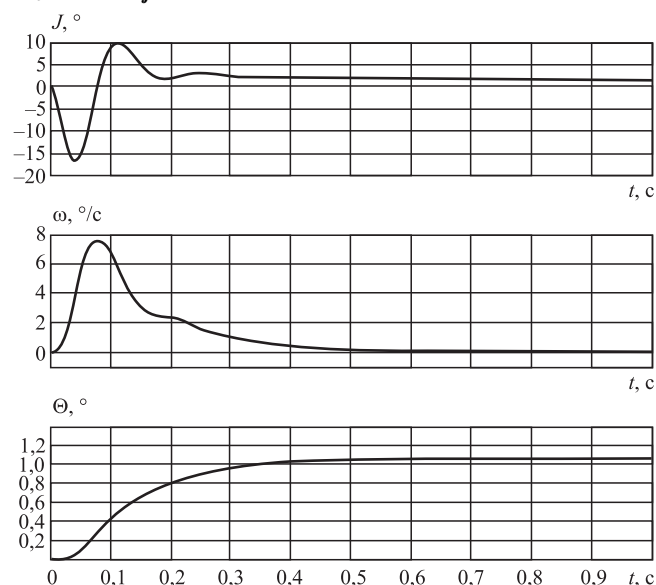


Рис. 3. Реакция ИСУ на воздействие ($J_{\text{прогр}} = 1^\circ$ при $K_J = 20$, $K_j = 3$)

этапе проектирования ракеты, когда имеется возможность менять параметры матрицы A в модели (1), появляется возможность существенно повысить степень управляемости переменных состояния модели.

Выводы. Проведено исследование СУ, применяемых в ракетной технике. Для управления различными классами ракет предложено применять ИСУ с ансамблем априорных моделей, описывающих динамику ракеты и влияние внешних воздействий. Повышение точности моделей ИСУ предложено осуществлять путём повышения степени управляемости переменных состояния моделей, используемых в ИСУ. Результаты моделирования продемонстрировали незначительное улучшение эффективности предложенного подхода при варьировании коэффициентами матрицы управления. Перспективы дальнейших исследований связаны с анализом степеней управляемости моделей ИСУ при изменении коэффициентов матрицы модели ракеты.

Библиографические ссылки

1. Selezneva M.S., Neusyypin K.A. Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. No. 9. P. 916—922.
2. Кай Ш., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.
3. Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И. Задача коррекции в инерциальной навигации. М.: МГУ, 1982.
4. Yusupov R., Rozenwasser E. Sensitivity of Automatic Control Systems. — London etc.: CRS Press, 1999. 436 p.
5. Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. М.: Наука, 1979. 336 с.
6. Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А. Синтез адаптивного регулятора инерциальной навигационной системы // Техническая кибернетика. 1992. № 2.
7. Неусыпин К.А., Фам Суан Фанг. Численный критерий степени управляемости переменных состояния // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 7.
8. Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 10—14.
9. Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.
10. Анохин П.К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М.: Медицина, 1968.
11. Селезнева М.С., Оглоблина Ю.С. Построение самоорганизующейся модели с высокой степенью наблюдаемости // Научный взгляд. 2015. С. 250—253.

12. Цибизова Т.Ю., Пью С., Селезнева М.С. Математическое моделирование динамических систем с использованием параметрической идентифицируемости // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 1. С. 54—60.

13. Kalman R.E., Ho Y.C., Narendra K.S. Controllability of linear dynamical systems // Contributions to the Theory of Differential Equations. 1963. Vol. I. No. 2. P. 189—213.

14. Silverman L.M., Meadows H.E. Controllability and observability in time-variable linear systems // SIAM Journal on Control. 1964. Vol. 5 (1). P. 64—73.

15. Ham F.M., Brown R.G. Observability, eigenvalues, and Kalman filtering. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1983. Vol. AES-19. Iss. 2. С. 269—273.

16. Kai Shen, Neusypin K.A., Proletarsky A.V. On State Estimation of Dynamic Systems by Applying Scalar Estimation Algorithms // Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. August 8—10, 2014. Yantai, China. P. 124—129.

17. Brown R.G. Not just observable, but how observable? / National Electronics Conference Proceedings 22, 1966. P. 409—714.

18. Ablin H.L. Criteria for degree of observability in a control system // Retrospective Theses and Dissertations. Paper 3188. Iowa State University, 1967.

19. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М., 2013.

20. Ham F.M., Brown R.G. Observability, eigenvalues, and Kalman filtering // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1983. Vol. AES-19. Iss. 2. P. 269—273.

21. Кай Шэнь, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Исследование степени наблюдаемости погрешностей автономных инерциальных навигационных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 1. С. 24—30.

