

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

**Журнал Сибирского
федерального университета
Техника и технологии**

**Journal of Siberian
Federal University
Engineering & Technologies**

2022 15 (3)

ISSN 1999-494X (Print)
ISSN 2313-6057 (Online)

2022 15(3)

Журнал включен в «Russian Science Citation Index» на платформе «Web of Science»

Индексируется Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлен в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, EBSCO (CША), Google Scholar, ProQuest, Erihplus, READera, КиберЛенинке.

Включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» Высшей аттестационной комиссии.

Журнал Сибирского федерального университета Техника и технологии

Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies

**Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.
Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *В.А.Кулагин*. Редактор *И.А.Вейсиг*. Корректор *Т.Е.Бастрыгина*.
Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 3. 30.05.2022. Индекс: 42328. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства: 660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 79, оф. 32-03.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28722 от 29.06.2007 г.,
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 24.05.2022. Формат 84х108/16. Усл. печ. л. 8,8.

Уч.-изд. л. 8,3. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 15838.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

CHIEF EDITOR

Vladimir A. Kulagin, Head of the Department of Heat Technology and Fluid Dynamics of Polytechnic Institute of SibFU, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Honorary Worker of Science and Technology of the Russia

EDITORIAL BOARD

- Sereeter Batmönkh, Institute of Heat Engineering and Industrial Ecology Mongolian Academy of Sciences, Mongolia;
- Yuri Galerkin, Saint Petersburg State Polytechnic University, Russia;
- Eugene Garin, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Zuev, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Tomsk, Russia;
- Juriy Koziratzky, Military Education and Research Centre of Military-Air Forces "Military-Air Academy name after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia;
- Genius Kuznetsov, Tomsk Polytechnic University, Russia;
- Feng-Chen Li, Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology Sun Yat-Sen University, Zhuhai, China;
- Dmitriy Markovich, Institute of Thermophysics Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Novosibirsk, Russia;
- Valery Mironov, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Moskvichev, Institute of Computational Technologies of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Krasnoyarsk, Russia;
- Bernard Nacke, Institute of Electrotechnology Leibniz University, Hannover, Germany;
- Valeriy Nikulin, Kamsk Institute of Humanitarian and Engineering Technologies, Izhevsk, Russia;
- Valery Okulov, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark;
- Oleg Ostrovski, University of New South Wales, Australia;
- Harald Oye, Norwegian University of Science and Technology, Norway;
- Vasili Panteleev, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Petr Polyakov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
- Ibragim Khisameev, Kazan State Technological University, Russia;
- Nikolai Zuglenok, Federal Research Center KSC Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia;
- Vladimir Shaidurov, Institute of Computational Modelling Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Russia;
- Anatoly Shvidenko, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria.

CONTENTS

Researching. Design. Operating Experience

Sergey B. Zhironkin, Andrey A. Pshenitsyn and Alexander A. Bliznyuk Characteristics of Strobeless Identification of Trajectories of Air Objects in Positioning and Radar Identification	294
Dmitrii V. Emelyanov, Irina Yu. Botvich, Vladimir K. Ivchenko and Anatolii P. Shevyrnogov Construction and Analysis of Crops Maps Based on Unmanned Survey Data in Different Vegetative Stages	308
Eugenii A. Storozhok, Grigorii V. Dorofeev and Pavel A. Starodubtsev Classification of Signals Using Neural Network Technology	318
Ekaterina A. Kohonkova Hardware Implementation of a System for Transmission of Electromagnetic Signals Through-the-Earth	325
Vasilij I. Murko, Viktor I. Karpenok and Marina P. Baranova Vortex Method of Water-Coal Combustion Fuel from Coal Preparation Sludge.....	338
Grigoriy R. Mongush, Marina P. Baranova and Kalestina K. Chuldum Study of Combustion Characteristics of Coals by Thermogravimetric Analysis and Ir-Spectroscopy	346
Pavel V. Petrov, Viktor R. Vedruchenko, Evgeny V. Rezanov, Ivan I. Kadtsin and Vladimir A. Kulagin Experimental Study of the Effective Insulation of Building Envelopes	356

Information and Communication Technologies

Vitalii S. Svishcho, Andrey I. Uvarov and Oleg V. Kryukov Probabilistic Assessment of Objects Belonging to a Given Class Based on the Combination of Multispectral Images of Different Times	370
Aleksandr V. Bogdanov, Sergei G. Petrov, Aleksandr A. Kuchin, Aleksandr A. Lobanov and Vitalii V. Shepranov Synthesis of Optimal Algorithm of Recognition Numerical Model of Group Air Target from Class «Turbojet Aircrafts» Based on Kalman Filtering and Neural Network	381

СОДЕРЖАНИЕ

Исследования. Проектирование. Опыт эксплуатации

С. Б. Жиронкин, А. А. Пшеницын, А. А. Близнюк

Характеристики бесстробового отождествления траекторий воздушных объектов при координатно-связном и радиолокационном опознавании 294

**Д. В. Емельянов, И. Ю. Ботвич,
В. К. Ивченко, А. П. Шевырнов**

Построение и анализ карт высот растительности агроценозов по данным беспилотной съемки в различные фазы вегетации 308

Е. А. Сторожок, Г. В. Дорофеев, П. А. Стародубцев

Классификация сигналов с использованием технологии нейронных сетей..... 318

Е. А. Кохонькова

Аппаратная реализация системы передачи электромагнитных сигналов через горную породу 325

В. И. Мурко, В. И. Карпенко, М. П. Баранова

Вихревой способ сжигания водоугольного топлива из шламов углеобогащения 338

Г. Р. Монгуш, М. П. Баранова, К. К. Чульдун

Определение особенностей горения углей методами термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии..... 346

**П. В. Петров, В. Р. Ведрученко,
Е. В. Резанов, И. И. Кадцин, В. А. Кулагин**

Экспериментальное исследование эффективности утепления наружных ограждающих конструкций стен здания 356

Информационно-коммуникационные технологии

В. С. Свищо, А. И. Уваров, О. В. Крюков

Вероятностная оценка принадлежности объектов к заданному классу на основе комплексирования разновременных многоспектральных изображений..... 370

**А. В. Богданов, С. Г. Петров,
А. А. Кучин, А. А. Лобанов, В. В. Шепранов**

Синтез оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели из класса «самолеты с турбореактивными двигателями» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети 381

**Researching. Design.
Operating Experience
Исследования.
Проектирование.
Опыт эксплуатации**



DOI: 10.17516/1999-494X-0392

УДК 621.396. 96

Characteristics of Strobeless Identification of Trajectories of Air Objects in Positioning and Radar Identification

Sergey B. Zhironkin*,
Andrey A. Pshenitsyn and Alexander A. Bliznyuk
*VKO Military Academy named after Marshal
of the Soviet Union Georgiy Zhukov
Tver, Russian Federation*

Received 25.01.2022, received in revised form 18.03.2022, accepted 24.04.2022

Abstract. The characteristics of identification of data of special (military) automatic dependent and radar observations of air objects during their coordinate-connected identification are presented. The characteristics are obtained as a result of statistical simulation of the algorithm for strobeless identification of trajectories, synthesized by a method based on the theory of optimal filtering of discrete-continuous Markov random processes. These characteristics are compared with the characteristics of strobeless and strobe identification in radar identification.

Keywords: strobeless identification, coordinate-connected identification, radar identification, optimal filtering, Kalman filter.

Citation: Zhironkin, S. B., Pshenitsyn, A. A. and Bliznyuk A. A. Characteristics of strobeless identification of trajectories of air objects in positioning and radar identification. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 294–307. DOI: 10.17516/1999-494X-0392

Характеристики бесстробового отождествления траекторий воздушных объектов при координатно-связном и радиолокационном опознавании

С. Б. Жиронкин,

А. А. Пшеницын, А. А. Близнюк

Военная академия воздушно-космической обороны

им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова

Российская Федерация, Тверь

Аннотация. Представлены характеристики отождествления данных специального (военного) автоматического зависимого и радиолокационного наблюдений воздушных объектов при их координатно-связном опознавании. Характеристики получены в результате статистического имитационного моделирования алгоритма бесстробового отождествления траекторий, синтезированного по методу, основанному на теории оптимальной фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов. Выполнено сравнение этих характеристик с характеристиками бесстробового и стробового отождествлений при радиолокационном опознавании.

Ключевые слова: бесстробовое отождествление, координатно-связное опознавание, радиолокационное опознавание, оптимальная фильтрация, фильтр Калмана.

Цитирование: Жиронкин, С. Б. Характеристики бесстробового отождествления траекторий воздушных объектов при координатно-связном и радиолокационном опознавании / С. Б. Жиронкин, А. А. Пшеницын, А. А. Близнюк // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 294–307. DOI: 10.17516/1999-494X-0392.

Введение

Необходимой операцией при опознавании воздушных объектов является отождествление оценок координат опознаваемого объекта, сформированных потребителем информации опознавания (например, наземной РЛС), с оценками координат своего объекта, сформированными средством опознавания. Отождествление называют еще привязкой признака опознавания к информации обнаружения по опознаваемому объекту.

При координатно-связном опознавании (КСО) в качестве средства опознавания может выступать приемник сигналов специального (военного) вещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В), например, приемник терминала объединенной системы связи, навигации, обмена данными и опознавания (ОСНОД) [1]. Вещательная технология АЗН-В признана международным сообществом для наблюдения за воздушными судами и эффективного управления воздушным движением. Суть технологии АЗН-В состоит в автоматическом определении на борту воздушного судна его координат и передачи их оценок, с некоторым периодом, по каналам радиосвязи в беззапросном режиме всем заинтересованным потребителям. Если с помощью помехоустойчивой аппаратуры навигации [2, 3] реализовать специальные (военные) режимы АЗН-В с передачей зашифрованных координат своих воздушных объектов по помехоустойчивым каналам радиосвязи [4–7], то можно говорить о реализации метода координатно-связного опознавания.

В методе радиолокационного опознавания (РЛО) оценки координат своих объектов формируются запросчиком системы государственного опознавания явным (в несопряженных запросчиках, функционирующих независимо от потребителя) или неявным (в сопряженных запросчиках, функционирующих синхронно с потребителем по запуску и обзору пространства) образом [8]. В запросчике реализуется радиолокационный принцип измерения координат.

Цель работы – получить сравнительные характеристики бесстробового отождествления траекторий, основанного на теории оптимальной фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов при координатно-связном и радиолокационном опознавании воздушных объектов.

При координатно-связном (навигационно-связном) опознавании воздушных объектов выполняется отождествление траекторий своих объектов, представляемых совокупностью оценок их навигационных данных (прямоугольных координат), полученных опознающим объектом по связным каналам специального (военного) АЗН-В, с траекториями опознаваемых объектов, представляемых совокупностью оценок их сферических координат, полученных от РЛС.

Обоснование характеристик отождествления

При анализе качества отождествления данных от потребителя информации опознавания и запросчика системы государственного радиолокационного опознавания часто говорят о том, что из-за низкой разрешающей способности запросчика по угловым координатам во многих тактических ситуациях чужой объект отождествляется со своим. Более правильно в данном случае говорить о низкой точности измерения угловых координат запросчиком, так как в нем задача разрешения своего и чужого объектов вообще не возникает: запросчик получает сигналы только от своего объекта.

Задача разрешения своего и чужого объектов должна рассматриваться применительно к системе, включающей потребитель информации опознавания и средство опознавания.

Под интервалом разрешения системы «потребитель информации опознавания – средство опознавания» будем понимать такое минимальное расстояние между своим и чужим объектами, при котором вероятность правильного неотождествления чужого объекта со своим не меньше заданной величины при фиксированной вероятности правильного отождествления своего объекта, а в качестве характеристики отождествления рассматривать зависимость интервала разрешения от дальности до объектов.

Алгоритм бесстробового отождествления траекторий при координатно-связном опознавании

С использованием метода [9] синтеза оптимальных алгоритмов отождествления измерений векторов состояния подвижных объектов различными системами наблюдения на основе теории оптимальной фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов [10] был получен алгоритм отождествления данных специального (военного) автоматического зависимого и радиолокационного наблюдений воздушных объектов при их координатно-связном опознавании в следующем виде:

$$\sum_k (\zeta_k - \tilde{\zeta}_k)^T \tilde{\mathbf{R}}_{\xi\eta}^{-1}(k) (\zeta_k - \tilde{\zeta}_k) - \sum_{\mu} (\eta_{\mu} - \mathbf{H}_{\eta} \tilde{X}_{\eta\mu})^T \tilde{\mathbf{R}}_{\eta\eta}^{-1}(\mu) (\eta_{\mu} - \mathbf{H}_{\eta} \tilde{X}_{\eta\mu}) -$$

чужой

$$- \sum_v (\xi_v - S(\tilde{X}_{\xi v}))^T \tilde{\mathbf{R}}_{\xi\xi}^{-1}(v) (\xi_v - S(\tilde{X}_{\xi v})) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} h$$

свой

В алгоритме использованы обозначения:

h – порог принятия решения об отождествлении;

η_{μ} – вектор наблюдаемых параметров на входе фильтра навигационных данных, поступающих в моменты времени t_{μ} (навигационные данные – оценки прямоугольных координат своего воздушного объекта (ВО), полученные от него по связному каналу);

ξ_v – вектор наблюдаемых параметров на входе фильтра радиолокационных данных, поступающих в моменты времени t_v (радиолокационные данные – оценки сферических координат опознаваемого ВО, полученные от РЛС);

ζ_k – вектор наблюдаемых параметров на входе комплексного фильтра (при $t_k = t_{\mu}$ $\zeta_k = \eta_{\mu}$, при $t_k = t_v$ $\zeta_k = \xi_v$);

$\tilde{\zeta}_k$ – прогнозируемое наблюдение на входе комплексного фильтра, рассчитываемое следующим образом:

$\tilde{\zeta}_k = \mathbf{H}_{\eta} \tilde{X}'_k$, если на вход фильтра поступают навигационные данные, где $\tilde{X}'_k$ – прогнозируемая оценка вектора X состояния ВО, сформированная комплексным фильтром, $\mathbf{H}_{\eta}$ – матрица пересчета вектора состояния ВО в вектор наблюдаемых параметров на входе фильтра навигационных данных;

$\tilde{\zeta}_k = S(\tilde{X}'_k)$, если на вход фильтра поступают радиолокационные данные, $S(\tilde{X}'_k)$ – нелинейная вектор-функция пересчета из прямоугольной системы координат в сферическую;

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\eta}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования наблюдения в комплексном фильтре, рассчитываемая следующим образом:

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\eta}(k) = \mathbf{H}_{\eta} \tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\eta}(k) \mathbf{H}_{\eta}^T$, если на вход фильтра поступают навигационные данные, где $\tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\eta}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования вектора X состояния ВО в комплексном фильтре;

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\xi}(k) = \mathbf{H}_{\xi}(k) \tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\xi}(k) \mathbf{H}_{\xi}^T(k)$, если на вход фильтра поступают радиолокационные данные, где $\mathbf{H}_{\xi}(k) = \partial S(\tilde{X}'_k) / \partial X^T$ – матрица пересчета вектора X состояния ВО в вектор наблюдаемых радиолокационных данных, полученная путем линеаризации нелинейной вектор-функции пересчета из прямоугольной системы координат в сферическую;

$\tilde{X}_{\eta\mu}$ – прогнозируемая оценка вектора X состояния ВО, сформированная фильтром навигационных данных;

$\tilde{\mathbf{R}}_{\eta\eta}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования навигационных данных в фильтре навигационных данных, рассчитываемая следующим образом:

$\tilde{\mathbf{R}}_{\eta\eta}(k) = \mathbf{H}_{\eta} \tilde{\mathbf{R}}_{X\eta\eta}(k) \mathbf{H}_{\eta}^T$, где $\tilde{\mathbf{R}}_{X\eta\eta}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования вектора X состояния ВО в фильтре навигационных данных;

$\tilde{X}_{\xi v}$ – прогнозируемая оценка вектора X состояния ВО, сформированная фильтром радиолокационных данных;

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\xi}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования сферических координат в фильтре радиолокационных данных, рассчитываемая следующим образом:

$\tilde{\mathbf{R}}_{\xi\xi}(k) = \mathbf{H}_{\xi}(k) \tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\xi}(k) \mathbf{H}_{\xi}^T(k)$, где $\tilde{\mathbf{R}}_{X\xi\xi}(k)$ – корреляционная матрица ошибок прогнозирования вектора $\mathbf{X}$ состояния ВО в фильтре радиолокационных данных.

Реализация алгоритма бесстробового отождествления траекторий

В представленном выше алгоритме используются три фильтра: фильтр навигационных данных, фильтр радиолокационных данных и комплексный фильтр. Соответствующие уравнения фильтрации и в целом алгоритм были реализованы программно.

Исходными уравнениями фильтрации являются уравнение динамики вектора состояния воздушного объекта (априорное уравнение сообщения) и уравнение наблюдения [10].

В вектор состояния воздушного объекта для повышения точности фильтрации его прямоугольных координат целесообразно включить не только их, но и соответствующие параметры движения – проекции скорости и ускорения, представив вектор состояния в виде

$$\lambda = \begin{bmatrix} x & y & z & v_x & v_y & v_z & a_x & a_y & a_z \end{bmatrix}^T.$$

Для одной координаты и соответствующих параметров движения была использована линейная модель [11], подтвержденная в [12] по результатам летных экспериментов:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_x, \\ \dot{v}_x = a_x, \\ \dot{a}_x = -\alpha a_x - \beta v_x + \sqrt{2\alpha\sigma_a^2} \cdot n_x(t), \end{cases}$$

где α – величина, обратная времени корреляции флуктуаций ускорения;

β – средний квадрат частоты собственных колебаний автокорреляционной функции флуктуаций ускорения;

σ_a^2 – дисперсия флуктуаций ускорения воздушного объекта;

$n_x(t)$ – стандартный (с единичной спектральной плотностью) белый гауссовский шум (БГШ).

С использованием данной модели уравнение динамики имеет следующий векторно-матричный вид:

$$\dot{\lambda}(t) = \mathbf{A}\lambda(t) + n_{\lambda}(t),$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta & 0 & 0 & -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta & 0 & 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta & 0 & 0 & -\alpha \end{bmatrix},$$

$$n_{\lambda}(t) = \left\| 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad n_x(t) \quad n_y(t) \quad n_z(t) \right\|^T,$$

где $n_x(t)$, $n_y(t)$, $n_z(t)$ – независимые стандартные БГШ.

Такому дифференциальному уравнению динамики соответствует следующее уравнение в дискретном времени:

$$\lambda_v = \mathbf{F}\lambda_{v-1} + \mathbf{\Gamma}_{\lambda} n_{\lambda v},$$

где

$$\lambda_v = \lambda(t_v), \quad \mathbf{F} = \exp(\mathbf{A} \cdot \Delta), \quad \Delta = t_v - t_{v-1},$$

$$n_{\lambda v} = \left\| 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad n_{xv} \quad n_{yv} \quad n_{zv} \right\|^T,$$

где n_{xv} , n_{yv} , n_{zv} – независимые стандартные (с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией) гауссовские случайные величины,

$$\mathbf{\Gamma}_{\lambda} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{D} \end{pmatrix},$$

где $D = 2\alpha\sigma_a^2\Delta$.

Были приняты следующие численные значения параметров: $\alpha = 0,2$ 1/с; $\beta = 0,39$ 1/с²; $\sigma_V = 0,2$ м/с; $\sigma_a^2 = 0,0172$ м²/с⁴ [12] и $\Delta = 10$ с.

Уравнение наблюдения для фильтра навигационных данных имеет линейный вид:

$$\xi_{\text{азн } v} = \mathbf{H}\lambda_v + \mathbf{\Gamma}_{\xi \text{ азн}} n_{\text{азн } v},$$

где

$$\xi_{\text{азн } v} = \left\| \xi_{xv} \quad \xi_{yv} \quad \xi_{zv} \quad \xi_{V_{xv}} \quad \xi_{V_{yv}} \right\|^T,$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma}_{\xi \text{ азн}} = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{V_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{V_y} \end{pmatrix},$$

$$n_{\text{азн } v} = \left\| n_{\text{азн } xv} \quad n_{\text{азн } yv} \quad n_{\text{азн } zv} \quad n_{\text{азн } V_{xv}} \quad n_{\text{азн } V_{yv}} \right\|^T,$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{V_x}, \sigma_{V_y}$ – среднеквадратические ошибки измерения прямоугольных координат и горизонтальных составляющих скорости в бортовой навигационной аппаратуре воздушного объекта;

$n_{азн\ x\ y}, n_{азн\ y\ y}, n_{азн\ z\ y}, n_{азн\ V_{xy}}, n_{азн\ V_{yy}}$ – независимые стандартные гауссовские случайные величины.

Так как для фильтра навигационных данных оба уравнения – динамики и наблюдения – линейные, то оптимальным по критерию минимума $\sigma_{x\ азн}, \sigma_{y\ азн}, \sigma_{z\ азн}$ является алгоритм фильтрации Калмана, представляемый следующими уравнениями [10]:

$$\begin{aligned}\hat{\lambda}_v &= \tilde{\lambda}_v + \mathbf{K}_v (\xi_{азн\ v} - \mathbf{H} \tilde{\lambda}_v), \\ \mathbf{K}_v &= \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}^T + \Gamma_{\xi\ азн} \Gamma_{\xi\ азн}^T)^{-1},\end{aligned}$$

где оценка прогноза (экстраполированная оценка) $\tilde{\lambda}_v$ и корреляционная матрица ошибок прогноза $\tilde{\mathbf{R}}_v$ были сформированы в конце предыдущего шага фильтрации по формулам:

$$\tilde{\lambda}_v = \mathbf{F} \hat{\lambda}_{v-1}, \quad \tilde{\mathbf{R}}_v = \mathbf{F} \mathbf{R}_{v-1} \mathbf{F}^T + \Gamma_{\lambda} \Gamma_{\lambda}^T.$$

В конце данного шага рассчитывается корреляционная матрица ошибок фильтрации

$$\mathbf{R}_v = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_v \mathbf{H}) \tilde{\mathbf{R}}_v,$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица 9×9 , и осуществляется прогноз на следующий $(v + 1)$ шаг: рассчитываются $\tilde{\lambda}_{v+1}$ и $\tilde{\mathbf{R}}_{v+1}$.

При фильтрации данных РЛС уравнение наблюдения имеет нелинейный вид

$$\begin{aligned}\xi_{рлс\ v} &= S(\lambda_v) + \Gamma_{\xi\ рлс} n_{рлс\ v}, \quad \xi_{рлс\ v} = \begin{bmatrix} \xi_{Dv} & \xi_{\beta v} & \xi_{\varepsilon v} \end{bmatrix}^T, \\ S(\lambda_v) &= \begin{bmatrix} D_v = \sqrt{x_v^2 + y_v^2 + z_v^2} \\ \beta_v = \arctg\left(\frac{x_v}{y_v}\right) + \frac{\pi}{2} (2 - \operatorname{sgn} x_v - \operatorname{sgn} x_v \operatorname{sgn} y_v) \\ \varepsilon_v = \arctg\left(\frac{x_v - z_v}{\sqrt{x_v^2 + y_v^2}}\right) \end{bmatrix}, \\ \Gamma_{\xi\ рлс} &= \begin{bmatrix} \sigma_D & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\beta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varepsilon \end{bmatrix}, \quad n_{рлс\ v} = \begin{bmatrix} n_{Dv} & n_{\beta v} & n_{\varepsilon v} \end{bmatrix}^T,\end{aligned}$$

где $\sigma_D, \sigma_\beta, \sigma_\varepsilon$ – среднеквадратические ошибки измерения сферических координат в РЛС;

$n_{Dv}, n_{\beta v}, n_{\varepsilon v}$ – независимые стандартные гауссовские случайные величины.

Так как в данном случае уравнение наблюдения нелинейно, то оптимальным по критерию минимума $\sigma_{x\ рлс}, \sigma_{y\ рлс}, \sigma_{z\ рлс}$ является алгоритм фильтрации Стратоновича [10], который практически реализовать тяжело. Поэтому применительно к решаемой задаче был реализован квази-оптимальный расширенный (линеаризованный) фильтр Калмана, отличающийся от линейного фильтра Калмана следующими уравнениями [10]:

$$\hat{\lambda}_v = \tilde{\lambda}_v + \mathbf{K}_v \left(\xi_{\text{рлс } v} - S(\tilde{\lambda}_v) \right),$$

где

$$\mathbf{K}_v = \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}_v^T \left(\mathbf{H}_v \tilde{\mathbf{R}}_v \mathbf{H}_v^T + \Gamma_{\xi \text{ рлс}} \Gamma_{\xi \text{ рлс}}^T \right)^{-1},$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_v = \mathbf{F} \mathbf{R}_{v-1} \mathbf{F}^T + \Gamma_{\lambda} \Gamma_{\lambda}^T,$$

$$\mathbf{R}_v = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_v \mathbf{H}_v) \tilde{\mathbf{R}}_v,$$

а матрица пересчета изменений вектора состояния в изменения вектора наблюдения имеет вид [13]

$$\mathbf{H}_v = \begin{bmatrix} \frac{\tilde{x}_v}{\tilde{D}_v} & \frac{\tilde{y}_v}{\tilde{D}_v} & \frac{\tilde{z}_v}{\tilde{D}_v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tilde{y}_v}{\tilde{D}_{\Gamma v}^2} & -\frac{\tilde{x}_v}{\tilde{D}_{\Gamma v}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\tilde{x}_v \tilde{z}_v}{\tilde{D}_v^2 \tilde{D}_{\Gamma v}} & -\frac{\tilde{y}_v \tilde{z}_v}{\tilde{D}_v^2 \tilde{D}_{\Gamma v}} & \frac{\tilde{D}_{\Gamma v}}{\tilde{D}_v^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $\tilde{D}_v = \sqrt{\tilde{x}_v^2 + \tilde{y}_v^2 + \tilde{z}_v^2}$ – прогнозируемое с предыдущего шага фильтрации значение наклонной дальности до воздушного объекта,

$\tilde{D}_{\Gamma v} = \sqrt{\tilde{x}_v^2 + \tilde{y}_v^2}$ – прогнозируемое с предыдущего шага фильтрации значение горизонтальной дальности до воздушного объекта.

Совокупность рассмотренных выше фильтра навигационных данных (фильтра Калмана) и фильтра радиолокационных данных (расширенного фильтра Калмана) является третьим фильтром, используемым в алгоритме отождествления, – комплексным фильтром (рис. 1).

Работу комплексного фильтра можно пояснить с помощью временной диаграммы (рис. 2).

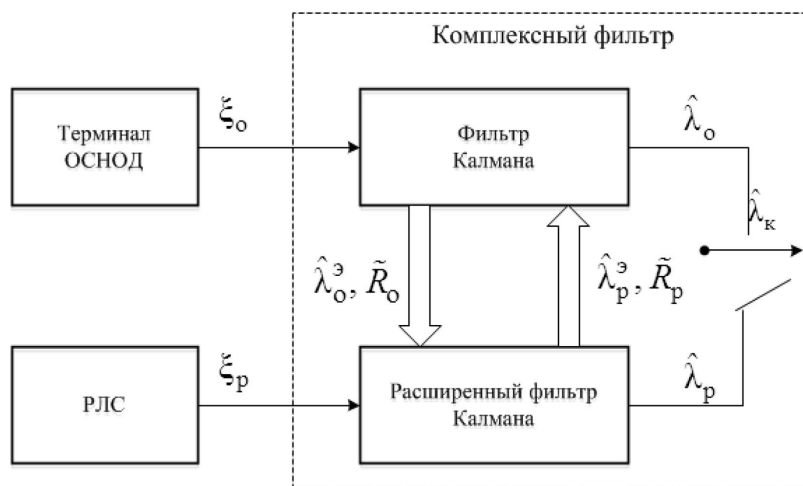


Рис. 1. Структурная схема комплексного фильтра

Fig. 1. Block diagram of a complex filter

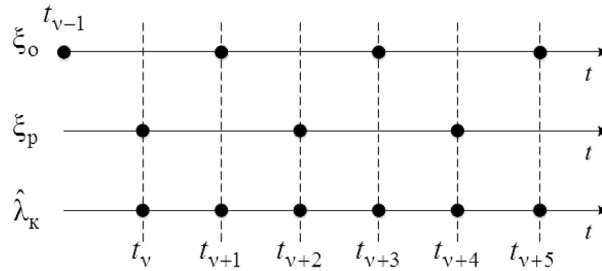


Рис. 2. Временная диаграмма работы комплексного фильтра

Fig. 2. Timing diagram of complex filter operation

В момент времени t_{v-1} из $v-1$ отсчета наблюдения ξ_0 в фильтре Калмана формируется экстраполированная оценка вектора состояния $\hat{\lambda}_0^3$, кроме этого рассчитывается корреляционная матрица ошибок прогноза $\tilde{R}_0$. Полученные $\hat{\lambda}_0^3$ и $\tilde{R}_0$ передаются в расширенный фильтр Калмана.

В момент времени t_v на вход расширенного фильтра Калмана поступает v отсчет ξ_p от РЛС. На основе этого отсчета и $\hat{\lambda}_0^3$, $\tilde{R}_0$ расширенный фильтр Калмана формирует оценку вектора состояния $\hat{\lambda}_p$, которая подается на выход комплексного фильтра. Полученные $\hat{\lambda}_p^3$ и $\tilde{R}_p$ передаются в фильтр Калмана для обработки $v+1$ отсчета наблюдения ξ_0 . В результате обработки сформируются $\hat{\lambda}_0$, $\hat{\lambda}_0^3$, $\tilde{R}_0$.

Таким образом, на выход комплексного фильтра попеременно будут поступать оценки $\hat{\lambda}_p$ и $\hat{\lambda}_0$.

Характеристики алгоритма бесстробового отождествления траекторий

При использовании программной реализации алгоритма бесстробового отождествления траекторий получены в результате статистического имитационного моделирования значения интервала разрешения при координатно-связном опознавании в зависимости от дальности до опознаваемого объекта (табл. 1) при $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 50$ м (измерения горизонтальных составляющих скорости не использовались); $\sigma_p = \sigma_e = 0,02^\circ$; $\sigma_D = 5$ м; заданной вероятности правильного отождествления чужого объекта со своим 0,96 при фиксированной вероятности правильного отождествления своего объекта 0,97. В алгоритме отождествления использовались по три точки каждой из отождествляемых траекторий – всего шесть точек в комплексном фильтре (рис. 2).

Для сравнения приведены результаты моделирования аналогичного алгоритма отождествления при радиолокационном опознавании (отождествляются данные потребителя и данные радиолокационного запросчика с $\sigma_p = \sigma_e = 0,2^\circ$; $\sigma_D = 300$ м).

Таблица 1. Характеристики бесстробового отождествления

Table 1. Characteristics of strobeless identification

D , км	20	30	40	50	100	150	200	250
$D_{сч\ КСО}$, м	154,1	158	161,8	164,9	170,9	174,6	177,9	183,8
$D_{сч\ РЛО}$, м	870,2	896,7	926,6	955,8	1007,8	1034,2	1048,1	1063,6

Как видно из данных табл. 1, в рассмотренном диапазоне дальностей способность системы по разрешению «своего» и «чужого» объектов с использованием алгоритма бесстробового отождествления при координатно-связном опознавании примерно в 6 раз выше, чем при радиолокационном опознавании.

В табл. 2 показан выигрыш бесстробового алгоритма отождествления при координатно-связном опознавании по сравнению с отождествлением в стробах, когда решение о «своем» объекте формируется при совместном (по всем отождествляемым координатам) попадании оценок координат своего объекта, сформированных средством опознавания, в стробы, центры которых выставлены по оценкам координат опознаваемого объекта, сформированным потребителем информации опознавания.

Из данных табл. 2 следует, что по разрешающей способности координатно-связное опознавание при использовании алгоритма отождествления траекторий обеспечивает выигрыш в 6–20 раз относительно радиолокационного опознавания с отождествлением в стробах.

В табл. 3 приведены значения интервала разрешения при бесстробовом отождествлении траекторий воздушных объектов, формируемых: при координатно-связном опознавании по данным от средства координатно-связного опознавания с $\sigma_x = \sigma_y = 10$ м, $\sigma_z = 100$ м, $\sigma_{V_x} = 0,5$ м/с, $\sigma_{V_y} = 0,5$ м/с и от РЛС радиотехнических войск (РТВ) типа 55Ж6МЕ с $\sigma_\beta = 10'$, $\sigma_\epsilon = 12'$, $\sigma_D = 90$ м [14], при радиолокационном опознавании – от средства радиолокационного опознавания с $\sigma_\beta = 2^\circ$, $\sigma_\epsilon = 30^\circ$, $\sigma_D = 500$ м и от РЛС типа 55Ж6МЕ.

Полученные результаты показывают, что при бесстробовом отождествлении с РЛС РТВ типа 55Ж6МЕ выигрыш координатно-связного опознавания по сравнению с радиолокационным составляет примерно 18 раз.