22. Богословский С.В., Дорофеев А.Д. Динамика полета летательных аппаратов: учебное пособие. СПб.: СПб. ГУАП, 2002.

Ссылка для цитирования

Пролетарский А.В. Использование моделей с улучшенными характеристиками в системе управления ракетами // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 563—568. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-12-563-568.

УДК 621.865.8

Е.И. Воробьев, д-р техн. наук, проф., **Е.Е. Конева**

(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва),

К.О. Моргуненко

(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

evgeniv36@mail.ru

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУРУКИМ РОБОТОМ ПРИ СБОРКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Построены алгоритмы управления двуруким роботом при сборке цилиндрических соединений на основе решения обратных задач кинематики и динамики. Предложены алгоритмы управления при захвате цилиндрической детали, перенесении её в заданное положение и процесса соединения деталей при ограничении нормальных сил.

Ключевые слова: построение движений манипуляторов; двурукая робототехническая система; процесс сборки.

Algorithms for controlling a two-handed robot at assembling cylindrical joints assembling are constructed based on solving inverse problems of kinematics and dynamics. Control algorithms for gripping a cylindrical part, transferring it to a given position and the process of joining parts with limited normal forces are proposed.

Keywords: construction of manipulator movements; two-handed robotic system; assembly process.

Введение. Вопросы роботизированной сборки в машиностроении рассматривались во многих работах [1—6]. Однако задачи построения алгоритмов управления манипуляторами при захвате и переносе деталей требуют особого внимания ввиду значительного времени их выполнения. Ниже показано построение алгоритмов управления на различных этапах сборочной операции.

Рассмотрим задачу построения движений манипуляторов в робототехнической системе сборки с двумя манипуляторами портального типа (рис. 1).

Обратная задача кинематики манипулятора. Для построения программных движений манипуляторов портального типа решим задачу об определении относительных положений звеньев манипулятора с пятью степенями

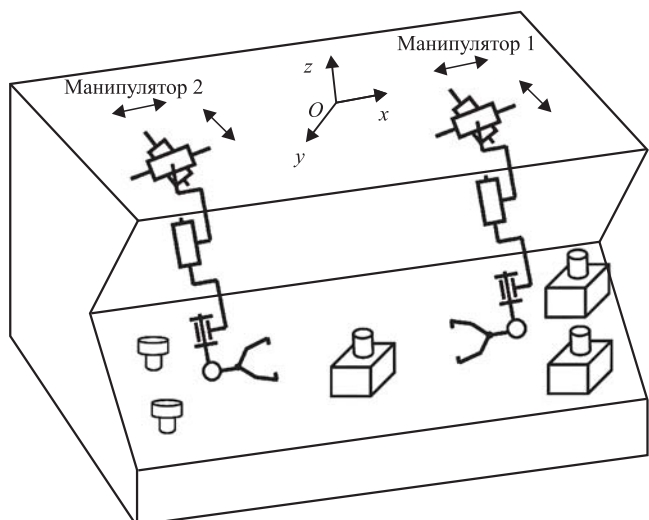


Рис. 1. Система сборки цилиндрических соединений

свободы при захвате цилиндрической детали. Будем считать, что оба манипулятора имеют одинаковые кинематические схемы. Манипулятор содержит три поступательных и две вращательных кинематические пары (рис 2). Со звеньями манипулятора свяжем системы координат следующим образом: оси системы координат звеньев 1...3 параллельны осям неподвижной системы координат $OXYZ$; со звеном 4 свяжем систему координат $O_4X_4Y_4Z_4$,

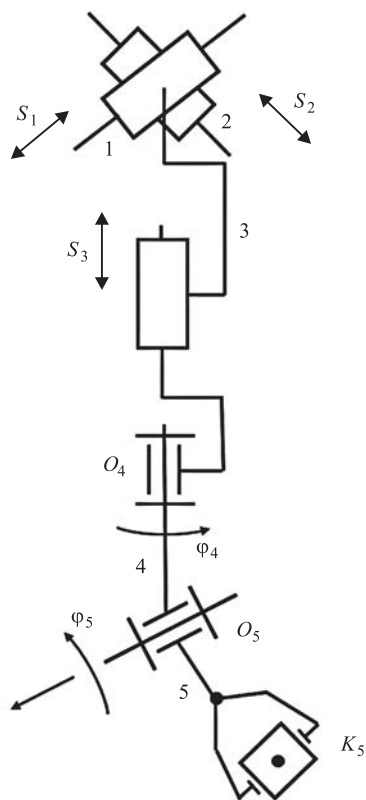


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора

направив ось Z_4 параллельно оси OZ , а ось X_4 — параллельно оси пары O_5 ; со звеном 5 свяжем систему координат $O_5X_5Y_5Z_5$, направив ось X_5 по оси пары O_5 , а ось Z_5 — по оси звена 5 — схвата манипулятора.