Представленные выше характеристики отождествления получены в предположении, что расстояние между своим и чужим объектами распределено равномерно по всем трем про-

Таблица 2. Характеристика бесстробового отождествления в сравнении с отождествлением в стробах

Table 2. Characteristics of strobeless identification in comparison with identification in strobes

D , км	20	30	40	50	100	150	200	250
$D_{сч\text{ РЛО в стробах}}$, м	943,6	1000	1074	1162,2	1730,6	2394,9	3093,9	3808,6
$D_{сч\text{ КСО1 в стробах}}$, м	260,7	262,77	265,65	269,3	298	340,49	392,33	450,3
$D_{сч\text{ КСО2 при бесстробовом отождествлении}}$, м	154,1	158	161,8	164,9	170,9	174,6	177,9	183,8

Таблица 3. Характеристики бесстробового отождествления с РЛС РТВ типа 55Ж6МЕ

Table 3. Characteristics of strobeless identification with RTV type 55Zh6ME radar

D , км	20	30	40	50	100	150	200	250
$D_{сч\text{ КСО}}$, м	286,4	315,6	353,1	399	675,5	973,5	1284	1601,5
$D_{сч\text{ РЛО}}$, м	23678	24258	24696	25181	26187	26820	27430	28970

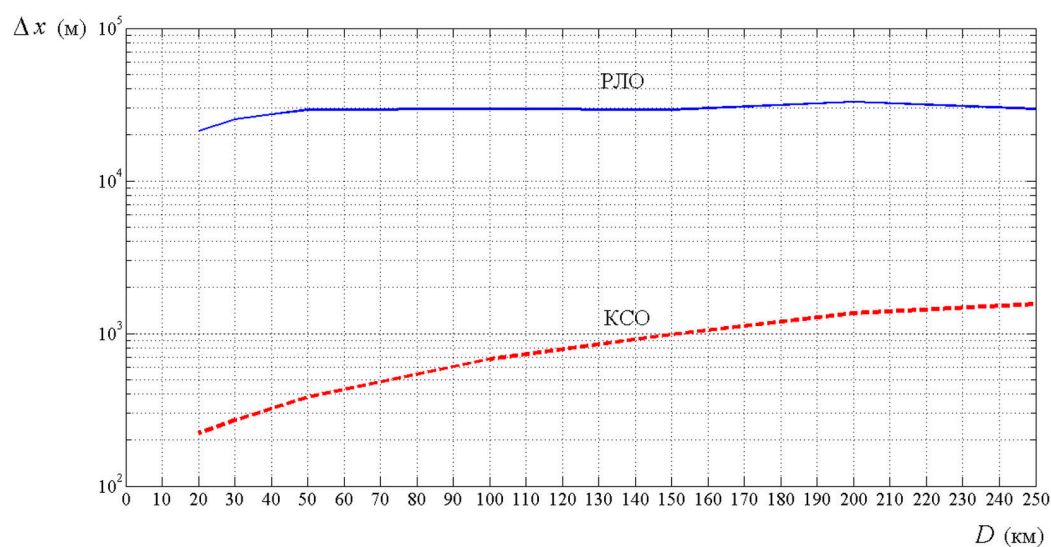


Рис. 3. Интервал разрешения по координате X при бесстробовом отождествлении для координатно-связного и радиолокационного опознавания

Fig. 3. Resolution interval along the x coordinate for strobeless identification for coordinate-connected and radar identification

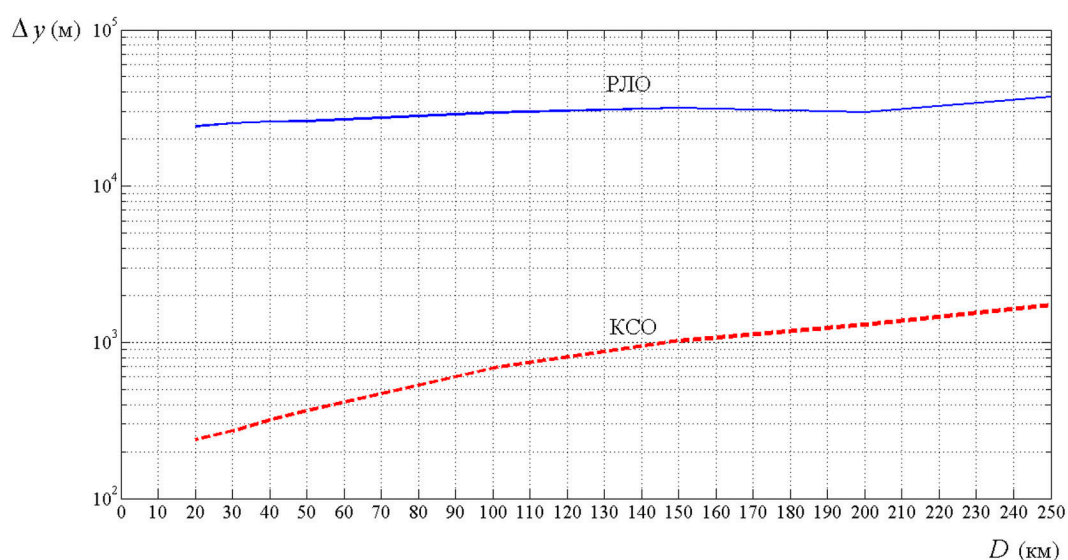


Рис. 4. Интервал разрешения по координате Y при бесстробовом отождествлении для координатно-связного и радиолокационного опознавания

Fig. 4. Resolution interval along the y coordinate for strobeless identification for coordinate-connected and radar identification

странственным координатам. На графиках рис. 3, 4 представлены зависимости интервалов разрешения по отдельным координатам от дальности при бесстробовом отождествлении для координатно-связного и радиолокационного опознавания. Характеристики отождествляемых средств такие же, как и для табл. 3.

Заключение

Таким образом, в работе получены характеристики алгоритма бесстробового отождествления траекторий воздушных объектов, синтезированного по методу, основанному на теории оптимальной фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов. Полученные характеристики отождествления при координатно-связном опознавании свидетельствуют о том, что по разрешающей способности координатно-связное опознавание обеспечивает выигрыш до 20 раз относительно радиолокационного опознавания с отождествлением в стробах. Если при радиолокационном опознавании также используется бесстробовое отождествление, то выигрыш координатно-связного опознавания составляет 6–18 раз в зависимости от дальности и характеристик потребителя информации опознавания (РЛС).

Список литературы / References

- [1] Аврамов А. В., Жиронкин С. Б., Черваков В. О. Интегрированные системы опознавания: направления разработки на основе методов координатно-связного и комплексного опознавания. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2017, 1, 35–41. [Avramov A. V., Zhironkin S. B., Chervakov V. O. Integrated identification systems: directions of development based on coordinate-connected and complex identification methods. *Advances in modern radio electronics*, 2017, 1, 35–41 (in Russian)]
- [2] Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012, 260 с. [Tyapkin V. N., Garin E. N. *Methods for determining the navigation parameters of mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation system: monograph*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2012, 260 p. (in Russian)]
- [3] Тяпкин В. Н., Виноградов А. Д. Детерминированный подход к решению задачи определения координат и угловой ориентации бортовой пеленгаторной антенны по результатам радиопеленгования радиоориентиров. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(3), 289–310. [Tyapkin V. N., Vinogradov A. D. Deterministic approach to solving the problem of determining the coordinates and angular orientation of the onboard direction-finding antenna based on the results of direction finding of radio landmarks. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*, 2020, 13(3), 289–310 (in Russian)]
- [4] Жиронкин С. Б., Близняк А. А., Кучин А. А. Помехоустойчивость запросного канала опознавания с широкополосными сигналами и корректирующими кодами в условиях импульсных шумовых и внутрисистемных помех. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2019, 12(6), 673–682. [Zhironkin S. B., Bliznuk A. A., Kuchin A. A. A noise stability of the request channel of an identification with broadband signals and correcting codes in the conditions of pulse noise and intersystem hindrances. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*, 2019, 12(6), 673–682 (in Russian)]
- [5] Жиронкин С. Б., Близняк А. А., Пшеницын А. А., Лютиков И. В. Оценка параметров смеси сигнала с шумом по наблюдению выходов многоканального устройства различения ортогональных сигналов при когерентном приеме. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(3), 361–369. [Zhironkin S. B., Bliznuk A. A., Pshenitsyn A. A.,

Lyutikov I. V. Estimation of the parameters of the signal-noise mixture by observing the outputs of a multichannel device for discriminating orthogonal signals with coherent reception. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*, 2020, 13(3), 361–369 (in Russian)]

[6] Бердышев В.П., Близнюк А.А., Жиронкин С.Б., Пшеницын А.А. Помехоустойчивость канала передачи данных с ППРЧ при мягком декодировании с использованием оценок спектральной плотности мощности помехи. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(7), 343–354. [Berdyshev V.P., Bliznyuk A. A., Zhironkin S. B., Pshenitsyn A. A. Noise immunity of a data transmission channel with frequency hopping during soft decoding using estimates of the spectral density of the interference power. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology*, 2020, 13(7), 343–354 (in Russian)]

[7] Жиронкин С.Б., Пшеницын А.А., Близнюк А.А. Оптимизация параметров каскадного кода по критерию максимума граничного значения полосы частот помехи и выбор алгоритма декодирования. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2021, 14(7), 820–829. [Zhironkin S. B., Pshenitsyn A. A., Bliznyuk A. A. Optimization of the cascade code parameters by the criterion of the boundary value of the interference band and the selection of the decoding algorithm. *Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology*, 2021, 14(7), 820–829 (in Russian)]

[8] Тяпкин В.Н., Фомин А.Н., Гарин Е.Н. и др. *Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. Под ред. В.Н. Тяпкина*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011, 536 с. [Tyapkin V.N., Fomin A.N., Garin E.N. *Fundamentals of building radar stations of the radio engineering troops. Ed. by V.N. Tyapkin*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2011, 536 p. (in Russian)]

[9] Жиронкин, С.Б., Богданов А.В., Черваков В.О. Метод синтеза оптимальных алгоритмов отождествления измерений векторов состояния подвижных объектов различными системами наблюдения на основе теории фильтрации дискретно-непрерывных марковских случайных процессов. *Сборник статей по материалам XXV Всероссийской НТК школы семинара: Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах*. Сочи: РАН, 2014, 619 с. [Zhironkin S. B., Bogdanov A. V., Chervakov V. O. Synthesis method of optimal algorithms for identifying measurements of state vectors of moving objects by various observation systems based on the theory of filtering discrete-continuous Markov random processes. *Collection of articles based on materials of the XXV All-Russian Scientific and Technical Complex of the Seminar School: Transmission, reception, processing and display of information about fast processes*. Sochi, RAN, 2014, 619 p. (in Russian)]

[10] Тихонов В.И., Харисов В.Н. *Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем*. М.: Радио и связь, 1991, 320 с. [Tikhonov V.I., Harisov V.N. *Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems*. Moskva, Radio i svyaz, 1991, 320 p. (in Russian)]

[11] Ярлыков М.С. *Статистическая теория радионавигации*. М.: Радио и связь, 1985 [Yarlykov M. S. *Statistical theory of radio navigation*. Moskva, Radio i svyaz, 1985 (in Russian)]

[12] Богданов А.В., Голубенко В.А., Княжев А.И., Филонов А.А. Алгоритм совместного траекторного сопровождения-распознавания функционального назначения самолетов, летящих в сомкнутом боевом порядке. *Радиотехника*, 2008, 10, 4–13. [Bogdanov A. V., Golubenko V. A.,

Knyagev A.I., Filonov A.A. Algorithm for joint trajectory tracking-recognition of the functional purpose of aircraft flying in close combat formation. *Radio engineering*, 2008, 10, 4–13 (in Russian)]

[13] Ширман, Я.Д., Манжос В.И. *Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех*. М.: Радио и связь, 1981. [Shirman Ya.D., Manzhos V.I. *Theory and technique of processing radar information against the background of interference*. Moskva, Radio i svyaz, 1981 (in Russian)]

[14] 55Ж6МЕ «Небо-МЕ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-690/html4> – Заглавие с экрана. [55Zh6ME «Nebo-ME» [Electronic resources] – Access: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-690/html4>]

DOI: 10.17516/1999-494X-0393

УДК 528.8

Construction and Analysis of Crops Maps Based on Unmanned Survey Data in Different Vegetative Stages

Dmitrii V. Emelyanov^{*a}, Irina Yu. Botvich^a,
Vladimir K. Ivchenko^b and Anatolii P. Shevyrnogov^a

^a*Institute of Biophysics SB RAS*

Krasnoyarsk, Russian Federation

^b*Krasnoyarsk State Agrarian University*

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 14.03.2022, received in revised form 18.04.2022, accepted 24.04.2022

Abstract. An assessment was made of changes in the height of vegetation of agricultural crops. The object of the study was agricultural crops – wheat and barley, located on the territory of the educational experimental farm “Minderlinskoe”, Sukhobuzimsky district, Krasnoyarsk region. The work was based on unmanned survey data. The measurements were taken with the ZENMUSE X5S camera mounted on the DJI Matrice 210 RTK V2 unmanned aerial vehicle. Maps of the spatial distribution of plant heights of barley and wheat crops was constructed. The spatial resolution of the obtained maps was 2.7 cm. An assessment of the growth dynamics of crop plants was carried out using remote sensing methods. The effectiveness of the use of unmanned aerial vehicles for determining the heights of agricultural crops is shown. The possibility of revealing intra-field heterogeneity of crops at various stages of growth was established.

Keywords: maps of plant heights, UAV, agricultural fields, ZENMUSE X5S.

Citation: Emelyanov, D.V., Botvich, I.Y., Ivchenko, V.K., Shevyrnogov, A. P. Construction and analysis of crops maps based on unmanned survey data in different vegetative stages. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 308–317. DOI: 10.17516/1999-494X-0393.

Построение и анализ карт высот растительности агроценозов по данным беспилотной съемки в различные фазы вегетации

Д. В. Емельянов^а, И. Ю. Ботвич^а,
В. К. Ивченко^б, А. П. Шевырногов^а

^аИнститут биофизики СО РАН

Российская Федерация, Красноярск

^бКрасноярский государственный аграрный университет

Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В ходе проведенного исследования выполнена оценка изменений высоты растительности посевов сельскохозяйственных культур. Объектами исследования являлись яровая пшеница и ячмень, расположенные на территории учебно-опытного хозяйства “Миндерлинское” Сухобузимского района Красноярского края. Работа основывается на данных беспилотной съемки. Измерения выполнены камерой ZENMUSE X5S, установленной на беспилотном воздушном судне DJI Matrice 210 RTK V2. Построены карты пространственного распределения высот растений посевов ячменя и яровой пшеницы. Пространственное разрешение полученных карт составляет 2,7 см. Проведена оценка динамики роста и развития сельскохозяйственных культур методами дистанционного зондирования. Показана эффективность применения беспилотных воздушных судов для определения высоты сельскохозяйственных культур. Установлена возможность выявления внутрипольной неоднородности посевов на различных стадиях роста и развития культурных растений.

Ключевые слова: карта высот растений, BBC, сельскохозяйственные угодья, ZENMUSE X5S.

Цитирование: Емельянов, Д. В. Построение и анализ карт высот растительности агроценозов по данным беспилотной съемки в различные фазы вегетации / Д. В. Емельянов, И. Ю. Ботвич, В. К. Ивченко, А. П. Шевырногов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 308–317. DOI: 10.17516/1999-494X-0393.

Введение

Оценка высоты растений сельскохозяйственных культур имеет большое значение для контроля как нормальной сезонной динамики, так и отклонений от нее в связи с негативным влиянием целого ряда факторов. Определение высоты растений на больших площадях наземным методом крайне затруднительно. Особенно трудновыполнима оценка внутрипольной неоднородности посевов. Картосхемы внутрипольной неоднородности могут эффективно использоваться при внедрении технологий точного земледелия, для определения локации и количества необходимой подкормки удобрениями, при оценке повреждений посевов вредителями, болезнями, сорняками и соответствующей корректировке технологических операций при возделывании культурных растений, оценке величины потерь будущего урожая из-за неблагоприятных погодных-климатических условий, наличии и местах расположения зон полегания посевов, что также необходимо учитывать при уборке урожая и т.д.

В течение вегетационного периода изменчивость высоты посевов дает важную информацию о здоровье растений, их росте и реакции на воздействие окружающей среды [1, 2]. Высо-

та растений как фактор оценки состояния посевов используется во множестве литературных источников, как отечественных, так и зарубежных [3–6]. В Xiongze Han и др. [3] показана возможность использования беспилотных воздушных судов (БВС) для оценки высоты растений с высокой точностью на относительно большом сельскохозяйственном поле. Корреляция между оценками, основанными на БВС, и контактными данными была сильной во все даты измерений ($R^2 > 0.80$). Однако было обнаружено, что возможно снижение среднеквадратичной ошибки (RMSE) оценок высоты объекта на основе данных БВС примерно на 20 % при использовании многоуровневых наземных контрольных точек (GCP). В Virginia E. [6] с помощью цифровой 3D-реконструкции растительного покрова показана разница в высоте растений при резких изменениях уклона, связанных с повреждениями. Показана возможность определения площадей поврежденных посевов. Предлагаемые методы могут быть использованы с применением БВС.

Цель исследований: изучение изменений высоты растений посевов сельскохозяйственных культур по данным беспилотных воздушных судов (БВС).

Задачи исследований:

- проведение измерений высоты растений контактными и дистанционными методами;
- построение карты пространственного распределения высот растений посевов ячменя и яровой пшеницы.

Объект и методы исследований. Исследования проводились в учебно-опытном хозяйстве «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края в течение периода вегетации 2021 г. Опытное поле, состоящее из отдельных участков, представлено на рис. 1. Внесение удобрений производилось по северной части каждой полосы (шириной 10 м), южная оставалась без удобрений [7, 8]. Каждая полоса засеяна определенным видом сельскохозяйственных культур. В работе представлен анализ результатов обработки данных по полосе № 1, засеянной яровой пшеницей сорта «Новосибирская-15», № 2 – яровой пшеницей сорта «Новосибирская-15», № 3 – ячменем сорта «Ача». Все полосы разделены на варианты в соответствии с четырьмя видами обработки почв: «а» – вспашка (ПН-5–35 на 20–22 см); «б» – плоскорезная обработка (КПШК-3,8 на 20–22 см); «с» – поверхностная обработка (дискатор БДШ-5,6 на 8–10 см); «д» – прямой посев при нулевой обработке почвы (Агратор 4,8). В работе представлены данные по обработке «а» – вспашка.

Исследование основывается на данных, полученных с помощью беспилотного воздушного судна DJI Matrice 210 RTK V2, с полезной нагрузкой в виде камер ZENMUSE X5S. БВС имеет систему RTK, которая позволяет достигать точности географической привязки до 2 см.

Камера ZENMUSE X5S дает возможность получения цифровых изображений с разрешением 5120x2880 пикселей, что приводит к достижению высокой детализации изображения с больших высот. На основе полученных данных произведено построение 3D-модели местности. Данная возможность позволяет получать информацию о высоте объектов (в том числе растений), состоянии рельефа и т.д.

Построение полетных заданий выполнялось в программном обеспечении DJI Pilot, поставляемом в комплекте с DJI Matrice 210 RTK V2. Высота полета от точки взлета 60 м. Каждая съемка проводилась в пять этапов и состояла из двух видов: надирная и наклонная. Во время первого этапа камера устанавливалась в надир. В последующие этапы наклон камеры состав-



Рис. 1. Месторасположение опытного поля учхоза “Миндерлинское” и его структура по видам обработки, культурам

Fig. 1. Study site (educational experimental farm “Minderlinskoe”) and its structure by types of treatment

для 70° от вертикали, но менялось направление камеры: северное, восточное, южное, западное. Надирная съемка позволяет построить ортофотоплан и цифровую модель местности, однако для создания 3D-модели требуются измерения с наклоном камеры. Благодаря этому хорошо видны морфологические особенности растений. Также такие комбинированные съемки позволяют определять высоты объектов. Пространственное разрешение изображений составило 2,7 см.

Обработка полученных данных проводилась в специализированной программе AgisoftMetashape и QGIS.

Для построения карты высот растительности посевов (cropsurfacemodels – CSMs) использовались программы AgisoftMetashape и QGIS. В AgisoftMetashape после построения плотного облака точек вручную классифицировались участки с растительностью и незасеянной почвой. Далее отдельно строились цифровые модели местности (ЦММ) с использованием облака точек растительности (DSM – digitalsurfacemodel) и без нее (DTM – digitalterrainmodel). В итоге за каждую дату получено две ЦММ: с растительным покровом и без растительного покрова. В QGIS при помощи калькулятора растров из ЦММ с растительностью (DSM) вычиталась ЦММ без растительности (DTM) для получения растра со значениями высоты (CSMs).

CSM представляет собой множество параллелепипедов с одинаковым основанием, но разной высотой. Для вычисления занимаемого объема растительностью использовалась формула для расчета объема параллелепипеда

$$V = a * b * h,$$

где a – длина, b – ширина, h – высота параллелепипеда. Так как в данном случае длина и ширина параллелепипеда являются разрешением изображения – 2,7 см, площадь основания каждого параллелепипеда составляет 7,29 см². В программе QGIS при помощи инструмента «Калькулятор раstra» растр CSM умножался на 7,29 для вычисления объема каждого параллелепипеда. Из полученного раstra при помощи инструмента «Зональная статистика» извлекалась сумма значений по исследуемому участку.

Результаты исследований

На рис. 2 представлены карты пространственного распределения высот растений посевов пшеницы и ячменя в разные фазы вегетации (с 16 июня по 30 сентября 2021 г.) с пространственным разрешением 2.7 см. В начале периода вегетации, когда высота растений еще не достигла 10 см, затруднительно разделение растительного покрова от почвенного. По мере нарастания фитомассы расчет ЦММ происходит с наименьшей ошибкой, следовательно, ошибка определения высоты становится меньше. На рис. 2 видно, что на всех трех исследуемых полосах высота культур на удобренном фоне выше. Также отчетливо видны участки с высокими и низкими значениями высоты во все фазы вегетации.

На карте пространственного распределения высоты растений посевов от 30 сентября 2021 г. полосы оранжевого цвета показывают технологические участки уборки урожая комбайном Террион. Прямое комбайнирование Террионом проводится в 4–6-кратной повторности для учета урожая зерновых культур.

На рис. 2 хорошо видна изменчивость высот посевов в течение вегетационного периода. Карты пространственного распределения высоты растений позволяют оценивать внутрипольную неоднородность посевов. На полосе № 1 возрастает контрастность продольных полос к 9–27 августа 2021 г., на полосе № 2 ярче с 22.07.2021 по 27.08.2021 в восточной части участка проявляется устойчивая структура различных высот малого размера. На полосе № 3 структура, появившаяся 2.07.2021–22.07.2021 в период роста, к 9.08.2021, 27.08.2021 исчезает, что говорит о неравномерности темпов роста посевов ячменя на различных участках поля.

Расчет значений средней высоты растений по контурам 1, 2, 3 с учетом разделения на удобренный/неудобренный фон показал, что наибольшая высота растений зафиксирована 9 августа (рис. 3). Самые высокие значения зафиксированы на удобренных фонах: пшеница по кукурузе – 69 см, пшеница по пару – 66 см, ячмень – 68 см. В этот момент можно отследить разницу между удобренным и неудобренным фоном. Наибольшая разница зафиксирована на пшенице по кукурузе – 19 см, ячменю – 14 см, пшенице по пару – 5 см.

Использование карт высот растительности позволяет проводить расчет объема, занимаемого растительностью. Проведенные расчеты позволили установить объем, занимаемый растительностью, с учетом фона – удобренного (неудобренного) 9 августа 2021 г. (табл. 1).

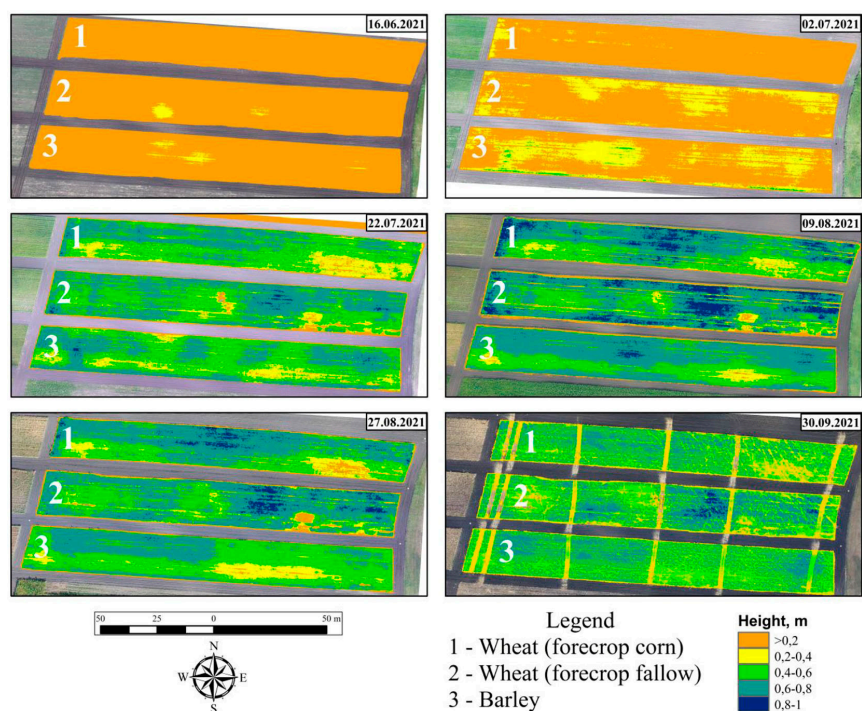


Рис. 2. Карта пространственного распределения высоты растений посевов сельскохозяйственных культур в разные фазы вегетации с пространственным разрешением 2.7 см. Периоды вегетации: 16.06.2021 – кушение, 02.07.2021 – начало выхода в трубку, 22.07.2021 – колошение, 09.08.2021, 27.08.2021, 30.09.2021 – созревание

Fig. 2. CSM map in different phase of vegetation with 2.7 cm spatial resolution. Vegetation stages: – 16.06.2021- tillering, 02.07.2021- stem elongation, 22.07.2021 – earing, 09.08.2021, 27.08.2021, 30.09.2021 – maturation

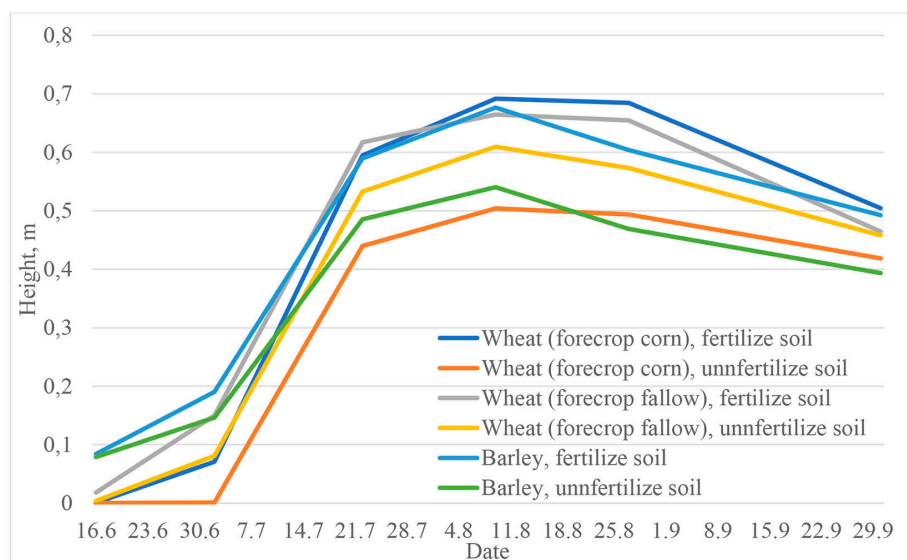


Рис. 3. Изменение высоты растений посевов зерновых культур в течение периода вегетации

Fig. 3. Change in cereal crops height during the vegetation season

Таблица 1. Объем, занимаемый растительностью 9 августа 2021 г.

Table 1. Volume occupied by vegetation on August 9, 2021

№ полоса	Объем, занимаемый растительностью (фон удобренный), м ³	Объем, занимаемый растительностью (фон неудобренный), м ³
1	918.2	644.4
2	979.7	836.2
3	938.4	814.7

Проведен анализ динамики высот растений на поперечных срезах полос 1–3 (рис. 4–6). Срезы выполнены на расстоянии 0,5 м от западного края посева. Установлено, что внутри срезов по полосам 1–3 наблюдается ряд особенностей, максимальные значения высот для различных посевов различны: полоса № 1 (пшеница по кукурузе) – 0,7–0,9 м; полоса № 2 (пшеница по пару) – 0,6–0,75 м; полоса № 3 (яровой ячмень) – 0,5–0,7 м. По приведенным срезам видно, что основной рост идет от 0 до максимума с 16 июня по 9 августа 2021 г. Наблюдаются устойчивые во времени участки с выпадением высот вниз (рис. 6, положение 14,6). Это может быть обусловлено свойствами почвы или локальными негативными условиями. На срезах такие особенности проявляются как точки, на картосхемах – как локальные участки. Отличия динамики высот по типам посевов показывает, что на полосе № 1 более высокое значение максимума; на полосе № 2 быстрее выходит на максимум (22 июля уже почти максимум). Динамика нарастания надземной фитомассы ячменя существенно отличается от таковой яровой пшеницы. Максимальные значения этого показателя синхронно меняются на фоне убранных растений, что может отражать уровень почвенного плодородия.

Установлена особенность влияния наличия удобренного фона на высоту растений. На полосах № 1 и 2, засеянных яровой пшеницей, различия на удобренном и неудобренном фоне незначительны. Максимальные отличия по средней высоте зафиксированы 16 июня во время кущения 46,4 и 38,6 % соответственно. В целом в период прохождения растениями таких фаз роста и развития, как выход в трубу, колошение и созревание, различие по высоте на разных фонах, не превышает 6 %.

Наиболее отличительным является изменение высоты растений на полосе № 3, засеянной ячменем. Во время кущения высота растений на разных фонах отличается незначительно (на 1,3 %). В последующие фазы роста и развития растений ячменя разница по высоте составляет от 15 до 61 %. Величина среднеквадратического отклонения на неудобренном фоне с 22 июля существенно не меняется и остается высокой.

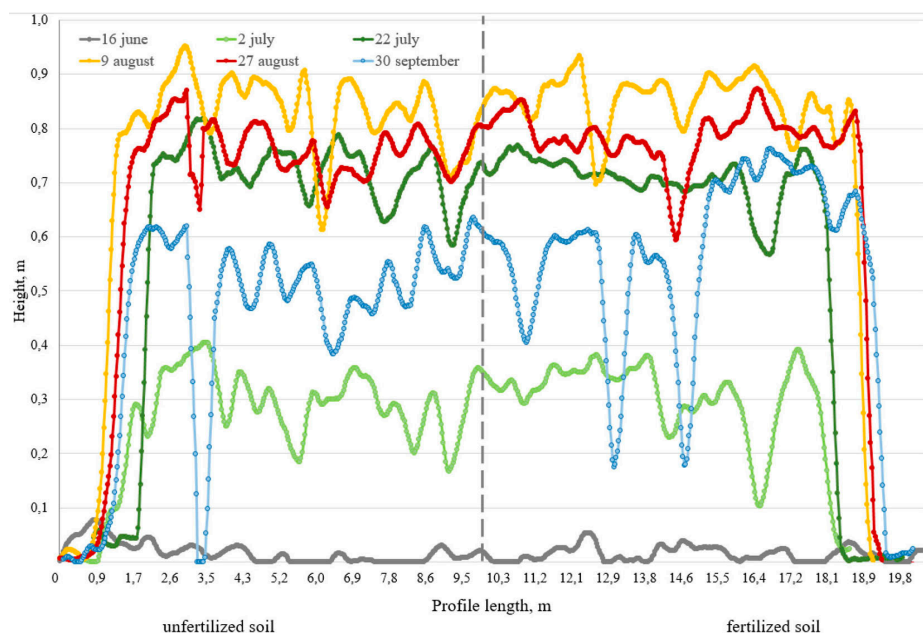


Рис. 4. Профиль высот поперечного среза посева яровой пшеницы, высеваемой после кукурузы, полоса № 1

Fig. 4. Height profile of a cross-section of wheat (forecrop corn), line 1

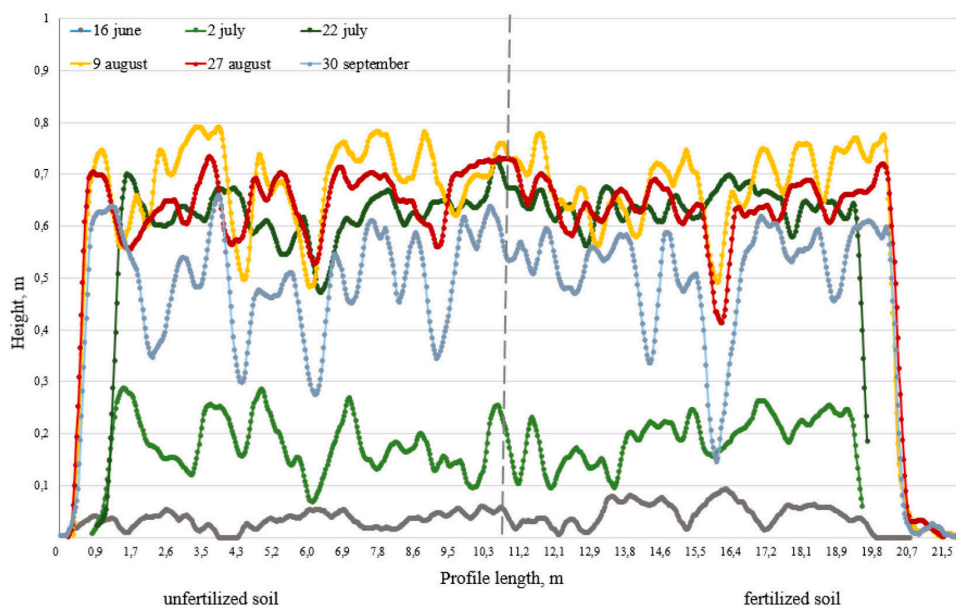


Рис. 5. Профиль высот поперечного среза посева яровой пшеницы, высеваемой после сидерального пара, полоса № 2

Fig. 5. Height profile of a cross-section of wheat (forecrop fallow), line 2

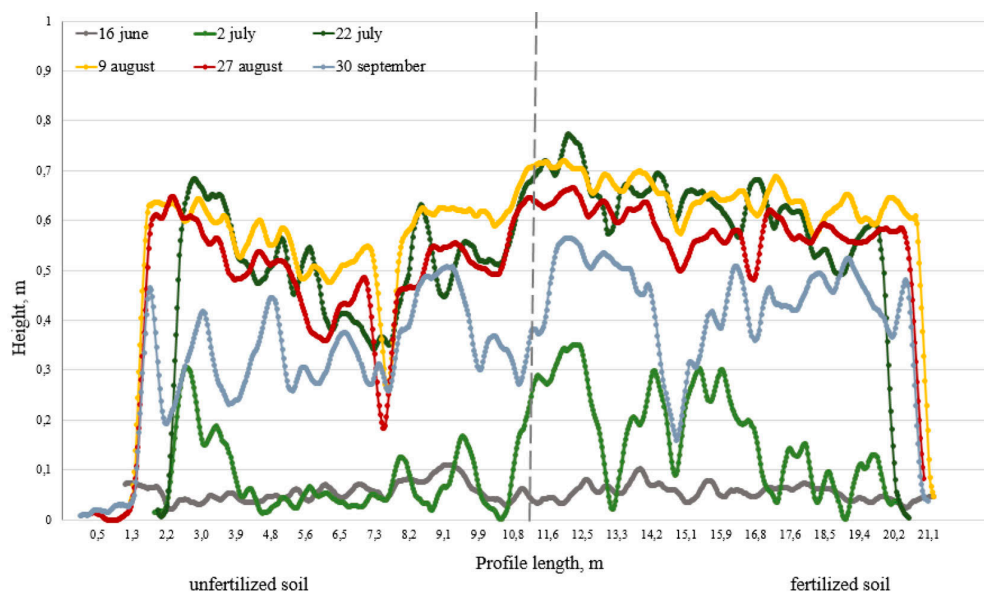


Рис. 6. Профиль высот поперечного среза посева ячменя, полоса № 3

Fig. 6. Height profile of a cross-section of barley, line 3

Выводы

В результате исследований проведено изучение изменений высоты растений посевов зерновых культур в течение периода вегетации. Построены карты пространственного распределения высоты растений посевов сельскохозяйственных культур в разные фазы вегетации. Представлена оценка динамики роста яровой пшеницы и ячменя методами дистанционного зондирования. Показана эффективность применения беспилотных летательных аппаратов для определения высот растений в посевах сельскохозяйственных культур. Установлена возможность выявления внутрипольной неоднородности посевов на различных стадиях роста и развития сельскохозяйственных культур.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что разработанную методику можно использовать для мониторинговой оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур с целью дифференцированного внесения минеральных удобрений, выполнения некорневой подкормки посевов в период вегетации, а также для борьбы с вредителями, болезнями и сорняками, прогнозирования уровня урожайности.

Список литературы / References

- [1] Tianjin Xie, Jijun Li, Chenghai Yang, Zhao Jiang, Yahui Chen, Liang Guo, Jian Zhang Crop height estimation based on UAV images: Methods, errors, and strategies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 185, 106155
- [2] Juliane Bendig, Kang Yu, Helge Aasen, Andreas Bolten, Simon Bennertz, Janis Broscheit, Martin L. Gnyp, Georg Bareth Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 39, 79–87

[3] Xiongzhe Han, J. Alex Thomasson, G. Cody Bagnall, N. Ace Pugh, David W. Horne, William L. Rooney, Jinha Jung, Anjin Chang, Lonesome Malambo, Sorin C. Popescu, Ian T. Gates and Dale A. Cope Measurement and Calibration of Plant-Height from Fixed-Wing UAV Images, *Sensors*. 2018. 18, 4092; doi:10.3390/s18124092

[4] Мальчиков Н.О., Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В., Ивченко В. К., Шевырногов А. П. Определение высоты растений сельскохозяйственных культур на основе данных измерений беспилотных воздушных судов, *Вестник КрасГАУ*, 2020, № 12 (165), 46–53 [Malchikov N.O., Botvich I. Yu., Emelyanov D.V., Ivchenko V.K., Shevyrnogov A.P. Determining the height of agricultural crops based on measurements of unmanned aircraft, *The Bulletin of KrasGAU*, 2020, No 12 (165), 46–53 (in Russian)]

[5] Campos, I.; González-Gómez, L.; Villodre, J.; Calera, M.; Campoy, J.; Jiménez, N.; Plaza, C.; Sánchez-Prieto, S.; Calera, A. Mapping within-field variability in wheat yield and biomass using remote sensing vegetation indices. *Precis. Agric.* 2019. 20. 214–236.

[6] Virginia E. Garcia Millan, Cassidy Rankine and G. Arturo Sanchez-Azofeifa Crop Loss Evaluation Using Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles Data, *Remote Sens.* 2020. 12. 981; doi:10.3390/rs12060981

[7] Ивченко В.К., Демьяненко Т.Н., Ильченко И.О., Шевырногов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Ларько А.А., Мальчиков Н.О. Использование наземных спектрофотометрических измерений для выявления влияния приемов основной обработки почвы на процесс нарастания надземной фитомассы яровой пшеницы в зернопаропропашном севообороте. *Вестник КрасГАУ*, 2020, № 1 (154), 3–11 [Ivchenko V.K., Demyanenko T.N., Ilchenko I.O., Shevyrnogov A.P., Botvich I. Yu., Emelyanov D.V., Larko A.A., Malchikov N.O. The use of ground-based spectrophotometric measurements to identify the effect of basic tillage methods on the process of growth of above-ground phytomass of spring wheat in grain-crop rotation, *The Bulletin of KrasGAU*, 2020, No 1 (154), 3–11 (in Russian)]

[8] Ивченко В.К., Демьяненко Т.Н., Шевырногов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Ларько А.А. Оценка агротехнических факторов возделывания ячменя по ресурсосберегающим технологиям с помощью наземной спектрометрии. *Вестник КрасГАУ*, 2019, № 5 (146), 86–93 [Ivchenko V.K., Demyanenko T.N., Shevyrnogov A.P., Botvich I. Yu., Emelyanov D.V., Larko A.A. The assessment of agrotechnical factors of barley cultivation on resource-saving technologies by means of land spectrometry, *The Bulletin of KrasGAU*, 2019, No 5 (146), 86–93 (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0394

УДК 629.124: 681.883

Classification of Signals Using Neural Network Technology

Eugenii A. Storozhok,
Grigorii V. Dorofeev* and Pavel A. Starodubtsev
*Pacific Higher Naval School named after S. O. Makarov
Vladivostok, Russian Federation*

Received 02.02.2022, received in revised form 03.04.2022, accepted 24.04.2022

Abstract. Currently, the threat of sabotage on hydraulic structures (bridges, dams, drilling rigs, etc.) has increased. In this regard, the creation of effective hydroacoustic monitoring systems is an urgent task. The article considers the possibility of solving the problem of signal classification using neural network technology.

Keywords: modeling, neuron, neural network, learning, deterministic signal, harmonics.

Citation: Storozhok, E.A., Dorofeev, G.V., Starodubtsev, P. A. Classification of signals using neural network technology. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 318–324. DOI: 10.17516/1999-494X-0394.

Классификация сигналов с использованием технологии нейронных сетей

Е. А. Сторожок, Г. В. Дорофеев, П. А. Стародубцев
*Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С. О. Макарова
Российская Федерация, Владивосток*

Аннотация. В настоящее время возросла угроза диверсий на гидротехнических сооружениях (мосты, плотины, буровые вышки и т.п.). В связи с этим создание эффективных систем гидроакустического мониторинга является актуальной задачей. В статье рассмотрена возможность решения задачи классификации сигналов с использованием технологии нейронных сетей.

Ключевые слова: нейрон, нейронная сеть, обучение, детерминированный сигнал, гармоники.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: grigory_artem_007@mail.ru

Цитирование: Сторожок, Е. А. Классификация сигналов с использованием технологии нейронных сетей / Е. А. Сторожок, Г. В. Дорофеев, П. А. Стародубцев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 318–324. DOI: 10.17516/1999-494X-0394.

Введение

Реализация нейронной сети для решения какой-либо задачи включает пять основных этапов:

1. Подготовка данных для тренировки сети.
2. Создание сети.
3. Обучение сети.
4. Тестирование сети.
5. Использование сети для решения поставленной задачи [1].

В таблице 1 заданы детерминированные сигналы. Создадим нейронную сеть, которая при поступлении на входы сети гармоник одного из этих сигналов на выходе формирова бы номер сигнала, соответствующий этой гармонике. Для создания сети будем использовать систему Matlab.

Таблица 1. Детерминированные сигналы

Table 1. Deterministic signals

№ п/п	Детерминированные сигналы
1	$\sin(2\pi \cdot 5 \cdot t)$
2	$\cos(2\pi \cdot 3 \cdot t)$
3	$\sin(2\pi \cdot 2 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 20 \cdot t)$
4	$\sin(2\pi \cdot 4 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 40 \cdot t)$
5	$\cos(2\pi \cdot 6 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 30 \cdot t)$
6	$\cos(2\pi \cdot 7 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 28 \cdot t)$
7	$\sin(2\pi \cdot 5 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 15 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 30 \cdot t)$
8	$\sin(2\pi \cdot 4 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 24 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 40 \cdot t)$
9	$\cos(2\pi \cdot 3 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 21 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 63 \cdot t)$
10	$\cos(2\pi \cdot 6 \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot 30 \cdot t) \cdot \sin(2\pi \cdot 54 \cdot t)$

Подготовка данных для тренировки сети

Средствами Matlab создадим массив размерностью $N \times M$, где $N=15$ – количество различных гармоник из табл. 1, M – количество векторов входного массива. Размерность выходного массива будет, соответственно, $1 \times M$. Количество входных и выходных векторов выберем равным $M=100$. Этого достаточно для обучения, а процесс обучения не займет много времени. Ниже приведен фрагмент программы, формирующий массивы входных и выходных векторов.

`t=0:1/4000:1/2;% Формируем вектор времени с шагом 1/4000 с, верхний% предел 1/2 соответствует периоду гармоник с минимальной частотой 2 Гц`

`% Формируем векторы отсчетов сигналов`

```

Y 0=sin(2*pi*5*t);
Y 1=cos(2*pi*3*t);
Y 2=sin(2*pi*2*t).* sin(2*pi*20*t);
Y 3=sin(2*pi*4*t).* sin(2*pi*40*t);
Y 4=cos(2*pi*6*t).* cos(2*pi*30*t);
Y 5=cos(2*pi*7*t).* cos(2*pi*28*t);
Y 6=sin(2*pi*5*t).* sin(2*pi*15*t).* sin(2*pi*30*t);
Y 7=sin(2*pi*4*t).* cos(2*pi*24*t).* sin(2*pi*40*t);
Y 8=cos(2*pi*3*t).*sin(2*pi*21*t).* sin(2*pi*63*t);
Y 9= cos(2*pi*6*t).* cos(2*pi*30*t).* sin(2*pi*54*t);
T=[1:10];
T=[T T T T T T T T T];% Массив выходных векторов (номера сигналов)
n=0.2;% Шум с амплитудой 0.2
Y=Y 0;
noise=0.5*rand(1, length(t))-n;% Создаем шум с амплитудой 0.2
P=mas(Y, t, noise);
P0=P;
Y=Y 1;
noise=0.5*rand(1, length(t))-n;% Создаем шум с амплитудой 0.2
P=mas(Y, t, noise);
P1=P;
.....
PP1=[P0; P1; P2; P3; P4; P5; P6; P7; P8; P9];
.....
PP10=[P0; P1; P2; P3; P4; P5; P6; P7; P8; P9];
PP=[PP1; PP2; PP3; PP4; PP5; PP6; PP7; PP8; PP9; PP10];
PP=PP';% Массив входных векторов (гармоники сигналов)
%Функция mas (Y, t, noise):
function [P] = Untitled (Y, t, noise)
Y=Y+noise;% К сигналу аддитивно добавляем шум
y=fft(Y,4000);% Находим БПФ сигнала
Y=y.*conj(y)/4000;% Находим модули БПФ
P=[Y(2) Y(3) Y(4) Y(5) Y(6) Y(7) Y(15) Y(20) Y(21) Y(24) Y(28) Y(30) Y(40) Y(54) Y(63)]
End

```

Создание сети

Сеть строим с использованием функции newff.

% Построение сети

```
net4=newff(minmax(PP),[15,8,1],{'purelin' 'logsig' 'purelin'},'trainlm');
```

Параметрами функции newff являются:

PP – массив входных векторов;

15 – количество входов (нейронного входного слоя), соответствующее количеству различных гармоник из табл. 1;

8 – количество нейронов скрытого слоя (половина суммы входных и выходных нейронов);

1 – количество выходов;

'purelin' 'logsig' 'purelin' – функции активации нейронов входного, скрытого и выходного слоев соответственно;

'trainlm' – функция обучения.

Обучение сети

Следующий шаг – обучение созданной сети. Перед обучением необходимо задать параметры обучения. Задаем функцию оценки функционирования sse.

```
net.performFcn='sse';
```

В этом случае в качестве оценки вычисляется сумма квадратичных отклонений выходов сети от эталонов. Задаем критерий окончания обучения – значение отклонения, при котором обучение будет считаться законченным:

```
net.trainParam.goal=0.01;
```

Задаем максимальное количество циклов обучения. После того как будет выполнено это количество циклов, обучение будет завершено:

```
net.trainParam.epochs=1000;
```

Теперь можно начинать обучение (рис. 1):

```
[net, tr]=train(net, P, T);
```

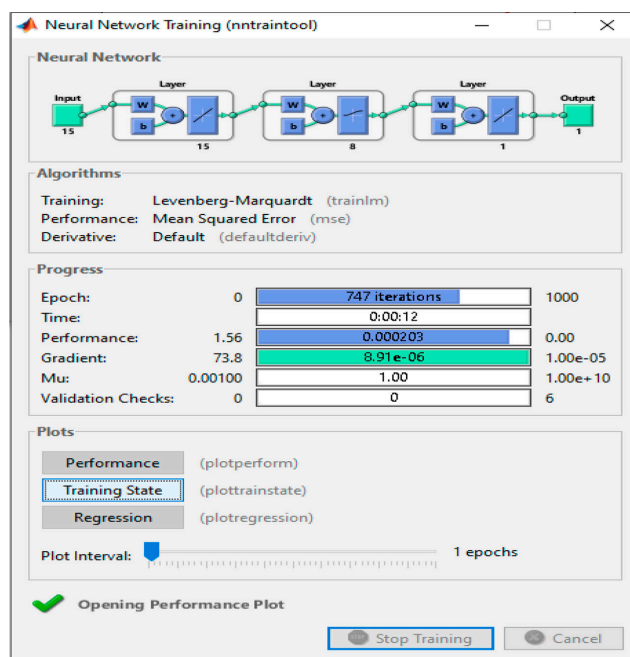


Рис. 1. Обучение сети

Fig. 1. Network training

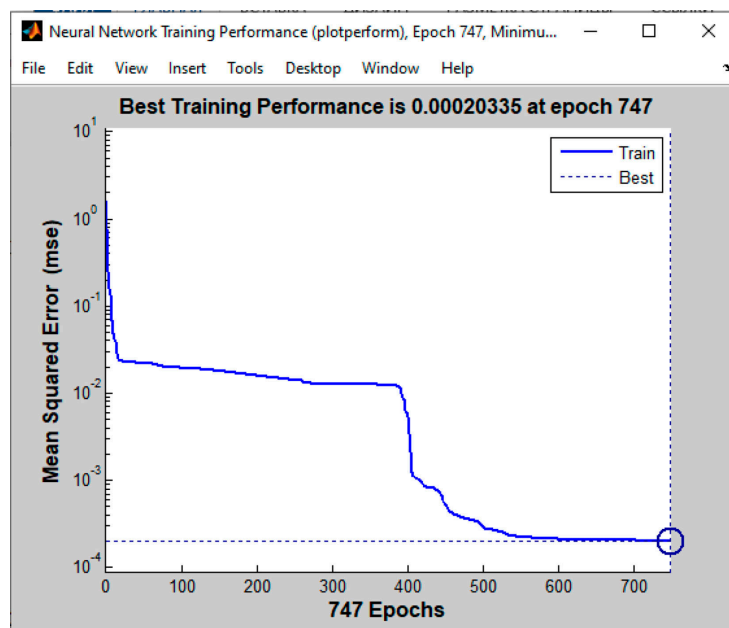


Рис. 2. Зависимость оценки функционирования от номера цикла обучения

Fig. 2. Dependence of the assessment of functioning on the number of the training cycle

Процесс обучения иллюстрируется графиком зависимости оценки функционирования от номера цикла обучения (рис. 2).

Таким образом, обучение сети окончено. Теперь эту сеть можно сохранить в файле nn1.mat:

```
save nn1 net;
```

Тестирование сети

Перед тем как воспользоваться нейронной сетью, необходимо исследовать степень достоверности результатов вычислений сети на тестовом массиве входных векторов. В качестве тестового массива необходимо использовать массив, компоненты которого отличаются от компонентов массива, использованного для обучения. Для оценки достоверности результатов работы сети можно воспользоваться результатами регрессионного анализа, полученными при сравнении эталонных значений со значениями, полученными на выходе сети, когда на вход поданы входные векторы тестового массива. В среде MATLAB для этого можно воспользоваться функцией `postreg`. Следующий набор команд иллюстрирует описанную процедуру:

```
y=sim(net, P);%обработка тестового массива
[m]=postreg(y(1,:), T(1,:));%регрессионный анализ результатов обработки.
```

На рис. 3 видно, что все точки легли на прямую, что говорит о правильной работе сети на тестовом массиве.

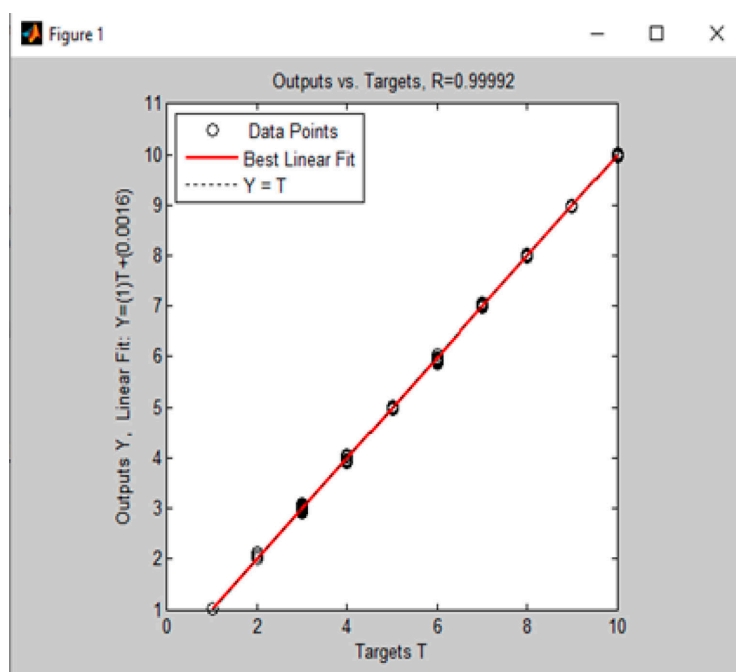


Рис. 3. Результаты тестирования

Fig. 3. Test results

Использование сети

Для того чтобы применить обученную сеть для обработки данных, необходимо воспользоваться функцией `sim`:

```
%Использование сети
m=0;%Количество ошибок
for i=1:100
Y=round(sim(net4, PP(:, i)))
if Y ~= T(i)
m=m+1;
end
end;
```

На рис. 4 показан график зависимости вероятности ошибки от амплитуды шума. Вероятность ошибки увеличивается, если амплитуда шума отличается от той амплитуды, при которой происходило обучение сети (0,2) более чем на 0,01. Следовательно, необходимо переобучение сети. На рис. 4 проиллюстрировано переобучение сети при амплитуде шума 0,29. Вероятность ошибки вновь становится близкой к нулю.



Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки от амплитуды шума

Fig. 4. Dependence of the error probability on the noise amplitude

Выводы

1. Нейросетевая технология позволяет эффективно и с наименьшими затратами времени осуществлять классификацию сигналов, а также выявить скрытые закономерности влияния входных параметров на выходные, что практически невозможно определить статистическими методами [2].

2. Вероятность ошибки классификации очень зависит от амплитуды шума, что вызывает необходимость переобучения нейросети.

Список литературы / References

[1] Грудинин В.С. *Работа с нейросетями в пакете MatLab*, Киров: Издательство Вятского гос. ун-та, 2014. [Grudin V.S. *Working with neural networks in the MatLab package*, Kirov: Publishing House of the Vyatka State University, 2014 (in Russian)]

[2] Стародубцев П.А., Сторожок Е.А., Алифанов Р.Н. Снижение вероятности ложной тревоги в измерительном узле системы гидроакустического мониторинга, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2020, 13(5), 568–577. [Starodubtsev P.A., Storozhok E.A., Alifanov R.N. Reducing the probability of a false alarm in the measuring node of the hydroacoustic monitoring system, *SIBFU Journal. Engineering and technology*, 2020, 13(5), 568–577 (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0395

УДК 621.396.945

Hardware Implementation of a System for Transmission of Electromagnetic Signals Through-the-Earth

Ekaterina A. Kohonkova*
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 18.02.2022, received in revised form 09.03.2022, accepted 20.05.2022

Abstract. The article discusses the structure of the system for transmitting and receiving dispatcher commands to mine personnel using a wireless electromagnetic channel through rocks to a depth of 1000 m in the frequency range of 0.3–30 kHz. The methods of modulation and coding of information in the channel are considered taking into account man-made noise.

Keywords: wireless channel, rock, mine, infra-low frequencies, very low frequencies, electromagnetic field, Through-The-Earth.

Citation: Kohonkova, E. A. Hardware implementation of a system for transmission of electromagnetic signals through-the-earth. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 325–337. DOI: 10.17516/1999-494X-0395

Аппаратная реализация системы передачи электромагнитных сигналов через горную породу

Е. А. Кохонькова
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В статье рассматривается структура системы для передачи и приема команд диспетчера персоналу шахт по беспроводному электромагнитному каналу через горные породы на глубину до 1000 м в частотном диапазоне 0,3–30 кГц. Рассмотрены методы модуляции и кодирования информации в канале с учетом промышленных помех.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: kokhonkova@yandex.ru

Ключевые слова: беспроводной канал, горная порода, шахта, инфранизкие частоты, очень низкие частоты, электромагнитное поле.

Цитирование: Кохонькова, Е. А. Аппаратная реализация системы передачи электромагнитных сигналов через горную породу / Е. А. Кохонькова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 325–337. DOI: 10.17516/1999-494X-0395

Введение

Наравне с традиционными каналами оповещения и связи с персоналом в условиях подземной добычи полезных ископаемых применяются системы беспроводной передачи данных с реализацией технологии TTE (Through-The-Earth). Метод использует электромагнитное поле в диапазоне 3–300 кГц, распространяющееся через горные породы на расстояние, достигающее нескольких сотен метров. Технология TTE доказала свою эффективность для связи и сигнализации в чрезвычайных ситуациях, поскольку обеспечивает передачу информации непосредственно через горные породы [1–6]. Большинство систем низкочастотной беспроводной связи в мире применяют в качестве передающей антенны магнитную петлю диаметром 10–120 м, расположенную на поверхности грунта. В качестве приемных устройств используются стационарные приемные пункты с антенной в виде магнитной петли или индивидуальные компактные приемники.

Альтернативный способ передачи информации был разработан в ЦКБ «Геофизика» и введен в эксплуатацию АО НВИЦ «Радиус». Метод состоит в использовании приземной длинномерной заземленной антенны для увеличения зоны радиопокрытия рудника [4].

При наличии металлоконструкций в горных выработках возможно использование поративных индукционных передатчиков и приемников СЧ-диапазона (300 кГц – 3 МГц) с применением аналоговой частотной модуляции. Данный тип связи способен предавать сигнал по выработкам протяженностью до 5 миль при наличии непрерывной металлической инфраструктуры [7].

В статье предложен метод аппаратной реализации передачи полезного сигнала через горные породы с использованием длинномерной, заземленной в грунт или на контур заземления. Также будут даны рекомендации по повышению помехоустойчивости канала «сверху-вниз», предназначенного для оповещения и индивидуального вызова шахтеров.

Техническая реализация канала связи

Беспроводная система аварийного оповещения и индивидуального вызова позволяет обеспечить сигнализацию с большим радиопокрытием при использовании электромагнитных волн СДВ-диапазона.

В разработку всей системы входят:

- оптимизация алгоритмов фильтрации промышленных помех с частотой 50 Гц и их гармоник, обладающих большой мощностью в ИНЧ- и ОНЧ-диапазонах (0,3–30 кГц). Источниками этих помех являются электрические и коммутационные сети, расположенные в горных выработках, а также работа подземных машин и механизмов;
- выбор помехоустойчивых методов кодирования, учитывающих объем передаваемой информации в виде кодов общей тревоги и индивидуальных номеров персонала;

- обоснование выбора помехоустойчивых методов модуляции, наиболее подходящих для передачи коротких кодовых посылок на низкой частоте;
- описание технических характеристик оборудования для передачи и приема данных, а также описание работы блоков передатчика и приемных устройств.

Коммуникационный комплекс (рис. 1) работает следующим образом: диспетчер отправляет сигнал об аварии или индивидуальный вызов по номеру горняка при помощи персонального компьютера или дистанционного пульта управления, подключенного к блоку управления и модуляции. Блок управления совместно с передатчиком и согласующими трансформаторами и конденсаторами устанавливается на поверхности (например, в пункте связи). К согласующему конденсаторному блоку подключают антенну, длину которой выбирают в зависимости от размеров и конфигурации рудника или шахты. На передатчике устанавливают наиболее подходящую для задачи рабочую частоту. Антенны могут прокладывать в горных выработках и заземлять как на металлоконструкции шахты, так и на металлический каркас шахтного ствола. Это позволяет расширить зону покрытия для глубоких рудников с большой площадью горизонтов. Передающая антенна может разворачиваться и на поверхности шахтного поля для рудников и шахт меньших объемов.

Передающий комплект с рабочей частотой 0,3–10 кГц и мощностью 3 кВт включает в себя несколько основных рабочих блоков. Источник питания (ИП) включает в себя выпрямитель (ВП), сглаживающий фильтр (СФ) и источник бесперебойного питания (ИБП). ИП преобразует напряжение питающей сети 380 В в сеть питания силового транзисторного моста и выполняет задачу формирования напряжения 12 В для питания низковольтных цепей передатчика, а также функцию поддержания напряжения в случае отключения питающей сети. Выпрямленное напряжение подается на силовой транзисторный мост (СТМ), обеспечивающий коммутацию первичной обмотки согласующего трансформатора (СТ), по сигналам управления, подаваемым с блока управления и контроля состояния антенн (БУиКСА). СТ обеспечивает гальваническую развязку выходных цепей блока согласования с питающей сетью, а также формирование необходимого выходного напряжения. Это обеспечивает ступенчатую регулировку выходной мощности передатчика и ограничения максимальной амплитуды напряжения на выходных реактивных элементах передающего комплекта. В качестве реактивных элементов используется излучающий антенный кабель и блок согласующих конденсаторов (БСК). Блок согласования содержит в своем составе датчики производной формы тока каждой антенны и группу реле для отключения антенн в случае их неисправности. БУиКСА обеспечивает формирование сигналов управления для управляемого центральным процессором силового транзисторного моста формирующими требуемую кодовую последовательность передаваемой команды. Также он обеспечивает контроль и вычисление физических параметров передающих антенн: индуктивность антенн; активное сопротивление; активная мощность; а также фиксирует обрыв провода или короткое замыкание. Управление передатчиком осуществляется как удаленно (через Ethernet и RS 485), так и при помощи встроенного в передатчик пульта управления. При помощи длинномерных приземных антенн, заземленных в грунт через металлические стержни, на контуры заземления шахты или шахтный ствол осуществляется формирование беспроводного канала передачи данных. Также через блок автоматического ввода резерва (АВР) обеспечивается возможность переключения на дублирующие блоки передатчика (рис. 1).

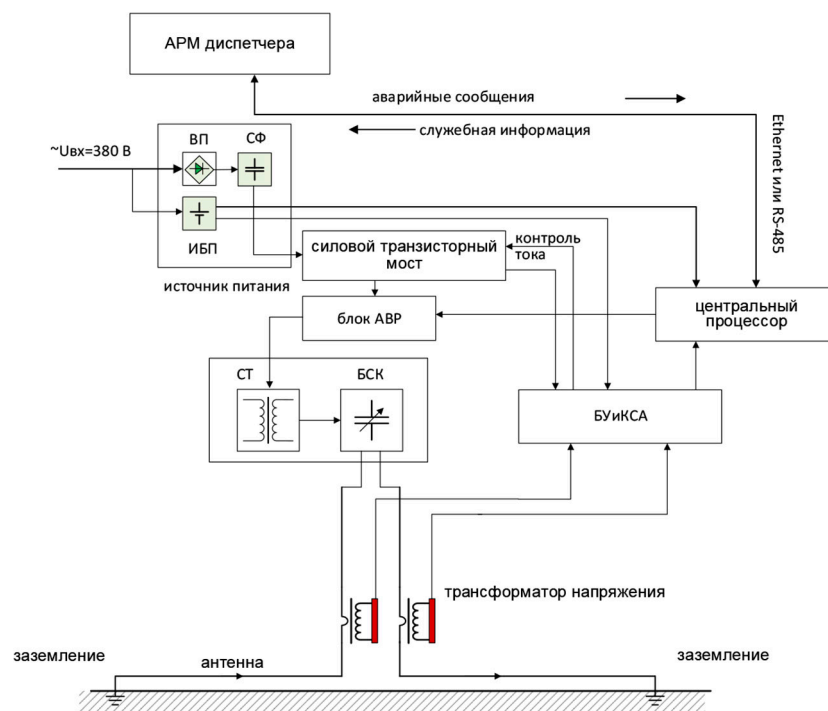


Рис. 1. Структурная схема передатчика для низкочастотного электромагнитного канала связи через горные породы

Fig. 1. Block schematic diagram of a transmitter for a low-frequency electromagnetic communication channel through the earth

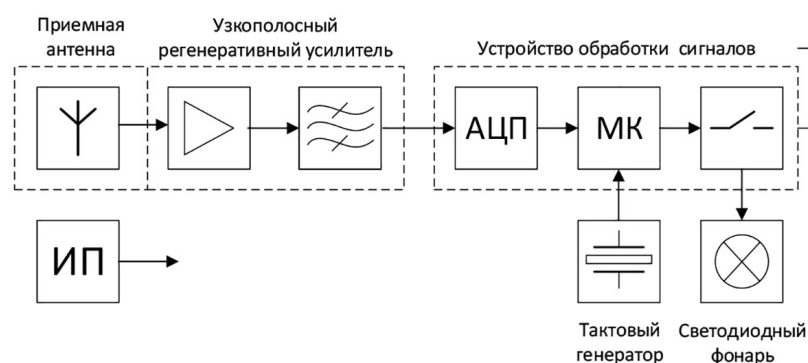


Рис. 2. Структурная схема приемного устройства

Fig. 2. Block schematic diagram of the receiving device

Регистрация сигналов производится при помощи компактного приемника, включающего ферритовую магнитную антенну [10], узкополосный регенеративный усилитель, АЦП, блок фильтрации и демодулятор на базе микроконтроллера (рис. 2). Для визуальной индикации индивидуальное приемное устройство подключается к головному светильнику шахтерской каски через транзисторный ключ. При передаче сигнала индивидуального вызова по ЭМ-каналу с поверхности светильник начинает подавать сигналы периодическим миганием. Этот сигнал

обозначает необходимость связаться с поверхностью по другим каналам или направиться к диспетчерскому пункту связи в выработке. Персональное приемное устройство имеет миниатюрный размер и низкое энергопотребление, что обеспечивает возможность совместного использования с другими системами связи и позиционирования.

Методы повышения помехоустойчивости

Электромагнитные помехи в рудниках и шахтах представляют комбинацию полей промышленной частоты 50 Гц и случайных импульсных последовательностей с широкой динамикой амплитудного распределения со своей спецификой для каждого подземного предприятия.

Рабочая частота канала выбирается таким образом, чтобы в нее попали все гармоники, кратные 50 Гц. Так, на частоте $f = 1200 \text{ Гц}$ в нее попадают 24 гармоники от 50 Гц, 12 гармоник от 100 Гц и т.д. Частота дискретизации в таком случае должна быть в четыре раза больше 1200 Гц, чтобы в период колебания промышленной помехи всегда попадало четыре отсчета. Это позволяет впоследствии высчитать амплитуду помехи из мнимой и действительный компонент сигнала (рис. 3).

Из синфазной $I = 1 \div 3$ и квадратурной $Q = 2 \div 4$ составляющих огибающей сигнала вычисляется амплитуда сигнала $A = \sqrt{I^2 + Q^2}$. В приемнике выделяется сигнал, модулированный кодом номера приемного устройства. Изменение фазы происходит через 20 мс, что кратно частоте 50 Гц. Длительность 1 бита составляет 40 мс. В один период 20 мс укладывается 24 периода сигнала с рабочей частотой 1200 Гц. Полученные активная I и реактивная Q составляющие сигнала суммируются в периоде 20 мс и задерживаются по времени. Затем устройство ждет 20 мс и вычитает из первой вторую сумму I . Так происходит вычитание последующей суммы из предыдущей (рис. 3).

Если фаза сигнала не менялась после 20 мс, то результат вычитания на интервале 40 мс равен величине накопленной случайной помехи. При этом промышленная помеха 50 Гц и ее гармоники компенсируют друг друга. Рассмотрим процесс компенсации помехи (рис. 4): а – помеха, не несущая информации (не манипулированный), поступает на вход АЦП, где происходит процесс дискретизации на частоте 4800 Гц по четыре отсчета на период; б – вычисляются I и Q составляющие за 20 мс и суммируются. Из накопленной суммы вычитается сумма I и Q за следующие 20 мс (накопление промышленной помехи отмечено желтым цветом). Результатом будет полная компенсация и удаление повторяющейся во времени гармонической помехи с большой амплитудой. Останется только помеха, накопленная за 40 мс, которая изменяется во времени случайным образом (отмечено красным цветом); в – фаза

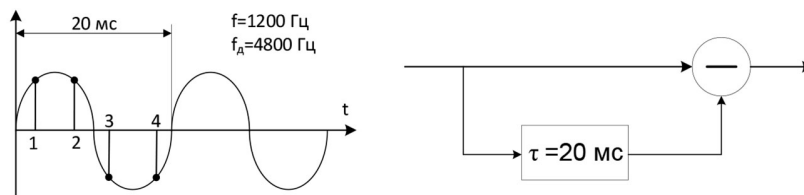


Рис. 3. Процесс дискретизации и компенсации принятого сигнала

Fig. 3. The process of sampling and compensation of the received signal

сигнала изменяется на 180° каждые 20 мс; γ – результатом вычитания второго промежутка в 20 мс из первого будет накопление сигнала. При этом за n повторений полезный сигнал возрастает в n раз (отмечено зеленым цветом), а шум – $\sqrt{n}$ раз. При этом промышленная помеха компенсируется.

Представленный процесс был реализован в качестве математической модели, показывающей процесс зашумления полезного сигнала и удаления помех в программном пакете Matlab. На рис. 5 изображен сигнал без промышленных помех и посторонних шумов среды. Красными

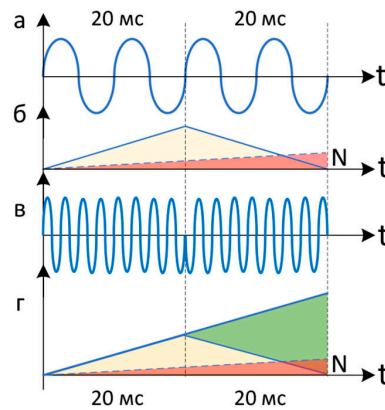


Рис. 4. Процесс накопления сигнала и шума за период длительности бита: а – помеха 50 Гц; б – компенсация помехи 50 Гц за период 40 мс; в – полезный сигнал с фазовой манипуляцией; г – накопленный полезный сигнал за период 40 мс

Fig. 4. The process of signal and noise accumulation over the period of the bit duration: а – interference 50 Hz; б – interference compensation 50 Hz for a period of 40 ms; в – useful signal with phase shift keying; г – accumulated useful signal for a period of 40 ms

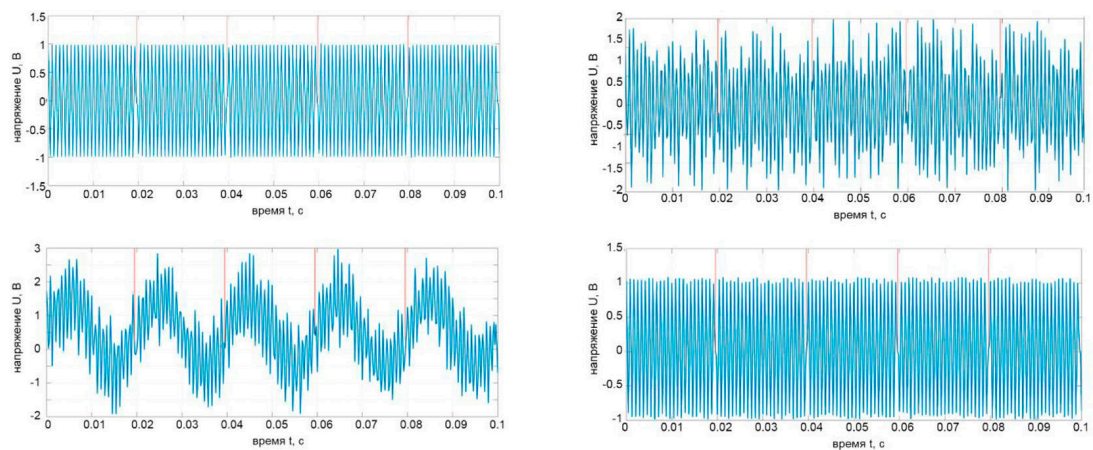


Рис. 5. Несущее колебание со сдвигом фазы на частоте $f_0=1200$ Гц: а – без помех; б – с гауссовским шумом; в – с гауссовским шумом и промышленной помехой на частоте 50 Гц; г – несущее колебание после алгоритма компенсации

Fig. 5. Carrier wave with phase shift at the frequency $f_0=1200$ Hz: а – without interference; б – with Gaussian noise; в – with Gaussian noise and man-made noise at a frequency of 50 Hz; г – the carrier wave after the compensation algorithm

линиями отмечен скачок фазы на 180° , за время 40 мс передается 1 бит сигнала. По описанному ранее алгоритму в процессе накопления и интегрирования в зашумленном сигнале компенсируются промышленные помехи и подавляется гауссовский шум за счет накопления.