Положение цилиндрической детали будем задавать координатами точки, расположенной на оси детали, и направляющими косинусами оси детали в неподвижной системе координат.

При решении обратной задачи о положениях манипулятора будем иметь в виду, что захват цилиндрической детали может производиться схватом робота двумя разными способами: с торца и сбоку.

Будем считать, что цилиндрические детали для сборки: втулка и цилиндрический штифт в загрузочное устройство подаются в положении, когда ось детали параллельна оси OZ неподвижной системы координат.

Координаты контролируемой точки схвата робота O_5 могут быть найдены по формуле

$$[X_5] = L_{03} + L_{34}L_4 + L_{45}L_5, \quad (1)$$

где L_4, L_5 — длины звеньев 4 и 5; L_{34}, L_{45} — матрицы перехода от системы i к системе $i - 1$ ($i = 3,4$); L_{03} — единичная матрица перехода от системы $O_3X_3Y_3Z_3$ к системе $OXYZ$.

Матрицы L_{34} и L_{45} имеют следующий вид:

$$L_{34} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_4 & -\sin \varphi_4 & 0 \\ \sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$L_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_5 & -\sin \varphi_5 \\ 0 & \sin \varphi_5 & \cos \varphi_5 \end{bmatrix}.$$

Перемножив матрицы в выражении (1) с учётом (2), получим координаты точки K_5 схвата в неподвижной системе координат:

$$\begin{aligned} X_5 &= S_1 + L_5 \sin \varphi_4 \sin \varphi_5; \\ Y_5 &= S_2 \pm b_i - L_5 \cos \varphi_4 \sin \varphi_5; \\ Z_5 &= S_3 + L_4 + L_5 \cos \varphi_5, \end{aligned} \quad (3)$$

где b_i — смещение стойки манипуляторов от начала системы $OXYZ$ по оси Y ; $i = 1, 2$.

Ориентация схвата определяется матрицей ориентации связанной с ним системы координат $K_5X_5Y_5Z_5$:

$$L_{05} = L_{04}L_{45}. \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) выражение для матриц и производя перемножение, получим

$$L_{05} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_4 & -\sin \varphi_4 \cos \varphi_5 & \sin \varphi_4 \sin \varphi_5 \\ \sin \varphi_4 & \cos \varphi_4 \cos \varphi_5 & -\cos \varphi_4 \sin \varphi_5 \\ 0 & \sin \varphi_5 & \cos \varphi_5 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Ориентацию детали будем задавать матрицей

$$L_{0D} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Приравнивая элементы матриц (5) и (6), получим выражения для определения углов φ_4 и φ_5

$$\begin{aligned} \cos \varphi_5 &= \alpha_{33}; \\ \sin \varphi_5 &= \alpha_{21}. \end{aligned}$$

При захвате детали с торца ось Z_5 схвата направлена по оси OZ , т. е. элементы третьего столбца матрицы (5) $\alpha_{13} = 0$; $\alpha_{23} = 0$; $\alpha_{33} = 1$, откуда $\cos \varphi_5 = 1$; $\varphi_5 = 0$; $\sin \varphi_4 = 0$; $\varphi_4 = 0$.

При захвате детали сбоку ось Z_5 перпендикулярна к оси OZ и элементы третьего столбца матрицы (5) принимают следующие значения: $\alpha_{13} = 0$; $\alpha_{23} = 1$; $\alpha_{33} = 0$, откуда $\cos \varphi_5 = 0$; $\varphi_5 = \pi/2$; $\varphi_4 = 0$.

Значения S_1, S_2, S_3 определяются из системы линейных уравнений (3).

Построение законов движения по управляемым координатам. Движение по управляемым обобщённым координатам манипуляторов можно построить, имея их значения в начале и конце движения после решения обратной задачи о положениях манипуляторов.

Зная начальные и конечные значения обобщённых координат манипулятора, можно построить процесс изменения их во времени.

Построим эти движения для линейных координат, время изменения которых в большинстве случаев является максимальным. Используем для этого синусоидальный закон ускорения. В этом случае запишем выражение

$$\ddot{S}(t) = \frac{\dot{S}_{\max} \pi}{2\Delta S} \left(\frac{\dot{S}_{\max} \pi t}{\Delta S} \right), \quad (7)$$

где ΔS — разность между начальными и конечными координатами; \ddot{S} — вторая производная по времени от перемещений; \dot{S} — скорость движения по координате.