В условиях наличия промышленных помех необходимо применение помехоустойчивого кодирования, обеспечивающего обнаружение и исправление ошибок при приеме сигналов с закодированным номером приемника. Так как в канале связи через равные промежутки времени циклично передаются лишь короткие номера приемников, то можно использовать блочный тип корректирующих кодов, к которым относится код Хэмминга (15, 11) [8]. Рассмотрим процесс помехоустойчивого кодирования. Входной вектор – информационное слово: $U=(1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0)$. Определим необходимое количество контрольных бит по формуле

$$k=2^k-m-1=2^k-15-1=2^k-16=4, \quad (1)$$

где k – количество контрольных бит; m – количество информационных бит.

Кодирование линейного блочного кода задается добавлением 4 контрольных бит. Контрольными в данном случае являются разряды, кратные 2^n , т.е. u'_1, u'_2, u'_4, u'_8 :

$$V=(k_1, k_2, u_3, k_3, u_5, u_6, u_7, u_8, k_4, u_9, u_{10}, u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}).$$

Значение контрольных разрядов вычисляется так:

$$\begin{aligned} k_1 &= u_3 \oplus u_5 \oplus u_7 \oplus u_9 \oplus u_{11} \oplus u_{13} \oplus u_{15} = 1, \\ k_2 &= u_3 \oplus u_6 \oplus u_7 \oplus u_{10} \oplus u_{11} \oplus u_{14} \oplus u_{15} = 0, \\ k_3 &= u_5 \oplus u_6 \oplus u_7 \oplus u_{12} \oplus u_{13} \oplus u_{14} \oplus u_{15} = 1, \\ k_4 &= u_9 \oplus u_{10} \oplus u_{11} \oplus u_{12} \oplus u_{13} \oplus u_{14} \oplus u_{15} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, получим итоговый кодовый вектор V , сочетающий информационные и проверочные биты: $V=(1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0)$.

Таблица 1. Значение разрядов кодового вектора

Table 1. The value of the code vector bits

k_1	k_2	u_3	k_3	u_5	u_6	u_7	k_4	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}
1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0

При декодировании информации в приемнике необходимо вычислить из вектора V синдром S , указывающий на наличие и положение ошибочных бит при помощи контрольных разрядов:

$$\begin{aligned} s_1 &= k_1 \oplus u_3 \oplus u_5 \oplus u_7 \oplus u_9 \oplus u_{11} \oplus u_{13} \oplus u_{15}, \\ s_2 &= k_2 \oplus u_3 \oplus u_6 \oplus u_7 \oplus u_{10} \oplus u_{11} \oplus u_{14} \oplus u_{15}, \\ s_3 &= k_3 \oplus u_5 \oplus u_6 \oplus u_7 \oplus u_{12} \oplus u_{13} \oplus u_{14} \oplus u_{15}, \\ s_4 &= k_4 \oplus u_9 \oplus u_{10} \oplus u_{11} \oplus u_{12} \oplus u_{13} \oplus u_{14} \oplus u_{15}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 2. Значение разрядов кодового вектора с ошибочным битом

Table 2. The value of the bits of the code vector with a bit error

k_1	k_2	u_3	k_3	u_5	u_6	u_7	k_4	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}
1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0

В результате вычисления получено число S из k разрядов. При $S=(0\ 0\ 0\ 0)$ передача информационного слова была произведена без ошибок.

Введем в кодовый вектор V ошибку в 10-м разряде и повторно проведем вычисление синдрома S : $V=(1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0)$.

При декодировании информации в приемнике необходимо вычислить из вектора V синдром S , указывающий на наличие и положение ошибочных бит при помощи контрольных разрядов. Было получено значение синдрома $S=(0\ 1\ 0\ 1)$, что указывает на передачу информационного слова с ошибкой в 10-м разряде. Таким образом, корректирующие коды позволяют существенно сократить вероятность битовой ошибки при передаче коротких битовых посылок за счет избыточности и исправления ошибочного бита.

Анализ методов модуляции

Рассмотрим некоторые цифровые методы модуляции по параметру помехоустойчивости, такие как амплитудная манипуляция (АМн), частотная манипуляция (ЧМн) и фазовая манипуляция (ФМн). Для сравнения помехоустойчивости основных видов цифровой модуляции АМн, ЧМн и ОФМн необходимо определить эквивалентную энергию разностного сигнала $S_s(t)=S_1(t)-S_0(t)$ или расстояние между этими сигналами и воспользоваться выражением для расчета средней вероятности ошибочного приема [8]:

$$P=Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}}q_s\right)=Q\left[\frac{d(S_1,S_0)}{\sqrt{2N_0}}\right], \quad (4)$$

где $Q(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}}dt$ – функция ошибок (функция Лапласа);

$$q_s=\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}=\frac{d(S_1,S_0)}{\sqrt{N_0}} \text{ – отношение сигнал/помеха по энергии разностного сигнала;}$$

E_s – энергия разностного сигнала; N_0 – спектральная плотность мощности шума.

Эффективность модуляции определяется соотношением энергии сигналов с разными видами модуляции, которые обеспечивают равные вероятности битовых ошибок. На рис. 6 представлен график зависимостей вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/помеха.

Помехоустойчивость трех основных типов манипуляции определяется по формулам расчета вероятности битовой ошибки при заданном отношении сигнал/помеха [8, 9]:

$$P_{AM}=Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{E}{N_0}}\right)=Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}}q\right). \quad (5)$$

$$P_{qM} = Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2E}{N_0}}\right) = Q(q). \quad (6)$$

$$P_{\phi M} = Q\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{4E}{N_0}}\right) = Q(2q). \quad (7)$$

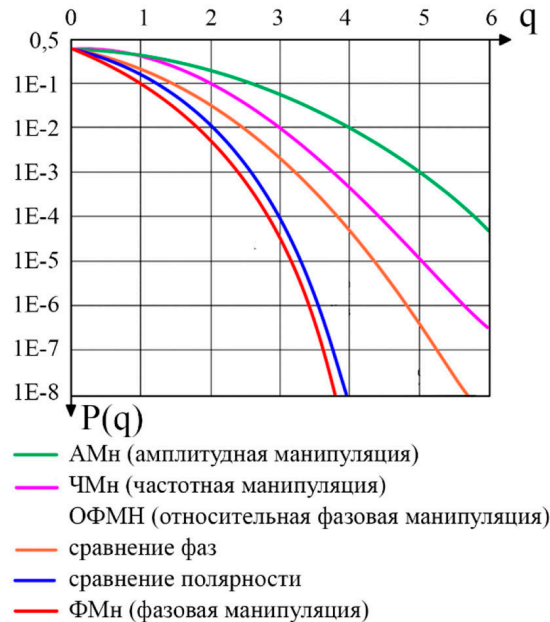


Рис. 6. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/помеха для основных видов цифровой модуляции

Fig. 6. Dependence of the bit error rate on the signal-to-noise ratio for the main types of digital modulation

При одинаковых условиях (энергий сигнала и помех) сигнал с ЧМн в два раза, а сигнал с ФМн в четыре раза более помехоустойчивы, чем АМн. Однако по средней мощности выигрыши ЧМн и ФМн уменьшаются до двух раз. Также следует отметить, что АМн в условиях рудников, вносящих затухание в полезный сигнал, требует большего накопления каждого бита для преодоления порога демодуляции. Стоит учитывать, что все рассматриваемые виды модуляции совмещаются с фазовым методом компенсации промышленных помех.

Далее рассмотрим метод двоичной фазовой манипуляции (ДФМн) – binary phase-shift key (BPSK) и особенности ее реализации. При этом методе фаза несущего колебания изменяется пропорционально битам информационного сигнала. В процессе модуляции цифровой сигнал $b_0(t)$ перемножается с опорным $\cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, что дает на выходе сигнал с фазовой манипуляцией $S_{bpsk}(t)$. Поскольку поток информации передается со скоростью B_r (бит/с), то длительность импульса определяется как $T=1/B_r$. При умножении цифрового сигнала на опорный $\varphi_0 = -\pi/2$ на выходе модулятора получаем сигнал со скачком фазы на π (180°). Каждый раз

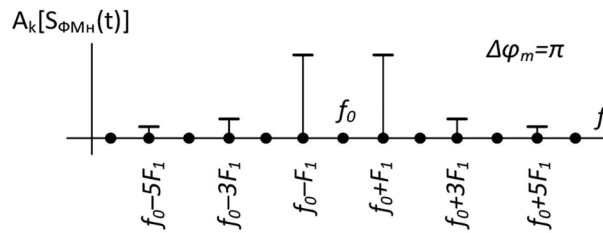


Рис. 7. Спектр цифрового сигнала при двоичной фазовой манипуляции

Fig. 7. Spectrum of a digital signal with binary phase shift keying

при смене «1» на «0» и обратно происходит скачок фазы сигнала (рис. 7). Для формирования стабильного канала в условиях передачи через сплошные горные породы необходимо увеличить время накопления сигнала. Например, до $T=1$ с, что соответствует битовой скорости $B_r = 1$ бит/с (1.25 бод).

Сам ФМн-сигнал имеет вид последовательностей радиоимпульсов с огибающей прямоугольной формы [8]:

$$S_{PSK} = A_m \cdot \cos[\omega_0 t + (1 + x_c(t) \cdot \Delta\varphi)], \quad (8)$$

где $x_c(t)$ – нормированная функция значений -1 и 1 , обозначающая изменение информационного сигнала; A_m – амплитуда; $\Delta\varphi_m$ – девиация фазы; ω_0 – несущая угловая частота.

При выборе значения девиации фазы необходимо учитывать сильное влияние производственных помех на частоте 50 Гц и кратных ей гармоник в диапазоне ОНЧ. В процессе реализации алгоритма подавления этих помех сигнал на несущей частоте $f_0=1200$ Гц также будет подавлен, из чего следует потребность полностью перенести энергию полезного сигнала в боковые полосы модуляции и $f_0 \pm F_1$ при $F_1=25$ Гц. Этот перенос осуществляется повышением девиации фазы до значения $\Delta\varphi_m=\pi$.

Приемные устройства являются некогерентными, то есть не согласованы по фазе с задающим генератором передатчика и не могут отделить случайный скачок фазы от заданного. Кроме того, приемные устройства могут включиться на прием сигнала в любое несогласованное время и станут принимать поток бит не в начале битовой последовательности. Это делает демодуляцию ошибочной.

Для решения этой проблемы применяют относительную фазовую манипуляцию (ОФМн или DBPSK). При передаче номера шахтера (непосредственно перед информационной битовой последовательностью) передаются три стартовых бита «1 0 1». Каждому информационному биту соответствует не абсолютное значение фазы, а ее изменение относительно предыдущего значения. Приемник заранее закодирован на то, что в начале каждого сообщения присутствуют стартовые биты «1 0 1», а смена фазы уже будет означать противоположное значение после «1».

Альтернативным методом является распространенный в телекоммуникации метод частотной манипуляции (ЧМн) – *frequency shift key* (FSK). В данном канале связи используется модификация этого метода модуляции – частотная манипуляция с непрерывной фазой (CPFSK), которая способствует снижению уровня боковых лепестков (рис. 8). Частота несущего колебания

меняется в соответствии с информационным сигналом и сохранением фазы несущего колебания. Сигнал в таком случае можно представить в виде суммы двух несущих, соответствующих двум значениям информационного сигнала [8]:

$$\begin{aligned} S(t) &= S_l(t) + S_h(t), \\ S_l(t) &= b_l(t) \cdot \cos((\omega_0 - \omega_\delta)t), \\ S_h(t) &= b_h(t) \cdot \cos((\omega_0 + \omega_\delta)t), \end{aligned} \quad (9)$$

где $b_l(t)$, $b_h(t)$ – информационные сигналы;

$\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая частота несущего колебания;

$\omega_\delta = 2\pi f_\delta m$ – угловая частота девиации FSK-сигнала;

$F_b = B_r/2 = 0,5$ – частота повторения бита в цифровом сигнале;

m – индекс модуляции.

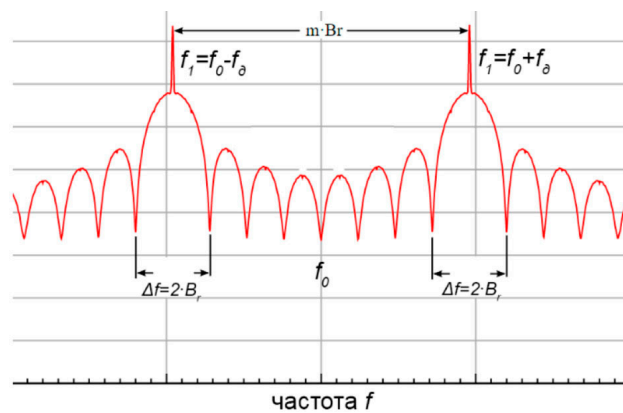


Рис. 8. Спектральная характеристика сигнала с частотной манипуляцией

Fig. 8. Spectral response of the signal with frequency shift keying

Для низкочастотной системы связи через горные породы низкая частота девиации f_δ и малая ширина главного лепестка в спектре Δf стоят в приоритете перед битовой скоростью передачи данных B_r , поскольку уровень сигнала в такой среде очень зависит от его частоты. Для передачи коротких команд и номеров шахтеров на приемники не требуется высокой битовой скорости. Из этого ограничения были выбраны следующие характеристики CFSK модуляции сигнала: $B_r = 1$; $f_0 = 975$ Гц; $m = 18$; $f_\delta = 9$ Гц; $\Delta f = 2$ Гц; $f_l = 966$ Гц; $f_2 = 984$ Гц. Такой подбор параметров также позволяет избежать промышленных помех, кратных 50 Гц в полосе полезного сигнала.

Заключение

В связи с высоким уровнем промышленных помех от работающих в выработках электрических машин и сетей электроснабжения и для обеспечения качественной передачи сообщений необходимо использовать все известные в радиотехнике эффективные методы повышения помехоустойчивости. Наиболее устойчивыми в условиях рудников являют-

ся частотная манипуляция с непрерывной фазой CFSK и двоичная фазовая манипуляция BPSK, так как среда горных массивов оказывает влияние на амплитуду сигнала, не искажая параметры фазы и частоты. Для повышения помехозащищенности предпочтительно использовать корректирующие коды, позволяющие обнаруживать и исправлять ошибки за счет избыточности. На низких частотах в горных выработках вблизи сетей электроснабжения сосредоточены промышленные помехи, кратные 50 Гц. Метод компенсации промышленных помех также повышает помехоустойчивость канала. Для увеличения отношения сигнал/шум также возможно использовать повышение мощности передатчика, выбор в качестве мест заземления передающей антенны металлических конструкций стволов рудника или контуров заземления. Конфигурация передающей антенны, длина и место расположения выбираются с учетом топологии горных выработок, глубины шахты и геометрии рудных залежей.

Список литературы / References

- [1] Шайдуров Г.Я., Кохонькова Е.А., Кудинов Д.С. и др. *Системы беспроводной связи и сигнализации через горную породу на электромагнитных и сейсмических волнах*. Под ред. Г.Я. Шайдурова. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. 252 с. [Shaidurov G. Ya., Kohonkova E. A., Kudinov D. S. and others. *Systems of wireless communication and signaling through the rock on electromagnetic and seismic waves*. Ed. G. Ya. Shaidurov. Krasnoyarsk: Sibirskij federalnyj universitet, 2021. 252 p. (in Russian)].
- [2] Технология передачи данных через горные породы на низкой частоте. CanaryComm-IS. Vital Alert [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vitalalert.com/product/canarycommis/>. [Technology of data transmission through the rocks at low frequency. CanaryComm-IS. Vital Alert. [Electronic resource] – Access: <https://vitalalert.com/product/canarycommis/>].
- [3] Магнитная система связи. MagneLink [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mining-technology.com/features/featurelockheed-martin-post-accident-wireless-mining-communication/>. [Magnetic Communication System. MagneLink. [Electronic resource] – Access: <https://www.mining-technology.com/features/featurelockheed-martin-post-accident-wireless-mining-communication/>].
- [4] Система аварийного оповещения для шахт «Радиус-2» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://radius-nvic.ru/page7059197.html>. [Emergency warning system for mines Radius-2. [Electronic resource] – Access: <http://radius-nvic.ru/page7059197.html>].
- [5] Многофункциональная система связи Flexcom [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://flexcom.akvarius.lv/downloads/doc/flexcom/system/MSB_FLEXCOM.pdf [Multifunctional system Flexcom. The PBE Group (Headquarter) Mine Radio Systems-R. [Electronic resource] – Access: https://flexcom.akvarius.lv/downloads/doc/flexcom/system/MSB_FLEXCOM.pdf].
- [6] Коммуникационная система CanaryComm-IS [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vitalalert.com/product/canarycommis/>. [Communication system CanaryComm-IS. Vital Alert. [Electronic resource] – Access: <https://vitalalert.com/product/canarycommis/>].
- [7] Компактное портативное радио для шахт DRUM [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kuttaradios.com/DRUM100P.html>. [DRUM Compact Portable (CP) Radio. Kutta Radios, Inc. [Electronic resource] – Access: <https://www.kuttaradios.com/DRUM100P.html>].

[8] Деев В.В. *Методы модуляции и кодирования в современных системах связи*. М.: Наука, 2007. 268 с. [Deev V.V. *Methods of modulation and coding in modern communication systems*. Moscow, Nauka, 2007. 268 p. (in Russian)].

[9] Варакин Л.Е. *Системы связи с шумоподобными сигналами*. М.: Радио и связь, 1985. 384 с. [Varakin L.E. *Communication systems with noise-like signals*. Moscow: Radio i svyaz, 1985. 384 p. (in Russian)].

[10] Хомич В.И. *Приемные ферритовые антенны*. Издание второе. Дополненное и переработанное. Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1963. 63 с. [Khomich V.I. *Receiving ferrite antennas*. Second edition. Supplemented and revised. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1963. 63 p. (in Russian)].

Theoretical and Applied Heating Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

DOI: 10.17516/1999-494X-0400

УДК 697.432

**Vortex Method of Water-Coal Combustion Fuel
from Coal Preparation Sludge**

Vasilij I. Murko^a,
Viktor I. Karpenok^a and Marina P. Baranova^{*b, c}

^a*Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russian Federation*

^b*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

^c*Krasnoyarsk Agrarian University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 12.04.2022, received in revised form 19.05.2022, accepted 22.05.2022

Abstract. The paper presents the results of developing designs of low and medium capacity heat generators. Vortex adiabatic combustion chambers are differentiated by the location of the axis of vortex motion of gases in the furnace space (horizontally and vertically). Depending on the thermal capacity of the boiler, the vortex chamber is located either next to the boiler (the boiler is a waste heat boiler), or is built into the furnace space of the boiler. Adiabatic vortex combustion chambers with horizontal axis of rotation of flue gases were developed for boilers with heat output from 0.1 to 0.7 MW. Experimental studies, tests in pilot-industrial and industrial conditions of heat generators operating on WCF showed their high technical efficiency (unburned carbon loss amounted to no more than 5 %, the efficiency of boilers 86 %), and the amount of harmful emissions in flue gases is significantly lower than the maximum allowable values (in 2–3 times).

Keywords: vortex way of burning, water coal fuel, fine waste of coal preparation.

Acknowledgements. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-43-420016/20.

Citation: Murko, V.I., Karpenok, V.I. and Baranova, M. P. Vortex method of water-coal combustion fuel from coal preparation sludge, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 338–345. DOI: 10.17516/1999-494X-0400

Вихревой способ сжигания водоугольного топлива из шламов углеобогащения

В. И. Мурко^а, В. И. Карпенко^а, М. П. Баранова^{б, в}

^аСибирский государственный индустриальный университет
Российская Федерация, Новокузнецк

^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

^вКрасноярский аграрный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Представлены результаты разработки конструкций теплогенераторов малой и средней мощности. Вихревые адиабатические камеры сжигания различаются по расположению оси вихревого движения газов в топочном пространстве (горизонтально и вертикально). В зависимости от теплопроизводительности котла вихревая камера либо располагается рядом с котлом (котел является котлом-утилизатором), либо встраивается в топочное пространство котла. Адиабатические вихревые топочные камеры с горизонтальной осью вращения топочных газов были разработаны для котлов с теплопроизводительностью от 0,1 до 0,7 МВт. Экспериментальные исследования, испытания в опытно-промышленных и промышленных условиях теплогенераторов, работающих на ВУТ, показали их высокую техническую эффективность (мехнедожог составил не более 5 %, к.п.д. котлов 86 %), а количество вредных выбросов в уходящих газах существенно меньше предельно допустимых значений (в 2–3 раза).

Ключевые слова: вихревой способ сжигания, водоугольное топливо, тонкодисперсные отходы углеобогащения.

Благодарности. Исследование было выполнено при финансовой поддержке российского Фонда Фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-43-420016/20.

Цитирование: Мурко, В. И. Вихревой способ сжигания водоугольного топлива из шламов углеобогащения / В. И. Мурко, В. И. Карпенко, М. П. Баранова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 338–345. DOI: 10.17516/1999-494X-0400

Введение

Увеличение предприятий по углеобогащению в Кузбассе привело к росту выхода угольных шламов и тонкодисперсных отходов углеобогащения на вновь построенных углеобогащающих фабриках. Высокие значения влажности и зольности данных материалов не позволяют использовать их как товарный продукт без дополнительной обработки. В результате эти отходы отправляют в отвал, что приводит не только к потерям добытого сырья, но и к значительному загрязнению окружающей среды. В то же время существует возможность использовать такие шламы как топливо в виде водоугольных суспензий с применением технологии низкотемпературного вихревого сжигания забалластированных топлив. Задачи технологии приготовления водоугольного топлива (ВУТ) с необходимыми структурно-реологическими и теплофизическими характеристиками в настоящее время достаточно успешно решены как в научном, так и в практическом плане, а вопросы технологии надежного сжигания полученного топлива и, в первую очередь, создания конструкций теплогенераторов малой и средней мощности остаются в значительной мере не решенными.

Перспективным направлением при этом является использование технологии низкотемпературного вихревого сжигания некондиционных топлив. При использовании данной технологии для сжигания ВУТ имеются проблемы, сдерживающие ее практическое применение. В первую очередь это недостаточность теоретических данных по оценке влияния основных характеристик ВУТ (выхода летучих веществ, влажности, зольности и, соответственно, низшей теплоты сгорания топлива) на процессы воспламенения и горения, отсутствие научно обоснованных методических рекомендаций по выбору конструктивных параметров вихревых адиабатических топок (внутренние размеры и диаметр пережимного окна) для надежного сжигания топлива в зависимости от теплопроизводительности теплогенераторов малой и средней мощности, в том числе при переводе мазутных, газовых и угольных котлов со слоевыми топками на сжигание ВУТ [1–5].

Задачей работы было совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива, приготовленного на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения (ТДОУ), и создание теплогенераторов малой и средней мощности, работающих на этом топливе.

Экспериментальная часть

Исследовалось сжигание распыленного суспензионного водоугольного топлива в вихревых адиабатических топках. Внутренняя поверхность топок выполнена близкой к цилиндрической. При этом дутьевой воздух поступает в топочное пространство через сопла, направляющие поток тангенциально условной внутренней цилиндрической поверхности. Таким образом, поступающий в топку воздух, как и тангенциально направленный факел распыленного водоугольного топлива, организует вихревое (круговое) движение находящихся в топке горящих крупных угольных частиц и капель ВУТ. Круговое вихревое движение в топке способствует эффективному перемешиванию всех материалов, которые находятся в ее пространстве.

Известно, что для эффективного зажигания и стабильного факельного горения водоугольного топлива в топочном пространстве котла, в том числе вихревой адиабатической топке, необходимо выполнение следующих условий:

- качественное распыление водоугольного топлива;
- максимально возможный подвод высокотемпературных газов к корню распыленного факела ВУТ;
- достаточное время нахождения капель распыленного топлива и угольных частиц в камере сжигания [6–8].

Организация вихревого сжигания распыленного водоугольного топлива в адиабатическом или близком к нему режиме позволяет обеспечить соблюдение указанных выше условий за счет того, что подача топлива (диспергированной водоугольной суспензии) осуществляется по касательной к условной окружности внутри топки и поток горячих топочных газов непрерывно поступает к корню факела распыла. Таким образом, в момент попадания в пространство вихревой топки диспергированные частицы (как чисто угольные, так и капли) практически мгновенно вовлекаются в вихревой горячий поток. Вихревое движение газов и распыленного топлива приводит к тому, что центробежные силы удерживают частицы и капли в пространстве топки до тех пор, пока не выгорит их горючая часть. В результате выделяющаяся минеральная часть становится легкой, смещается к оси вихря и выносится из топки с дымовыми газами.

Известные работы по исследованию горения капель водоугольных суспензий основаны на моделях, в основе которых лежит обтекание горячей или нагреваемой частицы (или капли) потоком воздуха. В настоящей работе была разработана модель, основанная на взаимодействии угольных частиц и капель с атмосферой топочного пространства [9].

Рассмотрение материального баланса поступающих в топку воздуха и топлива показало, что при сжигании топлива с более высоким содержанием золы концентрация водяного пара в атмосфере топки повышается и может сравняться (а для топлив с зольностью выше 70 % даже превысить) с концентрацией кислорода. На этом основании при расчетах топок учитывалось, что для сжигания ВУТ, приготовленного из ТДОУ, коэффициент избытка воздуха (α) должен быть существенно выше, чем для сжигания угля, содержащегося в ВУТ.

Рассмотрение рассчитанных констант равновесия возможных химических реакций и коэффициентов диффузии газов, составляющих атмосферу топочного пространства, показало, что первичной реакцией окисления углерода топлива следует признать реакцию взаимодействия углерода с водяным паром. При этом тепловая энергия, ради которой сжигается ВУТ, выделяется при сгорании водорода и монооксида углерода, а также летучих компонентов органической массы угля за пределами зоны 3.

В ходе работы для сжигания ТДОУ были разработаны и испытаны конструкции теплогенераторов малой и средней мощности. Вихревые адиабатические камеры сжигания различались по расположению оси вихревого движения газов в топочном пространстве (горизонтально и вертикально). В зависимости от теплопроизводительности котла вихревая камера либо располагается рядом с котлом (котел является котлом-утилизатором), либо встраивается в топочное пространство котла.

Адиабатические вихревые топочные камеры с горизонтальной осью вращения топочных газов были разработаны для котлов с теплопроизводительностью от 0,1 до 0,7 МВт (табл. 1)

На рис. 1 представлен теплогенератор для сушки зерна в пос. Краснообск Новосибирской области.

Вихревые адиабатические топки с вертикальной осью вращения были разработаны для экспериментального стенда КузГТУ (на базе котла «Теплотрон») для промышленного котла ДКВР-10-13 (ОАО «Междуречье»). В табл. 2 показаны характеристики теплогенераторов с вертикальной осью вращения.

На рис. 2 изображен вертикальный разрез топочного пространства парового котла ДКВР-10-13ВУТ (котельная ОАО «Междуречье»).

В табл. 3 представлены состав и количество вредных выбросов в дымовых газах при сжигании опытных образцов топлива в котле КВр-0,63ВУТ, конструкция которого изображена на рис. 3 (на базе котла «Теплотрон»).

Котел (рис. 3) состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1 с водоохлаждаемой рубашкой 2, дверцей 3 и крышкой 4, колосниковой решетки 5 и зольника 6. Наружная поверхность цилиндрического корпуса теплоизолирована. На боковой поверхности корпуса смонтированы горелочные устройства 7 с форсунками (на рисунке не показаны) и щелевые сопла 8 для тангенциальной подачи дутьевого воздуха. Внутренняя цилиндрическая поверхность камеры сгорания над колосниковой решеткой теплоизолирована термостойким материалом 9. Для подвода и отвода жидкого теплоносителя смонтированы, соответственно, патрубки 10 и 11. Для

Таблица 1. Характеристика теплогенераторов с горизонтальной осью

Table 1. Characteristics of heat generators with a horizontal axis

Наименование показателя	Название объекта				
	Стендовая установка СибГИУ	Технологический комплекс шахта «Заречная»	Теплогенератор для сушки зерна, пос. Краснообск	Технологический комплекс, г. Черепаново	Установка сжигания ВУТ, г. Забже, Польша
Теплопроизводительность, МВт	до 0,25	0,66	0,25	0,56	0,25
Расход топлива, кг/ч	до 120	190	75	160	65
Низшая теплота сгорания ВУТ, МДж/кг	10,00 ÷ 14,00	12,00	11,75	12,70	13,40
Геометрические размеры топки, м					
диаметр	1,15	1,40	1,30	2,00	1,35
ширина	0,70	1,05	0,90	1,30	0,93
соотношение $d_{\text{по}}/D$	0,20	0,25	0,18	0,19	0,22
Теплонапряжение объема топки, МВт/м ³	0,35	0,39	0,21	0,28	0,21



Рис. 1. Теплогенератор

Fig. 1. Heat generator

теплосъема оборудована система теплообмена 12 между горячими продуктами горения и теплоносителем. Корпус котла и система теплообмена связаны газоходом 13. Корпус котла с зольником и система теплообмена установлены на раме 14.

Наименование показателя	Название объекта	
	КВр-0,63ВУТ	Технологический комплекс ОАО «Междуречье»
Теплопроизводительность, МВт	0,65	4,5
Расход топлива, кг/ч	200 ÷ 470	1200 ÷ 1400
Низшая теплота сгорания ВУТ, МДж/кг	12,15–14,25	11,72–13,59
Геометрические размеры топки, м		
диаметр	1,40	2,60
высота	2,00	3,00
соотношение $d_{\text{по}}/D$	0,28	0,36
Теплонапряжение объема топки, МВт/м³	0,21	0,23

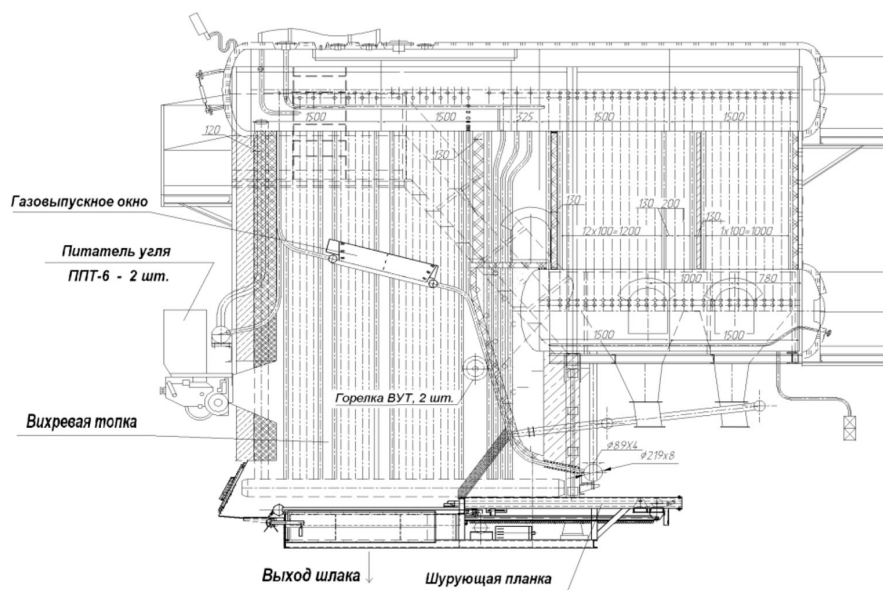


Fig. 2. DKVR-10–13WCF boiler

Table 3. Composition and amount of harmful emissions from WCF combustion

Исходное сырье	ПДК	ВУТ «ОФ ш. Комсомолец»	ВУТ «ОФ ш. имени С. М. Кирова»
Пыль, мг/м ³	250	не более 170	не более 200
СО, мг/м ³	375	не более 75	не более 75
NOx, мг/м ³	750	не более 250	не более 230
SO2, мг/м ³	1200	не более 200	не более 200
ПАУ (бенз(а)пирен), мг/м ³	0,1·10 ⁻³	менее 0,1·10 ⁻³	

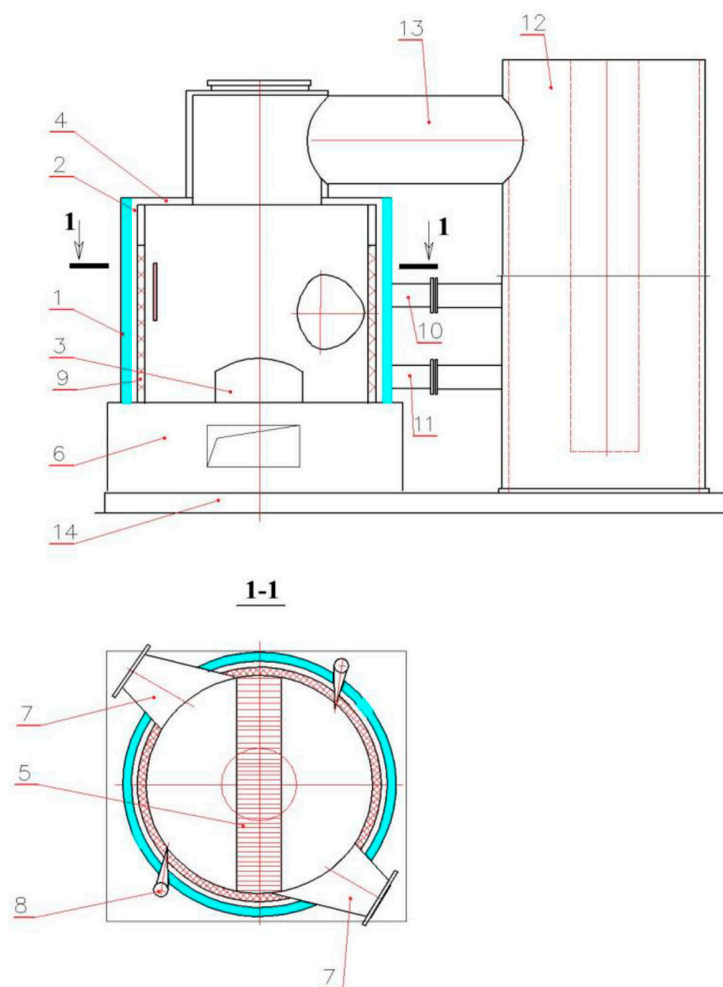


Рис. 3. Конструкция котла КВр-0,63ВУТ

Fig. 3. Design of copper KVR-0,63 CWS

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных работ:

- предложена физико-химическая модель горения ВУТ;
- получены результаты разработки конструкций теплогенераторов малой и средней мощности. Вихревые адиабатические камеры сжигания различаются по расположению оси вихревого движения газов в топочном пространстве (горизонтально и вертикально). В зависимости от теплопроизводительности котла вихревая камера либо располагается рядом с котлом (котел является котлом-утилизатором), либо встраивается в топочное пространство котла. Адиабатические вихревые топочные камеры с горизонтальной осью вращения топочных газов были разработаны для котлов с теплопроизводительностью от 0,1 до 0,7 МВт;
- экспериментальные исследования, испытания в опытно-промышленных и промышленных условиях теплогенераторов, работающих на ВУТ, показали их высокую техническую эффективность (мехнедожог составил не более 5 %, к.п.д. котлов 86 %), а количество

вредных выбросов в уходящих газах существенно меньше предельно допустимых значений (в 2–3 раза).