Закон изменения скорости движения по координате находится путём интегрирования (7):

$$\dot{S}(t) = \frac{\dot{S}_{\max}}{2} \left[1 - \cos \frac{\dot{S}_{\max} \pi t}{\Delta S} \right]. \quad (8)$$

Закон изменения перемещения в линейных координатах находится путём интегрирования (8):

$$S(t) = \frac{1}{2} \left[\dot{S}(t) - \frac{\Delta S}{\pi} \sin \left(\frac{\dot{S}_{\max} \pi t}{\Delta S} \right) \right]. \quad (9)$$

Максимальную скорость относительного перемещения по линейным координатам задаем исходя из технологических соображений в пределах 0,5...1 м/с.

Максимальное линейное ускорение определяется по формуле (7).

Время перехода из начального положения в конечное T можно получить из формулы (9):

$$T = \frac{2\Delta S}{\dot{S}_{\max}}. \quad (10)$$

Для угловых перемещений законы изменения обобщённых координат могут быть найдены по аналогичным формулам с заменой величины S на φ .

Зная времена переходов по обобщённым координатам, можно построить циклограмму движения для обоих манипуляторов.

Ограничение контактных усилий при сборке.

При сборке деталей с минимальным зазором одним из важных требований является ограничение контактных усилий, возникающих при соединении деталей.

Это может быть выполнено при ограничении осевых усилий при движении штифта во втулке.

Определим связь усилия, необходимого для движения штифта во втулке, для случаев одноточечного и двухточечного контактов (рис. 3).

Будем считать, что сила, приложенная к штифту, приводится к одной осевой силе \bar{Q} , направленной по оси втулки.

Запишем условие равновесия штифта для одноточечного контакта в проекциях сил на ось втулки:

$$-Q + fN_1 \cos \gamma + N_1 \sin \gamma = 0,$$

откуда

$$N_1 = \frac{Q}{f \cos \gamma + \sin \gamma}, \quad (11)$$

где f — коэффициент трения; γ — угол между осями штифта и втулки.

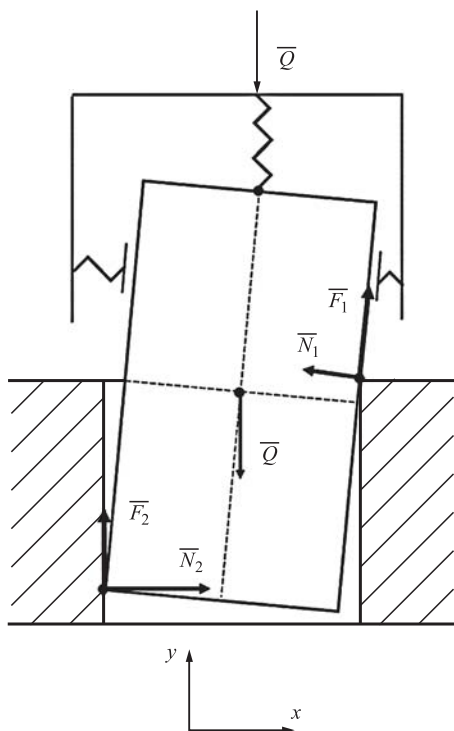


Рис. 3. Схема усилий при сборке цилиндрических соединений

Для двухточечного контакта из условий равновесия штифта имеем

$$\begin{aligned} N_2 &= N_1 \cos \gamma + f N_1 \sin \gamma; \\ Q &= f N_1 \cos \gamma + N_1 \sin \gamma + f N_2, \end{aligned} \quad (12)$$

где N_1 и N_2 — нормальные реакции в точках контакта штифта с поверхностью втулки.

Из первого уравнения (12) получим

$$N_2 = N_1 (\cos \gamma + f \sin \gamma),$$

где $f \sin \gamma$ ввиду малости угла γ приближенно равно нулю.

Тогда

$$N_2 = N_1 \cos \gamma. \quad (13)$$

Из второго уравнения (12) получим

$$Q = N_1 (2f \cos \gamma + \sin \gamma),$$

откуда

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{Q}{2f \cos \gamma + \sin \gamma}; \\ N_2 &= \frac{Q}{2f \cos \gamma + \sin \gamma} \cos \gamma. \end{aligned}$$

Ввиду малости угла $\gamma \cos \gamma \approx 1$. Тогда $N_1 = N_2$ и получим выражение

$$N_1 + N_2 = 2N = \frac{2Q}{2f \cos \gamma + \sin \gamma},$$

откуда

$$Q = N (2f \cos \gamma + \sin \gamma), \quad (14)$$

где N — допустимое усилие в точке контакта, считаем заданным.

Формула (14) задаёт осевое усилие, допустимое при сборке, с учётом ограничения контактных сил.

Алгоритм управления усилием при соединении деталей. Из опыта построения сборочных устройств известно, что операция соединения цилиндрических деталей реализуется при совпадении штифта с отверстием втулки.

При этом осевое усилие обеспечивается или пружиной, или системой управления.

Ниже рассматривается вопрос поддержания постоянного осевого усилия с помощью системы силового управления с помощью электродвигателя постоянного тока. При этом постоянство усилия обеспечивается управляющим током возбуждающегося якоря двигателя.

Математическую модель силового управления принимаем в виде

$$\ddot{Q}(t) + a_1 \dot{Q}(t) + a_0 Q(t) = b U(t), \quad (15)$$

где $a_0 = Ck^2 J^{-1}$, C — жёсткость осевой пружины, k — коэффициент передачи от вращательного движения к поступательному, J — приведённый момент инерции ротора двигателя и звеньев передаточного механизма; $b = Ck \frac{K_m}{JR}$, $a_1 = \frac{1}{J_m}$, $J_m = \frac{J}{K_m K_w}$, R — активное сопротивление цепи якоря, K_m , K_w — коэффициенты вращательного момента двигателя; $Q(t)$ — осевое усилие привода.

Задачи построения силового алгоритма управления сформулируем следующим образом. В начальный момент времени, при $t = 0$, усилие $Q(t) = Q_0$, а его производная по времени $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0$.

Управляющее напряжение на двигателе $U = U(Q, \dot{Q})$, при котором двигатель обеспечивает постоянное усилие Q_0 , обеспечивается переходным процессом $Q(t) \rightarrow Q_0$ в соответствии с решением эталонного дифференциального уравнения

$$K^2 \ddot{Q}^*(t) + 2MJ \dot{Q}^*(t) + Q^*(t) = Q_0. \quad (16)$$

Причём $Q_0^* = Q_0$; $\dot{Q}_0^* = \dot{Q}_0$, знак * означает принадлежность функции к эталонному процессу.

Постоянную времени K и коэффициент сжатия M можно считать заданными. Эти величины выбираются исходя из желаемого качества переходного процесса.

Чтобы изменение усилия в системе сборки происходило согласно эталонному уравнению, необходимо чтобы ускорения в модели (15) и эталонном уравнении (2) были равны, т. е.

$$\begin{aligned} \ddot{Q}(t) &= \ddot{Q}^*(t); \\ \ddot{Q}(t) &= bU - a_0Q - a_1\dot{Q}; \\ \ddot{Q}^*(t) &= \frac{1}{K^2}(Q_0 - Q^*) - 2\frac{M}{KR}\dot{Q}^*. \end{aligned} \quad (17)$$

Принимая $Q^*(t) = Q(t)$, получим выражение для управляющей функции

$$U(Q, \dot{Q}) = \frac{1}{6} \left[\frac{1}{M^2}(Q_0 - Q) + a_0Q + \left(a_1 - 2\frac{M}{KR} \right) \dot{Q} \right]. \quad (18)$$

Формула (18) показывает, что для реализации заданного постоянного усилия прижима штифта необходимо наличие силового датчика на деформационных элементах сборочной системы.

Заключение. Для сборки цилиндрических соединений число степеней свободы сборочных манипуляторов при произвольном расположении подающих устройств должно быть не меньше пяти. При специальном расположе-

нии подающих устройств число степеней свободы манипуляторов может быть уменьшено.

Для ограничения контактных усилий сборки необходимо ограничивать осевое усилие при совмещении деталей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00775.

Библиографические ссылки

1. Козырев Ю.Г. Применение промышленных роботов. М.: Кнорус, 2013.
2. Воробьев Е.И., Козырев Ю.Г., Царенко В.И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа. М.: Машиностроение, 1988.
3. Козырев Ю.Г. Установка захватных устройств и инструментов на конечном звене манипулятора при сборке изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 12.
4. Гибкие сборочные системы / под ред. А.М. Покровского. М.: Машиностроение, 1988.
5. Лебедевский М.С., Вейц В.Л., Федотов А.И. Научные основы автоматической сборки. Л.: Машиностроение, 1985.
6. Кузнецова С.В., Симаков А.Л., Варганов М.В., Зинена И.Н. Синтез управления процессом адаптации детали при сборке методом обратной задачи динамики // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3.

Ссылка для цитирования

Воробьев Е.И., Моргуненко К.О., Конева Е.Е. Алгоритмы управления двуруким роботом при сборке цилиндрических соединений // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 568—572.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал «Автоматизация. Современные технологии» успешно прошёл аккредитацию в ВАК при Минобрнауки России для публикации работ соискателей учёных степеней по отрасли науки:

05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы;

05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении;

05.02.22 — Организация производства (по отраслям);

05.07.02 — Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;

05.07.07 — Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем;

05.07.10 — Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности;

05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям);

05.13.05 — Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления;

05.13.06 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям);

05.13.12 — Системы автоматизации проектирования (по отраслям).