Список литературы / References

- [1] Мурко В. И., Хямяляйнен В. А., Волков М. А., Баранова М. П. Возможности и перспективы реализации отходов технологии обогащения углей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2019, 6, 165–172 [Murko V. I., Khyamyalyainen V. A., Volkov M. A., Baranova M. P. The opportunities and prospects for the implementation of non-waste coal preparation technology, *Journal Mountain Information and Analytical Bulletin*, 2019, 6, 165–172 (in Russian)]
- [2] M. Alaa Musalam and Abdel Fattah A. Qaraman. The thermal behavior of the coal-water fuel (CWF). *International Journal of Energy and Environmental Research*, 2016, Vol. 4, No.3, pp. 27–36.
- [3] Baranova M. P., Qian Li, Zhi –Ying Zheng, Feng-Chen Li, Kulagin V. A., Likhachev D. Utilization slurry coal-water fuel., *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2014, 7(4), 474–480 (in Russian)
- [4] Patent No. 2145038. M.cl. F 23 Q 5/00. Method of Combustion and Combustion Stabilization of the Water-Coal Fuel in the Settling Chamber (in Russian). – No. 97120914/06.
- [5] Murko V, Karpenok V, Fedyaev V and Chernykh D Results of tests of a fuel additive on a coal-fired boiler, *Journal of SFU*, 2017, 10 (8), 474–480 (in Russian)
- [6] Murko V. I., Khyamyalyainen V. A. and Baranova M. P. The Creation of a Low-Capacity Boiler Plant on Coal-Enrichment Waste, 2019, *International Science and Technology Conference “EastConf”*, Vladivostok, Russia, 2019, 1–4. doi: 10.1109/EastConf.2019.8725397
- [7] Murko V., Baranova M., Grishina I The intensification of the solid fuel grate-firing process. *J. Phys.: Conf. Ser.*, V. 1261, 2019, 012024.
- [8] Проэнергомаш [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.pem-energo.ru – Заглавие с экрана. [Proenergomash [Electronic resource] – Access: www.pem-energo.ru
- [9] Karpenok V. I., Murko V. I., Mastikhina V. P., Loboda Yu. A. Thermodynamic and chemical analysis of water-coal fuel ignition and combustion in adiabatic combustion chamber, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2021, 14(4), 385–398.

Theoretical and Applied Heating Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

DOI: 10.17516/1999-494X-0401

УДК 662.611

Study of Combustion Characteristics of Coals
by Thermogravimetric Analysis and Ir-Spectroscopy

Grigorij R. Mongush^a,
Marina P. Baranova^{*b, c} and Kezhik K. Chuldum^a

*^aTuvinian Institute for Exploration
of Natural Resources of SB RAS
Kyzyl, Russian Federation*

^bSiberian Federal University

Krasnoyarsk, Russian Federation

*^cKrasnoyarsk State Agrarian University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 12.04.2022, received in revised form 27.04.2022, accepted 23.05.2022

Abstract. The features of the chemical composition of coals from the Tuva deposits have been determined and the corresponding possibilities of their energy-technological processing have been established. By IR spectroscopy methods it was established that in the samples of coals Zh1, Zh2, GZh the amount of aromatic carbon (aromaticity index AR 1) is the highest, which affects the flammability. GZh and G2 coals have a high index of condensation (fc). Caking of coal samples in the series Zh1-GZh-Zh2-D-B naturally decreases. Coals from the Tuvinian deposits of Mezhegeyskoye and Kaa-Khemskeye deposits have greater caking capacity. In the samples of coals Zh2, B, D “shoulders” in the region of ≈ 1730 cm^{-1} , which are typical for the C=O valence oscillations, which indicates some natural oxidation of these coals and a decrease in their energy value, are observed. The oxidation of coals breaks down the aromatic structures with the formation of low molecular weight hydrocarbons, which, in turn, reduces the temperature of maximum decomposition of coal and the lower heat of combustion, but increases the ignitability temperature of fuel due to oxygen-containing compounds. Thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry showed that the Tuvinian coal sample of GZh has a high activity in the combustion process (reduction of the final burning temperature and a fairly narrow temperature range of combustion). The coals Ж1, Ж2 are less reactive.

The results of studies of coal samples of different stages of metamorphism indicate that there is a possibility to control the technological process of pyrolysis or gasification of such coals, taking into account the characteristics of these coals. Also, the chemical composition and structure of Tuvinian coals should be taken into account when burning them by layer method in small volume furnaces. The obtained results can be used when designing the equipment for energy-technological processing of Tuvinian coals.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: marina60@mail.ru

Keywords: coal, metamorphism stages, caking, burning characteristics.

Acknowledgements. This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-43-420016/20.

Citation: Mongush, G.R., Baranova, M.P. and Chuldum, K.K. Study of combustion characteristics of coals by thermogravimetric analysis and ir-spectroscopy, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 346–355. DOI: 10.17516/1999-494X-0401

Определение особенностей горения углей методами термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии

Г. Р. Монгуш^а, М. П. Баранова^{б, в}, К. К. Чульдум^а

^аТувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов СО РАН
Российская Федерация, Кызыл

^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

^вКрасноярский государственный аграрный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Определены особенности химического состава углей тувинских месторождений и установлены соответствующие возможности их энерготехнологической переработки. Методами ИК-спектроскопии установлено, что в образцах углей Ж1, Ж2, ГЖ количество ароматического углерода (индекс ароматичности AR 1) наиболее высокое, что влияет на воспламеняемость. Угли марок ГЖ и Ж2 имеют высокий показатель конденсированности (fc). Спекаемость образцов углей в ряду Ж1-ГЖ-Ж2-Д-Б закономерно уменьшается. Большей спекаемостью из тувинских месторождений обладают угли Межегейского и Каа-Хемского месторождений. В образцах углей Ж2, Б, Д наблюдаются «плечи» в области $\approx 1730 \text{ см}^{-1}$, которые характерны для C=O валентных колебаний, что свидетельствует о некоторой природноокисленности данных углей и снижении их энергетической ценности. При окислении углей происходит разрушение ароматических структур с образованием низкомолекулярных углеводородов, что, в свою очередь, снижает температуру максимального разложения угля и низшую теплоту сгорания, но увеличивает температуру воспламеняемости топлива из-за кислородсодержащих соединений. Термогравиметрический анализ и дифференциальная сканирующая калориметрия показали, что из тувинских углей образец угля марки ГЖ имеет высокую активность в процессе горения (снижение конечной температуры выгорания и достаточно узкий температурный интервал горения). Угли Ж1, Ж2 менее реакционноспособны.

Полученные результаты исследования образцов угля разной стадии метаморфизма говорят о том, что существует возможность управлять технологическим процессом пиролиза или газификации таких углей с учетом особенностей этих углей. Также следует учитывать химический состав и структуру тувинских углей при сжигании их слоевым способом в топках малого объема. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании оборудования для энерготехнологической переработки тувинских углей.

Ключевые слова: уголь, стадии метаморфизма, спекаемость, характеристики горения.

Благодарности. Исследование было выполнено при финансовой поддержке российского Фонда Фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-43-420016/20.

Цитирование: Монгуш, Г.Р. Определение особенностей горения углей методами термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии / Г.Р. Монгуш, М.П. Баранова, К.К. Чульдун // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 346–355. DOI: 10.17516/1999-494X-0401

Введение

Одним из приоритетов энергетической политики Российской Федерации является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов и создание необходимых условий для перехода нашей страны к энергосберегающим и экологически чистым направлениям развития тепловой энергетики. Одним из новых центров угледобычи в 2030 году, по прогнозам Министерства энергетики РФ, станет Республика Тыва. На территории региона расположены Элегестское, Межегейское, Каа-Хемское и Чаданское месторождения. Одним из крупнейших угольных месторождений Республики является также Улуг-Хемский угольный бассейн, общая площадь которого охватывает несколько кожуунов: Кызылский, Тандинский, Чеди-Хольский и Пий-Хемский. Улуг-Хемский угольный бассейн включает месторождения «Каа-Хем», «Межегей», «Эрбек», «Элегест», «Чихачево» и Юго-Восточную угленосную область. Запасы этих месторождений промышленные (до 4017605 тыс./т). Марки углей в основном газовые Г, газовые жирные ГЖ, жирные Ж, коксовые слабоспекающиеся низкотемпературные КСН, слабоспекающиеся (отощенные) СС, каменные окисленные (окисленные каменные энергетические) ОК энерг.

На территории Республики Тыва имеются и другие месторождения угля, которые в настоящее время не эксплуатируются, это Онкажинская мульда, Актальская перспективная угленосная площадь, расположенная на территории Чеди-Хольского кожууна, Инитальская площадь на территории Улуг-Хемского кожууна и др.

Угли каждого из месторождений имеют свои особенности, которые влияют на возможность их энерготехнологической переработки и получению расширенного ассортимента возможных продуктов [1–3].

Поскольку основным применением вышеперечисленных углей является энергетическое использование, основное внимание было уделено исследованию особенностей процесса горения спекающихся углей.

Цель работы заключалась в установлении особенностей структуры и состава тувинских углей различных стадий метаморфизма методами термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии для определения возможностей их энерготехнологического использования.

Материалы и методы

Для исследования по стандартным методикам (ГОСТ 9815–75) были отобраны пробы углей месторождений: Каа-Хемское – марка угля ГЖ, Межегейское – марка угля Ж1, Элегестское – марка угля Ж2, а также товарные пробы углей из месторождений: Балахтинское – марка угля БЗ, Аршановское – марка угля Д.

Технический анализ углей проводился по ГОСТ 11022–95; 33503–2015 (ISO 11722:2013, ISO 5068–2:2007); Р 55660–2013; 30404–2013 (ISO 157:1996) и 147–2013 (ISO 1928–2009). Элементный состав углей определяли на универсальном анализаторе Vario EL cube (ELEMENTAR,

Германия), предназначенном для одновременного определения элементов CHNS. Разложение образца происходит в токе кислорода при температуре 1200 °С. Разделение газов – продуктов сгорания проводится по классической технологии «purge & trap».

ИК-спектры образцов углей регистрировали на Фурье-спектрометре «Tensor S 2» в области 400–4000 см⁻¹. Обработку ИК-спектров осуществляли с помощью программного обеспечения OPUS.

Комплексный термический анализ образцов проведен с применением синхронного термоанализатора «SDT Q600». Нагревание осуществляли в интервале температур от 0 до 1000 °С со скоростью 20 °С /мин с одновременной регистрацией состава газов (CO, CO₂, CH₄ и т.п.), выделяющихся при нагревании при помощи ИК-приставки «Nikolet 380». Построение и расшифровка термограмм производились при помощи специального программного обеспечения «TA Universal Analysis 2000». Определяли температуры основных пиков: воспламенения ($T_{\text{вспл}}$), выгорания топлива ($T_{\text{вг}}$), и максимальную температуру (T_{max}) основного пика ДТГ, при которой достигается максимальная скорость потери массы образцов [4].

Результаты и обсуждения

Технический и элементный анализ.

В табл. 1. представлены результаты технического анализа отобранных проб углей.

Данные табл. 1 показывают, что все угли малозольные (не более 10 %), кроме образца Д, который достигает 28 %. Повышенной рабочей влажностью характеризуются образцы Б и Д. Выход летучих веществ закономерно увеличивается в ряду: Ж2 – Д – Ж1 – ГЖ – Б. Все образцы являются малосернистыми (менее 1 %). Теплота сгорания как одна из важнейших характеристик для твердых горючих ископаемых была использована для теплотехнических расчетов, сопоставления свойств углей различных месторождений, марок углей между собой и другими видами топлива, установления степени окисленности углей. Теплота сгорания углей увеличивается в ряду: Б – Д – ГЖ – Ж2 – Ж1. В табл. 2 показан элементный состав исследуемых углей.

Анализ данных табл. 2 показывает, что с увеличением степени метаморфизма (Б–Д–ГЖ–Ж2–Ж1) закономерно увеличивается содержание углерода, водорода и уменьшается содержание кислорода. Особенно это заметно для углей марок Б, Д, ГЖ. На более высоких стадиях метаморфизма (например, для Ж1) содержание углерода возрастает менее интенсивно и его

Таблица 1. Технические характеристики углей

Table 1. Technical characteristics of coals

Марка угля	A^d , %	W_t , %	W_a , %	V^{daf} , %	S_d , %	Q_i , ккал/кг
ГЖ	6,3–9,1	3,0–7,0	1,2–2,0	46,90	0,22	7399
Ж1	4,8–7,7	-	0,9–1,1	32,7–37,2	0,6–0,8	7683
Ж2	5,08	-	2,0	27,6	0,51	6862
Б	4,0–7,0	21,0	-	44,0–48,0	0,3–0,8	4800–5000
Д	27,90	12,0–14,0	-	28,9	0,67–0,86	5800

Таблица 2. Элементный состав органической массы каменных углей

Table 2. Element structure of organic mass of coals

Марка угля	Содержание элементов, масс.%					Атомные соотношения	
	C	H	N	S	O	H/C	O/C
ГЖ	78,9	5,5	1,63	0,0	13,97	0,83	0,13
Ж1	82,5	5,3	2,10	0,0	10,10	0,76	0,09
Ж2	75,0	4,7	2,70	0,3	17,57	0,75	0,17
Б	67,6	5,0	1,08	0,0	26,32	0,89	0,28
Д	57,2	3,8	1,83	0,0	37,17	0,81	0,49

классификационное значение уменьшается. Содержание кислорода уменьшается от 20–30 % у бурых до 10 % у каменных углей. Атомное соотношение Н/С практически одинаково, а соотношение О/С у образцов Б и Д выше, чем в тувинских углях. Содержание серы низкое. Повышенным содержанием азота в органической массе угля характеризуются образцы Ж1, Ж2, Д. Азот входит в состав ОМУ в виде сложных соединений.

Анализ ИК-спектров исследуемых углей

Для установления особенностей состава углей тувинских месторождений и определения соответствующих возможностей их энерготехнологической переработки был проведен анализ ИК-спектров этих углей.

Среди физико-химических методов исследования состава и структуры поверхностных слоев угольных частиц инфракрасная спектроскопия (ИКС) дает наиболее существенную информацию о молекулярном строении органического вещества угля [5]. На рис. 1 видно, что для всех образцов углей характерными оказались следующие группы соединений в частотных областях поглощения, см⁻¹: 3600–3100 – валентные колебания О-Н-групп, связанных водородными связями; 3100–3000 – валентные колебания С-Н-связей в ароматических и непредельных

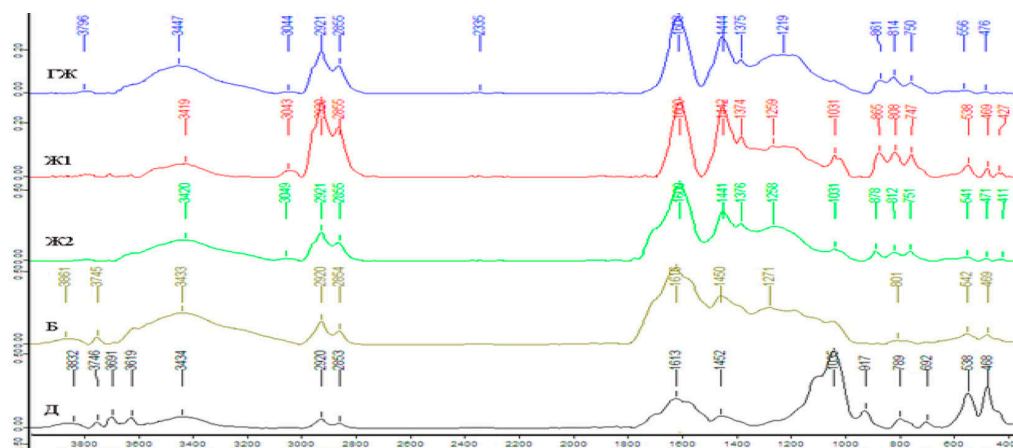


Рис. 1. ИК-спектры образцов углей

Fig. 1. IR spectra of coal samples

соединениях; 2960 – асимметричные колебания алифатических CH_3 -групп; 2920–2850 – симметричные валентные колебания алифатических CH_2 , CH_3 -групп; 1700 – валентные колебания алифатических $\text{C}=\text{O}$ -групп; 1600 – валентные колебания $\text{C}=\text{C}$ -связей ароматического кольца; 1450 – валентные колебания ароматических $\text{C}=\text{C}$ -связей; 1373 – CH_3 -группы в алифатических цепях; 1275–1034 – $\text{C}-\text{C}$ -скелетные колебания; 900–700 – внеплоскостные деформационные колебания ароматических $\text{C}-\text{H}$ -связей; 870 – деформационные колебания мета-дизамещенных ароматических циклов; 815 – деформационные колебания пара-дизамещенных ароматических циклов [6].

Для сравнения были выбраны структурные параметры (табл. 3), рассчитанные на основе метода ИК-спектроскопии. ИК-спектры всех исследуемых образцов сходны. Установлено, что в образцах углей Ж1, Ж2, ГЖ количество ароматического углерода (индекс ароматичности AR_1) наиболее высокое, что говорит о высокой ароматичности, которая влияет на воспламеняемость. Установлено, что содержание ароматических углеводородов в топливе хорошо согласуется с расчетным индексом углеродной ароматичности.

Следует отметить высокий показатель конденсированности (f_c) в углях марок ГЖ и Ж2 по сравнению с другими, у которых показатель снижается до нуля (марка Б). Показатель AR_2 характеризует наличие внеплоскостных деформационных колебаний ароматических $\text{C}-\text{H}$ -связей в соотношении симметричным валентным колебаниям алифатических CH_2 , CH_3 -групп в образцах, и они почти одинаковы для всех тувинских месторождений. Высокий показатель AR_2 замечен для образца Д и низкие – для образца Б. Уменьшение количества ароматического водорода (для образцов Ж2, Б, Д) происходит за счет увеличения кислородсодержащих групп $\text{C}=\text{O}$ (1700 см^{-1}) и OH -фенольных групп ($3600\text{--}3100\text{ см}^{-1}$), подтверждение тому – увеличение структурного параметра $\text{C}=\text{O}$ (рост содержания кислородсодержащих фрагментов). Увеличение доли водорода в алифатических фрагментах ($\text{H}_{\text{al}}/\text{H}$) для образцов углей показывает структурный параметр длины алифатической цепи (CH_3/CH_2).

В образце Д замечен ИК-спектр при 1035 см^{-1} с наибольшей интенсивностью, по сравнению с которым другие ИК-спектры меньше. Поскольку при $1275\text{--}1034\text{ см}^{-1}$ присутствуют $\text{C}-\text{C}$ -скелетные колебания, спектры могут наложиться поверх колебания связи $\text{Si}-\text{O}$ именно при 1035 см^{-1} [7]. Это подтверждается высокой зольностью данного образца. Как следствие, лучше всего предварительно проводить деминерализацию высокзолных углей для качественной оценки данным методом.

Таблица 3. Структурные параметры, рассчитанные на основе метода ИК-спектроскопии

Table 3. The structural parameters calculated by infrared spectroscopy

Марка угля	Структурные параметры, рассчитанные на основе метода ИК-спектроскопии						
	$\text{H}_{\text{al}}/\text{H}$	AR_1	AR_2	f_c	CH_3/CH_2	$\text{C}=\text{O}$	$\text{CH}_{\text{al}}/\text{C}=\text{CAR}$
ГЖ	0,664	0,043	0,506	0,024	1,562	0,505	0,549
Ж1	0,638	0,080	0,566	0,074	1,515	0,502	0,920
Ж2	0,649	0,073	0,541	0,024	1,574	0,574	0,331
Б	0,841	0,000	0,188	0,000	1,680	0,616	0,324
Д	0,473	0,000	1,112	0,000	1,800	0,568	0,330

Параметр $CH_{al}/C=C_{AR}$ позволяет выявить отличия в спекаемости [8] сравниваемых углей различных месторождений – он всегда выше и лучше у спекающихся углей, а при окислении симметрично снижается с уменьшением спекаемости. Согласно оценке этого параметра спекаемость образцов углей в образцах в ряду Ж1-ГЖ-Ж2-Д-Б уменьшается. Большей спекаемостью из тувинских месторождений обладают угли Межегейского и Каа-Хемского месторождений. В образцах углей Ж2, Б, Д наблюдаются «плечи» в области $\approx 1730\text{ см}^{-1}$, которые характерны для $C=O$ валентных колебаний, что свидетельствует о некоторой природноокисленности данных углей и снижении их энергетической ценности.

В ходе работы для экспресс-анализа качественных характеристик топлив был проведен термогравиметрический анализ исследуемых углей. На рис. 2 показана убыль массы образцов при повышении температуры в камере сжигания.

Эти пробы были проанализированы также с применением дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (рис. 3).

Анализ дериватограмм показал, что на кривых ДСК есть эндоэффекты при температуре 90–150 °С, что соответствует температуре выделения гигроскопической влаги угля. При даль-

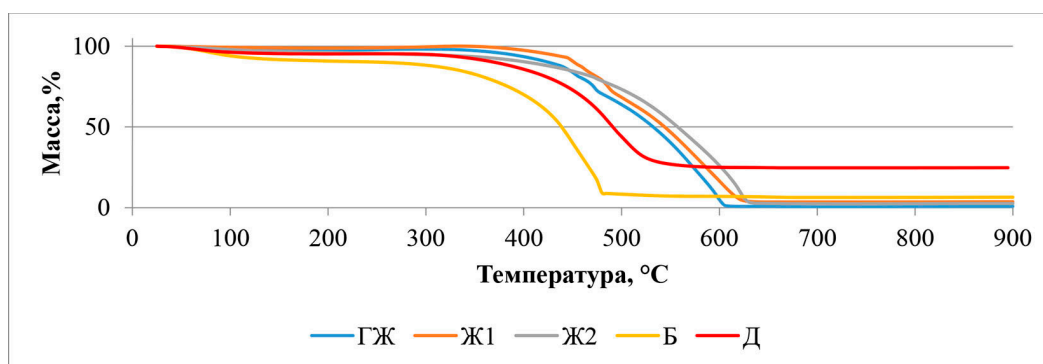


Рис. 2. Убыль массы образцов при повышении температуры в камере сжигания

Fig. 2. Weight loss of samples with increasing temperature in the combustion chamber

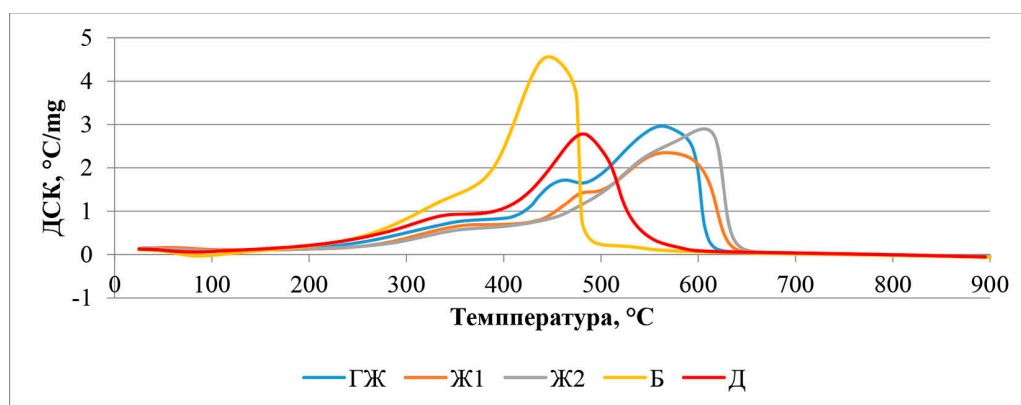


Рис. 3. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) образцов углей

Fig. 3. Differential Scanning Calorimetry (DSC) of coals samples

нейшем повышении температуры до 700 °С (конечная температура сгорания ОМУ) происходит разложение и сгорание органической массы угля (ОМУ) непрерывно с экзотермическим эффектом. «Скачки» в линии ДСК в интервалах 250–350 °С соответствуют периоду деструкции и сгорания алифатических и алициклических фрагментов угля, а интервал 320–440 °С – разрушению ароматических структур [9, 10]. Интервал 440–700 °С соответствует догоранию ОМУ. Для углей Д, Б максимальные пики экзотермического эффекта в линиях ДСК заметны в пределах температур 450–480 °С, для углей ГЖ, Ж1, Ж2 – в диапазоне температур 560–605 °С, что говорит о преобладании ароматических фрагментов угля с более высокими температурами выгорания. Максимальную интенсивность линии ДСК с пиком при температуре 450 °С показал уголь Б низкой стадии метаморфизма, в составе летучих которого присутствуют вещества с высоким содержанием низкомолекулярных углеводородов. В интервале температур 700–800 °С происходит разложение и окисление неорганических соединений (силикатов, карбонатов) минеральной части угля [11, 12], после чего формируется зола (остаток).

Из тувинских углей образец угля марки ГЖ показал высокую активность в процессе горения (снижение конечной температуры выгорания и достаточно узкий температурный интервал горения). Угли Ж1, Ж2 менее реакционноспособны.

Полученные результаты исследования образцов угля разной стадии метаморфизма говорят о том, что существует возможность управлять технологическим процессом пиролиза или газификации таких углей с учетом особенностей этих углей. Также следует учитывать химический состав и структуру тувинских углей при сжигании их слоевым способом в топках малого объема.

Заключение

В ходе работы был проведен технический и элементный анализ проб угольных месторождений Республики Тыва. Были определены особенности химического состава углей тувинских месторождений и установлены соответствующие возможности их энерготехнологической переработки. Методами ИК-спектроскопии установлено, что в образцах углей Ж1, Ж2, ГЖ количество ароматического углерода (индекс ароматичности AR I) наиболее высокое, что влияет на воспламеняемость. Следует отметить высокий показатель конденсированности (fc) в углях марок ГЖ и Ж2. Спекаемость образцов углей в образцах в ряду Ж1-ГЖ-Ж2-Д-Б закономерно уменьшается. Большей спекаемостью из тувинских месторождений обладают угли Межегейского и Каа-Хемского месторождений. В образцах углей Ж2, Б, Д наблюдаются «плечи» в области $\approx 1730 \text{ см}^{-1}$, которые характерны для C=O валентных колебаний, что свидетельствует о некоторой природноокисленности данных углей и снижении их энергетической ценности. При окислении улей происходит разрушение ароматических структур с образованием низкомолекулярных углеводородов, что, в свою очередь, снижает температуру максимального разложения угля и низшую теплоту сгорания, но увеличивает температуру воспламеняемости топлива из-за кислородсодержащих соединений.

Термогравиметрический анализ и дифференциальная сканирующая калориметрия показали, что из тувинских углей образец угля марки ГЖ имеет высокую активность в процессе горения (снижение конечной температуры выгорания и достаточно узкий температурный интервал горения). Угли Ж1, Ж2 менее реакционноспособны.

Полученные результаты исследования образцов угля разной стадии метаморфизма говорят о том, что существует возможность управлять технологическим процессом пиролиза или газификации таких углей с учетом особенностей этих углей. Также следует учитывать химический состав и структуру тувинских углей при сжигании их слоевым способом в топках малого объема. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании оборудования для энерготехнологической переработки тувинских углей.

Список литературы / References

- [1] Лебедев Н.И. *Угли Тувы: Состояние и перспективы освоения сырьевой базы*. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2007. 180 с. [Lebedev N.I. *Ugli Tuva: The state and prospects of the development of the raw material base*. Kyzyl: TuvIKOPR SB RAS, 2007. 180 p. (in Russian)]
- [2] Тас-оол Л.Х., Янчат Н.Н. Техногенное загрязнение воздушной атмосферы. *Природные ресурсы, среда и общество*, 2019, 3, 56–61 [Tas-ool L.Kh., Yanchat N. N. Technogenic pollution of the air atmosphere. *Natural resources, wednesday and society*, 2019, 3, 56–61. (in Russian)]
- [3] Куликова М.П. Котельников В.И. Перспективы использования и потенциал каменных углей Улуг-Хемского бассейна. *Уголь*, 2011, 11 (1028), 41–43 [Kulikova M.P. Kotelnikov V. I. Prospects of use and potential of coals of the Ulug-Hemsky pool. *Coal*, 2011, 11 (1028), 41–43 (in Russian)]
- [4] Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Кузнецов П.Н., Стебелева О.П., Самойло А.С. Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Хакасия, сосновых опилок и их смесей. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2021. 14(6), 611–622 [Zhuikov A. V., Matyushenko A. I., Kuznetsov P.N., Stebeleva O.P., Samoilov A.S. Thermogravimetric analysis of the gorenje of the Republic of Khakassia, pine sawdust and their mixtures. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2021, 14(6), 611–622 (in Russian)]
- [5] Юсупов Т.С., Шумская Л.Г., Бурдуков А.П. Логвиненко В.А. Реакционная способность углей различных стадий метаморфизма в процессах термоокислительной деструкции. *Химия в интересах устойчивого развития*, 2011, 19(4), 427–432 [Yusupov T.S., Shumskaya L.G., Burdukov A.P. Logvinenko V.A. Reactionary ability of coals of various stages of a metamorphism in processes of thermooxidizing destruction. *Chemistry in interests of a sustainable development*, 2011, 19(4), 427–432 (in Russian)]
- [6] Монгуш Г.Р. Исследование изменения технических показателей и химических свойств (методом ИК-спектрального анализа) угольных смесей тувинских месторождений. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2019, 12, 157–162 [Mongush G.R. Research of change of technical indicators and chemical properties (method of the IK-spectral analysis) coal mixes of the Tuva fields. *International magazine of applied and basic researches*, 2019, 12, 157–162 (in Russian)]
- [7] Федорова Н.И., Малышева В.Ю., Исмагилов З.Р. Ик-спектроскопия инертинитов каменных углей различных стадий метаморфизма. *Вестник Кузбасского государственного университета*, 2018, 3(127), 86–93 [Fedorova N. I., Malysheva V. Yu., Ismagilov Z.R. Ik spectroscopy inertinites coals of various stages of a metamorphism. *Vestnik of the Kuzbass state university*, 2018, 3(127), 86–93 (in Russian)]
- [8] Котельников В.И., Федянин В.Я., Баринев А.В., Рязанова Е.А. Экологически безопасные технологии получения угольного топлива. *Ползуновский вестник*, 2012, 3–1, 42–46. [Kotelnikov

V. I., Fedyanin V. Ya., Barinov A.V., Ryazanova E.A. Ekologicheski safe technologies of receiving coal fuel. *Polzunovsky vestnik*, 2012, 3-1, 42–46 (in Russian)]

[9] Jingyu Jiang, Weihua Yang, Yuanping Cheng, Zhengdong Liu, Qiang Zhang. Molecular structure characterization of middle-high rank coal via XRD, Raman and FTIR spectroscopy. Implications for coalification. *Fuel*, 2019, 239, 559–572.

[10] Baranova M, Grishina I, Damdinov B and Gomboev R. Dispersed-colloidal fuel systems, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019, 704, 012015

[11] Гандандорж Ш. Извлечение меди и молибдена сорбентами на основе окисленных углей из хвостов флотации: на примере КОО «Предприятие Эрдэнэт». автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2013. 18 с. [Gandandorzh. Copper and molybdenum extraction by sorbents on the basis of the oxidized coals from flotation tails: on the example of KOO “Enterprise of Erdenet”. Cand.Tech.Sci. Irkutsk, 2013. 18 p. (in Russian)]

[12] Патраков Ю.Ф., Семенова С.А., Федорова Н.И. Влияние различных методов модификации бурого угля на изменение его химического состава и поведение при пиролизе. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2008, 1, 31–34 [Patrakov Yu.F., Semenova S. A., Fedorova N. I. Influence of various methods of modification of brown coal on change of its chemical composition and behavior at pyrolysis. *Vestnik of the Kuzbass state technical university*, 2008, 1, 31–34 (in Russian)]

Theoretical and Applied Heating Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

DOI: 10.17516/1999-494X-0403

УДК 699.865

Experimental Study of the Effective Insulation
of Building Envelopes

Pavel V. Petrov^a,
Viktor R. Vedruchenko^a, Evgeny V. Rezanov^a,
Ivan I. Kadtsin^a and Vladimir A. Kulagin^{*b}

^a*Omsk State Transport University
Omsk, Russian Federation*

^b*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 10.04.2022, received in revised form 04.05.2022, accepted 20.05.2022

Abstract. The relevance of research is caused by the fact that at present, modern standards for saving thermal energy and thermal protection of buildings are focused on the use of a very limited set of solutions to reduce energy consumption, which do not always meet the specific conditions of construction and are often very expensive. A method for studying the effective insulation of building envelopes is proposed, taking into account the relationship between structural, heating, regime parameters and economic indicators. The goal is to determine the optimal value of the insulation thickness of the heat-insulating material, taking into account the thermal energy supplied to the object. The study used methods of mathematical modeling of heat transfer, optimization problem. An experimental study is presented, showing the possibility of applying the method of technical and economic optimization of thermal insulation of building envelopes. It was determined on the basis of the mathematical model of the thermal insulation of building envelopes developed by the authors, taking into account the regulation of the supplied thermal energy. The result of the study is to reduce the cost of heat losses through building envelopes and electrical energy for the regulation of the “heating, ventilation and air conditioning” system. The conducted studies testify to the expediency of using the proposed developments, which contribute to determining the optimal thickness of wall insulation with heat-insulating material, finding the minimum reduced costs, and an advantageous choice of a method for regulating the supplied thermal energy.

Keywords: research, efficiency, costs, thermal energy, building envelopes, optimal thickness.

Citation: Petrov, P.V., Vedruchenko, V.R., Rezanov, E.V., Kadtsin, I.I. and Kulagin, V.A. Experimental study of the effective insulation of building envelopes, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 356–367. DOI: 10.17516/1999-494X-0403

Экспериментальное исследование эффективности утепления наружных ограждающих конструкций стен здания

П. В. Петров^а, В. Р. Ведрученко^а,
Е. В. Резанов^а, И. И. Кадцин^а, В. А. Кулагин^б

^аОмский государственный университет путей сообщения
Российская Федерация, Омск

^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Актуальность исследований обусловлена тем, что в настоящее время современные нормы сбережения тепловой энергии и теплозащиты зданий ориентированы на применение весьма ограниченного набора решений по снижению энергетического потребления, не всегда отвечающих конкретным условиям строительства и зачастую весьма дорогостоящих. Предложена методика исследования эффективного утепления ограждающих конструкций стен зданий, учитывающая взаимосвязь конструктивных, теплотехнических, режимных параметров и экономических показателей. Целью является определение оптимального значения толщины утепления теплоизоляционным материалом объекта с учетом отпускаемой ему тепловой энергии. В проведенном исследовании использовались методы математического моделирования теплообмена, оптимизационной задачи. Представлено экспериментальное исследование, показывающее возможность применения методики технико-экономической оптимизации тепловой изоляции ограждающих конструкций стен здания. Результатом исследования является снижение расходов тепловых потерь через ограждающие конструкции и электрической энергии на регулирование системы «отопление, вентиляция и кондиционирование». Проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности использования предложенных разработок, способствующих определению оптимальной толщины утепления теплоизоляционным материалом стен объектов, нахождению минимальных приведенных затрат, выгодному выбору способа регулирования отпускаемой тепловой энергии.

Ключевые слова: исследование, эффективность, затраты, тепловая энергия, ограждающие конструкции, оптимальная толщина.

Цитирование: Петров, П. В. Экспериментальное исследование эффективности утепления наружных ограждающих конструкций стен здания / П. В. Петров, В. Р. Ведрученко, Е. В. Резанов, И. И. Кадцин, В. А. Кулагин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 356–367. DOI: 10.17516/1999-494X-0403

Introduction

Developments in the field of improving the energy efficiency of thermal protection and mathematical modeling of the thermal regime of buildings are widely known [1–8]. An analysis of the data of scientific developments shows the need to improve the theory in terms of optimizing the thermal parameters of the insulation of building envelopes, taking into account the regulation of the released thermal energy.

The purpose of the experiment is to assess the possibility of using the developed mathematical model and algorithm for determining the optimal wall insulation thickness in order to predict the heat consumption of buildings based on a comparison of the measured (statistical), calculated average daily and annual consumption values for heating, ventilation and air conditioning.