Напоминаем: статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!

С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ
«АВТОМАТИЗАЦИЯ. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» в 2020 г.

№ журнала Стр.

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Амиров С.Ф., Болтаев О.Т., Жураева К.К. Исследование магнитных цепей новых преобразователей усилений	1	24
Байнева И.И., Кузяков А.В. Исследование и расчёт оптических элементов светосигнальных светильников	5	202
Бойчук М.И., Васильева Л.А., Микаева С.А. Математический расчёт надёжности кварцевых резонаторов	7	311
Брокерев И.А. Сравнительный анализ корреляционных методов определения энергетических характеристик природного газа	2	57
Васильев И.И., Васильев М.И. Моделирование и управление вакуумом десорбера установки регенерации диэтиленгликоля при использовании контура автоматического управления, основанного на принципе нечёткой логики	10	435
Васильева Л.А., Бойчук М.И., Микаева С.А. Кварцевые генераторы	5	207
Васильева Л.А., Бойчук М.И., Микаева С.А. Контроль металлостеклянного спая пьезоэлектрических изделий	10	444
Веселовская О.А., Абанин А.Д. Стенд полунатурного моделирования для проверки функционирования оптико-электронных систем	12	531
Воробьёв Е.И., Дорофеев В.О. Координация движений двух манипуляторов, функционирующих совместно	3	115
Галкин Е.В. Управление ресурсами с применением имитационной модели производственного процесса	5	195
Глушко А.А., Зинченко Л.А., Макачук В.В., Терехов В.В., Михайличенко С.С., Палий Д.Д. Компьютерное моделирование стойкости распределённых микросистем к воздействию тяжёлых заряженных частиц	11	483
Годжаманов М.Г., Вердиев С.Б. Оценка информативности результатов лазерного сканирования при исследовании вертикальности тепловых труб энергетических объектов	3	99
Горбунов А.А., Микаева С.А. Исследование характеристик влагозащищённых светильников	1	27
Гринюк О.Н., Алексахина О.В., Вячеславова О.Ф. Повышение эффективности выполнения технологических операций при производстве изделий из металлопроката	4	147
Данилов К.В. Прогнозирование объёмов энергопотребления на основе автоматического машинного обучения	9	402
Денисов М.С., Котов Г.А. Влияние давления на сжимаемость алюминиевых сплавов	3	102
Джавадов Н.Г., Казымова Ф.Т. Информационная оценка результатов дистанционного зондирования почвы при изучении распределения в ней органических веществ	7	315
Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В. Методы оценки технологичности транспортного средства	4	152
Жеглова Ю.Г., Титаренко Б.П. Анализ проектных решений ограждений котлованов	9	390
Загидуллин Р.Р. Определение оптимальной партии запуска в станочной системе для малых и средних машиностроительных предприятий	1	16
Иванов В.К. К вопросу создания комплексной математической модели производственной системы	5	199
Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М., Аносов М.С., Колчин П.В. Цифровой двойник оборудования как основа для потребителя в условиях цифрового производства	9	394
Кокорева О.Г. Влияние волновых процессов на механизм деформирования образца	3	112
Колыбенко Е.Н. Формализованные знания технологических схем базирования объектов на их возможном множестве для автоматизированного решения задач практики в подготовке производства	7	299

Коноплев В.И., Анцев В.Ю., Воробьев А.В. Крюковая подвеска с устройством для предотвращения падения груза при обрыве каната в полиспасте	2	61
Куликов О.Е., Шалумов А.С., Шалумов М.А. АСОНИКА-ЭМС: моделирование электромагнитных процессов конструкций электроники	1	3
Лукьяненко В.С., Щеголев А.В., Сергиенко С.Н. Автоматизация гальванического цинкования стальных изделий	9	387
Лукьяненко В.С., Щеголев А.В., Сергиенко С.Н. Технологии процесса цинкования	8	345
Маммадли Р.Ш. Вопросы моделирования и оптимизации при снижении аэрозольной загрязнённости атмосферы над промышленными зонами	6	248
Марков А.В., Орешина О.А. Автоматизация процесса принятия решения о составе полимерных композиционных материалов	10	440
Микаева А.С. Основные этапы формирования стратегии технологического развития предприятия и принципы её разработки	1	19
Микаева А.С., Микаева С.А. Электронные пускорегулирующие аппараты	8	348
Микаева С.А., Микаева А.С., Ларшина Э.Л. Система очистки воздуха	3	118
Михайленко Л.А., Устименко В.В., Чубарь А.В. Реализация нечёткого супервизора для системы высокого порядка в среде динамического моделирования SIMINTECH	11	487
Несиоловский О.Г., Адакин Р.Д., Соцкая И.М., Карпов Д.С. Автоматизация системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания посредством программирования контроллера и применения системы управления его тепловым состоянием	4	160
Орлов П.С., Соцкая И.М., Адакин Р.Д. Разработка программного обеспечения для управления процессом очистки ультразвуком отложений с поверхностью многоразового фильтра	7	308
Пузанов А.В., Суворкина О.О., Ершов Е.А. Моделирование работоспособности насосного оборудования в арктических условиях эксплуатации	3	108
Силаев А.А., Григорьев М.С. Автоматизация непрерывного стана проката бесшовных труб	12	534
Султанова Е.А., Шарипова Д.Д. Моделирование систем поддержки принятия решений для диагностики степени износа оборудования и сооружений нефтеперерабатывающих комплексов	8	353
Тамаркин М.А., Нгуен В.Т., Соловьев А.Н., Тищенко Э.Э., Мордовцев А.А. Компьютерное моделирование съёма металла деталей машин при центробежно-ротационной обработке	6	243
Чирков Е.В., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Саблин С.Ю., Высоцкая И.А. Информационная модель зоны варьирования трассы лесовозной автомобильной дороги	12	538
Шалумов А.С., Шалумов М.А., Тихомиров М.В. АСОНИКА-УМ: управление моделированием электроники на внешние воздействующие факторы при проектировании	2	51
Шматков В.С., Тимохин Р.С., Шматкова А.В. Управление производством стандартизированных изделий с применением средств электронной автоматизации процессов — единого окна	8	339
Ягопольский А.Г., Домнышев А.А. Мониторинг производственных систем	1	14
Янгиров И.Ф., Сафиуллин Р.А. Искусственный движитель для микророботов	6	252

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Антипин А.Ф., Антипина Е.В. Многомерный нечёткий интервально-логический регулятор с механизмом предсказания термов	1	37
Афанасьев В.Н., Семион А.А. Управление объектом в условиях запаздывания и последствия с интервальной длительностью	4	170
Гладышев В.О., Кауц В.Л., Терешин А.А., Ульрих И.В., Фам С.Ч. Перспективные направления развития систем ориентации и навигации летательных аппаратов	3	123
Григорьев-Фридман С.Н. Новый взгляд на физические и квантовые свойства фотона	10	448
Елисеев В.А. Инновационные особенности современных технологических трансформаций	8	362
Елисеев В.А. Аспекты организации производственно-технологического развития	11	509
Ермаков Р.Н. Распознавание сетевых протоколов и приложений прикладного уровня с применением методов машинного обучения и алгоритмов нечёткой логики в системах анализа трафика	2	84
Железникова О.Е., Мышонков А.Б., Микаева С.А. Исследования режимов облучения листового салата	9	413
Железнякова О.Е., Куршев А.Е., Богатырёв С.Д., Микаева С.А. Влияние излучения светодиодных фитооблучателей комбинированного спектра на рост и развитие растений огурца	7	335