I. Methods

The “passive experiment” was chosen as the experimental method, which implies the observation and collection of the necessary statistical information about the object under study during its normal operation and comparison with the calculated data.

The duration of the time period during which the experiment was carried out is weekly (daily) and annual cycles.

The study was carried out during an energy audit of a residential complex in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, the city of Khanty-Mansiysk, together with FSBEI HE OmGUPS and Inkomb-Energo LLC. The period of the audit is from 16 to 22 January 2017.

The object accepted for the “passive experiment” is a multifunctional residential building with its own roof-top boiler house, located at Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra, Khanty-Mansiysk, Gagarin Street, 141. The building was built in 2015, the number of apartments is 77, 100 residents.

Architectural and planning solutions of the building: number of floors – 11; floor height (average) – 3.06 m; heated area of the building – 6929.6 m²; heated volume of the building – 23593.58 m³; wall area – 4073.30 m²; roof area – 845.00 m²; door area – 20.00 m²; window area – 462.00 m²; floor area – 813.00 m².

Functional groups of the building premises: floor below 0.000 – public premises; from the first to the ninth floor – residential and public premises; the tenth floor – utility premises.

Walls: brickwork made of M100 bricks (thermal conductivity 0.44 W/mK) of 500 mm thick; mineral wool insulation (thermal conductivity 0.042 W/mK) of 150 mm thick, lining with cassettes, conditional resistance of the fence to heat transfer 4.86 m² °C/W.

Windows: PVC single window unit with double glazing, reduced heat transfer resistance 0.65 m² °C/W.

Doors: metal, insulated with mineral wool of 50 mm thick (thermal conductivity 0.042 W/mK), reduced heat transfer resistance 1.4 m² °C/W.

Floors: 220 mm thick reinforced concrete slab (thermal conductivity 1.92 W/mK), average reduced heat transfer resistance 2.9 m² °C/W.

The heat supply of the building is carried out at the expense of its own roof gas boiler room.

The principal thermal diagram of the rooftop boiler room is shown in Fig. 1, the photo is shown in Fig. 2.

The connection of engineering heating systems of the building to the roof boiler room is carried out according to a dependent scheme.

Estimated temperature curve for regulating the network circuit of the rooftop boiler room 110–70 °C, the heat carrier in the supply and return pipelines of the hot water supply and heating system of the building, for design conditions 95–70 °C.

The regulation of the heat carrier circulating in the “heating, ventilation and air conditioning” system of the building is carried out in a qualitative and quantitative way (Fig. 3) by changing the temperature and flow rate of the heat carrier, depending on the outdoor air temperature and the temperature of the heat carrier in the return pipeline. To measure the consumption of thermal energy and temperatures, a thermal energy metering unit is provided.

The heating system is two-pipe vertical with top branching.

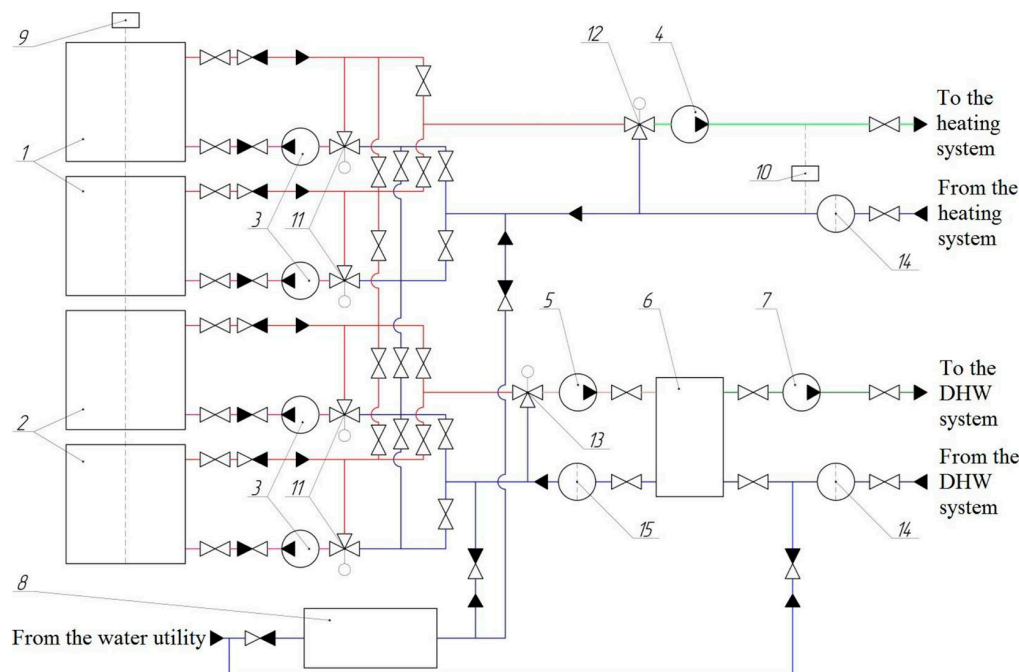


Fig.1. Principal thermal diagram of a rooftop boiler room: 1 – hot water boiler of the heating circuit; 2 – hot water boiler of the hot water supply circuit (DHW); 3 – circulation pump of the boiler circuit; 4 – circulation pump of the “heating, ventilation and air conditioning” system circuit; 5 – circulation pump of the hot water supply system; 6 – hot water heat exchanger; 7 – circulation pump for hot water supply; 8 – water treatment; 9 – gas consumption metering unit; 10 – metering unit for thermal energy of the “heating, ventilation and air conditioning” system; 11 – three-way valve for regulating the water flow of the boiler circuit; 12 – three-way valve for regulating the supply of thermal energy to the “heating, ventilation and air conditioning” system; 13 – three-way valve for regulating the hot water circuit; 14 – mud pan with filter

Bimetal radiators are installed as heating devices in the apartments. Thermostatic and shut-off valves are installed on the connections to heating devices.

Aluminum radiators with thermostatic and shut-off valves are installed in the public areas and the technical floor.

The building is ventilated with a natural impulse. The exhaust ducts of the ventilation system are implemented according to the scheme with satellite ducts connected to the prefabricated exhaust duct under the ceiling of the overlying floor. Exhaust air ducts are made of thin-sheet galvanized steel. There is no air conditioning in the building.

As the measured data of the outdoor climate parameters, the actual average values of the outdoor air temperatures obtained by the operation service using a thermometer were taken and compared with the Gismeteo data (Fig. 4).

The temperature of the indoor air measured with a thermometer from January 16 to January 22, 2017 showed an average of 20 °C for the premises.

Measurement of the daily values of heat consumption in the building (heating) was carried out by the Elf-04n VSTN Du50 heat meter installed in the individual heat substation of the rooftop boiler room. The indication of the electric power of the pumping equipment is carried out by the Smart IMS NP73L.2–5–2 counter.



a) hot water boilers of the hot water circuit



b) hot water boilers of the heating system circuit

Fig. 2. Photos of the roof boiler room

Table 1. Statistical data on daily changes in building heat consumption

Date, dd.mm.yy	Thermal energy consumption, Gcal/day						
	16.01.17	17.01.17	18.01.17	19.01.17	20.01.17	21.01.17	22.01.17
1	2	3	4	5	6	7	8
Value	4.4	3.8	4.3	4.5	5.8	3.9	7.6

Statistical data on daily and annual (for 2016) changes in the heat consumption of the building were received from the operation service (Table 1).

The actual thermal energy consumption by the building and the electrical energy consumption by the pump system is provided by the operation service for the heating period of 2016 according to metering devices (under actual conditions HSDD=7022.4 °C day, $t_{out}=-48$ °C, $t_{in}=20$ °C, $t_h=-6.6$ °C): heat consumption $Q_{act}=726.18$ Gcal/year; electrical consumption $E_{act}=7117$ kWh/year. Costs for 2016 are shown in Table. 2.

The daily values of heat consumption for heating the building according to architectural and planning solutions, thermal characteristics of enclosing structures and the mode of operation of the premises were calculated and compared with the project documentation.

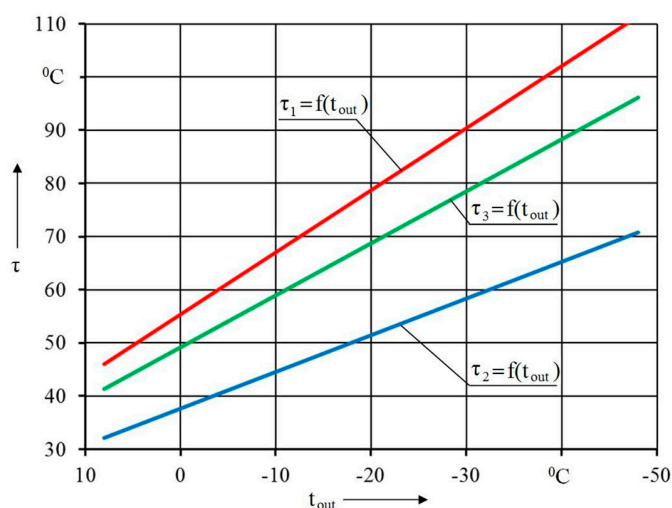


Fig. 3. Temperature chart of qualitative and quantitative regulation

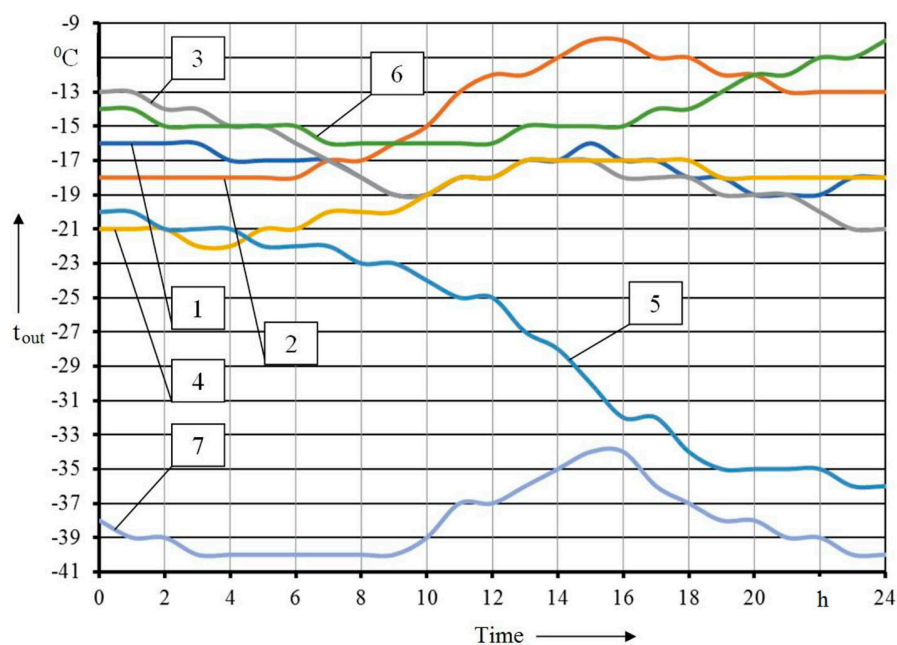


Fig. 4. Changes in outdoor temperatures: 1–16.01.2017; 2–17.01.2017; 3–18.01.2017; 4–19.01.2017; 5–20.01.2017; 6–21.01.2017; 7–22.01.2017

Table 2. Total costs for 2016

C_h , rub/J	C_{p}^{el} , rub/Wh	C_h , rub/year	C_{el} , rub/year	$C_a + C_0$, rub/year
1	2	3	4	5
4.287×10^{-7}	2.63×10^{-3}	1301729	18718	572700

According to the project documentation, the amount of ventilation air exchange in the apartments of a multifunctional residential complex is determined at the rate of 3 m³/h per 1 m² of the living room area and compensation for the exhaust from the kitchens, bathrooms and toilets. The value of ventilation air exchange in the premises of technical floors was taken in accordance with the standard value. On average, it amounted to (value of ventilation air exchange) $\eta_v = 0.65 \text{ h}^{-1}$.

The value of non-stationary household heat gains in the apartment premises is uncertain. At the same time, this value can have a significant impact on the heat balance of the building and, as a result, on the daily and annual values of heat consumption for heating. To calculate heat consumption for heating, the amount of household heat emissions was taken according to the Russian State Standard SP 50.13330.2012 “Thermal protection of buildings” (<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293799/4293799306.pdf>).

The measured average values were taken as the initial data for the temperature values of the internal premises and external enclosing structures.

The value of the optimal thickness of thermal insulation can be found based on the minimum of the total reduced discounted costs for the building envelopes I_w , by equating to zero the partial derivatives of δ_{ins} function with respect to the optimized parameter, rub/year:

$$\frac{dI_w}{d\delta_{ins}} = (86400 \cdot z_h \cdot C_t + b) \cdot \frac{dQ_w}{d\delta_{ins}} + (E_w + H) \cdot \frac{dK_w}{d\delta_{ins}} = 0, \quad (1)$$

where δ_{ins} – thickness of the insulating layer of the heat-insulating material of the building envelopes, m; z_h – the duration of the heating period, days/year; C_t – the average annual cost of thermal energy, rub/J; b – a complex of quantities; Q_w – heat losses through the outer walls, W; E_w – the coefficient of efficiency of investments in thermal insulation of building envelopes, 1/year; H – the rate of deductions in relative units for depreciation and annual maintenance of the building’s heat consumption system, 1/year; K_w – investment in heat-saving measures for insulating the building envelope with thermal insulation, rub.

The solution of equation (1) is represented as:

$$\delta_{ins}^{opt} = -R_{est} \cdot \lambda_{ins} + \sqrt{\frac{(86400 \cdot z_h \cdot C_t + b) \cdot \lambda_{ins} \cdot (\sum F_{w,i} \cdot (t_{in,i} - t_h) \cdot n_i)}{r_0 \cdot \eta \cdot (E_w + H) \cdot C_{ins} \cdot F_w}}, \quad (2)$$

$$b = \frac{C_p^{el} \cdot k \cdot H_p \cdot \gamma \cdot Z_p \cdot N_p^{work}}{\rho_l \cdot C_l \cdot (\tau_3 - \tau_2) \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_p}, \quad (3)$$

where δ_{ins}^{opt} – optimal thickness of the insulating layer of the heat-insulating material, m; R_{est} – the established resistance to heat transfer of the building envelope, (m² °C)/W; λ_{ins} – thermal conductivity of the insulating layer of the heat-insulating material of the building envelope, W/(m°C); $F_{w,i}$ – surface area of the building envelopes of the i -th zone in the room, m²; $t_{in,i}$ – design temperature of the internal air of the i -th zone in the building premises, °C; n_i – coefficient depending on the position of the outer surface of the building envelope in relation to the outside air; r_0 – the coefficient of thermal engineering homogeneity of the enclosing structure; η is the coefficient of divergence of the average over the area of the conditional resistance to heat transfer of the building walls, when it is insulated from the outside with heat-insulating material; C_{ins} – the cost of 1 m³ of heat-insulating material, rub/m³; F_w – the total surface area of the building envelope after its thermal insulation, m²; C_p^{el} – the average annual cost of

electrical energy consumption by the transfer pump, rub/W·h; Z_p – the duration of the pump operation during the day, h; N_p^{work} – number of working days of pumping equipment per year, 1/year; k – the safety factor; H_p – head developed by the pump, m; γ – the specific gravity of the pumped liquid, N/m³; η_{tr} – transmission efficiency; η_p – pump efficiency; ρ_l – density of the pumped liquid, kg/m³; C_l – the heat capacity of the pumped liquid, J/kg°C; τ_3 – the current temperature of the pumped liquid in the supply pipeline of the heating system, °C; τ_2 – the current temperature of the pumped liquid in the return pipeline of the heating system, °C.

II. Results

As a result of the calculation, the average daily values of heat consumption for heating the building (with qualitative and quantitative regulation) were obtained for the time period from January 16, 2017 to January 22, 2017 (Table 3).

Calculation of the heat energy consumption by the building for the heating period of 2016, performed on a computer according to the proposed method, with the actual conditions of HSDD=7022.4 °C day, $t_{out}=-48$ °C, $t_{in}=20$ °C, $t_h=-6.6$ °C, showed $Q_{calc}=721.83$ Gcal/year. The costs are given in Table 4.

To analyze the processes of supplying thermal energy, graphs of qualitative (Fig. 5) and quantitative regulation (Fig. 6), dependences $Q_w=f(\delta_{ins})$ and $Q_h=f(\delta_{ins})$ (Fig. 7), $P_p=f(\delta_{ins})$ were plotted (Fig. 8), as well as the dependence of the reduced discounted costs for the insulation of building envelopes (Fig. 9).

The determination of the reduced discounted costs for the insulation of the outer walls of the building and the optimal value of the thermal insulation thickness calculated on a computer showed (Fig. 9): $I_w^{quan}=3161502$ rubles / year, $\delta_{ins}^{opt}=0.159$ m with quantitative regulation; $I_w^{qual-quant}=3182631$ rubles/year, $\delta_{ins}^{opt}=0.16$ m with qualitative and quantitative regulation; $I_w^{qual}=3189254$ rubles/year, $\delta_{ins}^{opt}=0.161$ m with qualitative regulation.

III. Discussion

Comparison of the results of measured (Table 3) and calculated (Table 5) daily values of the building heat consumption shows their sufficient degree of coincidence. An analysis of the change in

Table 3. Calculated data of daily values of building heat consumption

Date, dd.mm.yy	Thermal energy consumption, Gcal/day						
	16.01.17	17.01.17	18.01.17	19.01.17	20.01.17	21.01.17	22.01.17
1	2	3	4	5	6	7	8
Value	4.41	3.93	4.38	4.53	5.9	3.92	7.53

Table 4. Total costs for 2016

C_h , rub/J	C_p^{el} , rub/Wh	C_h , rub/year	C_{el} , rub/year	C_a+C_0 , rub/year
1	2	3	4	5
4.287×10^{-7}	2.63×10^{-3}	1293931	17346.9	572700

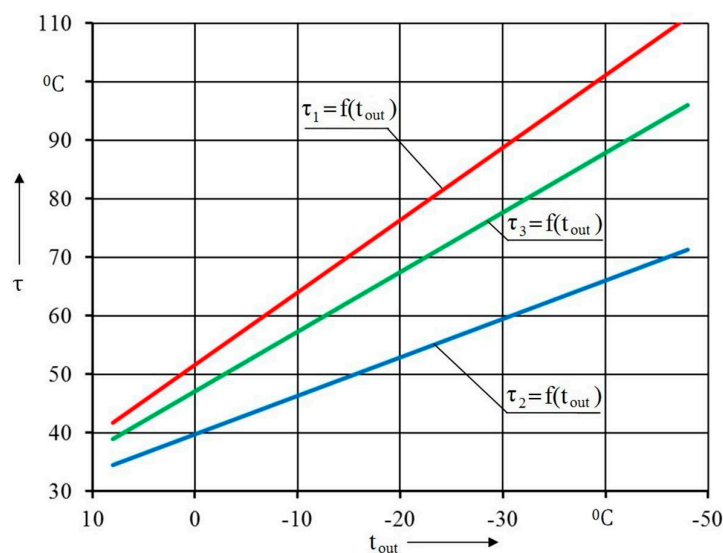


Fig. 5. Qualitative regulation temperature chart

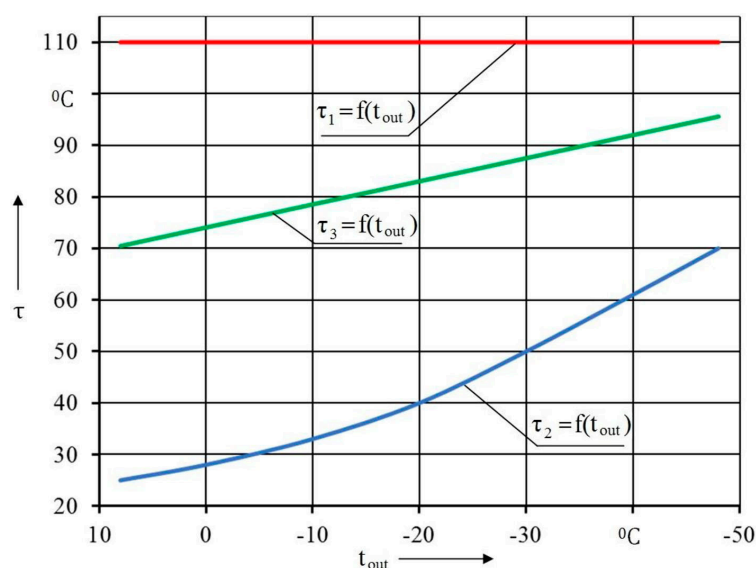


Fig. 6. Quantitative regulation temperature chart

the discrepancy showed that the discrepancy between the measured and calculated values does not exceed 2 %.

An analysis of the technical and economic characteristics of the object and the graphs shown in Figures 7–9 shows the convergence of the results' coincidence in terms of the insulated thickness of the heat-insulating material and costs with given regulation of the thermal energy supply for the base year 2016.

The calculation results (Fig. 9) show that, for the object under study, the most effective process for regulating the supplied thermal energy is “quantitative regulation” (gives savings in the consumption of electrical energy for the drive of pumping equipment).

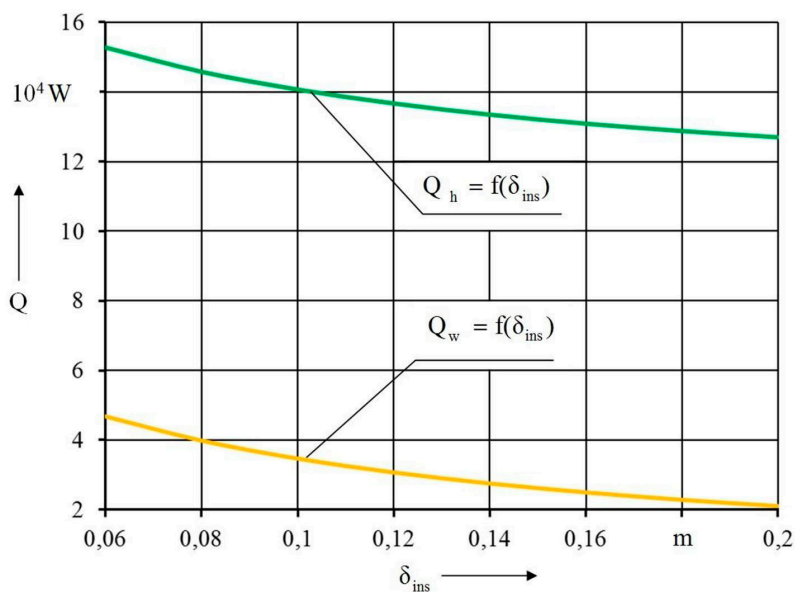
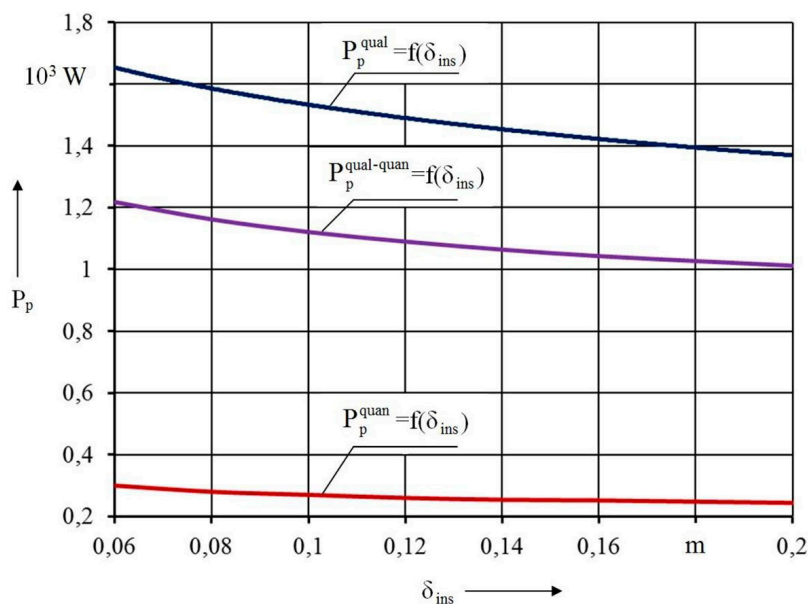
Fig. 7. Dependencies of Q_w , Q_h on δ_{ins} 

Fig. 8. Dependence of P_p on δ_{ins} : P_p^{qual} – average power of pumping equipment with qualitative regulation of the supplied thermal energy, W; $P_p^{qual-quan}$ – average power of pumping equipment with qualitative and quantitative regulation of the supplied thermal energy, W; P_p^{quan} – average power of pumping equipment with quantitative regulation of the supplied thermal energy, W

If we take the effective value of thermal insulation of 0.16 m, which is 0.01 m more than already installed (0.15 m), then a difference of 10 mm would reduce heat losses through the building envelope, the consumption of electrical energy and fuel (natural gas) burned in the boiler units of the rooftop boiler room by an average of 2–5 %.

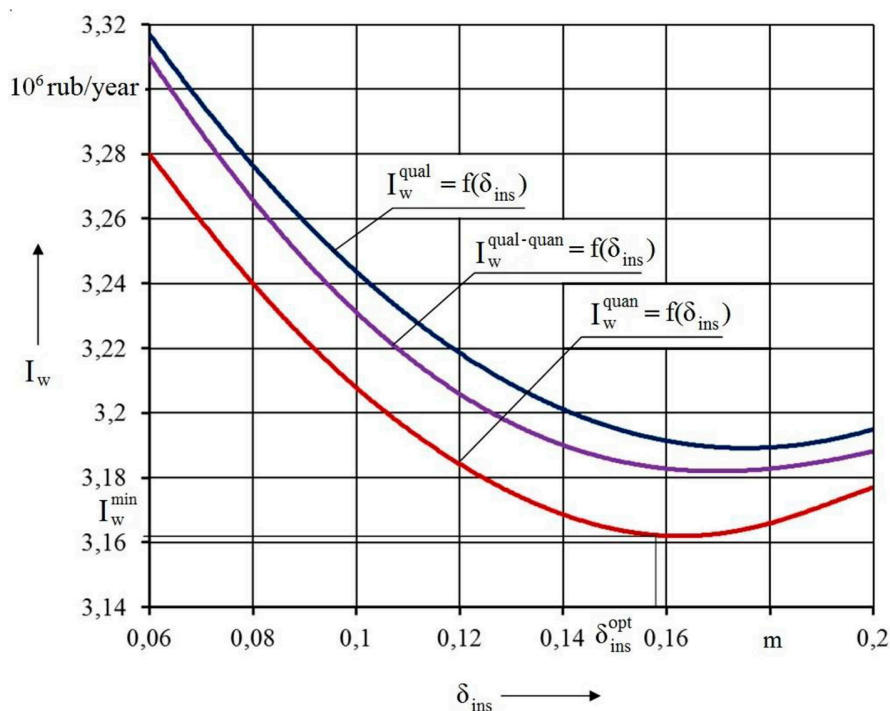


Fig. 9. The dependence of the reduced discounted costs on the thickness of the thermal insulation layer for the building envelopes: I_w^{qual} – the reduced discounted costs for the insulation of the external enclosing structures of walls with the qualitative regulation of the supplied thermal energy, rub/year; $I_w^{\text{qual-quan}}$ – reduced discounted costs for thermal insulation of external enclosing structures of walls with qualitative and quantitative regulation of the supplied thermal energy, rub/year; I_w^{quan} – reduced discounted costs for the insulation of the outer enclosing structures of the walls with the quantitative regulation of the supplied thermal energy, rub/year

After analyzing the data of the experiment and calculation, we can conclude that the developed mathematical model and the algorithm “determining the optimal thickness of thermal insulation of the building envelope” are adequate.

References

- [1] BS EN 15603:2008. Energy performance of buildings. Overall energy use and definition of energy ratings. Effective 2008–09–30. 66.
- [2] Hong, T. et al. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings, *Applied Energy*. 2014. 126. 90–106.
- [3] Crawley, D.B. et al. Contrasting the Capabilities of building energy performance simulation programs: report. United States Department of Energy: University of Strathclyde: University of Wisconsin. 2005. July. 59.
- [4] Hoes, P. et al. User behavior in whole building simulation. *Energy and Buildings*. 2009. 41. 295–302.
- [5] Fabi, V. et al. Description of occupant behaviour in building energy simulation: state of art and concepts for improvements. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14–16 November. Proceedings of Building Simulation. 2011. 2882–2889.

[6] Alajmi, A. Energy audit of an educational building in a hot summer climate. *Energy and Buildings*. 2012. 47. 122–130.

[7] Lubina P., Nantka M. Internal heat gains in relation to the dynamics of buildings heat requirements, *Architecture civil engineering environment*. 2009. 1. 137–142.

[8] Maile T., Fischer., Bazjanac V. Building energy performance simulation tools. A life-cycle and interoperable perspective: report. Center for Integrated Facility Engineering. 2007. Dec. 43.

**Information and
Communication
Technologies
Информационно-
коммуникационные
технологии**



DOI: 10.17516/1999-494X-0396

УДК 519.213

Probabilistic Assessment of Objects Belonging to a Given Class Based on the Combination of Multispectral Images of Different Times

Vitalii S. Svishcho^a,

Andrey I. Uvarov^{*a} and Oleg V. Kryukov^b

*^aMilitary Training and Research Center of the Air Force
«Air Force Academy ft. Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»
Voronezh, Russian Federation*

*^bVoronezh State Agrarian University named after Peter I
Voronezh, Russian Federation*

Received 29.12.2021, received in revised form 18.03.2022, accepted 24.03.2022

Abstract. Object detection is the task of classifying and localization of objects in an image. This article discusses methods of image aggregation. Probabilistic indicators of the quality of optoelectronic means when detecting images of observed objects are determined. The technique of image aggregation in a multispectral optoelectronic system based on the probabilistic belonging of an object to a given class is presented. Probabilistic data on the object belonging to a given class using the machine learning method were obtained. The results of image aggregation with different parameters of the classification criterion are presented.

Keywords: object detection and recognition, combining, deep learning, probability estimation

Citation: Svishcho, V.S., Uvarov, A.I., Kryukov, O. V. Probabilistic assessment of objects belonging to a given class based on the combination of multispectral images of different times. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 370–380. DOI: 10.17516/1999-494X-0396

Вероятностная оценка принадлежности объектов к заданному классу на основе комплексирования разновременных многоспектральных изображений

В. С. Свищо^а, А. И. Уваров^а, О. В. Крюков^б

*«Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
Российская Федерация, Воронеж*

*^бВоронежский государственный аграрный университет имени Петра I
Российская Федерация, Воронеж*

Аннотация. Обнаружение объектов – это задача классификации и локализации объектов на изображении. В этой статье рассматриваются методы комплексирования изображений. Определены вероятностные показатели качества оптико-электронных средств при обнаружении образов наблюдаемых объектов. Представлена методика комплексирования изображений в многоспектральной оптико-электронной системе на основе вероятностной принадлежности объекта к заданному классу. Получены вероятностные данные о принадлежности объекта к заданному классу с использованием метода машинного обучения. Приведены результаты комплексирования изображений при различных параметрах критерия классификации.

Ключевые слова: обнаружение и распознавание объектов, совмещение, глубокое обучение, оценка вероятности.

Цитирование: Свищо, В. С. Вероятностная оценка принадлежности объектов к заданному классу на основе комплексирования разновременных многоспектральных изображений / В. С. Свищо, А. И. Уваров, О. В. Крюков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 370–380. DOI: 10.17516/1999-494X-0396.

Введение

Оптико-электронные системы (ОЭС) находят все более широкое применение в самых различных областях науки и техники. Современный этап их развития характеризуется быстрым совершенствованием элементной базы, в частности, развитием оптико-электронных технологий, матричных многоэлементных приемников излучения. Данные технологии позволяют перейти к решению важнейших и актуальных задач по выделению полезных оптических сигналов и образов на фоне второстепенных, мешающих излучающих и отражающих полей путем приема изображений в двух и более диапазонах оптического спектра, т.е. к созданию многодиапазонных ОЭС [1].

Одним из составляющих элементов, участвующих в обработке получаемых многоспектральных данных, является их комплексирование. Под комплексированием будем понимать совместную обработку изображений одного участка сцены, полученных фотоприемниками разного спектрального диапазона. На результирующем изображении должна повыситься заметность элементов сцены и его деталей. Это реализуется благодаря извлечению дополнительных признаков об объекте интереса на основе взаимосвязи яркостных характеристик. Основной задачей комплексирования является определение интересующих нас компонентов информации на изображениях, полученных от фотоприемников разного спектрального диапазона, и даль-

нейший вывод ее на результирующее изображение. При этом необходимо обеспечить высокую скорость обработки в режиме времени, близкого к реальному.

Структурная схема и принцип работы МОЭС

Примерная структурная схема многоспектральных ОЭС приведена на рис. 1. Назначение и функционирование оптической системы МОЭС имеет такие же функции, как у такой системы во всех ОЭС [2], и выполняет функцию сбора необходимой информации, под которой мы понимаем получение изображений элементов сцены. Матричные фотоприемники собирают необходимые потоки излучения и формируют изображение элементов сцены. Далее происходит разделение спектрального диапазона на n отдельных каналов ($\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_{n-1}, \Delta\lambda_n$). Далее поток данных попадает на приемник излучения (ПИ₁, ПИ₂, ..., ПИ_{n-1}, ПИ_n), который преобразует оптический сигнал в электрический. Дальнейшая обработка сигналов идет в электронном блоке обработки сигналов. Система объединения (совмещения) изображений объединяет изображения разных спектральных диапазонов в совмещенное. На устройстве вывода осуществляется вывод результирующего изображения на дисплей или другие устройства.

Элементы сцены, которые характеризуются множеством информативных признаков (пространственное положение, спектр, форма объектов и т.д.), формируются в отдельных каналах, сигналы которых представляют собой функцию распределения освещенности на приемнике излучения. Цифровые изображения ($R_1, R_2, \dots, R_i$), сформированные на выходе электронного блока, впоследствии будут представлять объединенное множество (S).

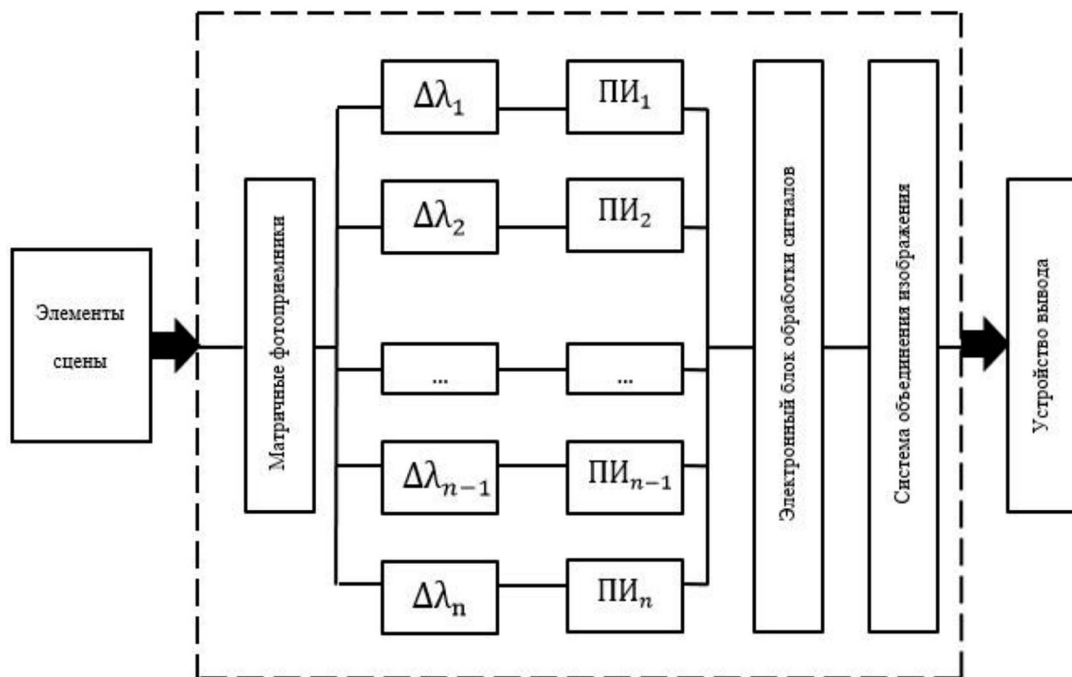


Рис. 1. Структурная схема многоспектральных ОЭС

Fig. 1. Block diagram of multispectral OES

$$R_1, R_2, \dots, R_l \subset S.$$

В итоге задача комплексирования сводится к нахождению функций пространственного преобразования и преобразования яркости. Устранение геометрических искажений можно отнести к пространственным преобразованиям, а необходимость учета преобразования яркости возникает из-за изменения освещения, сезонных и суточных изменений. Конечным продуктом комплексирования может быть как единое полутоновое, так и псевдоцветное изображение, на котором с заявленной точностью отображаются спектральные признаки элементов сцены.

Методы комплексирования изображений

Существует множество методов и алгоритмов комплексирования [3]. Но большая часть из них эффективна лишь для двухспектральных изображений, либо данные алгоритмы являются вычислительно затратными для многоспектральных изображений. Также в данных алгоритмах не принимаются к обработке изображения одной сцены, полученные в разные интервалы времени, что значительно поспособствует получению более полной информативности элементов сцены. Далее будут рассматриваться методы, в которых под комплексированием понимается такое совмещение нескольких изображений, которое приводит к повышению информативности по сравнению с анализируемыми отдельными исходными изображениями.

Метод максимума основан на принципе замещения значений изображения $H_1(i, j)$ значениями изображения $H_2(i, j)$ при условии, что значения второго изображения больше. В итоге получаем новое изображение, в котором будут присутствовать признаки изображения $H_1(i, j)$ и наиболее информативные признаки изображения $H_2(i, j)$. Реализация данного метода основывается на логической операции сравнения. Существенным недостатком данного метода является его полная зависимость от уровня яркости изображений.

Метод маски аналогичен методу максимума за исключением того, что одно из изображений служит маской для другого. Представим первое изображений $H_1(i, j)$, а второе – $H_2(i, j)$. Операция комплексирования выполняется путем пороговой фильтрации, в результате которой получается маска изображения $H_2(i, j)$. Далее результирующее изображение будет представлено множеством $H_1(i, j)$ и $H_2(i, j)$. Сложность применения метода маски обуславливается заданием порогового уровня фильтрации, который может привести к потере информации в результирующем изображении.

Метод усреднения заключается в нахождении среднего арифметического от исходных изображений. Данный способ основан на нахождении среднего значения, в результате получается изображение со сглаженными деталями объектов, контраст которых существенно уменьшается.

Ж. Лю и Р. Лаганьер [4] предложили метод степенного преобразования, который заключается в возведении исходного изображения $H_1(i, j)$ в показатель степени, равный нормированному значению негатива второго изображения $H_2(i, j)$. Реализация данного метода позволяет выполнять комплексирование изображений в режиме реального времени. В итоге на результирующем изображении минимальные значения яркости изображения $H_2(i, j)$ останутся прежними, а максимальные значения примут существенное изменение.

Метод чересстрочного комплексирования построен на основе построчного чередования одного изображения относительно другого. Необходимой составляющей для применения этого метода является условие, что все изображения имеют одно пространственное разрешение.

Метод весовой функции заключается в линейной комбинации изображений $H_1(i, j)$ и $H_2(i, j)$ с учетом коэффициента β , который характеризует величину значимости каждого из каналов и находится в интервале от 0 до 1. Величину коэффициента β выбирают в зависимости от эффективности каждого из каналов, тем самым более значимым становится изображение, средний уровень яркости которого выше. При комплексировании изображений данным методом требуется больше вычислительных затрат и основная сложность состоит в определении весового коэффициента. При неверном его определении в результирующем изображении возможна потеря информационных составляющих.

На основе приведенных методов были реализованы алгоритмы комплексирования [3], результаты которых представлены на рис. 2.

Анализ полученных изображений показывает, что для методов 3, 5 присутствует много лишних деталей, для методов 1, 2 произошла существенная потеря информационных признаков. Лучшие результаты показали методы 4, 6. Поэтому в дальнейшем необходимо строить алгоритм комплексирования изображений на основе метода весовой функции, где в качестве весов выступит вероятностная принадлежность объектов к заданному классу.

Исходными данными для классификации объектов к заданному классу будут использоваться разновременные изображения в видимом и инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн, полученные при помощи оптической системы (ОС), установленной на беспилотном летательном аппарате (БПЛА). В ходе натурного суточного эксперимента было выполнено шесть полетов в разные интервалы времени (05.00, 09.00, 12.00, 15.00, 19.00, 23.30). Полет БПЛА выполнял-

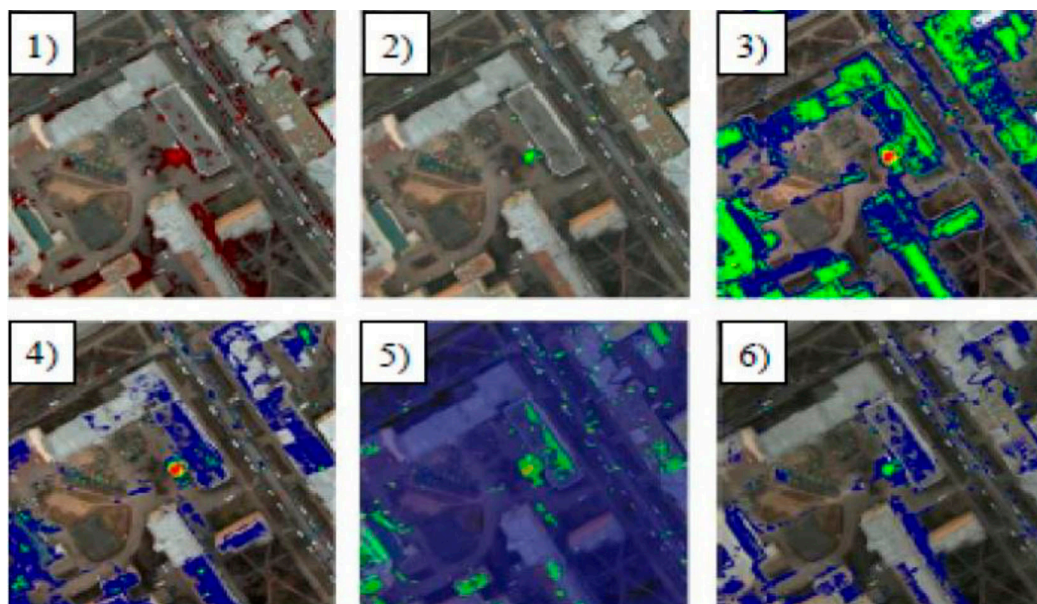


Рис. 2. Комплексированные изображения в зависимости от метода: 1 – метод максимума; 2 – метод маски; 3 – метод усреднения; 4 – метод степенного преобразования; 5 – метод чересстрочного комплексирования; 6 – метод весовой функции

Fig. 2. Complexed images depending on the method: 1 – maximum method; 2 – mask method; 3 – averaging method; 4 – power transformation method; 5 – interlaced aggregation method; 6 – weight function method

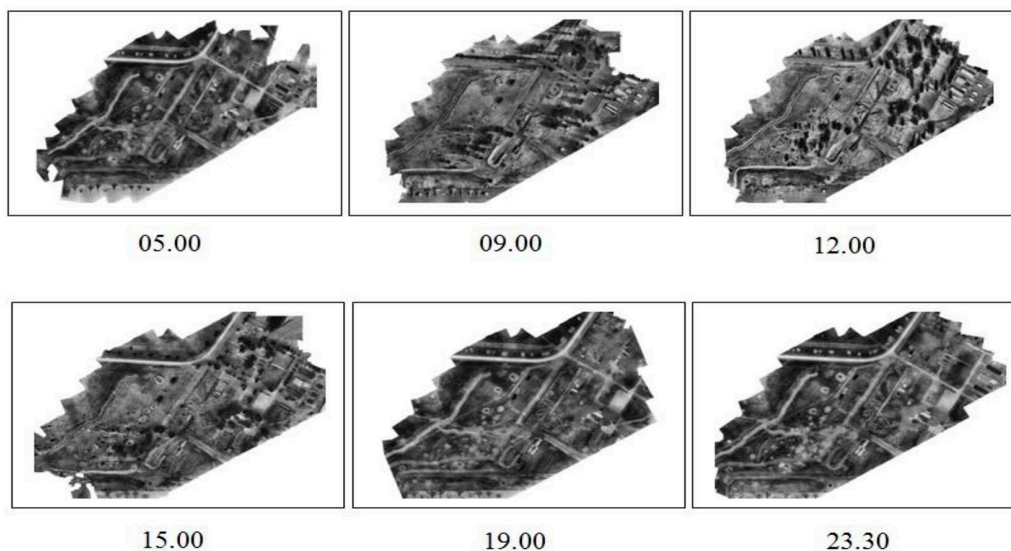


Рис. 3. Ортофотопланы изображений ИК-диапазона в определенное время

Fig. 3. Orthophotoplanes of IR range images at a certain time

ся по одинаковому маршруту. В результате обработки полученных изображений с помощью программного продукта «Agisoft» были сформированы ортофотопланы участка местности в соответствии с маршрутом и временем полета БпЛА (рис. 3).

Для корректной обработки объемного потока сведений следует автоматизировать ряд операций, включающих поиск и распознавание объекта [5]. Для решения данной задачи использовалась нейронная сеть [6] «Перцептрон», в алгоритм которой внесен дополнительный идентификационный признак, позволяющий классифицировать обнаруженные объекты по теплофизическим параметрам (ТФП) материалов, проявляющихся в виде изменения градаций яркости на изображениях [7]. Для обучения нейронной сети использовали шесть разновременных изображений одного участка местности, на которых присутствует дорога (рис. 4).

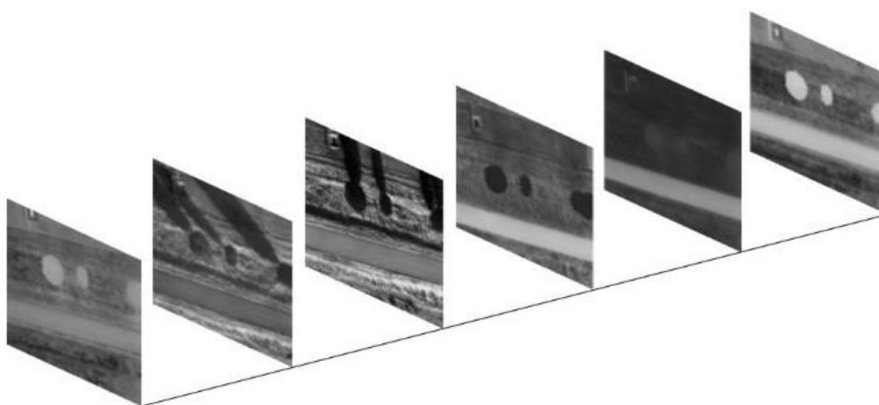


Рис. 4. Формирование кубоида из разновременных изображений

Fig. 4. Formation of a cuboid from images of different times

Сформировав кубоид изображений [8], выделяем на нем области (в данном случае это участки дороги), которые в последующем будут входными данными для обучения нейронной сети. Результат ее работы представлен на рис. 5.

Анализ полученных результатов показал, что нейронная сеть способна устойчиво и стабильно определять заданные объекты. Дорогу выделим белым цветом [9]. Пространственное распределение вероятности при классификации объекта дорога с введенным правилом принятия решения (рис. 6) представлено в виде

$$R(\theta) = \begin{cases} P_{ij} > \theta, \text{ then класс "дорога"} \\ \text{otherwise "не дорога"}, \end{cases} \quad (1)$$

где θ – параметр критерия классификации; P_{ij} – вероятность определения класса «дорога».

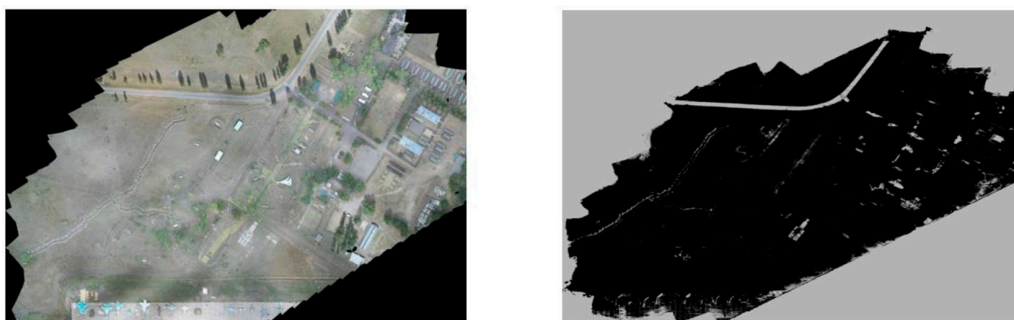


Рис. 5. Ортофотоплан в видимом диапазоне (а). Результат определения дорог на ортофотоплане ИК-диапазона (б)

Fig. 5. Orthophotoplane in the visible range (a). The result of determining roads on the orthophotoplane of the IR range (b)

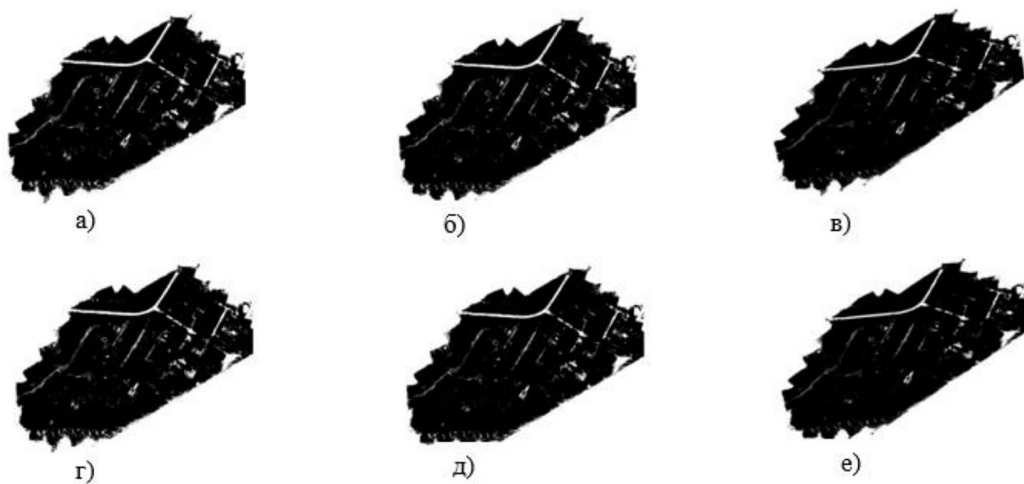


Рис. 6. Пространственные распределения вероятности при параметрах критерия классификации: а – $\theta = 0,1$; б – $\theta = 0,2$; в – $\theta = 0,3$; г – $\theta = 0,5$; д – $\theta = 0,7$; е – $\theta = 0,9$

Fig. 6. Spatial probability distributions for classification criteria parameters: а – $\theta = 0.1$; б – $\theta = 0.2$; в – $\theta = 0.3$; г – $\theta = 0.5$; д – $\theta = 0.7$; е – $\theta = 0.9$

Одним из результатов работы нейронной сети является вероятность принадлежности пикселя к классу «дорога» (рис. 7).

Произведение яркостей видимого изображения на вероятность принадлежности пикселей к классу «дорога» будет способствовать повышению контрастности дороги на результирующем изображении (рис. 8). Поскольку информативность изображения – величина переменная, а дешифровщик работает в условиях дефицита времени, то комплексированное изображение в значительной мере содержит наиболее полное и подробное описание выделенного объекта.

Актуальным становится вопрос оценки эффективности применения комплексированного изображения для выполнения задач воздушной разведки БПЛА в конкретных условиях. Общим показателем эффективности при этом могут выступать значения вероятностей обнаружения ($P_{обн}$) объекта на изображении, полученном оптической системой. Вероятности об-

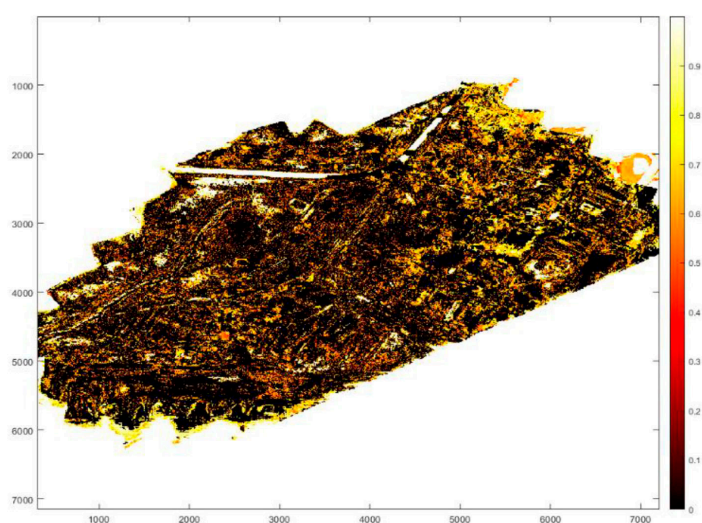


Рис. 7. Результат определения на ортофотоплане ИК-диапазона попиксельной вероятностной принадлежности к классу «дорога» (белый цвет – дорожное покрытие с вероятностью 0,9, черный цвет – дорожное покрытие с вероятностью 0,1)

Fig. 7. The result of determining the pixel-by-pixel probabilistic belonging to the “road” class on the orthophoto-plane of the IR range (white color is the road surface with a probability of 0.9 and black color is the road surface with a probability of 0.1)

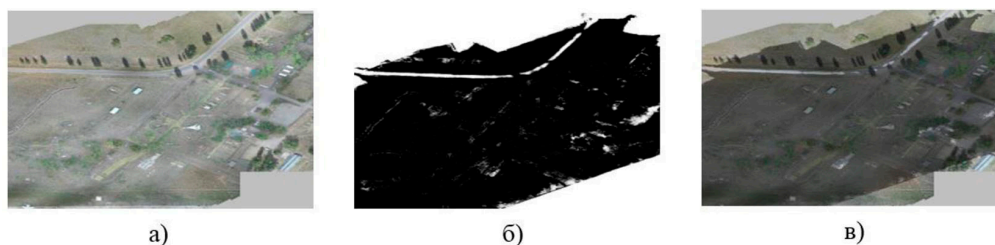


Рис. 8. Видимое (а), полученное нейронной сетью (б), комплексированное (в) изображения

Fig. 8. a) visible image b) obtained by a neural network v) complexed

наружения и распознавания зависят от разрешения видеокамеры, максимального линейного размера, формы и контраста объекта. Вероятность операторного обнаружения оценивается выражением

$$P_{\text{рас}} = \exp \left\{ - \left(\frac{B \cdot L}{I_{\text{пикс}} \cdot \sqrt{K}} \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

где $\left\{ - \left(\frac{B \cdot L}{I_{\text{пикс}} \cdot \sqrt{K}} \right)^2 \right\}$ – показатель ослабления разрешения объекта на изображении, полученном от фотоприемника, представленный следующими составляющими: B – коэффициент распознавания формы объекта; L – ЛРМ (линейное разрешение на местности) ОЭС; $I_{\text{пикс}}$ – максимальный линейный размер объекта в пикселях; K – видимый контраст объекта относительно фона [9].

Для наглядного определения видимого контраста дороги относительно фона рассмотрим отдельные участки дороги (рис. 9). Контраст дороги на комплексированном изображении в связи со зрительным восприятием оператора-дешифровщика, будет больше, чем на видимом (рис. 9в, г).

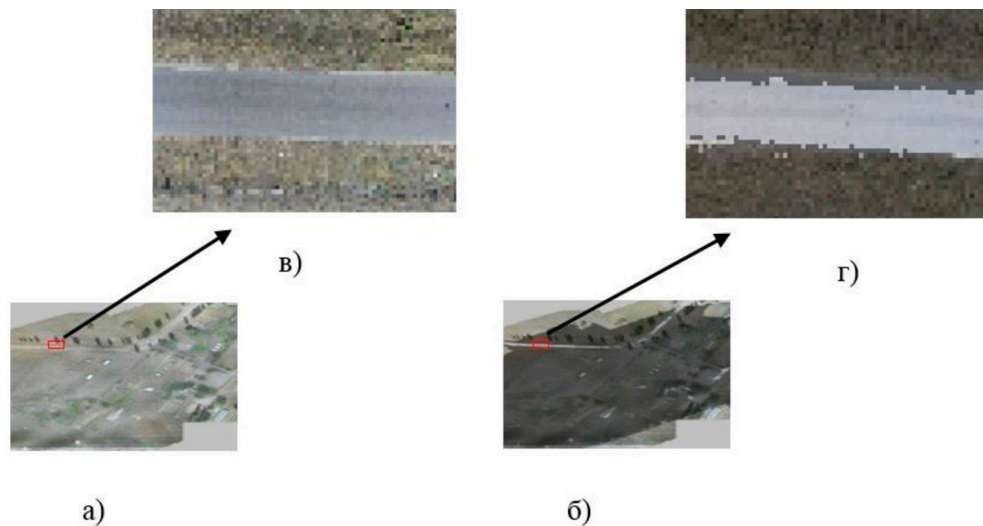


Рис. 9. Ортофотоплан видимого изображения (а), ортофотоплан комплексированного изображения (б), участок дороги видимого изображения (в), участок дороги комплексированного изображения (г)

Fig. 9. Orthophotoplan of the visible image (a), orthophotoplan of the complexed image (b), the road section of the visible image (v), the road section of the integrated image (g)

Согласно выражению

$$K = \frac{L_o - L_{\phi}}{L_{\phi}}, \quad (3)$$

определим численное значение видимого контраста относительно фона на изображениях (рис. 9в, г), где L_o и L_{ϕ} – яркости объекта и фона соответственно. Для рис. 9в получим $K=0,48$, а для рис. 9г $K=0,65$. Способностью глаза воспринимать объект является видимость, значение которой зависит от освещенности, размера объекта распознавания, его яркости, контраста между объектом и фоном и рассчитывается выражением

$$V = \frac{K}{K_{\text{пор}}}, \quad (4)$$

где K – контраст между объектом и фоном; $K_{\text{пор}}$ – пороговый контраст, то есть наименьший контраст, который различается глазом при данных условиях.

Таким образом, рассмотренная в статье методика комплексирования изображений с учетом метода весовой функции, а также использования нейронной сети позволяет повысить контраст и, соответственно, информативность полученного изображения. Учет значений вероятностной оценки классификации объектов при их отношении к определенному классу будет способствовать повышению достоверности распознавания. В свою очередь, повышение контраста объекта интереса позволяет оператору-дешифровщику за меньшее время установить визуальный контроль над объектом.

Список литературы / References

- [1] Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. *Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения*. М.: Университетская книга; Логос. 2007. 192 с. [Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Two- and multi-band optoelectronic systems with matrix radiation receivers*. M., University Book; Logos. 2007. 192 p. (in Russian)]
- [2] Якушенков Ю. Г. *Теория и расчет оптико-электронных приборов*. Монография. 4-е изд., переработанное и дополненное. М.: Логос, 1999. 500 с. [Yakushenkov Yu. G. *Theory and calculation of optoelectronic devices*. Monograph. 4th ed., revised and supplemented. Moscow, Logos, 1999. 500 p. (in Russian)]
- [3] Васильев А. С. Методы комплексирования изображений многоспектральных оптико-электронных систем. *Сборник трудов международной конференции «Прикладная оптика – 2014»*. СПб, 2014. Т. 2, с. 191–194. [Vasiliev A. S. Methods of image aggregation of multispectral optoelectronic systems. *Proceedings of the International Conference “Applied Optics – 2014”*. St. Petersburg, 2014, Vol. 2, pp.191–194 (in Russian)]
- [4] Liu Z. and Laganieri R., “Context Enhancement through Infrared Vision: *A Modified Fusion Scheme*”. *Signal, Image and Video Processing*, vol. 1, no. 4, pp. 293–301, Oct. 2007.
- [5] Студитский А. С. *Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки*. М.: НИИ и МНПО «Спектр», 2013. 112 с. [Studitskiy A. S. *Research and development of multifunctional optoelectronic surveillance and reconnaissance equipment*. M.: Research Institute and MNPO “Spectrum”, 2013. 112 p. (in Russian)]
- [6] Галимянов Ф. А., Гафаров Ф. М., Хуснутдинов Н. Р. Модель роста нейронной сети, *Математическое моделирование*, 2011, 23:3, 101–108. [Galimyanov F. A., Gafarov F. M., Khusnutdinov N. R. Neural network growth model, *Mathematical Modeling*, 2011, 23:3, 101–108 (in Russian)]
- [7] Ишук И. Н., Долгов А. А., Лихачев М. А., Тельных Б. К. Модель расчета теплофизических параметров материалов по данным многоспектральной разновременной фотографической съемки земной поверхности. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2020, 13(7), 894–906. [Ischuk I. N., Dolgov A. A., Likhachev M. A., Telnykh B. K. Model for Calculating the Thermophysical Characteristics of Materials According to Multispectral Multi-Temporal Photographic Survey of the Earth’s Surface. *Zh. Sib. Feder. un-ta. Engineering and Technology*, 2020, 13(7), 894–904 (in Russian)]

[8] Ищук И. Н., Степанов Е. А., Бебенин А. А., Дмитриев Д. Д., Филимонов А. М. Способ классификации объектов оптико-электронными системами разведки на основе обработки много-спектрального кубоида изображений. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2017, 10(2), 183–190. [Ischuk I. N., Stepanov E. A., Bebenin A. A., Dmitriev D. D., Filimonov A. M. Method for Classification of Objects Optoelectronic Exploration Systems Based Multispectral Cuboid Images. *Zh. Sib. Feder. un-ta. Engineering and Technology*, 2017, 10(2), 183–190 (in Russian)]

[9] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667847 Российская Федерация / А. И. Уваров от 03.11.2021 г. *Программная реализация алгоритма фотограмметрической обработки разновременных спектральных изображений с учетом тепловой инерции нейронной сетью глубокого обучения*. [Certificate of state registration of a computer program No. 2021667847 Russian Federation / A. I. Uvarov dated 03.11.2021 Software implementation of an algorithm for photogrammetric processing of multi-temporal spectral images taking into account thermal inertia by a deep learning neural network (in Russian)]

DOI: 10.17516/1999-494X-0397

УДК 621.396.96

Synthesis of Optimal Algorithm of Recognition Numerical Model of Group Air Target from Class «Turbojet Aircrafts» Based on Kalman Filtering and Neural Network

Aleksandr V. Bogdanov,
Sergei G. Petrov, Aleksandr A. Kuchin*,
Aleksandr A. Lobanov and Vitalii V. Shepranov
*Military Academy of Aero-Space Defence
named after the Marshal of Soviet Union G. K. Zhukov
Tver, Russian Federation*

Received 16.03.2022, received in revised form 18.04.2022, accepted 25.04.2022

Abstract. In this paper discusses an optimal algorithm for recognition the numerical type of group air target based on kalman filtering and neural network, ensuring a constant probability recognizing the numerical type of group air target not less then a given by optimizing the solver rule, allowing to adapt process to different aircraft flight pattern of group air target.

Keywords: group airtarget, kalman filtering, neural network, constant probability, turbojet aircrafts, recognition.

Citation: Bogdanov, A.V., Petrov, S.G., Kuchin, A.A., Lobanov, A.A., Shepranov V. V. Synthesis of optimal algorithm of recognition numerical model of group air target from class «turbojet aircrafts» based on kalman filtering and neural network. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(3), 381–396. DOI: 10.17516/1999-494X-0397

Синтез оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели из класса «самолеты с турбореактивными двигателями» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети

**А. В. Богданов, С. Г. Петров,
А. А. Кучин, А. А. Лобанов, В. В. Шепранов**
*Военная академия воздушно-космической обороны
им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова.
Российская Федерация, Тверь*

Аннотация. В данной статье синтезирован оптимальный алгоритм распознавания типового состава групповой воздушной цели на основе калмановской фильтрации и нейронной сети, обеспечивающий постоянство вероятности распознавания типового состава групповой воздушной цели не ниже заданной при различном характере ее полета.

Ключевые слова: групповая воздушная цель, калмановская фильтрация, нейронная сеть, постоянство вероятности, самолеты с турбореактивным двигателем, распознавание.

Цитирование: Богданов, А. В. Синтез оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели из класса «самолеты с турбореактивными двигателями» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети / А. В. Богданов, С. Г. Петров, А. А. Кучин, А. А. Лобанов, В. В. Шепранов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 381–396. DOI: 10.17516/1999-494X-0397

Введение

В [1] предложена концепция всестороннего распознавания воздушных целей (ВЦ) в радиолокационном (РЛ) комплексе воздушного базирования, где центральное место занимает перечень решений летчика и вопросы наведения ракет на ВЦ, основанные на их распознавании. Так, согласно данной концепции, распознавание типового состава групповой воздушной цели (ГВЦ) позволит поддержать следующие *решения летчика* в воздушном бою:

- оценить тактическое назначение группы самолетов противника, степень ее угрозы и возможности по противодействию;
- выбрать эффективный тактический прием исходя из особенностей работы бортовых радиолокационных станций (БРЛС) самолетов противника и оружия на их борту;
- определить приоритетность воздействия по наиболее опасным целям в зависимости от ситуации и важности целей;
- определить очередность обстрела целей;
- определить потребный наряд ракет для поражения каждого типа цели в группе;
- контролировать типовой состав самолетов группы противника при пуске по ним ракет, а также осуществить *оптимизацию наведения управляемых ракет* [2–4]:
- осуществить предстартовое целеуказание (ЦУ) радиолокационной головке самонаведения (РГС) ракеты о типе атакуемой ею целью из состава группы (для оптимизации наведения ракеты на заданный тип цели из состава группы);

– осуществить радиокоррекцию в РГС ракеты при ее перенацеливании на другой тип цели из состава группы.

В [5–9] приведены результаты летно-экспериментальных исследований по оценке возможностей распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с турбореактивными двигателями (ТРД)» в импульсно-доплеровской БРЛС истребителя. Так, экспериментальным путем установлено, что типовый состав ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» принципиально можно распознать на основе анализа взаимного частотного разнеса траекторий доплеровских частот РЛ-сигналов, отраженных от планеров самолетов группы и вращающихся лопаток рабочих колес первых ступеней компрессоров низкого давления (КНД) их силовых установок, по которым определяются типы двигателей самолетов группы, а по ним непосредственно и тип каждого самолета в группе.

Полученные при анализе результатов летно-экспериментальных исследований численные значения траекторных статистических характеристик реальных траекторий доплеровских частот были использованы в качестве экспериментальных исходных данных при синтезе и разработке методов и алгоритмов распознавания типового состава ГВЦ, приведенных в работах [10–16].

Их сущность заключается в том, что в амплитудно-частотном спектре РЛ-сигнала, отраженного от ГВЦ, выделяются отсчеты доплеровских частот, обусловленные отражениями сигнала от планеров самолетов группы и вращающихся лопаток первых ступеней рабочих колес КНД их силовых установок. На основе калмановской фильтрации находятся оценки данных отсчетов доплеровских частот, а затем величины их разносов. Принятие решения о типе самолета с ТРД в их группе осуществляется путем попадания разности оценок планерной и компрессорной доплеровских частот в один из априорно сформированных диапазонов возможных значений оценок разностей траекторий доплеровских частот. При этом границы каждого поддиапазона определяются выражениями:

$$F_{Hq} = F_{Pq} b_1 N_{л}; \quad (1)$$

$$F_{Bq} = F_{Pq} b_2 N_{л}, \quad (2)$$

где F_{Pq} – максимальная частота вращения ротора КНД силовой установки q -го типа самолета с ТРД;

b_1 и b_2 – соответственно минимальное и максимальное значения величины относительных оборотов вращения ротора силовой установки, одинаковые для всех типов самолетов группы;

$N_{л}$ – количество лопаток рабочего колеса первой ступени КНД.

Диапазон, в который величина разнеса доплеровских частот за определенное время попадает с максимальной вероятностью, и будет соответствовать оценке типа самолета с ТРД, находящимся в составе их группы.

Недостатком такого подхода распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» является непостоянство вероятности распознавания типа каждого самолета с ТРД в их группе. Это обусловлено тем, что решающее правило при распознавании типового состава ГВЦ, во-первых, является неоптимальным, во-вторых, не адаптируется к условиям полета ГВЦ, поскольку оно основано на априорно фиксированных границах сформированных поддиапазонов, определяемых выражениями (1) и (2), в-третьих, необходимо выполнение условия, когда

минимальное и максимальное значения величины относительных оборотов вращения ротора силовой установки (b_1 и b_2 , соответственно, в формулах (1) и (2)) должны быть одинаковыми для всех типов самолетов группы.

В действительности же данные априорно сформированные границы каждого поддиапазона в процессе полета ГВЦ могут меняться в зависимости от характера полета самолетов группы, например, с изменением высоты полета или при различных интервалах и дистанциях между самолетами группы при выдерживании заданных параметров боевого порядка в различных его формах («пеленг», «фронт», «клин» и т.д.), когда величины относительных оборотов b_1 и b_2 вращения ротора силовой установки не будут соответствовать априорно заданным и неравным для всех типов самолетов группы. Поэтому границы поддиапазонов не будут соответствовать априорным их значениям, что в результате приведет к неверному распознаванию типового состава ГВЦ в целом.

В последнее время все чаще и чаще находят применение нейронные сети в различных областях знаний, в том числе и в теории распознавания образов. В этой связи известно [17–19], что нейронная сеть по своим характеристикам эквивалентна оптимальному разомкнутому калмановскому фильтру. Поэтому если предварительно осуществить обучение нейронной сети (решающего правила) изменяющимися во времени разностями доплеровских частот, характерных для каждого типа самолета с ТРД в группе при различном характере его полета, то можно адаптировать оптимальное решающее правило к условиям полета ГВЦ, то есть обеспечить постоянство вероятности распознавания каждого типа самолета с ТРД в группе.

Цель статьи – синтезировать оптимальный алгоритм распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети, получить его характеристики с учетом экспериментальных исходных данных по траекторным статистическим характеристикам реальных РЛ-сигналов.

Структура оптимального алгоритма

Оптимальный алгоритм распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети состоит из четырех процедур:

процедура получения оценок разностей доплеровских частот на основе калмановской фильтрации;

процедура формирования разностей отсчетов доплеровских частот для обучения нейронной сети;

процедура обучения нейронной сети по разностям доплеровских частот;

процедура функционирования нейронной сети при принятии решения о типовом составе ГВЦ.

На рис. 1 представлена структура оптимального алгоритма распознавания типового состава ГВЦ в БРЛС перспективного истребителя, где обозначено:

$i = 1, \dots, I$; I – общее количество самолетов в группе;

$j = 1, \dots, J$; J – общее количество вариантов полета каждой i -й ВЦ из состава группы;

$q = 1, \dots, Q$; Q – общее количество типов самолетов в группе;

$\Delta F_{ijq}(k+1)$ – разность на k шаге между значениями доплеровских частот, обусловленных отражениями РЛ-сигнала от планера ВЦ и вращающихся лопаток рабочего колеса первой ступени КНД силовой установки ВЦ;

$\Delta \hat{F}_{ijq}(k+1)$ – оценка разности на k шаге между оцененными значениями доплеровских частот, обусловленных отражениями РЛ сигнала от планера ВЦ и вращающихся лопаток рабочего колеса первой ступени КНД силовой установки ВЦ;

ΔF_{ijq} – разности доплеровских частот, обусловленных отражениями РЛ-сигнала от планера ВЦ и вращающихся лопаток рабочего колеса первой ступени КНД силовой установки ВЦ;

P_{ijq} – вероятности предварительного распознавания q типа каждого самолета группы с каждого ij -го выхода нейронной сети;

$P_{зад}$ – заданная вероятность распознавания типа каждого самолета группы.

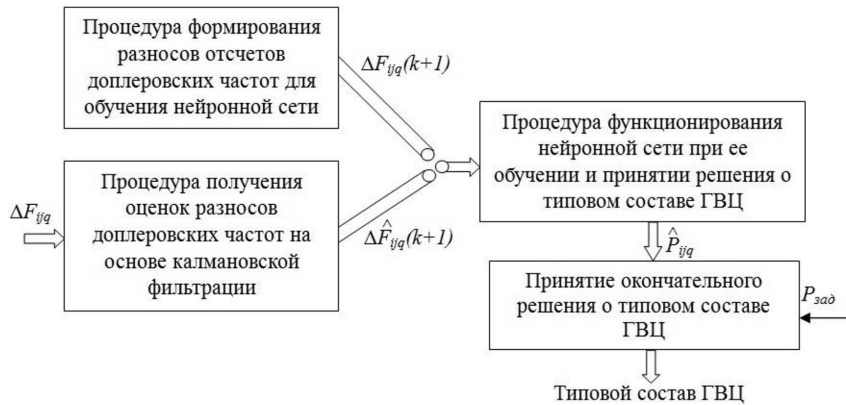


Рис. 1. Структура оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели

Fig. 1. The structure of the optimal algorithm for recognizing the typical composition of a group air target

Синтез процедуры получения оценок разностей доплеровских частот (скоростей) на основе калмановской фильтрации

Физический смысл данной процедуры заключается в получении оценок разностей отсчетов доплеровских частот (скоростей) между центроидом доплеровской частоты, обусловленным отражениями РЛ-сигнала от планеров всех самолетов группы и отражениями РЛ-сигнала от вращающихся лопаток рабочего колеса первой ступени КНД двигателя каждого самолета (с ТРД) группы.

Для синтеза процедуры получения таких оценок разностей отсчетов доплеровских частот (скоростей) используем оптимальную, линейную, дискретную, многомерную, калмановскую фильтрацию, представляемую следующими дискретными уравнениями [6–9]:

$$P^-(k+1) = \Phi(k)P(k)\Phi^T(k) + Q(k); \quad (3)$$

$$\Psi(k+1) = H(k)P^-(k+1)H^T(k) + R(k); \quad (4)$$

$$K(k+1) = P^-(k+1)H^T(k)\Psi^{-1}(k+1); \quad (5)$$

$$Y(k+1) = H(k) \cdot X(k) + N(k); \quad (6)$$

$$Z(k+1) = Y(k+1) - H(k)\Phi(k+1)X(k); \quad (7)$$

$$\hat{X}(k+1) = \Phi(k)\hat{X}(k) + K(k+1)Z(k+1); \quad (8)$$

$$P(k+1) = [I - K(k+1)H(k)]P^-(k+1), \quad (9)$$

где $P^-(k+1)$ и $P(k+1)$ – ковариационные матрицы ошибок экстраполяции и фильтрации соответственно, размерности $n \times n$ (n – размерность вектора $X(k+1)$ состояния);

$\Phi(k)$ – переходная матрица состояния размерности $n \times n$;

$Q(k)$ и $R(k)$ – ковариационные матрицы шумов возбуждения и наблюдения размерности $n \times n$ и $m \times m$ (m – размерность вектора $Y(k+1)$ наблюдения) соответственно;

$Y(k)$ – вектор-столбец шумов наблюдения, представляющие собой гауссовские «белые» последовательности с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами спектральных плотностей $N_Y(k)$ размерности m ;

$H(k)$ – матрица наблюдения (измерения) размерности $m \times n$;

$Z(k+1)$ – матрица невязок измерения размерности m ;

$K(k+1)$ – матрица весовых коэффициентов размерности $n \times m$;

I – единичная матрица размерности $n \times n$;

« T » – символ транспонирования;

« -1 » – символ нахождения обратной матрицы;

« $\wedge$ » – символ нахождения оценки.

Определим далее размерности матрицы значения их элементов, входящих в процедуру калмановской фильтрации (3) – (9).

Основу синтеза процедуры получения оценок разносов отсчетов доплеровских частот (скоростей) при использовании калмановской фильтрации составляет их динамическая модель, которая представляется в виде системы дифференциальных уравнений (д.у.). С этой целью составим следующую систему д.у. для i -го самолета из состава группы с j -м характером полета и имеющим q -й тип:

$$\begin{aligned} \dot{\Delta V}_{ijq}(t) &= a_{ijq}(t), \Delta V_{ijq}(0) = \Delta V_{0ijq}; \\ \dot{a}_{ijq}(t) &= -\alpha_{ijq} a_{ijq}(t) - \beta_{ijq} \Delta V_{ijq}(t) + \sqrt{2\alpha_{ijq}\sigma_{ijq}^2} n_{ijq}(t), a_{ijq}(0) = a_{0ijq}; \\ \dot{V}_{ijq}(t) &= 0, V_{ijq}(0) = V_{0ijq}, \end{aligned} \quad (10)$$

где V_{ijq} и ΔV_{ijq} – детерминированная и флюктуационная составляющие разнота скоростей (доплеровских частот) между центроидом планерных составляющих скоростей всех целей группы и вращающимися лопатками рабочего колеса первой ступени компрессора низкого давления (КНД) i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип;

a_{ijq} – флюктуационная составляющая разносов ускорений (производных доплеровских частот) между центроидом планерных составляющих скоростей всех целей группы и вращающимися лопатками рабочего колеса первой ступени КНД i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип;

α_{ijq} – величина, обратно пропорциональная времени корреляции τ_{ijq} разнота скоростей (доплеровских частот) i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип, определяемая как

$$\alpha_{ijq} = \frac{1}{\tau_{ijq}}; \quad (11)$$

β_{ijq} – квадрат собственной частоты f_{ijq} автокорреляционной функции разности скоростей (доплеровских частот) i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип, определяемая как

$$\beta_{ijq} = (2\pi f_{ijq})^2; \quad (12)$$

σ_{ijq} – среднеквадратическое отклонение (СКО) разностей скоростей (доплеровских частот) i -й ВЦ из состава группы, имеющая j -й характер полета и q -й тип, определяемое как

$$\sigma_{ijq}^2 = \sigma_{vijq}^2 \left[\alpha_{ijq}^2 + (2\pi f_{ijq})^2 \right]; \quad (13)$$

n_{ijq} – формирующий белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием (МОЖ) и единичными интенсивностями разностей скоростей (доплеровских частот).

Систему д.у. (10) в векторно-матричном виде можно представить следующим образом:

$$\dot{X}_{ijq} = A_{ijq} X_{ijq} + G_{ijq} N_{ijq}, \quad X(0) = X_{0ijq}, \quad (14)$$

где X_{ijq} и X_{0ijq} – соответственно истинный вектор состояния и его начальное условие размерности 3×1 , имеющие вид

$$X_{ijq} = \left[\Delta V_{ijq}, a_{ijq}, V_{ijq} \right]^T;$$

$$X_{0ijq} = \left[\Delta V_{0ijq}, a_{0ijq}, V_{0ijq} \right]^T;$$

где A_{ijq} – известная матрица размерности 3×3 , имеющая следующие, отличные от нуля, элементы (для сокращения записей индексы i, j и q для обозначения элементов соответствующих матриц будут опущены) $a_{12} = 1$; $a_{21} = -\beta_{ijq}$; $a_{22} = -a_{ijq}$;

G_{ijq} – матрица размерности 3×3 , имеющая ненулевой элемент $g_{22} = \sqrt{2\alpha_{ijq}\sigma_{ijq}^2}$;

$N_{ijq} = [0, n_{ijq}, 0]^T$ – транспонированный вектор формирующих белых гауссовских шумов с нулевым МОЖ и единичной интенсивности, имеющий размерность 3×1 .

Элементы матрицы наблюдения в уравнении (6) будут определяться, с одной стороны, составом измерителей функционально связанных координат, а с другой – условием наблюдаемости фильтра, которое необходимо обеспечить для предотвращения его расходимости. Исходя из этого ненулевыми элементами матрицы наблюдения $H_{ijq}(k)$ в уравнении наблюдения (6), имеющей размерность 1×3 , будут являться $h_{11} = h_{13} = 1$.

Элемент вектора шума наблюдения $\Upsilon_{ijq}(k)$, имеющего размерность 1×1 , является некоррелированным с элементом вектора шумов возбуждения N_{ijq} .

Для определения элементов матриц $\Phi_{ijq}(k)$ и $Q_{ijq}(k)$ осуществляется переход от векторно-матричного дифференциального уравнения (14) в непрерывном времени к уравнениям в дискретном времени в соответствии со следующими соотношениями [10]:

$$\Phi_{ijq}(k) = \exp(A_{ijq} T), \quad (15)$$

$$Q_{ijq}(k) = M[J_{ijq}(k)J_{ijq}^T(k)], \quad (16)$$

$$J_{ijq}(k) = \int_{kT_d}^{(k+1)T_d} \Phi_{ijq}[(k+1)T - \tau] G_{ijq}(\tau) N_{ijq}(\tau) d\tau, \quad (17)$$

где T – период дискретизации.

На практике, как правило, ограничиваются линейными членами при определении матриц $\Phi_{ijq}(k)$ и $Q_{ijq}(k)$ [10], т.е.

$$\Phi_{ijq}(k) \approx I + A_{ijq}T. \quad (18)$$

В результате матрица $\Phi_{ijq}(k)$, имеющая размерность 3×3 , будет иметь следующие отличные от нуля элементы: $\varphi_{11} = \varphi_{33} = 1$; $\varphi_{12} = T$; $\varphi_{21} = -\varphi_{ijq}T$; $\varphi_{22} = 1 - \varphi_{ijq}T$.

После ряда преобразований, определяемых формулами (15), (16) и (17), и ограничений линейными членами ненулевым элементом ковариационной матрицы $Q_{ijq}(k)$ шумов возбуждения размерности 3×3 будет являться $q_{22} = 2\alpha_{ijq}\sigma_{ijq}^2T$.

Элемент вектора $Y(k+1)$ наблюдения имеет вид

$$y_{11}(k+1) = [V_{ijq}(k+1) + \Delta V_{ijq}(k+1)] + \gamma_{ijq}(k+1); \quad (19)$$

элемент вектора $Z(k+1)$ невязок измерения имеет вид

$$z_{11}(k+1) = y_{11}(k+1) - [\hat{V}_{ijq}(k) + \Delta \hat{V}_{ijq}(k) + \hat{a}_{ijq}(k)T]; \quad (20)$$

элементы вектора $\hat{X}_{ijq}(k+1)$ оценок имеют вид

$$\Delta \hat{V}_{ijq}(k+1) = \Delta \hat{V}_{ijq}(k) + \hat{a}_{ijq}(k)T + k_{11}(k+1)z_{11}(k+1); \quad (21)$$

$$\hat{a}_{ijq}(k+1) = (1 - \alpha_{ijq}T)\hat{a}_{ijq}(k) - \beta_{ijq}T\Delta \hat{V}_{ijq}(k) + k_{21}(k+1)z_{11}(k+1); \quad (22)$$

$$\Delta \hat{V}_{ijq}(k+1) = \hat{V}_{ijq}(k) + k_{31}(k+1)z_{11}(k+1). \quad (23)$$

На рис. 2 представлена структура калмановского оптимального линейного фильтра.

Процедура получения разносов доплеровских частот для обучения нейронной сети

С целью обучения нейронной сети сформируем обучающие выборки разносов доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k+1)$ для различных типов самолетов с ТРД с различным характером их полета, исходя из выражения

$$\Delta F_{ijq}(k+1) = \Phi(k)X(k). \quad (24)$$

Представим динамическую модель (систему ду.) (10) в виде разносов не скоростей, а доплеровских частот как

$$\begin{aligned} \dot{F}_{ijq}(t) &= 0, \quad F_{ijq}(0) = const; \\ \Delta \dot{F}_{ijq}(t) &= F_{ijq}^*(t), \quad \Delta F_{ijq}(0) = F_{0ijq}; \\ \dot{F}_{ijq}^*(t) &= -\alpha_{ijq}F_{ijq}^*(t) - \beta_{ijq}\Delta F_{ijq}(t) + \sqrt{2\alpha_{ijq}\sigma_{ijq}^2}n_{ijq}(t), \quad F_{ijq}^*(0) = F_{0ijq}^*, \end{aligned} \quad (25)$$

где (по аналогии с (10)):

F_{ijq} и ΔF_{ijq} – соответственно детерминированные и флюктуационные составляющие раз-
носов доплеровских частот для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета
и q -й тип;

$F_{ijq}^*(t)$ – производные разностей доплеровских частот для каждого i -го самолета группы,
имеющего j -й характер полета и q -й тип;

α_{ijq} – величины, обратно пропорциональные временам корреляции разностей доплеровских
частот для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип;

β_{ijq} – квадраты собственных частот автокорреляционных функций разностей доплеровских
частот для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип;

σ_{ijq} – среднеквадратические отклонения производных разностей доплеровских частот для
каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер полета и q -й тип;

n_{ijq} – взаимонезависимые формирующие «белые» гауссовские шумы с нулевыми МОЖ
и единичными интенсивностями для каждого i -го самолета группы, имеющего j -й характер
полета и q -й тип, вектор состояния в соответствии с динамической моделью (25) определяется
как

$$X(t) = [F_{ijq}(t), \Delta F_{ijq}(t), F_{ijq}^*(t)]^T. \quad (26)$$

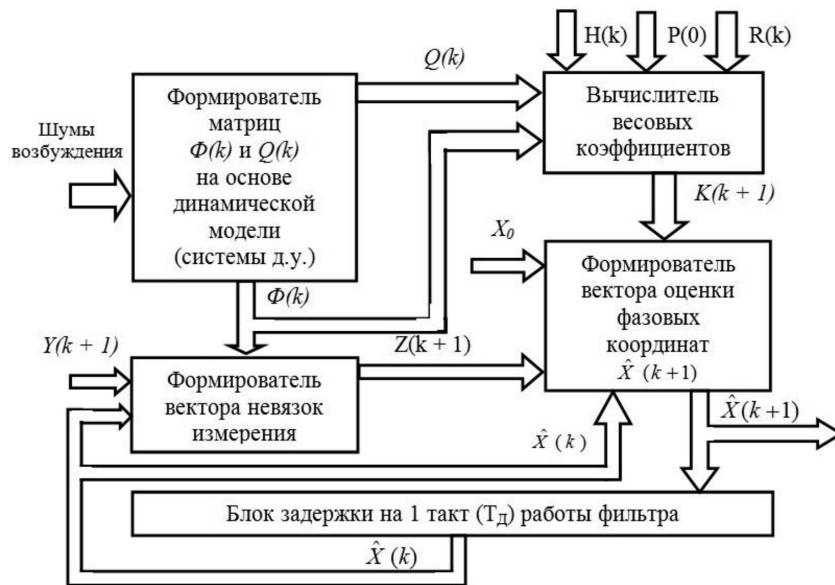


Рис. 2. Структурная схема калмановского фильтра

Fig. 2. Block diagram of the Kalman filter

Переходная матрица состояния размерности 3×3 в соответствии с динамической моделью
(25), ее отличные от нуля элементы имеют следующие значения:

$$\varphi_{11} = \varphi_{22} = 1; \varphi_{23} = T; \varphi_{31} = -\beta_{ijq}T; \varphi_{33} = 1 - \alpha_{ijq}T. \quad (27)$$

Согласно (24) и (25) формируются последовательно в дискретном времени разности доплеровских частот в виде

$$\Delta F_{ijq}(k+1) = F_{ijq}(k) + \Delta F_{ijq}(k) + (1 - \alpha_{ijq} T) F_{ijq}^*(k) T - \beta_{ijq} T^2 \Delta F_{ijq}(k), \quad (28)$$

где $k = 1, \dots, K$ – текущий такт формирования разностей доплеровских частот;

K – общее количество тактов формирования разностей доплеровских частот, по которым в течение K тактов осуществляется предварительное обучение нейронной сети для различных типов целей с различным характером их полета, имеющих соответствующий разнос доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k+1)$.

Процедура функционирования нейронной сети в режимах «обучение» и «принятие решения» о типовом составе групповой воздушной цели

В задачах распознавания при обучении нейронной сети широко используются методы градиентного спуска. Для многослойных нейронных сетей, использующих обучение с учителем обучения, применяется алгоритм обратного распространения ошибки [17–19], который можно рассматривать как обобщение алгоритма адаптивной фильтрации – минимизации среднеквадратической ошибки.

Обучение нейронной сети предполагает два прохода по всем ее слоям (рис. 3).

При прямом прохождении входной вектор, в который входят разности доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k+1)$, подается на сенсорные узлы сети (нейроны), после чего распространяется по сети от слоя к слою. В результате генерируется набор выходных сигналов, который и является фактической реакцией сети на данный входной вектор. Во время прямого прохода все синаптические веса (весовые коэффициенты) сети фиксированы.

Во время обратного прохода все синаптические веса настраиваются в соответствии с правилом коррекции ошибок, а именно фактический выход сети вычитается из желаемого (целевого) отклика, в результате чего формируется сигнал ошибки. Этот сигнал впоследствии распространяется по сети в направлении, обратном направлению синаптических связей. Весовые коэффициенты настраиваются с целью максимального приближения выходного сигнала сети к желаемому в статистическом смысле.



Рис. 3. Алгоритм обучения нейронной сети

Fig. 3. Neural network learning algorithm

Функция ошибки нейронной сети для каждого k -го разности доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k)$ рассчитывается как [19]

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_z \left(y_z^{(N)} - d_z \right)^2, \quad (29)$$

где $y_z^{(N)}$ – реальное выходное состояние z -го нейрона выходного слоя N нейронной сети при подаче на ее входы k -го разности доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k)$;

d_z – идеальное (желаемое) выходное состояние z -го нейрона выходного слоя.

Суммирование ведется по всем нейронам выходного слоя и по всем обрабатываемым сетью разностям доплеровских частот $\Delta F_{ijq}(k)$. Минимизация ведется методом градиентного спуска, что означает подстройку весовых коэффициентов следующим образом:

$$\Delta w_{tz}^{(n)} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{tz}}, \quad (30)$$

где w_{tz} – весовой коэффициент синаптической связи, соединяющей z -й нейрон слоя $n - 1$ с t -м нейроном слоя n ; η – коэффициент скорости обучения, $0 < \eta < 1$.

В выражении (30)

$$\frac{\partial E}{\partial w_{tz}} = \frac{\partial E}{\partial s_z} \cdot \frac{\partial s_z}{\partial w_{tz}}, \quad (31)$$

где s_z – взвешенная сумма входных сигналов нейрона z , слоя n , то есть аргумент активационной функции

$$s_z = \sum_z w_{tz} y_z. \quad (32)$$

Из формулы (31) величина $\frac{\partial s_z}{\partial w_{tz}}$ – равна выходу нейрона предыдущего слоя $y_z^{(n-1)}$. Что касается

первого множителя, он раскладывается следующим образом:

$$\frac{\partial E}{\partial s_z} = \sum_u \frac{\partial E}{\partial s_u} \cdot \frac{\partial s_u}{\partial s_z}. \quad (33)$$

Здесь суммирование по u выполняется среди нейронов слоя $n + 1$.

Введя новую переменную

$$\delta_t^{(n)} = \frac{\partial E}{\partial s_u} \cdot \frac{ds_u}{ds_t}, \quad (34)$$

получим рекурсивную формулу для расчетов величин $\delta_t^{(n)}$ слоя n из величин $\delta_u^{(n+1)}$ старшего слоя $n + 1$:

$$\delta_t^{(n)} = \left[\sum_u \delta_u^{(n+1)} \cdot w_{tu}^{(n+1)} \right]. \quad (35)$$

Таким образом,

$$\Delta w_{tz}^{(n)} = -\eta \cdot \delta_z^{(n)} \cdot y_t^{(n-1)}. \quad (36)$$



Рис. 4. Структура функционирования нейронной сети в режимах «обучение» и «принятие решения» о типовом составе групповой воздушной цели

Fig. 4. The structure of the neural network functioning in the «training» and «decision-making» modes on the typical composition of a group air target

После определения оптимальных значений всех переменных весовых коэффициентов нейронная сеть считается обученной и готовой к функционированию.

В режиме «принятие решения» на предварительно обученную нейронную сеть поступают оценки отсчетов разностей доплеровских частот $\Delta \hat{F}_{ijq}(k+1)$ (рис. 4) между центроидом планерных составляющих всех целей группы и вращающимися лопатками рабочего колеса первой ступени компрессора низкого давления i -й ВЦ из состава группы (21), формируемых на выходе каждого ijq -го калмановского фильтра, функционирующего в соответствии с процедурой (3)–(9) с динамической моделью (10).

За K тактов работы калмановских фильтров соответствующие вероятности P_{ijq} предварительного распознавания типа каждого самолета группы с каждого выхода нейронной сети поступают на соответствующие входы пороговых устройств.

В каждом пороговом устройстве соответствующие значения вероятностей P_{ijq} сравниваются с пороговым значением $P_{\text{пор}}$, при выполнении условия для каждого значения $P_{ijq} \geq P_{\text{пор}}$ принимается окончательное решение о том, что в группе находится i -й самолет группы, имеющий j -й характер полета и q -й тип, в противном случае принимается решение об отсутствии данного типа самолета в группе.

Результаты моделирования оптимального алгоритма распознавания типового состава групповой воздушной цели

В ходе моделирования нейронная сеть была обучена при условии, что общее количество самолетов с ТРД в группе равно 4 и возможно нахождение в группе 8 типов самолетов (типы

Таблица. Результаты имитационного моделирования

Table. Simulation results

№ цели	Вероятности распознавания типа каждого самолета с ТРД в группе							
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	Тип 6	Тип 7	Тип 8
1	0,94;0,97	0,1;0,12	0,08;0,1	0,11;0,13	0,09;0,11	0,13;0,15	0,15;0,16	0,12;0,14
2	0,18;0,2	0,94;0,97	0,19;0,21	0,17;0,19	0,2;0,22	0,14;0,0,18	0,21;0,24	0,15;0,18
3	0,23;0,25	0,15;0,16	0,95;0,97	0,11;0,13	0,1;0,12	0,13;0,15	0,18;0,2	0,09;0,11
4	0,19;0,21	0,09;0,11	0,18;0,2	0,94;0,97	0,12;0,14	0,14;0,0,18	0,15;0,16	0,13;0,15

1–8), радиолокационные сигналы от которых были зарегистрированы и обработаны, то есть $I=4, J=8$.

Пороговое значение вероятности принималось равным $P_{\text{пор}}=0,9$.

Величина дискрета – $T=0,1\text{с}$.

В результате моделирования за 14–15 тактов ($K=14–15$, то есть за время 1,4–1,5 с) работы калмановских фильтров были получены следующие результаты (с доверительной вероятностью 0,95), приведенные в таблице.

Из анализа полученных результатов имитационного моделирования следует, что с вероятностью 0,94–0,97 (превосходит пороговое значение $P_{\text{пор}}=0,9$) в группе находятся самолеты с ТРД типа 1, 2, 3 и 4, что соответствует действительности (именно оценки реальных разносов отсчетов доплеровских частот для этих типов самолетов подавались на ijq -е входы нейронной сети).

Во всех случаях вероятности ложного распознавания типов 1, 2, 3 и 4 составили порядка 0,022–0,03.

Выводы

1. Синтезирован оптимальный алгоритм распознавания типового состава ГВЦ из класса «самолеты с ТРД» на основе калмановской фильтрации и нейронной сети, который включает процедуры: получения оценок разносов доплеровских частот на основе калмановской фильтрации; формирования разносов отсчетов доплеровских частот для обучения нейронной сети; обучения нейронной сети по разносам доплеровских частот; функционирования нейронной сети при принятии решения о типовом составе ГВЦ.

2. Путем моделирования и с учетом экспериментальных исходных данных получены характеристики синтезированного оптимального алгоритма, при этом обеспечивается постоянство вероятности распознавания типа каждого самолета с ТРД в их группе независимо от характера его полета.

Список литературы / References

[1] Богданов, А.В., Коротков С.С., Кучин А.А., Бондарев В.Н., Лютиков И.В. Концепция распознавания воздушных целей в авиационном радиолокационном комплексе. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2016, 9(3). [Bogdanov A. V., Korotkov S. S., Kuchin A. A., Bondarev V. N., Lutikov I. V. The concept of recognition of air targets

in the aviation radar complex, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2016, 9(3) (in Russian)]

[2] Анциферов А.А., Богданов А.В., Бондарев В.Н., Гарин Е.Н., Гончаров А.М., Кучин А.А., Лютиков И.В. Синтез оптимальных алгоритмов наведения летательных аппаратов на групповую воздушную цель, *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2017, 10(2), 169–182 [Antsiferov A. A., Bogdanov A. V., Bondarev V. N., Garin E. N., Goncharov A. M., Kuchin A. A., Lyutikov I. V. Synthesis of optimal algorithms for guiding aircraft to a group air target. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2017, 10(2), 169–182 (in Russian)].

[3] Замаараев В.В., Кутузов А.С., Лютиков И.В., Мальцев Д.В. Метод построения траектории скрытного выхода летательного аппарата в заданную точку зоны обнаружения обзорного радиолокатора, основанный на анализе спектра доплеровских частот принимаемого сигнала. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2021, 14(3), 281–291 [Zamaraev V. V., Kutuzov A. S., Lyutikov I. V., Malcev D. V. Method of Constructing a Line Secretive Exit the Aircraft at a Given Point of the Detection Area Surveillance Radar Based on the Spectrum Analysis of the Doppler Frequency of the Received Signal, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2021, 14(3), 281–291 (in Russian)].

[4] Богданов А.В., Горбунов С.А., Кучин А.А., Хадур А.А. Алгоритм наведения управляемой ракеты класса «воздух-воздух» с активной радиолокационной головкой самонаведения на вертолет при различном характере его полета. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2020, 13(7), 829–842 [Bogdanov A. V., Gorbunov S. A., Kuchin A. A., Hadur A. A. The Guidance Algorithm of Air-to-Air Guided Missile with an Active Radar Target-Seeking Head to a Helicopter with Various Modes of its Flight, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2020, 13(7), 829–842 (in Russian)].

[5] Богданов А.В. и др. Результаты летно-экспериментальных исследований по оценке возможностей всестороннего распознавания воздушных целей в импульсно-доплеровской РЛС воздушного базирования в сантиметровом диапазоне. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2016, 11. [Bogdanov A. V. and etc. The result of experimental studies on assessment of comprehensive air target recognition in centimeter band by airborne pulse Doppler radar, *Advances in modern electronics*, 2016, 11 (in Russian)]

[6] Богданов А.В., Ибрагим Ф.Х., Лобанов А.А. Направления, принципы и признаки распознавания воздушных целей в импульсно-доплеровской РЛС на основе экспериментальных исследований информационных свойств радиолокационных сигналов, отраженных от реальных воздушных целей. *Научно-методический сборник ЦНИИ ВКС*. Тверь: ЦНИИ ВКС, 2019, 3 (558). [Bogdanov A. V., Ibragim F. H., Lobanov A. A. Directions, principle and signs of recognition air targets in airborne pulse doppler radar based on analyse spectral doppler portrait created by radar signals reflecting from real air targets, *Central Research Institute of the Aerospace Defence*, 2019, 3 (in Russian)].

[7] Богданов А.В., Ибрагим Ф.Х., Лобанов А.А. Результаты экспериментальных исследований разносов доплеровских частот, обусловленных отражениями радиолокационного сигнала от планера самолета и лопаток первой ступени компрессора низкого давления, в интересах распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем. *Научно-методический сборник*

ЦНИИ ВКС. Тверь: ЦНИИ ВКС, 2019, 3 (558). [Bogdanov A. V., Ibragim F. H., Lobanov A. A. The results of experimental research based on analyse spectral doppler portrait created by radar signals reflecting from real air targets with turbojet engine, *Central Research Institute of the Aerospace Defence*, 2019, 3 (in Russian)]

[8] Богданов А. В. и др. *Экспериментальный метод исследования информационных свойств радиолокационных сигналов, отраженных от реальных летательных аппаратов*, монография. Тверь: ВА ВКО, 2021. [Bogdanov A. V. and etc. *Experimental method to research information properties radiolocation signals, reflecting from real air targets*, Transaction of the Military Aerospace Defence Academy, 2021 (in Russian)]

[9] Богданов А. В., Ибрагим Ф. Х., Лобанов А. А., Савельева И. А. Анализ существующих методов распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем в импульсно-доплеровской радиолокационной станции. *Научно-методический сборник научных статей докторантов, адъюнктов и соискателей ученых степеней*. Т. . Кн. 1. Тверь: ВА ВКО, 2020. [Bogdanov A. V., Ibragim F. H., Lobanov A. A., Saveleva I. A. Analysis existing methods recognition type of air target with turbojet engine in pulse-Doppler radar. *Journal of PhD*. Т. 2, Book 1. Transaction of the Military Aerospace Defence Academy, 2020 (in Russian)]

[10] Богданов А. В., Бондарев В. Н., Васильев О. В., Гарин Е. Н., Закомолдин Д. В., Коротков С. С., Лютиков И. В., Ляпоров В. Н. Синтез оптимальных алгоритмов распознавания групповых воздушных целей в радиолокационных системах воздушного базирования. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2017, 10(2), 169–182. [Bogdanov A. V., Bondarev V. N., Garin E. N., D. V. Zakomoldin, S. S. Korotkov, I. V. Lyutikov, V. N. Lyaporov. Synthesis of optimum algorithms of aircraft recognition at the group aerial target in air-based pulse-Doppler radar, *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2017, 10(2), 169–182 (in Russian)]

[11] Богданов А. В., Ибрагим Ф. Х., Лобанов А. А. Способ распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем в импульсно-доплеровской радиолокационной станции при воздействии уводящей по скорости помехи. *Научно-методический сборник ЦНИИ ВКС*. Тверь, ЦНИИ ВКС, 2019, 3 [Bogdanov A. V., Ibragim F. H., Lobanov A. A. *Method of radar recognition type of air target with turbojet engine in pulse-Doppler radar under the influence of speed-stealing interference*, Central research Institute of aerospace Defence, 2019, 3(558) (in Russian)]

[12] Пат. 2324952 Российская Федерация, МПК G01S 13/52 (2006.01). Способ сопровождения групповой воздушной цели. Богданов А. В., Белый Ю. И., Васильев О. В., Голубенко В. А., Киселев В. В., Маняшин С. М., Пекарш А. И., Сеницын А. В., Филонов А. А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ОКБ Траверз» (Ru).— № 2006129699/09; заявл. 16.08.2006; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14. [Patent 2324952 Russian Federation MPK G 01 S 13/52 (2006.01). *Method of escort group aerial target* / A. V. Bogdanov, U. I. Belii, O. V. Vasiliev, V. A. Golubenko, V. V. Kiselev, S. M. Manyashin, A. I. Pekarsh, A. V. Sinicin, A. A. Filonov.— № 2006129699/09 (in Russian)]

[13] Пат. 2419815 Российская Федерация МПК, G 01 S 13/52. Способ сопровождения воздушной цели из класса «самолет с турбореактивным двигателем». А. В. Богданов, О. В. Васильев, И. Н. Исаков, А. Г. Ситников, А. А. Филонова.— № 2009140853, заявл. 03.11.2009, опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15. [Patent 2419815 Russian Federation MPK G 01 S 13/52. *Method of escort*

air target by turbojet aircraft class. A. V. Bogdanov, O. V. Vasiliev, I. N. Isakov, A. G. Sitnikov, A. A. Filonov – № 2419815 (in Russian)]

[14] Пат. 2456633 Российская Федерация, МПК G 01 S 13/52 (2006.01). Способ сопровождения групповой воздушной цели из класса «самолеты с турбореактивными двигателями». Ситников А. Г., Богданов А. В., Васильев О. В., Ибрагим А. К., Филонов А. А., Круталевич Ю. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное научное учреждение «Государственный научно-технологический центр «Наука» (ФГНУ «ГНТЦ «Наука») (RU). № 2011117802/07; заявл. 03.05.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20. [Patent 2456633 Russian Federation MPK G 01 S 13/52 (2006.01). *Method of escort group aerial target by turbojet aircraft class.* A. G. Sitnikov, A. V. Bogdanov, O. V. Vasiliev, A. K. Ibragim, A. A. Filonov, U. A. Krutalevich. № 2011117802/07 (in Russian)]

[15] Пат. 2705070 Российская Федерация МПК, G 01 S 13/52. Способ распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем в импульсно-доплеровской радиолокационной станции. А. В. Богданов, В. А. Голубенко, А. Г. Коваленко, А. А. Корнилов, А. А. Кучин, А. А. Лобанов, А. А. Филонов – № 2019111580, заявл. 16.04.2019, опубл. 05.11.2019, Бюл. № 31. [Patent 2705070 Russian Federation MPK G 01 S 13/52. *Method of radar recognition type of air target with turbojet engine in pulse-Doppler radar.* A. V. Bogdanov, V. A. Golubenko, A. G. Kovalenko, A. A. Kornilov, A. A. Kuchin, A. A. Lobanov, A. A. Filonov. 2019111580 (in Russian)]

[16] Пат. 2731878 Российская Федерация МПК, G 01 S 13/52. Способ распознавания типа самолета с турбореактивным двигателем в импульсно-доплеровской радиолокационной станции. А. А. Анциферов, А. В. Богданов, В. А. Голубенко, Ф. Ибрагим, С. Л. Макашин, П. В. Попова, А. А. Филонов. – № 2020107653, заявл. 18.02.2020, опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. [Patent 2731878 Russian Federation MPK G 01 S 13/52. *Method of radar recognition type of air target with turbojet engine in pulse-Doppler radar.* A. A. Antsiferov, A. V. Bogdanov, V. A. Golubenko, F. Ibragim, S. L. Makashin, P. V. Popovka, A. A. Filonov. № 2020107653 (in Russian)]

[17] Ефименко В. С., Харисов В. Н., Стребков Е. Г. Применение нейронных сетей в задачах оптимальной фильтрации. *Радиотехника*, 2000, 7. [Efimenko V. S., Harisov V. N., Strebkov E. G. Neural networks in optimal filtration. *Telecommunication and radio engineering*, 2000, 7 (in Russian)]

[18] Гафаров Ф. М. Искусственные нейронные сети и приложения. Казань: издательство Казанского университета, 2018. 121 с. [Gafarov F. M. *Artificial neural networks and applications*, Kazan, Kazan university, 2018. 121 p. (in Russian)]

[19] Уоссермен Ф. *Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика*. Москва: Мир, 1992. 240 с. [Yossermen F. *Neural-computer technique: Theory an practice*. Moscow, Mir, 1992. 240 p. (in Russian)]