Иванова Г.С., Жильцов А.И., Фетисов М.В., Чулин Н.А., Юдин А.Е. Адаптивная система моделирования	11	500
Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Алгоритмы адаптивной идентификации динамических систем на основе принципа регулярности	5	219
Коченгин А.Е., Шихина А.В., Ягодкина Т.В. Агрегированная модель прогноза цены на рынке электроэнергетики	3	134
Кудрявцев А.В., Куликов С.Н. Моделирование автоматической системы обеспечения устойчивости перспективного транспортного самолёта в канале крена	4	181
Ли Юе, Цибизова Т.Ю., Косовский А.В. Алгоритм обнаружения и изоляции отказов линейного фильтра Калмана	12	557
Лукьянова Н.В., Полякова А.А. Модульный метод полунатурного моделирования системы самонаведения	11	504
Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Иваненко С.В., Ещенко С.В., Демин С.С., Далецкий С.В. Влияние непреднамеренных радиопомех на качество функционирования аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем	4	165
Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н. Итерационный критерий асимптотической устойчивости дескрипторной системы	5	213
Неусыпин К.А. Способы определения качественных характеристик моделей динамических систем	2	71
Никифоров С.О., Кочева Т.В., Мархадаев Б.Е., Урмакшинова Е.Р., Никифоров Б.С. Особенности прототипирования кинематических движений конечностей человека при реализации демонстрационных роботов	7	325
Пузанов А.В. Анализ устойчивости корпусных элементов гидропривода робототехнического комплекса к повреждению поражающими элементами	4	190
Рублева Д.Б., Смирнов Н.Я. Исследование устойчивости алгоритмов распознавания образов к внешним воздействиям	9	418
Рязанова Н.Ю., Жуйян Чжоу. Алгоритм распознавания сигналов измерительного комплекса беспилотного летательного аппарата	12	543
Рязанова Н.Ю., Рыжкова Е.К. Методы определения положения беспилотного летательного аппарата на основе изображений подстилающей поверхности	12	549
Севернов Б.В., Севернов В.В. Решение задачи классификации поверхностей методом решающих деревьев	10	458
Селезнева М.С. Подход к определению степени управляемости с использованием свойства дуальности	1	42
Соколов С.В., Чуб Е.Г., Полякова М.В., Манин А.А. Адаптивная оценка дисперсионной матрицы шумов линейных измерений на основе неперiodических точных наблюдений	6	264
Столярчук В.А. Автоматизированная система поддержки научных исследований	2	64
Сюй Ц., Лукьянова Н.В., Лун С., Цибизова Т.Ю., Тань В. Применение генетического алгоритма для оптимизации нейронных сетей ВР	6	259
Фам С. Ч., Суркова А.Д., Селезнева М.С. Исследование системы маршрутной коррекции бортовой навигационной системы беспилотного летательного аппарата по радиолокационным изображениям местности	3	129
Ху Ц., Клычников В.В., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Исследование БИНС низкой точности для беспилотной машины	10	463
Чан Д.М. Разработка алгоритма настройки субоптимального коэффициента масштабирования в задаче фильтрации БИНС	7	329
Чжан Лифэй. Улучшение характеристик нелинейных моделей динамических систем	9	408
Чжоу Ж., Рязанова Н.Ю., Неусыпин К.А. Алгоритм распознавания цветковых сигналов при посадке беспилотного летательного аппарата на авианосец в автономном режиме	2	78
Чижикина Л.А. Методы проектирования БПЛА с солнечной силовой установкой, предназначенного для продолжительного мониторинга наземных объектов	4	184
Чыонг Ф.С. Способ коррекции астроинерциальной системы летательного аппарата	7	320
Чыонг Ф.С., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка структуры навигационного комплекса высокоточного беспилотного летательного аппарата для полёта в атмосфере	8	357

Шахтарин Б.И., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Лифэй Ч. Алгоритм оценивания навигационного комплекса летательного аппарата авианосного базирования	4	176
Юйхуэй Ху. Управление траекторией космического аппарата при спуске в атмосфере Марса с модифицированным ПИД-регулятором	11	492
Яковлева Ю.С., Макаренко Н.Г., Яковлев Е.В. Мониторинг технического состояния мобильных объектов	1	32

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Загидуллин Р.Р. Метод определения качества принимаемых решений в системах искусственного интеллекта	8	377
Пролетарский А.В., Березкин Д.В., Можаров Г.П. Игровые и графовые модели информационных сетей для исследования сложных систем	6	269

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Бром А.Е., Масленникова Ю.Л., Михайлов Н.Э. Сравнение понятий автоматизации и цифровизации в промышленности	6	282
Васильев М.И., Васильев И.И. Поиск оптимальной постоянной скорости изменения регулирующего входного воздействия нечёткого регулятора стабилизирующего контура	9	424
Воробьёв Е.И., Моргуненко К.О., Конева Е.Е. Алгоритмы управления двуруким роботом при сборке цилиндрических соединений	12	568
Даетеф Ф., Тимофеев А.Н. Управление мобильным роботом в динамической среде с помощью нечёткой логики	10	476
Денисов М.С. Автоматизированная система программного управления процессом наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл	5	234
Елисеев В.А., Дегтярёв Ю.И. Процедуры управления реализацией научно-технологического развития	5	225
Зенкевич С.Л., Назарова А.В., Хо Ц. Логическое управление движением группы мобильных роботов в среде с препятствиями	10	470
Колодин А.А. Управление на основе прогнозирующей модели в системах локального регулирования	11	521
Микаева А.С., Микаева С.А. Контроллер управления NF-K-001, NF-K-002	9	428
Мышляев Ю.И., Минкин В.О., Фиошин А.В. Управление колебаниями механической системы с приводом в условиях параметрической неопределённости	7	339
Пилипенко С.И., Медведева Л.И. Автоматизированная система управления отоплением коттеджа	8	381
Пролетарский А.В. Использование моделей с улучшенными характеристиками в системе управления ракетами	12	563

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов	1,	11
Указатель статей, опубликованных в журнале «Автоматизация. Современные технологии» в 2020 г. . .	12	573

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 28.09.2020.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 23.11.2020.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель