

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

---

**Сигов А.С.** Главный редактор журнала, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н., президент РТУ МИРЭА

**Кудж С.А.** Профессор, д.т.н., ректор РТУ МИРЭА

**Банис Ю.Й.** Профессор, habilitированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Литва

**Боков А.А.** Старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада

**Буслаева Т.М.** Профессор, д.х.н., РТУ МИРЭА

**Буш А.А.** Профессор, д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА

**Вахрушев С.Б.** Профессор, д.ф.-м.н., зав. лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ

**Голованова Н.Б.** Профессор, д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА

**Гуляев Ю.В.** Академик РАН, член Президиума РАН, профессор, д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

**Жуков Д.О.** Профессор, д.т.н., зав. кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА

**Кимель А.В.** Доцент, к.ф. - м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды

**Козлов Г.В.** Профессор, д.ф.-м.н., заместитель руководителя аппарата генерального директора АО «Концерн ВКО „Алмаз-Антей“»

**Кондратенко В.С.** Профессор, д.т.н., зав. кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА

**Крамаров С.О.** Профессор, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Сургутского государственного университета

**Мишина Е.Д.** Профессор, д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА

**Пасечник С.В.** Профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА

**Перно Ф.** Профессор, проректор по научной работе, Центральная Школа г. Лилль, Франция

**Романов М.П.** Профессор, д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА

**Савиных В.П.** Член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

**Скотт Дж.** Профессор, член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания

**Соколов В.В.** Профессор, д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА

**Тимошенко А.В.** Профессор, д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА

**Фетисов Ю.К.** Профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА

**Харин Ю.С.** Член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, д.ф.-м.н., директор Научно-исследовательского института прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Беларусь

**Цветков В.Я.** Профессор, д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА

### РЕДАКЦИЯ:

**Буслаева Т.М.** Профессор, д.х.н.; e-mail: buslaeva@mirea.ru

**Есипова О.В.** Ответственный секретарь, к.х.н., доцент; e-mail: esipova@mirea.ru

**Семерня Л.Г.** Технический редактор; e-mail: semernya@mirea.ru

**Середина Г.Д.** Зав. редакцией, к.т.н.; e-mail: seredina@mirea.ru

### Адрес редакции:

Россия, 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119

Тел.: +7 (495) 246-05-55 (#2-88); e-mail: seredina@mirea.ru; <http://rtj.mirea.ru>

## EDITORIAL BOARD

---

**Alexander S. Sigov** – Editor-in-Chief of the Journal, Academician of the Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, President of RTU MIREA

**Stanislav A. Kudzh** – Professor, D.Sc. (Eng.), Rector of RTU MIREA

**Yuras Banis** – Professor, Habilitated Doctor of Sciences, Vice-Rector of Vilnius University, Lithuania

**Tatyana M. Buslaeva** – Professor, D.Sc. (Chem.), RTU MIREA

**Alexander A. Bush** – Professor, D.Sc. (Eng.), Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA

**Sergey B. Vakhrushev** – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute RAS, Professor of the Department of Physical Electronics of SPbSPU

**Nataliya B. Golovanova** – Professor, D.Sc. (Economics), Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA

**Yury V. Gulyaev** – Academician of the Russian Academy of Sciences, Member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS

**Dmitry O. Zhukov** – Professor, D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA

**Alexey V. Kimel** – Associate Professor, Ph.D. (Phys.-Math.), Radboud University, Nijmegen, Netherlands

**Gennady V. Kozlov** – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Deputy Head of the Office of the General Director of JSC Concern “VKO Almaz-Antey”

**Vladimir S. Kondratenko** – Professor, D.Sc. (Eng.), Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA

**Sergey O. Kramarov** – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Surgut State University

**Elena D. Mishina** – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA

**Sergey V. Pasechnik** – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA

**Philippe Pernod** – Professor, Dean of Research, Ecole Centrale de Lille, France

**Mikhail P. Romanov** – Professor, D.Sc. (Eng.), Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA

**Viktor P. Savinykh** – Member-Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Professor, D.Sc. (Eng.), President of Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Twice Hero of the Soviet Union

**James F. Scott** – Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, UK

**Viktor V. Sokolov** – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Adviser on Scientific Work of RTU MIREA

**Andrey V. Timoshenko** – Professor, D.Sc. (Eng.), Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA

**Yury K. Fetisov** – Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA

**Yury S. Kharin** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, D.Sc. (Phys.-Math.), Director of the Research Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Belarus

**Viktor Y. Tsvetkov** – Professor, D.Sc. (Eng.), Councilor of the Administration of RTU MIREA

### EDITORIAL:

**Tatyana M. Buslaeva** – Professor, D.Sc. (Chem.). E-mail: buslaeva@mirea.ru

**Olga V. Esipova** – Executive Editor, Ph.D. (Chem.), Associate Professor. E-mail: esipova@mirea.ru

**Larisa G. Semernya** – Technical Editor. E-mail: semernya@mirea.ru

**Galina D. Seredina** – Managing Editor, Ph.D. (Engineering). E-mail: seredina@mirea.ru

### Address:

86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia (office L-119)

Phone: +7(495)246-05-55 (#288); e-mail: seredina@mirea.ru; <http://rtj.mirea.ru>

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг**  
Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи 5
- Смирнов А.В.**  
Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях 13
- Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Калмыков В.М., Ермилов Д.В.**  
Радиолокационные отражения от ясного неба в миллиметровом диапазоне длин волн 28
- Тарасов И.Е., Потехин Д.С.**  
Синтез сверточных функций в реальном времени в системах программно-зависимого радио и фазо-частотных измерительных устройствах 41

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

- Величко А.П.**  
Особенности калибровки ИК-радиометров, работающих в окне прозрачности атмосферы 8–14 мкм 55
- Титов С.А., Богаченков А.Н.**  
Визуализация и характеристика малых объектов в линзовом акустическом микроскопе с двумерной решеткой 66

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Пулькин И.С., Татаринцев А.В.**  
Свойства оценки максимального правдоподобия показателя распределения Парето 74

### МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЩЕСТВА

- Арапов О.Г., Арапова Э.А., Вольнякова О.А., Солодухин Д.В.**  
Философские проблемы образования в русской естественнонаучной мысли 84
- Крижановский И.Н.**  
Постмодернизм: шаг в «неточном направлении» 101

## CONTENTS

---

### *INFORMATION SYSTEMS. INFORMATICS. PROBLEMS OF INFORMATION SECURITY*

- Kulikov G.V., Nguyen Van Dung***  
Analysis of noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying under the influence of scanning interference 5
- Smirnov A.V.***  
Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domains 13
- Sterlyadkin V.V., Kulikovskiy K.V., Kalmykov V.M., Ermilov D.V.***  
Features of radar reflections from the clear sky in the millimeter wavelength range 28
- Tarasov I.E., Potekhin D.S.***  
Real-time kernel function synthesis for software-defined radio and phase-frequency measuring digital systems 41

### *ANALYTICAL INSTRUMENTATION AND TECHNOLOGY*

- Velichko A.P.***  
Features of calibration of infrared radiometers working in window of transparency of the atmosphere 8–14 microns 55
- Titov S.A., Bogachenkov A.N.***  
Visualization and quantitative characterization of small objects in a lens acoustic microscope with a two-dimensional array 66

### *MATHEMATIC MODELING*

- Pulkin I.S., Tatarintsev A.V.***  
Properties of the maximum likelihood estimates of the exponent of Pareto distribution 74

### *PHILOSOPHICAL FOUNDATIONS OF TECHNOLOGY AND SOCIETY*

- Arapov O.G., Arapova E.A., Volnyakova O.A., Solodukhin D.V.***  
Philosophical problems of education in the Russian natural scientific thought 84
- Krizhanovskiy I.N.***  
Postmodernism: A step in an "inexact direction" 101

## **АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СКАНИРУЮЩЕЙ ПОМЕХИ**

**Г.В. Куликов<sup>@</sup>,  
Нгуен Ван Зунг**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия  
<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru*

Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ) давно и успешно применяются в цифровых системах передачи информации с высокой пропускной способностью. Их применение регламентировано различными коммуникационными стандартами. Характеристики помехоустойчивости приема сигналов с М-ФМ на фоне белого гауссовского шума хорошо изучены. В статье рассмотрен случай, когда на входе приемника, кроме шума, присутствует сканирующая помеха. Методами статистической радиотехники проанализирована помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии шумовой и сканирующей помехи. При этом помеха представлена в виде гармонической помехи с частотой, изменяющейся по пилообразному закону. Рассмотрены два случая: первый – когда сканирующая помеха не попадает в зону основного лепестка спектра сигнала – в таком случае ее влияние ничтожно, и она практически не изменяет помехоустойчивости приема – второй, когда диапазон сканирования по частоте совпадает с зоной главного лепестка спектра сигнала – он более опасен. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от девиации частоты сканирующей помехи, ее интенсивности и от отношения сигнал/шум. Показано, что помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией сильно ухудшается при наличии сканирующей помехи, попадающей в область главного лепестка спектра полезного сигнала, и с увеличением позиционности сигналов это влияние значительно усиливается. При изменении девиации частоты такой помехи ее влияние на помехоустойчивость демодулятора М-ФМ изменяется незначительно. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов на фоне сканирующей помехи необходимо использовать алгоритмы компенсации помех, например, следящие режекторные фильтры.

**Ключевые слова:** вероятность битовой ошибки, сканирующая помеха, многопозиционная фазовая манипуляция, помехоустойчивость.

## ANALYSIS OF NOISE IMMUNITY OF RECEPTION OF SIGNALS WITH MULTIPLE PHASE SHIFT KEYING UNDER THE INFLUENCE OF SCANNING INTERFERENCE

G.V. Kulikov@,  
Nguyen Van Dung

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia  
@Corresponding author e-mail: kulikov@mirea.ru

Signals with multi-phase shift keying (M-PSK) have long been successfully used in digital information transmission systems with high bandwidth. Their use is regulated by various communication standards. The noise immunity characteristics of their reception against the background of white Gaussian noise are well studied. The article deals with the case when, at the input of the receiver, besides noise, there is a scanning interference. The noise immunity of signal reception with multi-phase shift keying in the presence of noise and scanning interference was analyzed using statistical radio engineering methods. In this case, the interference is represented as a harmonic interference with a frequency varying according to the sawtooth law. Two cases are considered in the study. The first is when the scanning interference does not fall into the zone of the main lobe of the signal spectrum. In this case, its influence is negligible, and it practically does not change the noise immunity of the reception. The second case, when the frequency range of the scan coincides with the zone of the main lobe of the signal spectrum, is more dangerous. The dependences of the probability of a bit error on the deviation frequency of the scanning interference, its intensity and the signal-to-noise ratio are obtained. It is shown that the noise immunity of receiving signals with multi-phase shift keying deteriorates greatly in the presence of scanning interference falling in the region of the main lobe of the spectrum of the useful signal, and this effect is greatly enhanced with increasing signal positionality. When changing the frequency deviation of such interference, its effect on the noise immunity of the M-PSK demodulator changes only slightly. To increase the noise immunity of receiving signals against the background of scanning interference, it is necessary to use interference compensation algorithms, for example, tracking notch filters.

**Keywords:** bit error rate, scanning interference, multiple phase-shift keying, noise immunity.

### Введение

Применение сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ) в цифровых системах передачи информации с высокой пропускной способностью регламентировано различными коммуникационными стандартами. Такой сигнал на тактовом интервале, равном длительности канального символа  $T_s$ , несущего информацию о  $k = \log_2 M$  информационных битах, может принимать одно из возможных значений:

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 + \varphi_i), \quad \varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, \quad t \in (0, T_s), \quad i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

где  $A_0 = \sqrt{2E_s / T_s}$  – амплитуда сигнала;

$E_s = kE_b$  – энергия канального символа;

$E_b$  – энергия, приходящаяся на один бит информации;

$\omega_0$  – несущая частота.

Одним из важнейших параметров систем передачи информации является их помехоустойчивость. При анализе помехоустойчивости необходимо учитывать, что на входе приемника наряду с шумовой помехой могут присутствовать и другие виды помех – непреднамеренных и преднамеренных, которые сильно влияют на качество радиосвязи [1–8]. К таковым относится и сканирующая помеха. Под сканирующей помехой будем понимать мешающий сигнал с относительной интенсивностью  $\mu$  и частотой  $\omega_{\Pi}$ , изменяющейся вокруг несущей частоты полезного сигнала  $\omega_0$  по некоторому периодическому закону. В простейшем случае этот закон может быть пилообразным:

$$s_{\Pi}(t) = \mu A_0 \cos(\omega_{\Pi}(t)t + \varphi_{\Pi}), \quad (2)$$

$$\omega_{\Pi}(t) = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{д}} - \frac{2\Delta\omega_{\text{д}}t}{T_{\text{с}}},$$

здесь  $\varphi_{\Pi}$  – случайная начальная фаза помехи;

$\Delta\omega_{\text{д}}$  – девиация помехи;

$T_{\text{с}}$  – период сканирования.

Целью работы является анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией в присутствии сканирующей помехи.

### 1. Методика анализа помехоустойчивости

Примем, что входное колебание приемника, кроме полезного сигнала (1), включает в себя белый гауссовский шум  $n(t)$  с односторонней спектральной плотностью  $N_0$  и сканирующую помеху (2):

$$x(t) = s_i(t) + s_{\Pi}(t) + n(t).$$

Классический корреляционный прием сигнала (1) предполагает вычисление интегралов свертки  $I_i$  принимаемого колебания  $x(t)$  и  $M$  опорных сигналов:

$$I_i = \frac{2A_0}{N_0} \int_0^{T_s} x(t) \cos(\omega_0 t + \frac{i2\pi}{M}) dt, i = 0, 1, \dots, M-1. \quad (3)$$

Вероятность правильного обнаружения любого канального символа, например, с индексом "0", находится при условии:

$$I_0 > \{I_i\}, i = 1, \dots, M-1.$$

Общая вероятность правильного обнаружения канального символа равна

$$P_s = \prod_{i=1}^{M-1} p_i(I_0 > I_i), \quad (4)$$

а вероятность ошибочного приема канального символа, соответственно, равна:

$$P_{\text{es}} = 1 - P_s. \quad (5)$$

Эта ошибка, в свою очередь, вызывает ошибку в один или более бит информации в зависимости от уровня помехового сигнала. При достаточно больших отношениях сигнал/шум можно принять [9, 10]:

$$P_{\text{eb}} = P_{\text{es}} / \log_2 M. \quad (6)$$

Если предположить, что скорость изменения частоты сканирующей помехи мала по сравнению со скоростью передачи полезной информации ( $T_c \gg T_s$ ), то на каждом тактовом интервале сигнала такую помеху можно считать гармонической с той или иной расстройкой несущей частоты  $\Delta\omega_{\Pi}$  относительно величины  $\omega_0$ .

Методика расчета вероятности ошибки заключается в следующем [1]. Предположим, что начальная фаза  $\omega_{\Pi}$  помехи  $s_{\Pi}(t)$  является некоторой фиксированной величиной. В этом случае можно рассчитать статистические характеристики условных по указанному параметру распределений случайных процессов  $I_i$  на выходах всех корреляторов приемника: средние значения  $m_0, \dots, m_i, \dots, m_{M-1}$ , дисперсии  $D_0, \dots, D_i, \dots, D_{M-1}$ , взаимные корреляционные моменты  $M_{0i}$ , а также параметры суммарных процессов  $y_i = I_0 - I_i$  на входе устройства сравнения корреляционных интегралов:

$$m_{y_i} = \langle y_i \rangle = \langle I_0 \rangle - \langle I_i \rangle = m_0 - m_i; \quad D_{y_i} = D_0 + D_i - 2M_{0i}.$$

Распределения всех указанных случайных процессов с учетом наличия на входе демодулятора белого гауссовского шума являются нормальными.

## 2. Результаты расчетов

Выполненные расчеты показывают, что средние значения  $m_{y_i}$  и дисперсии  $D_{y_i}$  определяются следующим образом:

$$m_{y_i} = \frac{2E_s}{N_0} \left\{ 1 - \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M}\right) + \mu \frac{\sin \frac{\Delta\omega_{\Pi} T_s}{2}}{\frac{\Delta\omega_{\Pi} T_s}{2}} \left[ \left( \cos \varphi_0 - \cos \frac{i2\pi}{M} \right) \cos\left(\frac{\Delta\omega_{\Pi} T_s}{2} + \varphi_{\Pi}\right) + \left( \sin \varphi_0 - \sin \frac{i2\pi}{M} \right) \sin\left(\frac{\Delta\omega_{\Pi} T_s}{2} + \varphi_{\Pi}\right) \right] \right\},$$

$$D_{y_i} = \frac{4E_s}{N_0} \left[ 1 - \cos\left(\varphi_0 - \frac{i2\pi}{M}\right) \right].$$

Условные по параметрам  $\varphi_{\Pi}$  и  $\Delta\omega_{\Pi}$  вероятности, входящие в (4), находят по формуле:

$$p_i(I_0 > I_i) = 1 - Q\left(\frac{m_{y_i}}{\sqrt{D_{y_i}}}\right), \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt.$$

С целью получения безусловной вероятности ошибки приема канального символа (5) и битовой ошибки (6) необходимо провести усреднение полученных результатов  $P_{es}(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi})$  и  $P_{eb}(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi})$  по этим параметрам, причем необходимо учесть, что случайная величина  $\varphi_{\Pi}$  равномерно распределена на полуинтервале  $(-\pi, \pi]$ , а величина  $\Delta\omega_{\Pi}$  – на интервале  $[-\Delta\omega_{\Delta}, +\Delta\omega_{\Delta}]$ :

$$P_{eb} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[ \frac{1}{2\Delta\omega_{\Delta}} \int_{-\Delta\omega_{\Delta}}^{+\Delta\omega_{\Delta}} P_e(\varphi_{\Pi}, \Delta\omega_{\Pi}) d\Delta\omega_{\Pi} \right] d\varphi_{\Pi}$$

Ввиду сложности подынтегральных выражений для получения окончательных результатов воспользуемся численным усреднением.

Нами рассмотрены два случая: первый – когда сканирующая помеха не попадает в зону основного лепестка спектра сигнала (здесь влияние помехи ничтожно, и она практически не изменяет помехоустойчивости приема); второй случай, когда диапазон сканирования по частоте совпадает с зоной главного лепестка спектра сигнала, более опасен. Рассмотрим второй случай более подробно. Результаты расчетов представлены на рис. 1–3.

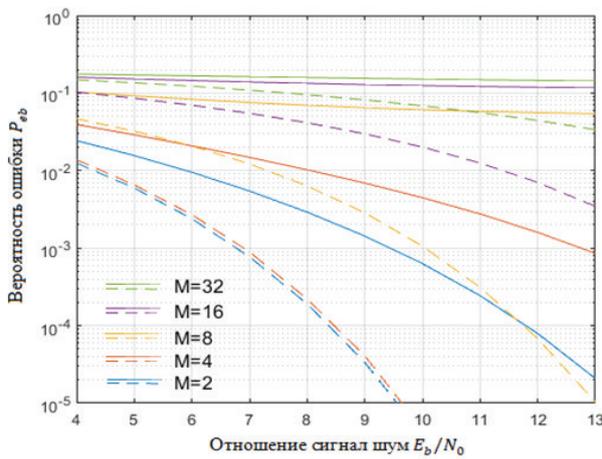


Рис. 1. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум.

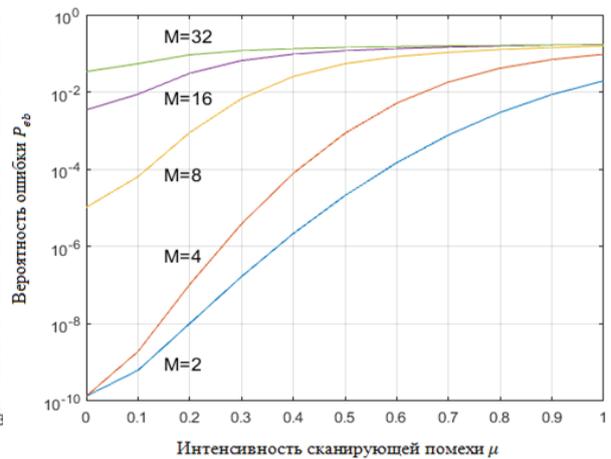


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от интенсивности сканирующей помехи.

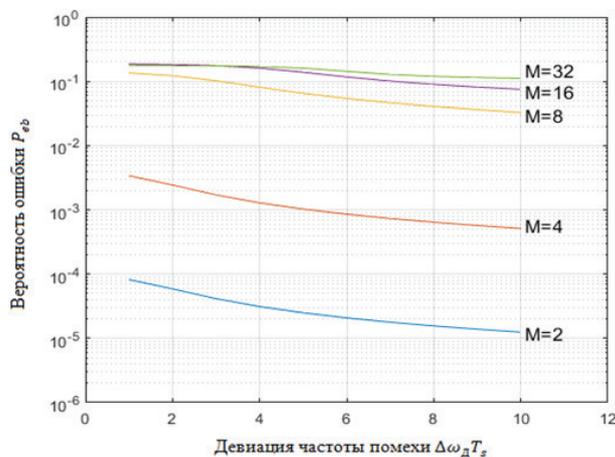


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от девиации частоты сканирующей помехи при  $\mu = 0.5$ ;  $E_b / N_0 = 13$  дБ.

На рис. 1 для разной позиционности  $M$  показаны зависимости вероятности ошибки  $P_{eb}$  от отношения сигнал/шум  $E_b / N_0$ . Сплошные кривые соответствуют приему сигнала на фоне сканирующей помехи с девиацией частоты  $\Delta\omega_d T_s = 6$  и интенсивностью  $\mu = 0.5$ , пунктирные – приему без сканирующей помехи. Рис. 2 иллюстрирует для разных  $M$  зависимости вероятности ошибки  $P_{eb}$  от интенсивности сканирующей помехи  $\mu$  при  $E_b / N_0 = 13$  дБ и  $\Delta\omega_d T_s = 6$ .

Очевидно (рис. 2), что с увеличением позиционности  $M$  влияние сканирующей помехи значительно усиливается: если слабая помеха ( $\mu = 0.1$ ) для  $M = 2$  или 4 практически не

увеличивает вероятность ошибки  $P_{eb}$ , то для  $M = 16$  или  $32$  при такой же помехе снижение помехоустойчивости становится заметным. Помеха большой интенсивности ( $\mu \geq 0.5$ ) опасна для всех видов сигналов М-ФМ и практически разрушают прием.

При изменении девиации частоты помехи, «накрывающей» зону главного лепестка спектра сигнала, ее влияние на помехоустойчивость демодулятора М-ФМ меняется незначительно, оставаясь при этом весьма существенным (рис. 3). Это связано с тем, что основной отрицательный вклад приходится на частоты помехи, близкие к частоте несущего колебания полезного сигнала. При стремлении девиации частоты помехи к нулю вероятность ошибки стремится к величине, полученной для случая прицельной гармонической помехи.

### Заключение

По результатам анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Сигналы с многопозиционной фазовой манипуляцией весьма сильно подвержены влиянию сканирующей помехи, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается. Так, для  $M > 8$  помехоустойчивость приема на фоне сканирующей помехи заметно снижается даже при малых уровнях помехи.

2. Сканирующая помеха, попадающая в область несущей частоты полезного сигнала, наиболее опасна. При изменении девиации частоты такой помехи ее влияние на помехоустойчивость демодулятора М-ФМ изменяется незначительно.

3. Для повышения помехоустойчивости приема сигналов М-ФМ на фоне сканирующей помехи необходимо использовать алгоритмы компенсации помех, например, следящие режекторные фильтры.

### Литература:

1. Куликов Г.В. Влияние гармонической помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов МЧМ // Радиотехника. 2002. № 7. С. 42–44.

2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Мухин Н.П., Шестопапов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.

3. Ложкин К.Ю., Стиценко А.И. Помехоустойчивость некогерентного и когерентного приема ДФРМ-сигнала в условиях воздействия фазоманипулированной, гармонической или гауссовской помех // Журн. Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 2. С. 260–270.

4. Куликов Г.В. Помехоустойчивость приемников модулированных сигналов с непрерывной фазой при наличии нефлуктуационных помех // Радиотехника. 2003. № 7. С. 21–25.

5. Куликов Г.В. Помехоустойчивость автокорреляционного демодулятора сигналов МЧМ в канале связи с гармонической помехой // Радиотехника. 2004. № 8. С. 20–22.

6. Перов А.И. Синтез оптимального алгоритма обработки сигналов в приемнике спутниковой навигации при воздействии гармонической помехи // Радиотехника. 2005. № 7. С. 37–42.

7. Кондратенко А.Е., Поддубный В.Н. Эффективность воздействия гармонической

и гауссовской помех на линии многоканальной радиосвязи с синхронным нелинейным кодовым уплотнением каналов // Радиотехника. 2009. № 6. С. 52–56.

8. Зеленецкий В.В. Помехоустойчивость приема избыточных частотно-манипулированных сигналов на фоне гармонических помех // Радиотехника. 2002. № 7. С. 32–36.

9. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

10. Боккер П. Передача данных. Техника связи в системах телеобработки данных: в 2-х т. Т. I. Основы: пер. с нем. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Связь, 1980. 264 с

### References:

1. Kulikov G.V. The effect of harmonic interference on the noise immunity of the correlating demodulator of the MSK signals. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2002; 7: 42-44. (in Russ.).

2. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mukhin N.P., Shestopalov V.I. Noise immunity of radio communication systems with spreading of the signal spectrum by the method of pseudo-random adjustment of the operating frequency. Moscow: Radio and Svyaz' Publ., 2000. 384 p. (in Russ.).

3. Lozhkin K.Yu., Stitsenko A.I. The immunity of non-coherent and coherent reception of a signal DPSK in the conditions of influence of PSK, a harmonic interference or Gaussian noise. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii. (Journal of the Siberian Federal University. Engineering & Technologies). 2017; 10(2): 260-270. (in Russ.).

4. Kulikov G.V. Noise immunity of receivers of modulated signals with a continuous phase in the presence of non-fluctuations interference. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2003; 7: 21-25. (in Russ.).

5. Kulikov G.V. Noise immunity of the auto-correlation demodulator of the MSK signals in the communication channel with harmonic interference. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2004; 8: 20-22. (in Russ.).

6. Perov A.I. Synthesis of the optimal signal processing algorithm in a satellite navigation receiver under the influence of harmonic interference. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2005; 7: 37-42. (in Russ.).

7. Kondratenko A.E., Poddubnyi V.N. Effectiveness of the impact of harmonic and Gaussian interference on a multichannel radio link with a synchronous nonlinear code channel multiplexing. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2009; 6: 52-56. (in Russ.).

8. Zelenevsky V.V. Noise immunity of reception of excessive frequency-manipulated signals against the background of harmonic interference. Radiotekhnika (Radio Engineering). 2002; 7: 32-36. (in Russ.).

9. Proakis J.G. Digital communications. 4th Edition. New York: McGraw-Hill, 2001. 1002 p.

10. Bocker P. Transmission of data. Communication techniques in data teleprocessing systems: in 2v. Volume I. Basics. / Ed. D.D. Klovsky. Moscow: Svyaz' Publ., 1980. 264 p. (in Russ.).

### Об авторах:

*Куликов Геннадий Валентинович*, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

## **Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи**

---

*Нгуен Ван Зунг*, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

### ***About the authors:***

*Gennady V. Kulikov*, D.Sc. (Engineering), Professor, Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

*Nguyen Van Dung*, Postgraduate Student, Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Для цитирования:** Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 5–12. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12

**For citation:** Kulikov G.V., Nguyen Van Dung. Analysis of noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying under the influence of scanning interference. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 5-12. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12

**МЕТОД ОДНОВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ  
В ЧАСТОТНОЙ И ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТЯХ**

**А.В. Смирнов**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*

*@Автор для переписки, e-mail: avs\_ramb@rambler.ru*

Изложен метод поиска аппроксимаций передаточных функций радиотехнических цепей и устройств, который позволяет решать задачи оптимизации характеристик одновременно в частотной и временной областях. Указанные задачи не могут быть решены аналитическими методами. Поиск осуществляется в пространстве координат полюсов и нулей передаточной функции с помощью эвристического алгоритма, основанного на многократном выполнении локального поиска экстремума целевой функции. На каждом шаге локального поиска производится расчет характеристик, а по ним – показателей качества. В частотной области рассчитываются амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ), а во временной области – переходная характеристика. Для получения переходной характеристики используется метод пространства состояний, обеспечивающий устойчивость к ошибкам округления. Преимуществами разработанного метода оптимизации являются универсальность и гибкость, обусловленные возможностью изменения набора показателей качества и весовых коэффициентов, с которыми эти показатели входят в целевую функцию. Результатом оптимизации является не отдельное решение, а множество оптимальных по Парето решений, из которых можно выбрать наиболее подходящее. Рассмотрены примеры решения задачи оптимизации переходной характеристики при условии выполнения требований к АЧХ в полосе задерживания. Найденные аппроксимации превосходят по характеристикам фильтры Бесселя и Баттерворта.

**Ключевые слова:** оптимизация, целевая функция, показатель качества, передаточная функция, амплитудно-частотная характеристика, переходная характеристика, межсимвольные искажения.

**METHOD OF SIMULTANEOUS OPTIMIZATION OF RADIO  
DEVICES PERFORMANCE IN FREQUENCY AND TIME DOMAINS**

**A.V. Smirnov**

*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

*@Corresponding author e-mail: avs\_ramb@rambler.ru*

A new method of searching for optimal transfer functions of radio circuits and devices was developed. This method allows optimizing performance in the frequency and time domain simultaneously. These tasks cannot be solved by analytical methods. The searching was performed in the coordinatespace of transfer function poles and zeros. The heuristic algorithm of multistart local search type was applied. Computation of transfer function, gain and transient response and goal function was implemented at each step of local search. In order to compute transient response the state space method was employed. This method provides robustness to rounding errors. The proposed method has the advantages of universality and flexibility due to the fact that it allows varying the set of quality parameters and their weighted coefficients in the goal function. Another advantage of this method is its capability of searching a set of Pareto-optimal solutions, from which we can select the most suitable one. Some examples of the transient function optimization under conditions of gain-frequency response in the stop-band are considered. The found approximations have performance exceeding that of the Bessel and Butterworth filters.

**Keywords:** optimization, goal function, quality parameter, transfer function, gain-frequency response, phase response, transient response.

### Введение

Свойства радиотехнических цепей и устройств описываются рядом характеристик. В частотной области определены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость модуля коэффициента передачи от частоты  $K(f)$  и фазочастотная характеристика (ФЧХ) – зависимость фазового сдвига от частоты  $\Delta\varphi(f)$ . Во временной области применяют импульсную характеристику (ИХ)  $h(t)$  – изменение напряжения на выходе устройства при подаче на его вход дельта-функции  $\delta(t)$  и переходную характеристику (ПХ)  $g(t)$  – изменение напряжения на выходе при подаче на вход функции включения  $\sigma(t)$ . Все эти характеристики могут быть получены из передаточной функции (ПФн), называемой также операторным коэффициентом передачи [1]. ПФн электрической цепи, содержащей элементы с сосредоточенными параметрами, имеет вид

$$H(p) = \frac{N(p)}{D(p)}, \quad (1)$$

где  $N(p)$  и  $D(p)$  – полиномы степеней  $NZ$  и  $NP$ , корни которых являются, соответственно, нулями и полюсами ПФн.

Оптимизация какой-либо из перечисленных характеристик заключается в минимизации или максимизации одного или нескольких показателей качества (ПоК), рассчитываемых по этой характеристике. Определения некоторых ПоК будут даны в дальнейшем изложении.

В частотной области известны аналитические решения, дающие оптимальные по некоторым ПоК АЧХ, такие, как фильтры Баттерворта, Чебышева, эллиптические. В результате оптимизации ФЧХ получаются фильтры Бесселя. Известны также аналитические решения, обеспечивающие одновременную оптимизацию АЧХ и ФЧХ для некоторых частных случаев [2]. Значительно расширить возможности поиска оптимальных решений позволяет применение численных эвристических алгоритмов оптимизации [3, 4].

Одним из вариантов оптимизации характеристик во временной области является получение минимальных межсимвольных искажений (МСИ). Теоретически МСИ устраняются, если ИХ устройства пересекает нулевой уровень в моменты времени, совпадающие с границами тактовых интервалов. Этому условию удовлетворяют идеальный фильтр нижних частот (ФНЧ), а также ФНЧ с АЧХ типа «приподнятый косинус» и некоторые другие [5]. Такие ФНЧ не могут быть точно реализованы схемными средствами. Поэтому задачей оптимизации является поиск реализуемой ПФн, дающей ИХ, точки пересечения которой с нулевым уровнем максимально приближены к требуемым положениям [6, 7].

Другой подход к оптимизации ИХ и ПХ заключается в минимизации их отличий от заданных функций. В числе используемых методов – линейное программирование, модификации алгоритмов Ремеза и др. [8]. Как правило, известные решения пригодны в некоторых частных случаях или требуют упрощения задачи, например, линеаризации в окрестности стартовой точки поиска.

Значительный интерес представляет одновременная оптимизация характеристик радиотехнических устройств в частотной и временной областях. Во многих практических задачах требуется обеспечить минимальные МСИ или другие искажения формы передаваемых сигналов и, одновременно, ограничить уровень спектра этих сигналов за пределами выделенной полосы частот. Такая задача, очевидно, является многокритериальной, поэтому возможности аналитических методов ограничены. Как примеры аналитических решений можно привести работы [2, 9], в которых для обеспечения минимальных искажений формы сигнала минимизируют нелинейность ФЧХ в полосе пропускания (ПП) с выполнением при этом требований к АЧХ в полосе задерживания (ПЗ). Однако сами ИХ и ПХ при этом не анализируются.

При использовании методов линейного программирования одновременная оптимизация в частотной и временной области в принципе возможна, причем неравенства, относящиеся к двум областям, объединяются в одну систему [8]. Однако указанные выше ограничения, связанные с нелинейностью задачи, остаются в силе.

В последние годы для исследования и оптимизации различных характеристик радиотехнических устройств все шире применяют эвристические методы, которые позволяют решать задачи многокритериальной оптимизации в случае сложного рельефа целевой функции (ЦФ) [10]. Применяются такие подходы и в задачах оптимизации частотных и временных характеристик [11, 12]. Однако известные решения относятся к частным случаям.

Цель данной работы – разработать и реализовать метод оптимизации характеристик радиотехнических устройств одновременно в частотной и временной областях, позволяющий использовать различные наборы ПоК и, следовательно, находить оптимальные решения при различных требованиях к устройству. Для достижения поставленной цели метод, основанный на эвристическом алгоритме поиска оптимальных по Парето решений и использованный ранее для оптимизации аппроксимаций ПФн в частотной области [3, 4], расширен на временную область.

### Описание метода

Определим ЦФ в виде

$$GF = \sum_{k=1}^N |S_k - S_k^t| \cdot W_k. \quad (2)$$

здесь  $S_k$  – значение  $k$ -го ПоК;

$S_k^t$  – его целевое (*target*) значение;

$W_k$  – соответствующий весовой коэффициент, значение которого зависит от знака разности полученного и целевого значений ПоК в соответствии с правилом

$$W_k = \begin{cases} W_k^+ & \text{при } S_k > S_k^t; \\ W_k^- & \text{при } S_k < S_k^t. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим набор ПоК, использовавшихся в данной работе. Частотные характеристики определялись на нормированной оси частот  $F$ . При этом рассматривался случай ФНЧ с нормированной частотой среза  $F_c = 1$ . Аналогично работам [3, 4] для частотной области определены следующие ПоК.

1. Максимальная неравномерность АЧХ в ПП, измеряемая в дБ:

$$DHpmx = 20 \lg \left( \frac{\max(K(F))}{\min(K(F))} \right), \quad 0 \leq F \leq 1. \quad (4)$$

2. Максимальное значение АЧХ в ПЗ, выраженное в дБ:

$$Hsmx = 20 \lg(\max(K(F))), \quad F_s \leq F \leq \infty. \quad (5)$$

здесь  $F_s$  – нижняя граница ПЗ. В расчетах верхнюю границу ПЗ брали равной некоторому конечному значению  $F_M$ .

3. Максимальное превышение АЧХ над заданным уровнем  $K^t(F)$  в полосе перехода между ПП и ПЗ, выраженное в дБ:

$$DHtmx = \max \left( 20 \lg \frac{K(F)}{K^t(F)} \right), \quad 1 \leq F \leq F_s. \quad (6)$$

4. Максимальное значение относительной неравномерности времени задержки в ПП, рассчитываемое как относительная дифференциальная нелинейность ФЧХ:

$$DTdmx = 2 \cdot \frac{\max(d\varphi(F)) - \min(d\varphi(F))}{\max(d\varphi(F)) + \min(d\varphi(F))}, \quad 0 \leq F \leq 1. \quad (7)$$

здесь  $d\varphi$  – абсолютная величина приращения фазового сдвига при фиксированном малом приращении частоты  $dF$ .

Во временной области использовались ПоК, обычно применяемые в качестве параметров ПХ [13], а именно: длительность переходного процесса  $Tt$  и максимальный выброс ПХ (перерегулирование)  $DUmX$ . При этом длительность  $Tt$  разделяется на три составляющих: длительность задержки  $Tdel$ , длительность фронта  $Tfr$  и длительность колебательного процесса  $Tosc$  (рис. 1).

Пороги  $DUdel$ ,  $DUfr$ ,  $DUosc$ , определяющие границы этих интервалов, задаются независимо друг от друга. Окончанием колебательной составляющей переходного процесса считается момент времени, когда значение ПХ в последний раз выходит за границы

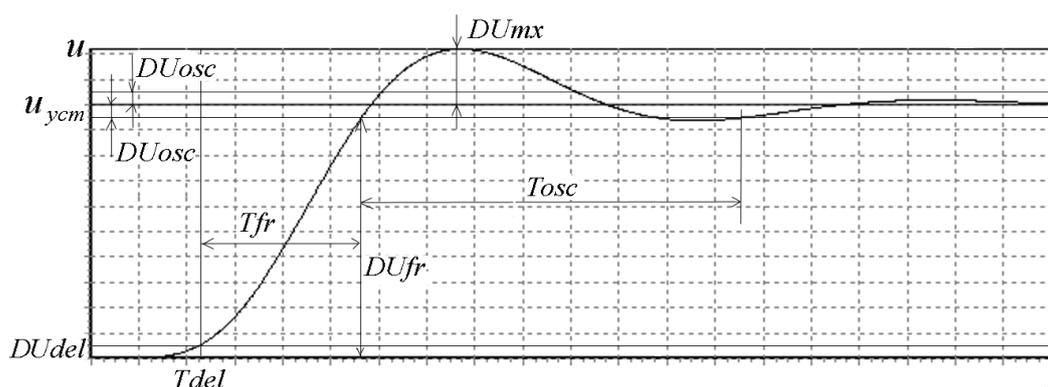


Рис. 1. Определения показателей качества переходной характеристики.

интервала  $(u_{уст} - DU_{osc}, u_{уст} + DU_{osc})$ . Для учета вклада какого-либо ПоК в ЦФ соответствующему весовому коэффициенту присваивается значение, отличное от нуля.

Перейдем к описанию метода поиска. Поиск производится в пространстве координат полюсов и нулей  $\{P, Z\}$  ПФн. Такой подход позволяет обеспечивать физическую реализуемость ПФн путем задания ограничений на возможные значения этих координат. Решением является точка  $\{P_{опт}, Z_{опт}\}$ , в которой достигается глобальный минимум ЦФ (1).

Рассматриваемая задача оптимизации относится к многокритериальным. Ее полным решением является множество решений, оптимальных по Парето. Решение является Парето-оптимальным, если любое его изменение, дающее улучшение какого-либо ПоК, приводит к ухудшению хотя бы одного из остальных ПоК. Множество Парето-оптимальных решений образует в пространстве значений ПоК фронт Парето (ФП). Для получения множества точек ФП использовали метод декомпозиции, основанный на задании разных наборов значений весовых коэффициентов в (2) [14].

Как показали эксперименты, ЦФ решаемой задачи имеет сложный рельеф с большим количеством локальных экстремумов. В связи с этим для поиска глобального экстремума нами применен метод адаптивного мултистарта, в основном подобный использовавшемуся в работах [3, 4]. При достаточно большом количестве запусков локального поиска такой метод с высокой вероятностью дает решение, близкое к глобальному минимуму ЦФ.

Структура алгоритма поиска глобального экстремума ЦФ приведена на рис. 2. Алгоритмы задания стартовых точек  $(P_0, Z_0)$  и поиска локального экстремума SearchLocOpt аналогичны описанным в [4]. Используется прямой поиск минимума ЦФ с изменением шага смещения в зависимости от хода поиска и заданных параметров.

На каждом шаге локального поиска после задания координат очередной точки  $\{P, Z\}$  выполняется расчет АЧХ, ФЧХ, ПХ, по которым определяются значения ПоК. Значения АЧХ и ФЧХ рассчитываются для множества значений частоты  $F_n$  в интервале  $(0, F_M)$  как

$$K(F_n) = |H(p = jF_n)|, \quad \Delta\varphi(F_n) = \arg(H(p = jF_n)). \quad (8)$$

Каких-либо принципиальных сложностей эти вычисления не создают.

Расчет ПХ не столь тривиален. Как известно [1], ПХ связана с ПФн соотношением

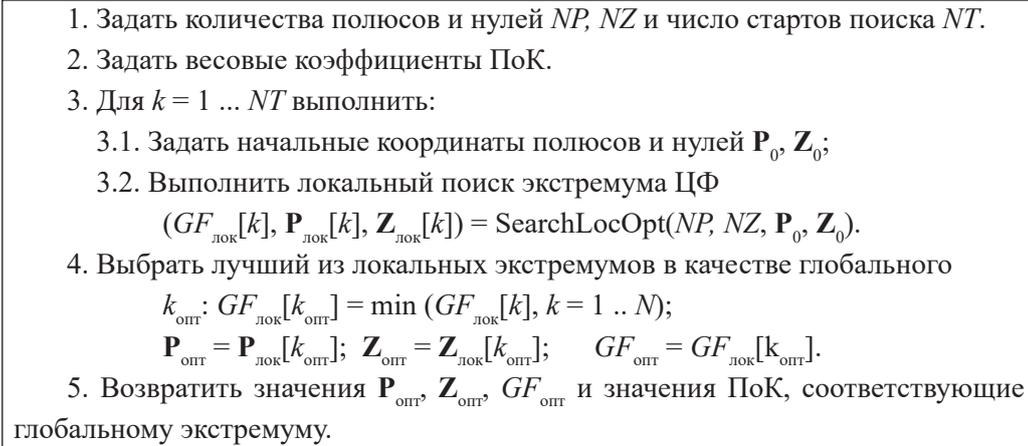


Рис. 2. Структура алгоритма поиска глобального экстремума.

$$h(t) = L^{-1}\left(\frac{H(p)}{p}\right), \tag{9}$$

где  $L^{-1}(X(p))$  – обратное преобразование Лапласа.

Разложив  $H(p)$  на простые дроби и применив к каждой из них преобразование (9), получают выражение для  $h(t)$  в виде суммы относительно простых слагаемых [15]. Однако такой путь во многих случаях приводит к чрезвычайно высокой чувствительности результатов расчета к погрешностям задания координат  $\{\mathbf{P}, \mathbf{Z}\}$  вследствие близости значений знаменателей некоторых из простых дробей к нулю. Поэтому для расчета ПХ был применен метод пространства состояний, основанный на решении системы дифференциальных уравнения первого порядка [16].

Система уравнений метода пространства состояний записывается в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{X}}{dt} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}, \end{aligned} \tag{10}$$

где  $\mathbf{X}$  – вектор внутренних переменных, описывающих состояние системы; размерность  $\mathbf{X}$  равна порядку дифференциального уравнения, описывающего систему, то есть порядку  $NP$  знаменателя ПФн (1); матрица  $\mathbf{A}$  имеет размер  $NP \times NP$ ;  $\mathbf{U}$  – вектор входных воздействий;  $\mathbf{Y}$  – вектор выходных переменных.

При наличии у системы одного входа и одного выхода, как в случае обычного электрического фильтра или усилителя, переменные  $U$  и  $Y$  скалярные,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  –  $NP$ -мерные векторы, а  $D$  – скаляр.

Как следует из определений ПоК для временной области (рис. 1), для получения их значений необходимо и достаточно рассчитать значения ПХ до конца интервала  $T_{osc}$ . Этот момент времени заранее не известен. Поэтому в разработанном алгоритме ведется расчет ПХ отсчет за отсчетом и одновременно контролируются переходы через пороговые уровни, показанные на рис. 1, до тех пор, пока не будет достигнут конец интервала  $T_{osc}$ .

Это позволяет не выполнять лишних расчетов. Упрощенная структура алгоритма показана на рис. 3. Отображена только основная ветвь, по которой выполняется расчет при наличии выброса и колебательной составляющей ПХ. Для случая монотонной ПХ предусмотрен контроль скорости нарастания ПХ после пересечения уровня  $DUfr$  с целью обнаружения отсутствия колебаний и прекращения в этом случае дальнейшего расчета.

1. Рассчитать параметры модели пространства состояний  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $D$ .
2. Задать начальную точку  $t = 0$ ,  $\mathbf{h}(0) = 0$ .
3. Рассчитывать отсчеты  $h(t)$ , пока не будет выполнено  $h(t) \geq DUdel$ . Сохранить  $Tdel$ .
4. Рассчитывать отсчеты  $h(t)$ , пока не будет выполнено  $h(t) \geq DUfr$ . Сохранить  $Tfr$ .
5. Рассчитывать отсчеты  $h(t)$ , пока не будет найден максимум  $h(t)$ . Сохранить  $DUmx$ .
6. Искать следующие экстремумы  $h(t)$ , пока два последних найденных экстремума не окажутся в интервале  $(1 - DUosc, 1 + DUosc)$ . Одновременно сохранять значение времени в переменной  $Tex = t$ , пока  $h(t)$  выходит за границы этого интервала.
8. Рассчитать и сохранить  $Tosc = Tex - Tdel - Tfr$ .

Рис. 3. Структура алгоритма расчета ПХ и получаемых из нее ПоК.

Расчет параметров модели пространства состояний по значениям полюсов и нулей ПФн осуществляли методом, аналогичным использованному в функции *zp2ss.m* модуля *Signal Processing Toolbox* программной системы MATLAB<sup>1</sup>. При этом равенство единице установившегося значения ПХ обеспечивалось умножением значений  $\mathbf{C}$  и  $D$  на нормирующий коэффициент

$$K_n = \frac{\prod_{m=1}^{NP} P_m}{\prod_{m=1}^{NZ} Z_m}, \quad (11)$$

где  $P_m$ ,  $Z_m$  – значения полюсов и нулей ПФн (1).

Вычисление отсчетов ПХ в соответствии с системой уравнений (10) выполняли модифицированным методом Эйлера [17].

Изложенный метод реализован в виде программы SOFTD (*Simultaneous Optimization in Frequency and Time Domains*) на языке C++ в системе Borland C++ Builder. На рис. 4 показан фрагмент окна программы. В левом верхнем углу задаются количества полюсов  $NP$  и нулей  $NZ$  ПФн, а также число нулей в правой полуплоскости  $NDZ$  и число действительных нулей  $NRZ$ . При установке флажка  $Re(Z) = 0$  действительные части всех нулей обнуляются.

Ниже (рис. 4) расположена таблица задания и отображения ПоК. В столбце  $St$  задается целевое значение ПоК, в двух следующих столбцах – весовые коэффициенты. В столбце  $S$  отображается значение ПоК в процессе поиска оптимума, в последнем столбце – вклад, который этот ПоК вносит в значение ЦФ. Значение  $Hsmx$  (в дБ) отображается без знака минус. В столбце  $Sel$  отмечаются ПоК, которые рассчитываются. При этом значение рассчитываемого ПоК не будет учитываться в ЦФ, если соответствующие весовые коэффициенты заданы равными нулю, но будет отображаться в таблице. Исключение

<sup>1</sup>URL: <http://www.mathworks.com>.

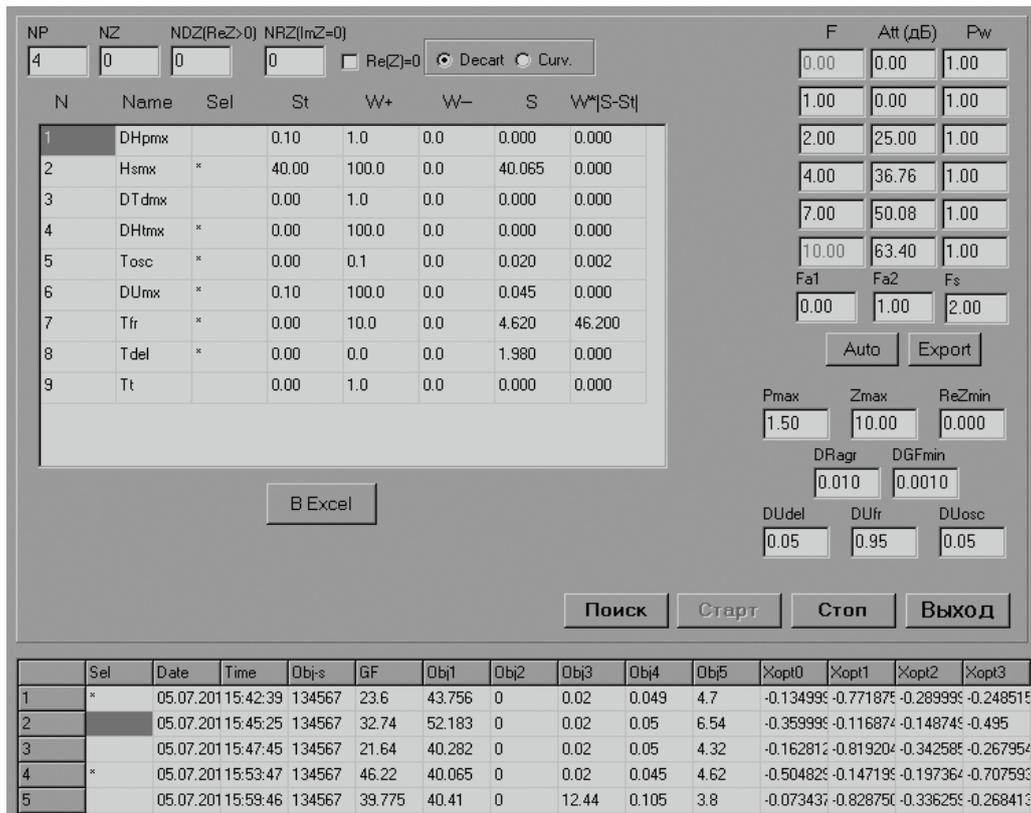


Рис. 4. Фрагмент окна программы SOFTD.

расчета ненужных ПоК позволяет уменьшать затраты времени на поиск решения. В ПоК  $Tt$  суммируются значения  $Tdel$ ,  $Tfr$  и  $Tosc$  или часть из них по выбору.

Справа (рис. 4) расположена таблица задания кусочно-линейной аппроксимации желаемой АЧХ (в дБ без знака минус). Нормированные частоты  $Fa1$  и  $Fa2$  показывают границы ПП, а частота  $Fs$  – нижнюю границу ПЗ. Значения  $DUdel$ ,  $DUfr$  и  $DUosc$  задают пороги при определении ПоК по ПХ (рис. 1).

Ниже (рис. 4) расположена таблица результатов поиска. После окончания поиска в ней отображается строка, содержащая номера вычислившихся ПоК (столбец  $Obj-s$ ), значения ЦФ и ПоК, координаты полюсов и нулей ПФн для найденного оптимального решения. Программа имеет функцию построения графиков АЧХ, ФЧХ и ПХ по данным строк, выделенных флажками в столбце  $Sel$ . Содержимое таблицы экспортируется в Excel для хранения и обработки. Предусмотрен также импорт ранее сохраненных данных из Excel для построения АЧХ и ПХ.

Остальные части окна программы SOFTD содержат настройки режимов поиска и другие элементы интерфейса.

### Результаты экспериментов

Чтобы продемонстрировать возможности разработанного метода, рассмотрим решение упомянутой выше задачи оптимизации ПХ при выполнении требований к АЧХ в ПЗ. В первой серии экспериментов минимизировалась суммарная длительность переходного процесса  $Tt$  для ФНЧ с  $NP = 4, 5, 6$  и  $NZ = 0$ . Во всех опытах задавались следующие па-

параметры: нижняя граница ПЗ  $F_s = 2$ ; пороги  $DU_{del} = 0.05$ ;  $DU_{fr} = 0.95$ ;  $DU_{osc} = 0.05$ ; целевые значения  $DH_{tmx}^t = 0$  и  $DU_{mx}^t = 0.1$ . Целевое значение  $H_{smx}^t$  варьировалось в пределах от 20 до 70 дБ с шагом в 5 дБ. Весовые коэффициенты  $W^+$  для трех указанных ПоК задавались равными 100, чтобы вносить в ЦФ штрафы за превышение целевых значений и, тем самым, обеспечить фиксацию этих ПоК на требуемых уровнях. Для минимизируемой длительности  $Tt$  установлен весовой коэффициент  $W^+ = 1$ . Остальные ПоК не учитывались.

Для каждой комбинации параметров выполнялось два цикла по 250 стартов локального поиска. На компьютере с процессором Intel Core 2 с тактовой частотой 1.87 ГГц и ОЗУ объемом 2 ГБ при  $NP = 4$  выполнение одного цикла занимало около 3 мин. На рис. 5 приведены серии точек, полученных в экспериментах.

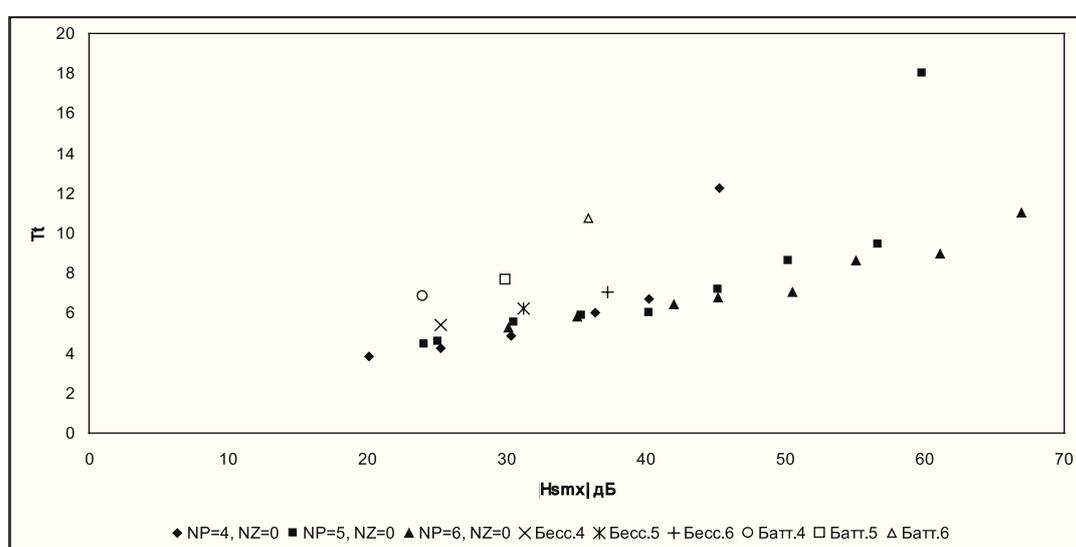


Рис. 5. Результаты оптимизации длительности переходного процесса  $Tt$ .

График для каждого значения  $NP$  является проекцией фронта Парето задачи одновременной оптимизации в частотной и временной областях на плоскость  $(H_{smx}, Tt)$ . При повышении качества АЧХ – увеличении затухания в ПЗ снижается качество ПХ – растет длительность переходного процесса. На рис. 5 показаны также точки, отображающие значения  $H_{smx}$  и  $Tt$  фильтров Баттерворта и Бесселя 4-го, 5-го и 6-го порядков. Видно, что фильтры Бесселя по своим характеристикам близки к найденным оптимальным аппроксимациям, в то время как фильтры Баттерворта заметно уступают им. Что касается фильтров Чебышева, то для них длительность  $Tt$  значительно больше, и соответствующие им точки на рис. 5 не показаны.

Приведенные результаты демонстрируют преимущество предлагаемого метода. Если для каждого значения порядка  $NP$  для фильтров Бесселя существует только одно сочетание  $H_{smx}$  и  $Tt$ , то разработанный метод при заданном  $NP$  позволяет найти множество возможных решений, задавая разные целевые значения  $H_{smx}$ , и выбрать наиболее подходящую аппроксимацию ПФн.

Отметим также, что на рис. 5 точки, соответствующие разным значениям порядка  $NP$  оптимальных ПФн, до  $H_{smx} \approx 40$  дБ лежат приблизительно на одной линии. Правее

значения  $Hsmx$ , равного 40 дБ, уходит вверх от общей линии зависимость для  $NP = 4$ , а после значения 55 дБ – зависимость для  $NP = 5$ . Оказывается, при выбранном в данном случае наборе ПоК увеличение порядка фильтра целесообразно только выше определенного значения  $Hsmx$ .

Графики АЧХ и ПХ для ФНЧ 4-го порядка показаны на рис. 6. Линии с 1 по 6 соответствуют значениям  $Hsmx$ , приблизительно равным 20, 25, 30, 35, 40 и 45 дБ. Можно заметить, что формы некоторых АЧХ отличаются от привычных АЧХ фильтров Баттерворта, Чебышева и др. Таковы результаты поиска оптимальных решений. В то же время формы всех ПХ выглядят вполне ожидаемо.

В следующей группе экспериментов при сохранении остальных условий минимизировалась сумма  $Tfr + Tosc$ , а величина  $Tdel$  была исключена из рассмотрения. Результаты поиска приведены на рис. 7. По сравнению с рис. 5 здесь можно отметить некоторые особенности:

- 1) наблюдается преимущество найденных оптимальных аппроксимаций по отношению к фильтрам Бесселя;
- 2) для фильтров 5-го порядка отсутствует резкий подъем графика при увеличении  $Hsmx$ . Можно сделать вывод, что поисковый алгоритм находит решения, в которых минимизируемая сумма уменьшается за счет увеличения длительности задержки.

Далее сравним графики АЧХ и ПХ для рассматриваемого случая с соответствующими графиками характеристик, полученных при минимизации полной длительности переходного процесса (рис. 8).

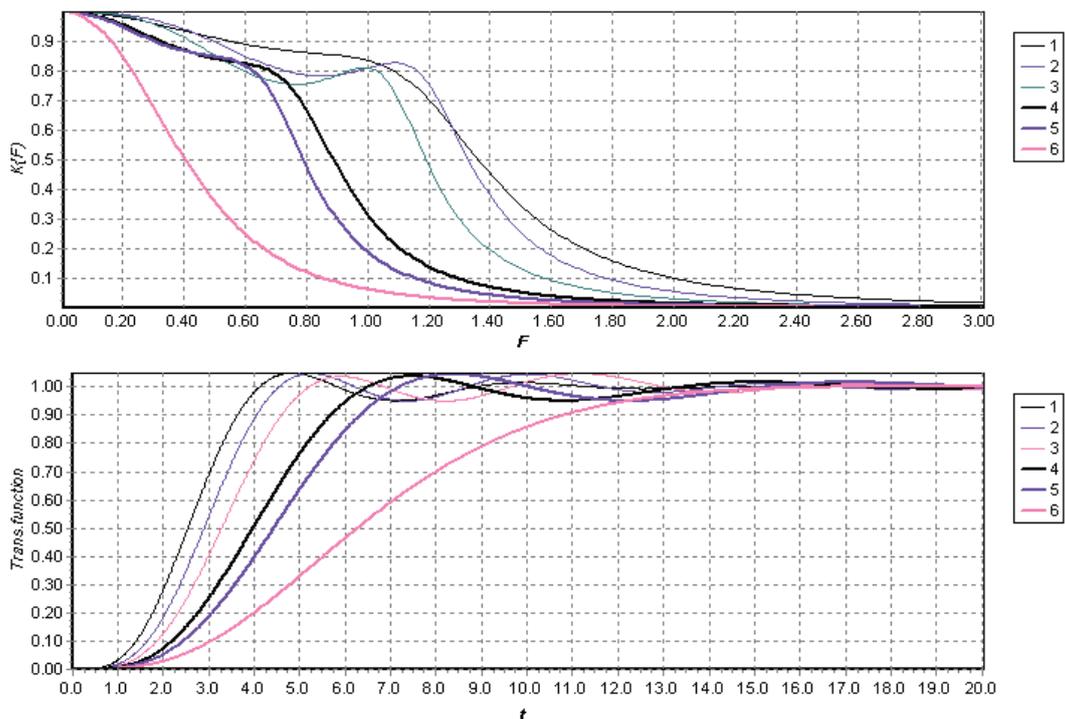


Рис. 6. Графики АЧХ и ПХ ФНЧ 4-го порядка при разных значениях  $Hsmx$ .

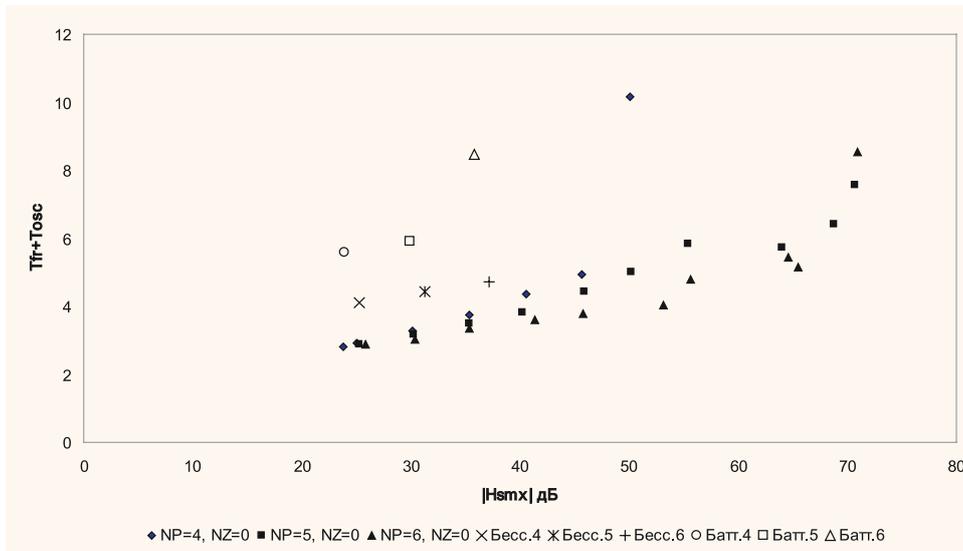


Рис. 7. Результаты оптимизации суммы интервалов времени  $T_{fr} + T_{osc}$ .

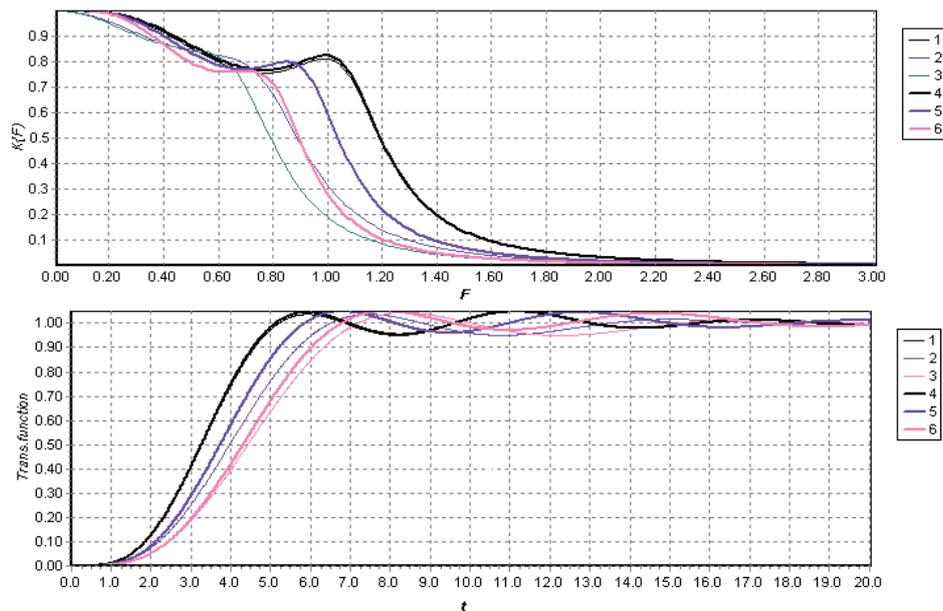


Рис. 8. АЧХ и ПХ, полученные в результате минимизации суммы  $T_{fr} + T_{osc}$  при  $NP = 4$ .

Графики 1, 2 и 3 на рис. 8 совпадают с графиками 3, 4 и 5 на рис. 6, полученными в результате минимизации полной длительности переходного процесса  $Tt$  при значениях  $Hsmx$ , равных 30, 35 и 40 дБ, а графики 4, 5 и 6 – получены в результате минимизации суммы  $T_{fr} + T_{osc}$  при таких же значениях  $Hsmx$ . При  $Hsmx = 30$  дБ графики для двух случаев совпадают. При других значениях  $Hsmx$  виден выигрыш в длительности фронта, достигаемый при исключении из оптимизируемой величины длительности задержки  $Tdel$ . Таким образом, выбирая ПоК для оптимизации, удастся улучшить ПХ.

Рассмотрим далее АЧХ и ПХ фильтров 5-го порядка, найденных при минимизации суммы  $T_{fr} + T_{osc}$  (рис. 9). Графики 1–6 соответствуют значениям  $Hsmx \approx 30, 40, 50, 55, 65$  и 70 дБ. В первую очередь, обращает на себя внимание 5-ая АЧХ, полученная при  $Hsmx \approx 65$  дБ и имеющая узкий пик. Соответствующая ПХ имеет длительность  $T_{fr}$ ; практиче-

ски такую же, как 4-я ПХ, полученная при затухании, меньшем на 10 дБ. Такое быстрое нарастание ПХ достигается за счет медленного затухания колебательной составляющей переходного процесса, которое обусловлено высокой добротностью резонанса, соответствующего пику АЧХ. При этом амплитуда колебательной составляющей не превышает значения  $DU_{osc}$ , так что поисковый алгоритм определяет окончание переходного процесса сразу после пересечения уровня  $DU_{fr}$ :

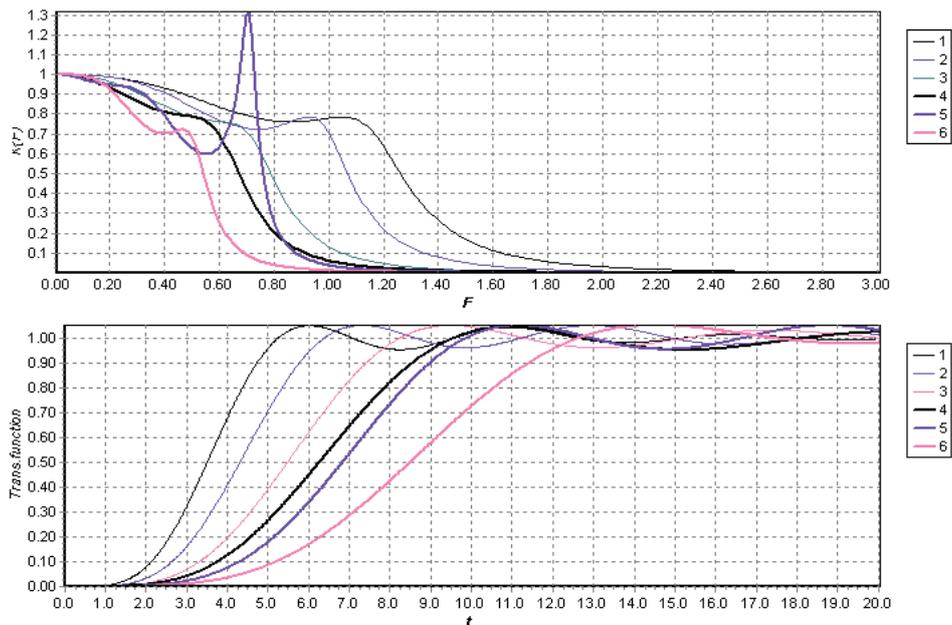


Рис. 9. АЧХ и ПХ, полученные в результате минимизации суммы  $T_{fr} + T_{osc}$  при  $NP = 5$ .

Указанный случай служит примером того, как эвристический алгоритм может найти решение, которое формально соответствует заданным условиям, но выглядит необычным и неожиданным. Такие особенности эвристических алгоритмов отмечались многими специалистами, работающими в данной области [18].

### Заключение

Как видно из представленных результатов, разработанный метод позволяет решать задачи оптимизации характеристик радиотехнических цепей и устройств, недоступные аналитическим методам. Описанные эксперименты демонстрируют лишь небольшую часть возможностей метода. Даже оставаясь в рамках приведенного выше набора из 9-ти ПоК, можно выбирать те или иные показатели и задавать различные их целевые значения и весовые коэффициенты. Например, получить серии аппроксимаций с различными соотношениями выброса  $DU_{mx}$  и длительности нарастания  $T_{fr}$  или добавить ограничение на неравномерность АЧХ в ПП. При этом, как уже отмечалось, можно находить любые точки фронта Парето, добиваясь наилучшего соответствия предъявляемым требованиям.

Дальнейшее расширение круга решаемых задач может быть достигнуто введением новых ПоК. В этом направлении необходимо продолжение и развитие исследований. Логично предположить, что будет полезно выявить ПоК, рассчитываемые по ПХ и характеризующие величину МСИ. Другая перспективная задача – связать параметры ПХ с искажениями формы импульсов, приводящими к потере информации, заключенной в

этой форме, и выработать методы расчета соответствующих ПоК. Наконец, можно предпринять попытку связать ПоК, характеризующие АЧХ и ПХ, с частотой ошибок на выходе линии связи, имеющей такие характеристики.

### Литература:

1. Нефедов В.И., Сигов А.С. Основы радиоэлектроники и связи: Учебное пособие / Под ред. В.И. Нефедова. М.: Высшая школа, 2009. 735 с.
2. Роудз Дж. Теория электрических фильтров: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1980. 240 с.
3. Смирнов А.В. Оптимальные по Парето аппроксимации передаточных функций электрических фильтров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 5-1 (76). Часть 1. С. 74–78.
4. Смирнов А.В. Метод поиска оптимальных дробно-чебышевских аппроксимаций АЧХ // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/7/text.pdf>.
5. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
6. Nader S., Lind L. Optimal data transmission filters // IEEE Trans. on Circuits and Systems. 1979. V. 26. Iss. 1. P. 36–45.
7. Huber K. A design method for pulse shaping filters having small intersymbol interference // IEEE Trans. on Circuits and Systems. 1987. V. 34. Iss. 9. P. 1137–1138.
8. Ланне А.А. Оптимальный синтез линейных электрических цепей. М.: Связь, 1969. 294 с.
9. Baher H., Beneat J. Design of analog and digital data transmission filters // IEEE Trans. on Circuits and Systems I. Fundamental Theory and Applications. 1993. V. 40. Iss. 7. P. 449–460.
10. Смирнов А.В. Перспективы применения эвристических методов оптимизации при проектировании радиотехнических и телекоммуникационных устройств и систем // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 6. С. 20–33. URL: <https://rtj.mirea.ru/journal-archive/2017/volume-5-number-6/>.
11. Walczak K. Multicriteria design of digital filter with evolutionary optimization // IEEE Int. Symp. on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), 14-17 Dec. 2011. P 331–335.
12. Torres-Ferrera P., Ferrero V., Valvo M., Gaudino R. Impact of the overall electrical filter shaping in next-generation 25G and 50G PON. URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.08584>, 25 Jan. 2018.
13. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учебное пособие. 2-е изд. М.: Наука, 1989. 304 с.
14. Zhang Q., Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition // IEEE Trans. on Evolutionary Computation. Jun. V. 11. № 6. P. 712–731.
15. Улахович Д.А. Основы теории линейных электрических цепей: Учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 816 с.
16. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб.-ник. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
17. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения: Учебное пособие /

Под ред. Б.П. Демидовича. 3-е изд. М.: Наука, 1967. 368 с.

18. Lehman J., Clune J., Misevic D. [et al.] The surprising creativity of digital evolution. URL: <https://arxiv.org/pdf/1803.03453>, 09 Mar. 2018.

### References:

1. Nefedov V.I., Sigov A.S. Basic of radio electronics and communications. Editor V.I. Nefedov. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2009. 735 p. (in Russ.).
2. Rhodes J.D. Theory of electrical filters: John Wiley & Sons, 1976. 240 p.
3. Smirnov A.V. Pareto-optimal approximations of electric filters transfer functions. *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk* (Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences). 2015; 05(76), Part 1: 74-78. (in Russ.).
4. Smirnov A.V. Method of searching for optimal gain-frequency characteristics approximations with Chebyshev rational functions. *Zhurnal radioelektroniki* (Journal of Radio Electronics) [electronic journal]. 2018; (3). (in Russ.). URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/7/text.pdf>.
5. Proakis J.G. Digital communications: McGraw-Hill, 1995. 800 p.
6. Nader S., Lind L. Optimal data transmission filters. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*. 1979; 26(1): 36-45.
7. Huber K. A design method for pulse shaping filters having small intersymbol interference. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*. 1987; 34(9): 1137-1138.
8. Lanne A.A. Optimal synthesis of linear electric circuits. Moscow: Sviaz' Publ., 1969. 294 p. (in Russ.)
9. Baher H., Beneat J. Design of analog and digital data transmission filters. *IEEE Trans. on Circuits and Systems I. Fundamental Theory and Applications*. 1993; 40(7): 449-460.
10. Smirnov A.V. The perspectives of heuristic optimization methods employment in a development of radio and telecommunication devices and systems. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2012; 5(6): 20-33. (in Russ.) URL: <https://rtj.mirea.ru/journal-archive/2017/volume-5-number-6/>.
11. Walczak K. Multicriteria design of digital filter with evolutionary optimization. *IEEE Int. Symp. on Signal Processing and Information Technology* (ISSPIT), 14-17 Dec. 2011: 331- 335.
12. Torres-Ferrera P., Ferrero V., Valvo M., Gaudino R. Impact of the overall electrical filter shaping in next-generation 25G and 50G PON. URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.08584>, 25 Jan. 2018.
13. Popov E.P. Theory of linear systems of automation adjustment and control. The 2nd edition. Moscow: Nauka Publ., 1989. 304 p. (in Russ.).
14. Zhang Q., Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *Trans. on Evolutionary Computation*. 2007. 11(6): 712-731.
15. Ulakhovich D.A. Basic of linear electric circuits theory. Saint-Petersburg: BHV-Peterburg Publ., 2009. 816 p. (in Russ.)
16. Bessonov L.A. Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1996. 638 p. (in Russ.)
17. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. Numerical methods of analysis. Functions

approximation. Differential and integral equations. Ed. by B.P. Demidovich. The 3rd edition. Moscow: Nauka Publ., 1967. 368 p. (in Russ.)

18. Lehman J., Clune J., Misevic D. [et al.] The surprising creativity of digital evolution. URL: <https://arxiv.org/pdf/1803.03453>, 09 Mar. 2018.

*Об авторе:*

*Смирнов Александр Витальевич*, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры телекоммуникаций и радиотехники Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

*About the author:*

*Alexander V. Smirnov*, Docent, Ph.D. (Engineering), Professor of the Chair of Telecommunications and Radio Techniques, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

*Для цитирования:* Смирнов А.В. Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 13–27. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27

*For citation:* Smirnov A.V. Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domains. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 13-27. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27

**РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ЯСНОГО НЕБА  
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

**В.В. Стерлядкин<sup>1</sup>,  
К.В. Куликовский<sup>1,@</sup>,  
В.М. Калмыков<sup>2</sup>,  
Д.В. Ермилов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

<sup>2</sup>АО "Центральное конструкторское бюро аппаратостроения", г. Тула 300034, Россия

@Автор для переписки, e-mail: constantinkk@mail.ru

Рассмотрена тонкая структура и условия возникновения радиолокационных отражений от безоблачной атмосферы в различных метеорологических условиях и в разные времена года. Немногочисленные результаты исследований в миллиметровом диапазоне длин волн определяют важность и актуальность задач в этом направлении. Приведены результаты натурных измерений, выполненных с помощью радиолокатора 8 мм диапазона, в зависимости от условий эксперимента. Рассмотрены возможности предлагаемого программного обеспечения для обработки и анализа полученных данных, которые могут быть использованы при проектировании всепогодных малогабаритных метеорологических радиолокаторов различного назначения. Представлены параметры импульсно-когерентных доплеровских радиолокаторов 8 мм диапазона длин волн для измерения профилей ветра в широком диапазоне метеоусловий. Указаны режимы зондирования, методы обработки и накопления данных с помощью программного обеспечения, а также форма представления полученных результатов. Приведена методика восстановления профиля ветра по направлениям зондирования. Получены данные по радиолокационной отражаемости в ясном небе в различных метеорологических ситуациях. Отдельно обсуждаются особенности структуры доплеровских спектров в миллиметровом диапазоне длин волн при отражении от ясного неба.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование атмосферы, миллиметровый ветровой профайлер, отражения от ясного неба, радиолокационная отражаемость,  $K_a$ -диапазон длин волн.

**FEATURES OF RADAR REFLECTIONS FROM THE CLEAR SKY  
IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE**

**V.V. Sterlyadkin<sup>1</sup>,  
K.V. Kulikovsky<sup>1,@</sup>,  
V.M. Kalmykov<sup>2</sup>,  
D.V. Ermilov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

<sup>2</sup>Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula 300034, Russia

@Corresponding author e-mail: constantinkk@mail.ru

The fine structure and conditions for the occurrence of radar reflections from a cloudless atmosphere in various meteorological conditions and at different times of the year are considered. The few research results in the millimeter wavelength range determine the importance and relevance of the tasks in this area. The results of field measurements carried out using a radar of 8 mm wavelength range at different times of the year under various weather conditions are presented. The possibilities of the developed software for processing and analyzing the data are considered. The obtained data can be used in the design of all-weather small-sized weather radars for various purposes. The parameters of pulse Doppler radars of 8 mm wavelength range for measuring wind profiles in a wide range of weather conditions are presented. Sensing modes, methods for processing and accumulating data using software, as well as the form for presenting the results are indicated. The technique of wind profile recovery in the directions of sounding is considered. The data on radar reflectivity in a clear sky in various meteorological situations are given. Separately, the features of the structure of the Doppler spectra in the millimeter wavelength range when reflected from the clear sky are considered.

**Keywords:** Remote sensing of the atmosphere, millimeter wind profiler, reflections from clear sky, radar,  $K_a$  wave band.

В последние годы в мире наметилась тенденция уменьшения массы и габаритов метеорологических радиолокаторов за счет перехода к более коротким длинам волн и использования твердотельных комплектующих большой мощности [1–3]. В России перспективность перехода в миллиметровый диапазон длин волн обоснована уже в 2004 г., когда по заказу Министерства обороны был разработан ветровой профайлер 8 мм диапазона длин волн [4, 5].

В сложившейся мировой практике миллиметровый диапазон длин волн считался неперспективным и фактически не использовался [6, 7]. Предполагалось, что в ясную погоду, когда отсутствуют осадки и облака, в миллиметровом диапазоне будут слишком слабые отражения, поскольку сигнал в этих условиях формируется от флуктуаций показателя преломления. Нижний масштаб турбулентности на высотах выше 3 км превышает 10 см, поэтому береговые условия формирования отражений для миллиметровых волн становятся невозможными, и сигналы обратного рассеяния на этих высотах почти всегда отсутствуют [6]. Однако ситуация изменяется, если назначение профайлера – мониторинг пограничного слоя атмосферы (0–3000 м), где ветер наиболее изменчив, и нужен практически всем потребителям. В пограничном слое нижний масштаб неоднородностей составляет несколько миллиметров, поэтому формирование отражений в безоблачную погоду от турбулентных неоднородностей на длине волны 8 мм является вполне реальным. Кроме того, в соответствии с законом Рэлея в миллиметровом диапазоне (по сравнению с дециметровым) на несколько порядков возрастает отражаемость аэрозолей. Это обеспечивает преимущество миллиметрового профайлера при наличии любых аэрозолей [8–10]. Указанное свойство позволяет проводить ветровые измерения в миллиметровом диапазоне в любых сложных метеорологических условиях: в тумане, при наличии облаков и осадков, прохождении фронтов, при сильных ветрах [10–15].

Отметим также, что использование коротких длин волн в импульсно-когерентных РЛС приводит к нарастанию проблем, связанных с неоднозначностью измерения скорости и дальности, хотя эта задача может быть эффективно решена за счет специальной корреляционной обработки сигналов [13].

В 2010-е гг. был создан когерентный доплеровский радиолокатор 8 мм диапазона длин волн для измерения профилей ветра в широком диапазоне метеоусловий [4, 9]. Оказалось, что в средней полосе России радиолокационные отражения в нижнем 300–500-метровом слое атмосферы формируются в 70–80% случаев даже в отсутствие осадков или облаков [14]. Данный факт оказался неожиданным для специалистов.

Цель настоящей работы – представить и обсудить результаты эксплуатации РЛС в различных природных условиях, причем особое внимание уделить уровням отражений от ясного неба (ОЯН), структуре сигналов и их спектров.

### Технические характеристики профайлера, режимы зондирования и методы обработки сигналов

Линейка доплеровских ветровых профайлеров миллиметрового диапазона длин волн была разработана и создана в Центральном конструкторском бюро аппаратостроения (АО ЦКБА), г. Тула [9]. Типичные характеристики базового образца приведены в табл. 1.

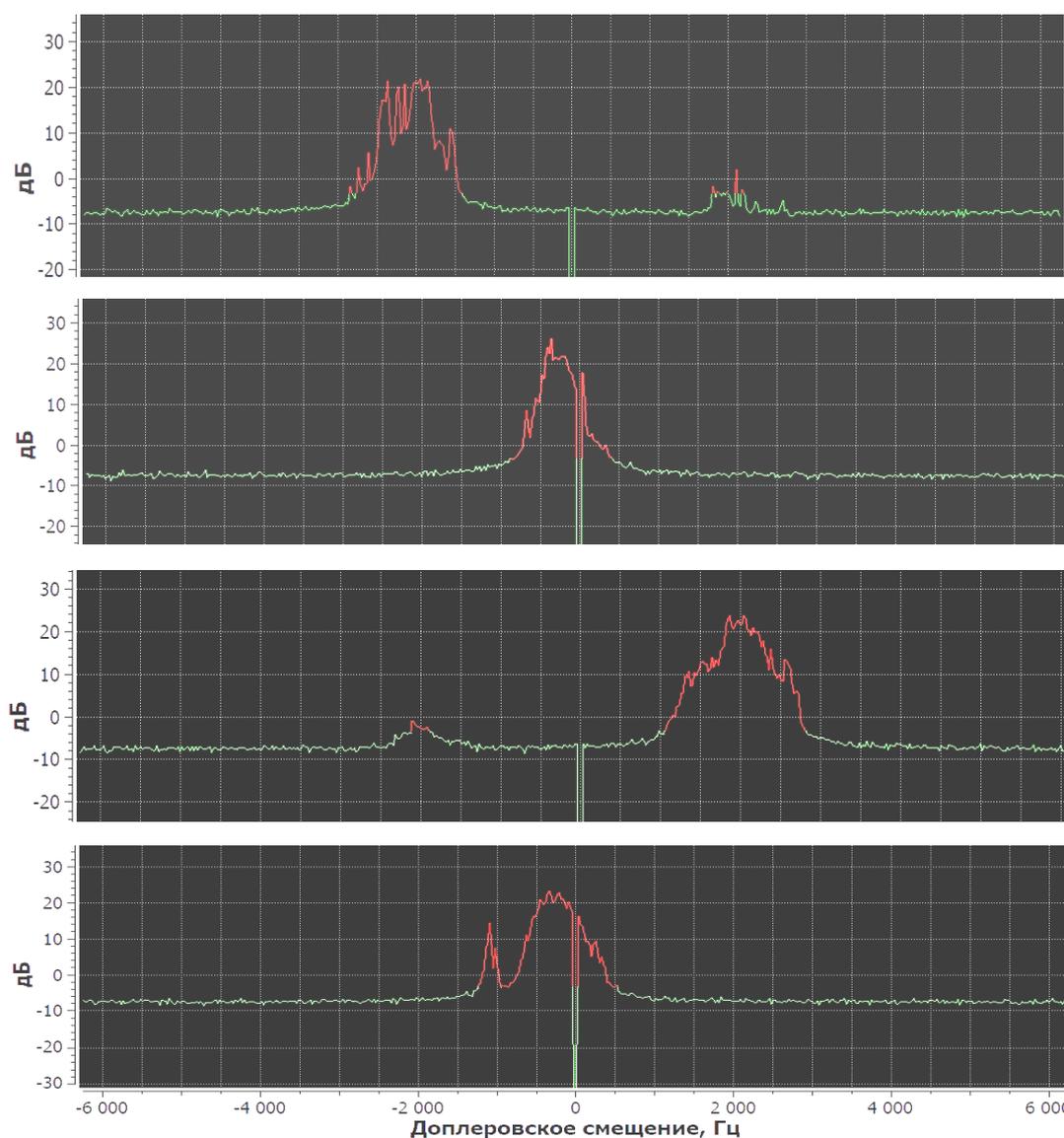
Таблица 1. Основные характеристики ветрового профайлера

№ п/п	Диапазон высот, м	100–4200 (8400)
1	Диапазон измерения скорости ветра, м/с	0.3–50
2	Среднеквадратичная погрешность определения скорости ветра: а) при скорости ветра до 10 м/с, м/с б) при скорости ветра (V) более 10 м/с, м/с	< 0.7 <0.07V
3	Среднеквадратичная погрешность измерения направления ветра, град.	< 6
4	Частота излучения, ГГц	37
5	Длительность импульсов, мкс	0.4; 0.8
6	Разрешение по высоте, м	40
7	Потребляемая мощность, Вт	800
8	Масса аппаратуры радиолокатора, кг	125

Один цикл измерений профиля ветра заключается в проведении азимутального конического разреза под постоянным углом места  $\beta = 45^\circ$  по 12 дискретным углам азимута через каждые  $30^\circ$ . Фиксированный угол места несколько снижает качество интерпретации метеорологических данных, однако упрощает процедуру измерения профиля ветра в автоматическом режиме. В каждом направлении происходит усреднение сигнала в течение 6 с. При длительности импульса 0.4 мкс разрешение по высоте составляет около 41 м. Диапазон высот, в котором производится зондирование, может изменяться от 4 до 8 км, а частота повторения изменяется от 25 до 12.5 кГц, соответственно. Обработку данных проводили с учетом уровня полученного сигнала с присвоением коэффициента достоверности каждому измерению. Это позволило повысить точность измерения параметров ветра в условиях слабых сигналов и различных уровней мощности, принимаемой с различных направлений зондирования.

В результате первичной обработки доплеровских сигналов в каждом направлении зондирования на выходе формируется матрица, представляющая собой набор доплеровских спектров для каждого дискретного значения высоты и для заданного направления

зондирования [16]. В каждом направлении зондирования получаем матрицу, состоящую из 200 уровней высоты и 512 значений доплеровского спектра для каждого уровня. На рис.1 представлен набор доплеровских спектров, полученных 15.06.2016 г. в 17:07 на полигоне ЦКБА г. Тула<sup>1</sup>, для выбранной высоты  $h = 984$  м для 4 направлений и фиксированном угле зондирования  $\beta = 45^\circ$ . Метеоусловия: ясное небо, температура у поверхности  $29^\circ\text{C}$ , влажность 41%.



**Рис. 1.** Набор доплеровских спектров для 4 направлений на выбранной высоте  $h = 984$  м, полученных 15.06.2016 г. в 17:07 на полигоне ЦКБА г. Тула.

Изображение исследуемого участка неба представлено на рис. 2. Фотографирование участка неба проводили с помощью видеокамеры, ось которой совпадала с направлением зондирования. На этих фотографиях видимый радиолокатором участок неба обозначен малым черным кружком в центре перекрестья. В поле зрения камеры намеренно установлен предмет для лучшей калибровки поля зрения.

<sup>1</sup>Точное указание даты, времени и места эксперимента здесь и далее целесообразно с точки зрения согласования полученных данных с реальными метеоусловиями.

Следует отметить, что отражения от ясного неба формировались до высоты около 2500 м, при этом мощность сигнала была настолько велика, что превышала уровни сигналов от облаков, которые иногда попадали в луч радиолокатора.

Для интерпретации сигналов весьма полезными являются спектрограммы, представленные на рис. 3.



Рис. 2. Видеоизображение ясного неба, полученное 15.06.2016 г. в 17:07 на полигоне ЦКБА г. Тула.

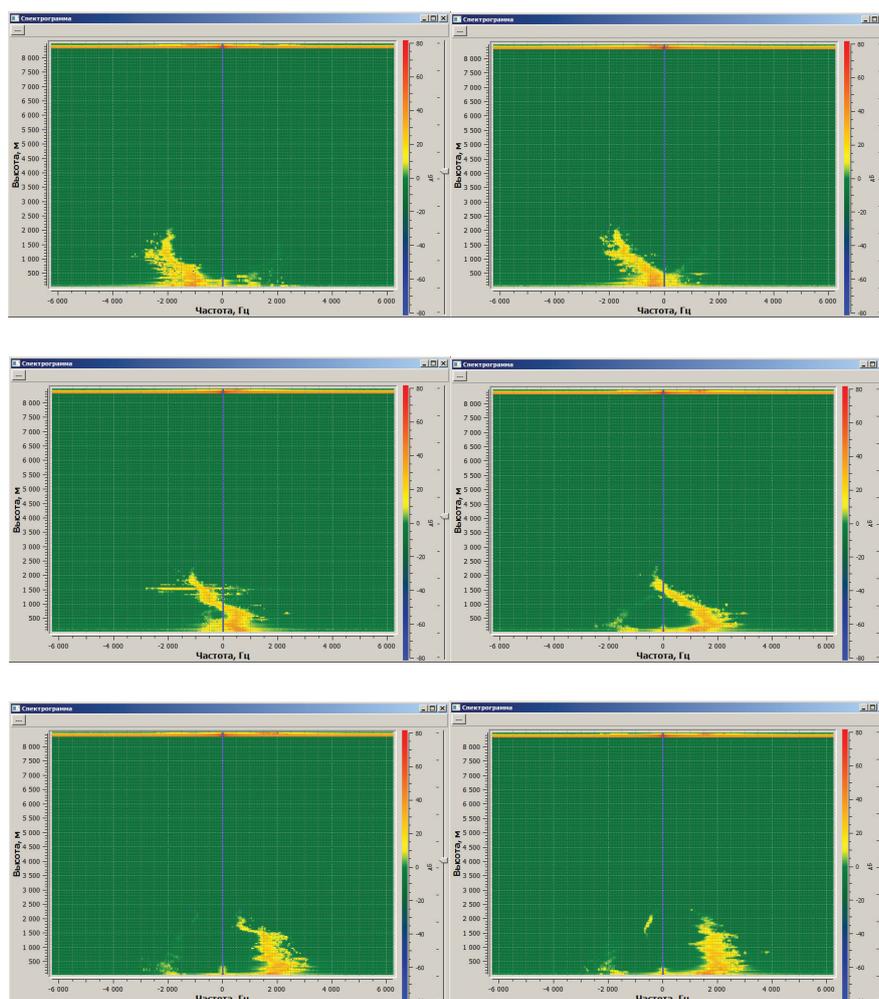


Рис. 3. Спектрограммы сигналов, полученные в различных направлениях зондирования.

Каждая из спектрограмм представляет собой матрицу доплеровских спектров, в которой горизонтальный уровень соответствует высоте, а спектральная плотность отмечена цветом для всего набора высот. Видно изменение положения спектра с изменением направления зондирования. Кроме того, спектрограммы позволяют наглядно показать ширину спектра, ее изменчивость по высоте и по направлению зондирования. Уровень сигнала на каждой из спектрограмм можно регулировать, что позволяет наблюдать как за слабыми, так и за очень мощными сигналами, которые формируются у поверхности Земли.

В результате программной обработки спектров для каждого из направлений зондирования формируется зависимость мощности принимаемого сигнала от высоты зондирования. На рис. 4 приведена типичная зависимость  $P(H)$  для направления 3 (угол поворота по азимуту составляет  $90^\circ$  от начального направления зондирования). При этом полезным считается сигнал, который превышает уровень шумов на 4-5 дБ (ср. шум  $+3\sigma_{\text{ш}}$ ). Данная зависимость может быть представлена в двух формах: первая – соответствует зависимости мощности сигнала, выраженной в дБ, от дальности (рис. 4); вторую – можно представить как зависимость радиолокационной отражаемости принимаемого сигнала от высоты. При этом радиолокационная отражаемость рассчитывается как произведение мощности на квадрат дальности [16].

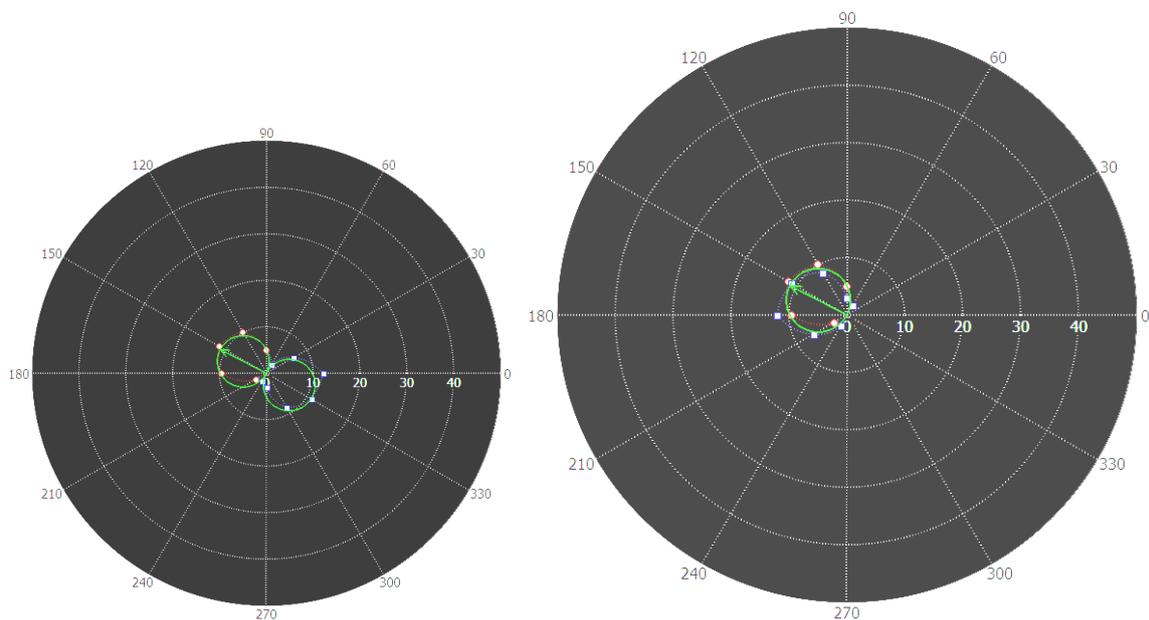


Рис. 4. Зависимость мощности сигнала от высоты зондирования.

Из рис. 4 видно, что превышение над шумами (минимальным уровнем сигнала) на высоте 1000 м составляет около 35 дБ. Ранее показано [4], что потенциал РЛС позволяет на дальности 1000 м регистрировать  $Z_{\text{min}}(H = 1 \text{ км}) = 3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^6/\text{м}^3$  ( $Z_{\text{min}} = -55 \text{ dBZ}$ ). С учетом последнего замечания уровень сигнала от ясного неба на высоте 1 км в рассмотренном случае составил  $Z = -20 \text{ dBZ}$ , т.е.  $Z = 10^{-2} \text{ мм}^6/\text{м}^3$  (напомним, что температура у поверхности Земли составляла  $29^\circ\text{C}$ ).

### Получение метеоданных о ветровом профиле

Восстановление ветрового профиля проводили по методике [16]. Для каждого направления зондирования и каждого значения высоты из соответствующего доплеровского спектра регистрируется положение максимума доплеровского спектра, которое соответствует средней по объему зондирования проекции скорости рассеивателей. Данное значение можно отобразить на угловой диаграмме, которая представляет собой зависимость проекции скорости от направления зондирования. На рис. 5 в полярных координатах представлены значения проекций скорости рассеивателей для различных азимутальных направлений зондирования: слева – отображены модуль скорости, справа – значения проекций скорости с учетом знака. стрелка соответствует восстановленному вектору скорости на данной высоте.



**Рис. 5.** Диаграмма проекций скорости для высоты 984 м при разных направлениях зондирования: слева – модуль проекций, справа – проекции с учетом знака; стрелка соответствует восстановленному вектору скорости на данной высоте.

В предположении горизонтальной однородности ветрового поля проекция скорости ветра на направление зондирования описывается соотношением (1):

$$V_{теор,i} = V_B \cos(\alpha_B - \alpha_i) \cos \beta_3 - V_z \sin \beta_3 \quad (1)$$

где  $V_B$  – модуль скорости ветра;

$\alpha_B$  – направление ветра;

$\alpha_i$  – направление зондирования;

$\beta_3$  – угол места;

$V_z$  – скорость гравитационного падения рассеивателей.

Измеренные значения проекций отличаются от теоретических. Теоретическая кривая – это окружность в полярных координатах, которая опирается на диаметр, соответствующий скорости ветра. Направление этого диаметра отвечает азимуту ветра, а от-

клонение теоретической кривой от идеальной теоретической зависимости описывается с помощью невязки (2):

$$H(V_B, \alpha_B) = \sum_{i=1}^N [V_i - V_B \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_B) \cdot \cos(\beta) + V_r \cdot \sin(\beta)]^2 \cdot Dv_i \quad (2)$$

где  $N$  – число направлений зондирования (при полном обороте  $N = 12$ );

$V_B, \alpha_B$  – искомые параметры ветра, соответствующие минимуму невязки;

$V_r$  – средняя скорость гравитационного падения частиц;

$\alpha_i, V_i$  – азимут зондирования и измеренные при этом значения проекции скорости ветра.

Минимизируя невязку по параметрам  $V_B, \alpha_B, V_r$ , можно для каждой высоты определить скорость ветра, направление ветра и скорость гравитационного падения рассеивателей. На рис. 5 результат минимизации невязки представлен в виде окружности, которая опирается на вектор скорости ветра.

Интересен тот факт, что по отклонению измеренных проекций от идеальной окружности судят об интенсивности турбулентного движения и пульсациях скорости ветра на каждом высотном уровне.

В результате обработки и получения проекции скорости ветра на каждой высоте удастся получить профиль скорости ветра на различных высотах, а также направление ветра для соответствующих значений высот. На рис. 6 представлены профили ветра, полученные 15.06.2016 г.

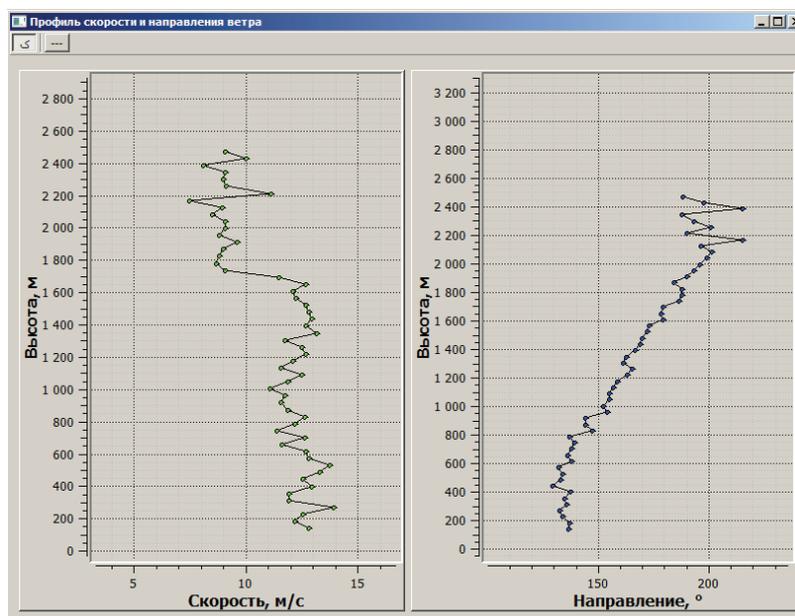
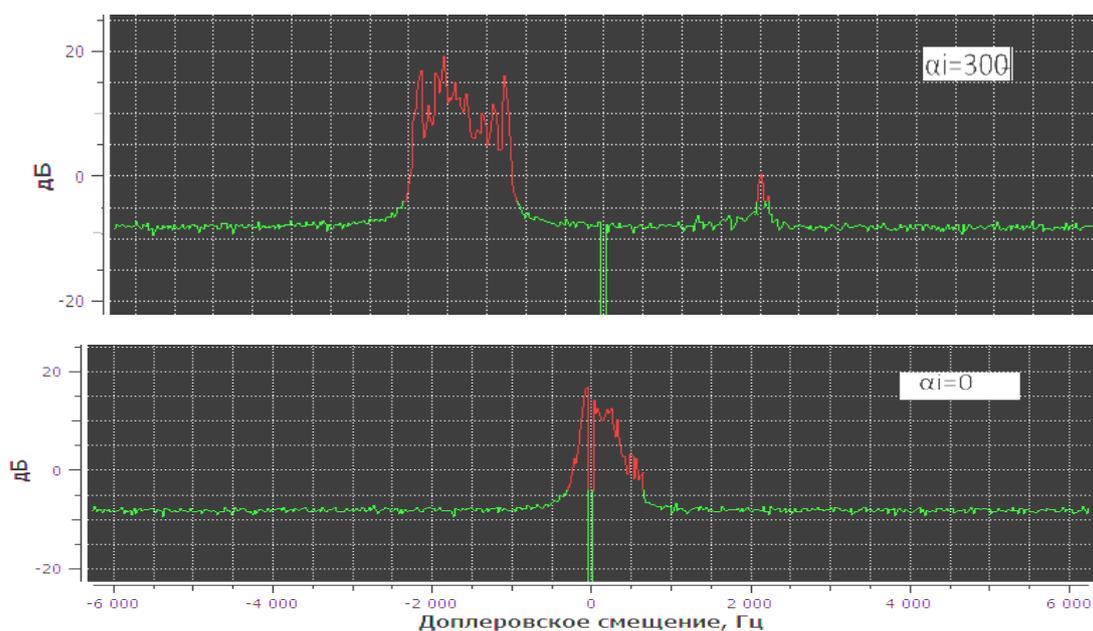


Рис. 6. Восстановленные профили скорости и направления ветра 15.06.2006 г., 17:07 мск.

### Особенность структуры доплеровских спектров в миллиметровом диапазоне длин волн при отражении от ясного неба

Интерес представляют особенности формы доплеровских спектров в миллиметровом диапазоне, которые формируются отражениями от ясного неба. Формы доплеровских

спектров в логарифмическом масштабе по оси спектральной плотности, полученные в г. Тула в июне 2016 г. ( $T_{\text{возд}} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$ ), представлены на рис. 1, а на рис. 7 изображены два аналогичных спектра, полученные в ясном небе на космодроме Байконур 20 июня 2018 г. на высоте 1 км при температуре воздуха  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Форма и мощность получаемых сигналов близки к сигналам на рис. 1. В летних условиях при температуре воздуха у Земли более  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  сигналы от ясного неба формируются до высот свыше 2500 м.



**Рис. 7.** Спектры, полученные на Байконуре 20.06.2018 г. на высоте 1 км, при направлениях зондирования вслед ветру при  $\alpha_i = 3000$  и в поперечном направлении – при  $\alpha_i = 00$ .

При этом радиолокационная отражаемость  $Z$  на высоте 100–1500 м может превышать  $-20 \text{ dBZ}$ . С увеличением высоты отражаемость снижается и на высотах свыше 2500 м становится меньше  $-48 \text{ dBZ}$  и уже не регистрируется радиолокатором. Из формы спектров видно, что они имеют высокую изрезанность и много локальных экстремумов при большой ширине. Это в принципе обуславливается различными факторами: 1) значительной неоднородностью отражателей в пределах объема зондирования; 2) сильными восходящими и нисходящими потоками в пределах объема разрешения. При этом отражатели находятся в различных частях рассеивающего объема, и их скорости за счет вертикальных движений, из-за турбулентности и градиента ветра имеют различные значения проекции на направления зондирования, вследствие чего при сильной неоднородности спектр имеет многопиковую форму. Такая структура спектра усложняет интерпретацию и автоматическое определение проекции скорости на данной высоте и при данном направлении зондирования. Однако процедура восстановления профиля ветра опирается не на один спектр, а на набор из 12 спектров, полученных для данной высоты, и многопиковость спектра и погрешности, связанные с их обработкой, нивелируются при усреднении значения ветра в различных направлениях.

Дополнительно следует обратить внимание на ширину спектров вдоль и поперек направления ветра. Как на рис. 1, так и на рис. 7 ширина спектров вдоль направления ветра

(при больших значениях доплеровского сдвига) явно больше, чем ширина спектра при зондировании поперек ветра (при малых значениях доплеровского сдвига). Это соответствует известным свойствам параметров турбулентных пульсаций. Из разницы в ширине спектров теоретически можно извлечь информацию об интенсивности турбулентности.

В осенних условиях, при низкой температуре воздуха (и низкой абсолютной влажности) интенсивность отражений от ясного неба резко снижается. На рис. 8 представлены доплеровские спектры, полученные вблизи Обнинска 29 октября 2016 г. в отсутствие облаков и осадков ( $T_{\text{возд}} = 2-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Отражения наблюдали на высотах до 200–500 м в разное время суток. Радиолокационная отражаемость не была одинаковой на различных направлениях зондирования и не превышала  $-50\text{ dBZ}$ .

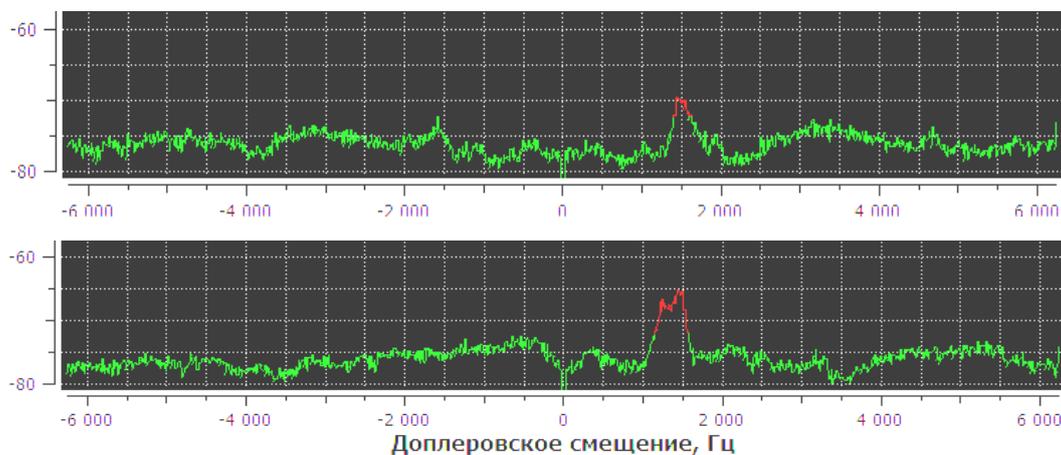


Рис. 8. Доплеровские спектры, полученные в условиях ясного неба в Обнинске 29.10.2016 г., 12:10 мск.

С уменьшением температуры и абсолютной влажности форма доплеровских спектров от ясного неба уже не изрезанная, что, по-видимому, связано с низкой интенсивностью вертикальных потоков и слабой турбулентностью. Отметим, что при температуре воздуха ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  отражения от неоднородностей плотности воздуха являются слабыми и практически не регистрируются. Однако при сильном ветре и/или наличии облачности, и/или осадков возникают радиолокационные отражения, и тогда ветровые измерения становятся возможными.

В заключение подчеркнем, что в летних условиях отражения от безоблачной атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн с помощью созданной РЛС можно зарегистрировать до высот свыше 2500 м. В некоторых случаях отражения от ясного неба достигают высот свыше 4000 м. Форма доплеровских спектров при этом имеет большую ширину и сильную изрезанность, что затрудняет обработку с целью определения профиля ветра. Радиолокационная отражаемость в летний период может превышать  $-20\text{ dBZ}$ , а в весенне-осенний и зимний периоды отражаемость и высота зондирования в условиях ясного неба снижается. При наличии облаков или осадков радиолокатор миллиметрового диапазона позволяет проводить измерения в любом типе облачности во всем слое облаков или осадков. Учитывая, что в средней полосе России облачность наблюдается более чем в 70% условий, работоспособность РЛС миллиметрового диапазона превысит этот уровень. По полученной нами статистике созданный радиолокатор 8-ми миллиметрового

диапазона позволяет получать ветровые данные в 70-80% случаев. Проведенная метеорологическая калибровка по объектам с известными радиофизическими характеристиками показала, что потенциал созданного профайлера позволяет на высоте 1 км регистрировать сигналы с радиолокационной отражаемостью на уровне  $Z_{\min} = -55$  dBZ. Созданные ветровые профайлеры миллиметрового диапазона найдут применение для диагноза и предсказания опасных явлений, поскольку наилучшую работоспособность они имеют в сложных метеорологических условиях: при сильном ветре, тумане, облачности, выпадении осадков и приближении фронтов. Достоинством РЛС миллиметрового диапазона являются малые габариты и вес, высокая устойчивость к наводкам и сетям мобильной связи.

### Литература:

1. Hamazu K., Hashiguchi H., Wakayama T., Matsuda T., Doviak R.J., Fukao S. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2003. V. 20. P. 972–986.
2. Kollias P., Clothiaux E.E., Miller M.A., Albrecht B.A., Stephens G.L., Ackerman T.P. Millimeter-wavelength radars: new frontier in atmospheric cloud and precipitation research // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2007. V. 88. № 10. P. 1608–1624.
3. Lindholm T.A., Frazier E., Barron B., Blackburn G., Kessinger C., Delemarr M., Williams J.K. Demonstrating feasibility of tactical turbulence alerts // In: AMS 17th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. 2015. Paper 13.3.
4. Стерлядкин В.В., Кононов М.А. Расчет потенциала и оценка возможностей ветровой метеорологической РЛС миллиметрового диапазона длин волн // *Научный вестник МГТУ ГА.* 2010. № 158. С. 52–59.
5. Стерлядкин В.В., Кононов М.А., Быковский С.С. Об оценке погрешностей измерений параметров профиля ветра, полученного методом круговых диаграмм и применением ИКР миллиметрового диапазона длин волн // *Научный вестник МГТУ ГА.* 2012. № 176. С. 31–39.
6. Doviak R.J., Zrnić D.S. Doppler radar and weather observations: 2nd ed. Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 2006. 562 p.
7. Gossard E.E., Strauch R.G. Radar observations of clear air and clouds. Elsevier, 1983. 280 p.
8. Kropfli R.A., Kelly R.D. Meteorological research applications of MM-wave radar // *Meteor. Atmos. Phys.* 1996. V. 59. Iss. 1-2. P. 105–121.
9. Новые возможности для метеобеспечения // *Арсенал. Военно-промышленное обозрение.* 2010. Т. 5(23). С. 124–126.
10. Fang M., Doviak R.J., Melnikov V.M. Spectrum widths measured by WSR88D: Error sources and statistics of various weather phenomena // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2004. V. 21. P. 888–904.
11. Fang M., Doviak R.J. Coupled contributions in the Doppler radar SW equation // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2008. V. 25. P. 2245–2258.
12. Melnikov V., Straka J. Axis ratios and flutter angles of cloud ice particles: retrievals from radar data // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2013. V. 30. P. 1691–1703.
13. Lane T.P., Sharman R.D., Trier S.B., Fovell R.G., Williams J.K. Recent advances in the

understanding of near-cloud turbulence // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2012. V. 93. P. 499–515.

14. Al-Momar S., Deierling W., Williams J.K. Examining in-cloud convective turbulence in relation to total lightning and the 3D wind field of severe thunderstorms // In: AMS 17th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. 2015. Paper 5.3.

15. Стерлядкин В.В., Стерлядкин А.В., Горелик А.Г., Коломиец С.Ф. Способ определения вертикального профиля концентрации газов в атмосфере: пат. 2510054 Росс. Федерация. № 2012145617/28. заявл. 26.10.2012; опубл. 20.03.2014. Бюл. № 8.

16. Стерлядкин В.В., Куликовский К.В. Метеорологическая калибровка ветрового профайлера для космодрома Байконур // Сб. Международная научно-техническая конференция «Информатика и технологии. МНТК-ФТИ-2017», 2017. С. 633–636.

### References:

1. Hamazu K., Hashiguchi H., Wakayama T., Matsuda T., Doviak R.J., Fukao S. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2003; 20: 972-986.

2. Kollias P., Clothiaux E.E., Miller M.A., Albrecht B.A., Stephens G.L., Ackerman T.P. Millimeter-wavelength radars: New frontier in atmospheric cloud and precipitation research. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2007; 88(10): 1608-1624.

3. Lindholm T.A., Frazier E., Barron B., Blackburn G., Kessinger C., Delemarr M., Williams J.K. Demonstrating feasibility of tactical turbulence alerts. In: AMS 17th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. 2015. Paper 13.3.

4. Sterlyadkin V.V., Kononov M.A. Calculation of potential and estimation of possibilities of a wind millimeter-wave meteorological radar. *Nauchnyi vestnik MGTU GA (Civil Aviation High Technologies)*. 2010; 158: 52-59. (in Russ.)

5. Sterlyadkin V.V., Kononov M.A., Bykovsky S.S. The accuracy of wind measurements by K-band Doppler meteo radar and VIA observation method. *Nauchnyi vestnik MGTU GA (Civil Aviation High Technologies)*. 2010; 176: 31-39.

6. Doviak R.J., Zrnić D.S. Doppler radar and weather observations: 2nd ed. Mineola, NY: Dover Publications, Inc., 2006. 562 p.

7. Gossard E.E., Strauch R.G. Radar observations of clear air and clouds. Elsevier, 1983. 280 p.

8. Kropfli R.A., Kelly R.D. Meteorological research applications of MM-wave radar. *Meteor. Atmos. Phys.* 1996; 59(1-2): 105-121.

9. New opportunities for meteorological support. *Arsenal. Voyenno-promyshlennoye obozreniye (Arsenal. Military Industrial Review)*. 2010; 5(23): 124-126. (in Russ.)

10. Fang M., Doviak R.J., Melnikov V.M. Spectrum widths measured by WSR88D: Error sources and statistics of various weather phenomena. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2004; 21: 888-904.

11. Fang M., Doviak R.J. Coupled contributions in the Doppler radar SW equation. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2008; 25: 2245-2258.

12. Melnikov V., Straka J. Axis ratios and flutter angles of cloud ice particles: retrievals from radar data. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2013; 30: 1691-1703.

13. Lane T.P., Sharman R.D., Trier S.B., Fovell R.G., Williams J.K. Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2012; 93: 499-515.

14. Al-Momar S., Deierling W., Williams J.K. Examining in-cloud convective turbulence in relation to total lightning and the 3D wind field of severe thunderstorms. In: AMS 17th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. 2015. Paper 5.3.

15. Sterlyadkin V.V., Sterlyadkin A.V., Gorelik A.G., Kolomiets S.F. The method for determining the vertical profile of the concentration of gases in the atmosphere. Patent RU 2510054; filed 10/26/2012; publ. 03/20/2014. (in Russ.)

16. Sterlyadkin V.V., Kulikovskiy K.V. Meteorological calibration of the wind profiler for the Baikonur cosmodrome. Int. Sci. Techn. Conf. «Informatics and Technology. MNTK-FTI-2017», 2017. P. 633-636. (in Russ.)

**Об авторах:**

**Стерлядкин Виктор Вячеславович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Куликовский Константин Владимирович**, аспирант кафедры физики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Калмыков Виктор Михайлович**, начальник отдела АО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» (300034, Россия, г. Тула, ул. Демонстрации, 36).

**Ермилов Дмитрий Викторович**, начальник сектора АО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения» (300034, Россия, г. Тула, ул. Демонстрации, 36).

**About the authors:**

**Viktor V. Sterlyadkin**, D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Chair of Physics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Konstantin V. Kulikovskiy**, Postgraduate Student, the Chair of Physics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Viktor M. Kalmykov**, Head of the Department of the Central Design Bureau of Apparatus Engineering (36, Demonstratsii St., Tula, 300034, Russia).

**Dmirty V. Ermilov**, Head of the Sector of the Central Design Bureau of Apparatus Engineering (36, Demonstratsii St., Tula, 300034, Russia).

**Для цитирования:** Стерлядкин В.В., Куликовский К.В., Калмыков В.М., Ермилов Д.В. Радиолокационные отражения от ясного неба в миллиметровом диапазоне длин волн // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 28–40. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-28-40

**For citation:** Sterlyadkin V.V., Kulikovskiy K.V., Kalmykov V.M., Ermilov D.V. Features of radar reflections from the clear sky in the millimeter wavelength range. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 28-40. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-28-40

**СИНТЕЗ СВЕРТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ  
В СИСТЕМАХ ПРОГРАММНО-ЗАВИСИМОГО РАДИО  
И ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

**И.Е. Тарасов<sup>@</sup>,  
Д.С. Потехин**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия  
<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: Ilya\_e\_tarasov@mail.ru*

В статье рассматривается оригинальный способ математического синтеза и технической реализации аппаратного генератора сверточных функций на основе вейвлет-функции Морле, предусматривающий интенсивное использование аппаратных компонентов высокопроизводительных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) для создания генераторов гармонических и модулирующих гауссовских функций, которые работают в режиме реального времени. Применение модулированных гармонических рядов позволяет регулировать характеристики сверточных функций в частотной и временной областях, при этом подстройку коэффициента затухания модулирующей функции для обеспечения минимизации фазовых искажений предлагается производить с учетом дискретного представления коэффициентов получаемой функции. Аппаратный генератор коэффициентов позволяет использовать ядра свертки высоких порядков, что недостижимо при условии хранения этих коэффициентов в памяти ПЛИС, объем которой ограничен. Проведенный в статье анализ позволил получить набор характеристик ядер свертки при различных показателях пределов интегрирования и связанного с ними коэффициента затухания гауссовского модулирующего окна. При реализации модуля генератора на базе ПЛИС использовано сочетание готовых компонентов, основанных на алгоритме CORDIC, и компонентов оригинальной разработки. Моделирование и реализация генератора выполнена на базе ПЛИС серии Kintex-7. С помощью данного подхода оказалось возможным построение высокоточных устройств, основанных на измерении частоты и фазы периодического сигнала, а также систем программно-зависимого радио, допускающих полностью цифровую обработку сигнала, включая входной радиочастотный сигнал. Архитектура разработанного генератора соответствует тенденциям развития аппаратной платформы ПЛИС и может быть использована в перспективных семействах этих микросхем.

**Ключевые слова:** вейвлет-анализ, цифровой фильтр, программно-зависимое радио, информационно-измерительная система, ПЛИС, система на кристалле.

## REAL-TIME KERNEL FUNCTION SYNTHESIS FOR SOFTWARE-DEFINED RADIO AND PHASE-FREQUENCY MEASURING DIGITAL SYSTEMS

I.E. Tarasov<sup>@</sup>,  
D.S. Potekhin

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia  
<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: Ilya\_e\_tarasov@mail.ru

This article presents a state-of-the-art method of mathematical analysis and implementation of a hardware-accelerated generator of kernel functions based on Morlet wavelet. The method is based on heavy usage of hardware cores of high-performance programmable logic devices (PLD) for generating harmonic and Gaussian modulating functions in real-time mode. The usage of modulated harmonic series allows tuning parameters of kernel functions both in frequency and time domains, while fine tuning of damping factor of Gaussian function is performed on the base of fixed-point representation of wavelet samples. The proposed hardware generator has a feature allowing to create high-order kernel functions, which is impossible with the approach based on storing coefficients in on-chip memory limited in size. An analysis performed in the article allows calculating a set of integration limits and corresponding damping coefficients for Gaussian modulating function. Implementation on the PLD was performed with combination of existing IP-cores based on CORDIC algorithm and original developed components. Modelling and implementation are performed with Kintex-7 series PLD. Using this approach several high-precision systems were designed. These systems are precision measurement devices for frequency and phase measurements. They also may be used for software-defined radio devices, including pure digital implementation of an input radio-frequency signal. Some examples are also reviewed.

**Keywords:** wavelet analysis, digital filter, software-defined radio, information-measurement system, PLD, system-on-chip.

### Введение

В современной микроэлектронике в последнее десятилетие отчетливо проявляется тенденция повышения степени интеграции компонентов на кристалле. Это отражается не только в экстенсивном увеличении количества транзисторов на полупроводниковом кристалле сверхбольшой интегральной схемы (СБИС), но и размещением на одном кристалле разнородных компонентов, образующих интегрированную систему вычислений или обработки данных. Для таких СБИС используется термин «Система на кристалле» (СНК), или *System-on-Chip*. Преимущества подхода СНК по сравнению с решением на дискретных компонентах проявляются в уменьшении стоимости, в повышении продуктивности разработки за счет использования проверенного производителем решения, в повышении пропускной способности накристалльных сетей передачи данных, которые имеют естественное преимущество над межкристалльными интерфейсами. Перспективы разработки СБИС класса СНК широко освещаются в специальной литературе [1–3]. Состоявшийся выход на рынок СНК, объединяющих процессорные ядра и высокоскорост-

ные периферийные устройства, открывает новые возможные сферы применения такой элементной базы.

Целью данной работы является поиск эффективных способов применения элементной базы программируемых логических интегральных схем с архитектурой FPGA или СНК для решения задач цифровой обработки сигналов с интенсивным использованием прямого синтеза ядер свертки. Необходимо также рассмотреть архитектуры вычислительных систем на базе ПЛИС, позволяющих реализовать данный подход на практике, в первую очередь, в сфере измерительной техники и программно-зависимого радио.

Направление программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) для СНК представляет собой привлекательную сферу. Это обусловлено тем, что ПЛИС, как элементная база, в виде матрицы программируемых ячеек обладает невысокой технико-экономической эффективностью при реализации широко распространенных решений, а высокочастотные компоненты, включающие аналоговые цепи, на программируемых ячейках реализовать, как правило, невозможно. Поэтому на протяжении развития элементной базы ПЛИС с архитектурой FPGA в эти микросхемы добавлялись компоненты СНК, такие, как блоки памяти, устройства цифровой обработки сигналов с аппаратной поддержкой операции «умножение с накоплением», аппаратные процессорные ядра, компоненты высокоскоростных последовательных интерфейсов.

В 2017 г. компания Xilinx, ведущий мировой производитель FPGA, объявила о выпуске нового семейства СНК Zynq RFSoc [4], которые впервые в отрасли объединили в составе одной СБИС матрицу программируемых логических ячеек, аппаратные процессорные ядра и компоненты АЦП и ЦАП гигагерцового диапазона. АЦП и ЦАП, создание программно-зависимого радио (ПЗР) с цифровой обработкой не только ПЧ, но и ВЧ (для создания систем связи специального назначения, так как для стандартных систем реализованы заказные микросхемы физического уровня). Размещение высокоскоростных АЦП и ЦАП в составе СБИС с реализацией аппаратного согласованного шинного интерфейса открывает принципиально новые возможности построения систем цифровой обработки сигналов, что связано прежде всего с отказом от внешнего межкристального интерфейса передачи данных от АЦП/ЦАП к устройству обработки, который в данном применении требует пропускной способности в десятки Гбайт/с.

### **1. Реализация цифровой обработки сигнала в ПЛИС на базе свертки с модулированными гармоническими функциями**

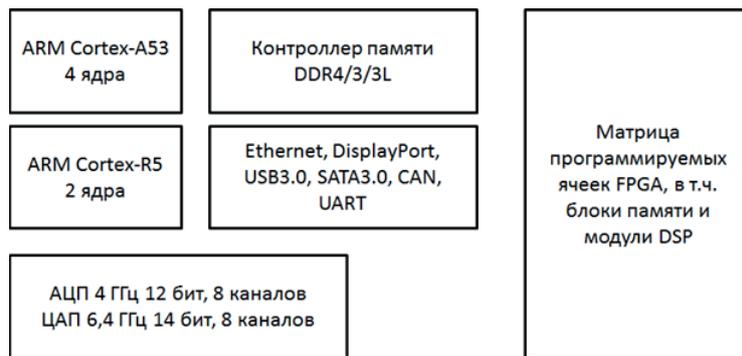
Вышедшее семейство ПЛИС Zynq RFSoc в настоящее время представлено пятью СБИС с различными решениями по видам корпуса для каждого наименования. Основные характеристики:

- логических ячеек: до 930 тыс.;
- блоков «умножение с накоплением»: 4272;
- накристалльной статической памяти: 60.5 Мбит;
- аппаратные компоненты контроллеров PCIe Gen3, 100G Ethernet, 150G Interlaken.

Основной отличительной чертой является размещение в СБИС компонентов высокоскоростных АЦП и ЦАП. АЦП имеют частоту преобразования 4 ГГц при разрядности 12 бит, а ЦАП – частоту 6.4 ГГц при разрядности 14 бит. Если использовать внешние

микросхемы, то подобные сигналы можно вводить в систему обработки только при использовании высокоскоростных последовательных приемопередатчиков, например, с интерфейсом JESD204. Такое требование существенно усложняет системные аспекты проектирования, формируя высокие технические риски получения неработоспособного высокочастотного интерфейса. Поэтому при наличии аппаратного решения АЦП и ЦАП, согласованного с цифровой частью СБИС готовыми интерфейсами от производителя, появляется возможность сосредоточиться на проектировании системы цифровой обработки сигнала.

Состав системы на кристалле Zynq RFSOC приведен на рис. 1.



**Рис. 1.** Состав системы на кристалле Zynq RFSOC.

Высокая производительность ПЛИС ставит задачу поиска методических решений в области сверточных функций. Перспективное направление – модуляция гармонического ряда оконными функциями. Учитывая фундаментальное ограничение в виде соотношения неопределенности:

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{\pi}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – длительность сигнала;

$\Delta f$  – полоса частот,

можно утверждать, что управление соотношением локализации функции в частотно-временной области способно оказать существенное влияние на характеристики системы цифровой обработки сигнала. Данное направление, связанное с конструированием сверточных функций с компактным носителем, носит название вейвлет-анализа и заключается в представлении анализируемых сигналов в виде ряда периодических функций, ограниченных во времени и имеющих различные частотно-временные масштабы. Теоретические основы вейвлет-анализа широко освещены в соответствующих источниках [5–8]. Одна из распространенных вейвлет-функций – вейвлет Морле, который целесообразно рассматривать как гармонический ряд, модулированный функцией Гаусса.

Приводимые в литературе выражения, ставшие типичными для вейвлета Морле

$$\psi(x) = (\cos 5x + j \cdot \sin 5x) \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \quad \text{с соответствующим ему вейвлет-преобразованием}$$

$$W_f(t, a) = \frac{1}{a} \int_{-4\pi}^{+4\pi} \psi\left(\frac{x-t}{a}\right) \cdot f(x) dx, \quad \text{имеют ряд недостатков, существенных при выполнении}$$

высокоточного анализа:

1. Временная локализация в пределах  $\pm 4\pi$  с используемым в исходном представлении коэффициентом затухания модулирующей функции Гаусса приводит к неравенству нулю вещественной составляющей вейвлет-функции.

2. Единственный вариант сочетания пределов временной локализации и коэффициента затухания однозначно приводит к единственной АЧХ функции, что не позволяет регулировать ее поведение в частотно-временной области, оставаясь в рамках исходного определения вейвлета Морле.

В [9] исследовано поведение модифицированного вейвлета Морле при изменении диапазона его локализации с соответствующим изменением коэффициента затухания модулирующей функции Гаусса. Выявлена возможность получения серии функций, отличающихся добротностью в частотной области, которые могут быть эффективно использованы в качестве полосовых фильтров для выявления гармонических составляющих исследуемых сигналов.

Таким образом, для получения требуемой АЧХ функции с соответствующим ее поведением в частотно-временной области необходимо использовать модифицированный вид вейвлет-функции Морле:

$$\psi(\tau) = (\cos 2\pi f_0\tau + j \cdot \sin 2\pi f_0\tau) \cdot e^{-\frac{(2\pi f_0\tau)^2}{k}} \quad (2)$$

и вейвлет-преобразования:

$$W_f(t, a) = \frac{1}{a} \int_{-\tau_{zp}}^{\tau_{zp}} (\cos 2\pi f_0\tau + j \cdot \sin 2\pi f_0\tau) \cdot e^{-\frac{(2\pi f_0\tau)^2}{k}} \cdot X(t - \tau) \cdot d\tau \quad (3)$$

Выражение (3) описывает вейвлет-преобразование функцией Морле, для которой границы интегрирования, выраженные в количестве полупериодов  $x$  анализируемого сигнала:

$$\pm \tau_{zp} = \pm x \cdot T = \pm x \cdot \frac{1}{f}, \quad (4)$$

где  $f$  и  $T$  – частота и период сигнала, соответственно.

При этом в (3) изменен смысл границ интегрирования, классически задаваемых в радианах, и масштаба  $a$ . В модифицированном виде границы интегрирования выражаются в единицах времени, а коэффициент  $a$  имеет смысл масштабного коэффициента. Соответствие классических и модифицированных границ  $\pm 4\pi$  означает, что вейвлет-функция занимает  $\pm 4$  полупериода  $x$ .

На рис. 2 приведены АЧХ различных функций. Для всех кривых количество точек выборки дано на период сигнала.

Добротность вейвлет-функции Морле определяется выражением (5):

$$Q = \frac{\sqrt{k}}{2\sqrt{2 \ln 2}} \quad (5)$$

и, как видно из выражения (3), зависит только от коэффициента затухания.

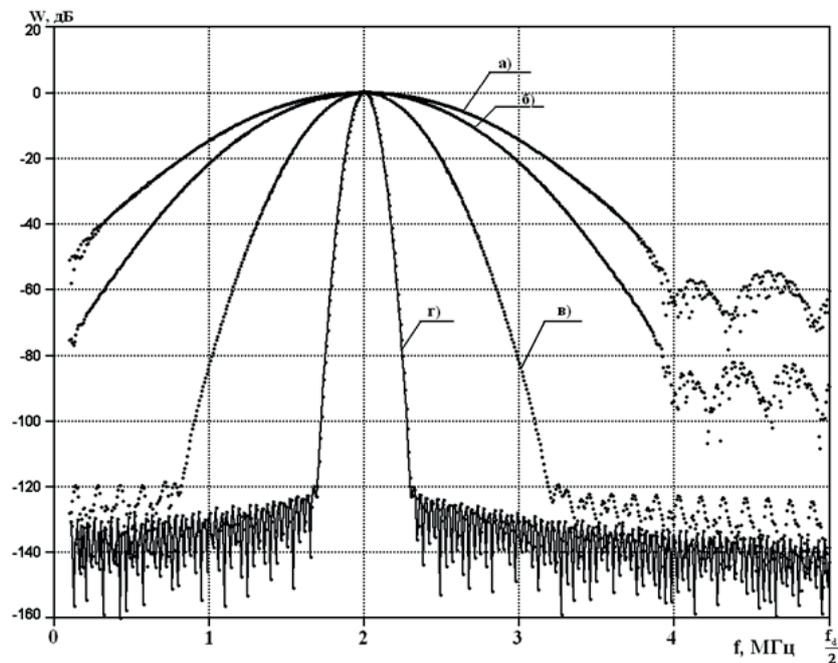


Рис. 2. АЧХ вейвлет-функций Морле с границами интегрирования  $\pm 3.5T$  (а),  $\pm 5.5T$  (б),  $\pm 13.5T$  (в),  $\pm 53.5T$  (г) вейвлет-функция Морле.

Таким образом, использование модифицированного вида вейвлет-функции Морле позволяет получить функцию с заданной добротностью АЧХ, влиянием шума на погрешность определения амплитуды и фазы [8] и с соответствующим ее поведением в частотно-временной области.

Рассмотренный подход был использован при разработке высокоточных измерительных систем – мостов переменного тока Тангенс-МЗ и МЕР-6ИС, где применены вейвлет-функции размером около 90 тыс. отсчетов. Приборы выпускаются в России, имеется свидетельство об утверждении типа измерительного средства № 44621-10 и сертификат, удостоверяющий регистрацию в государственном реестре средств измерения, № 32526-06. Достижимая погрешность – не более  $2 \cdot 10^{-4}$  на частоте 50 Гц, что соответствует требованиям ГОСТ. Однако практика разработки продемонстрировала возможность дальнейшего повышения точности при увеличении размера сверточной функции.

## 2. Аппаратный синтез вейвлета Морле в базисе ПЛИС

Механическое увеличение размера сверточной функции ведет к увеличению размера памяти, требуемой для ее хранения, что при достижении определенного предела может стать неприемлемым с точки зрения выбранной аппаратной платформы и системной архитектуры. Заметим, что оптимальной технической реализацией устройства хранения коэффициентов функции является накристалльная статическая память, которая, кроме высокой пропускной способности, обеспечивает также гарантированно низкую латентность доступа. Применение, например, динамической памяти с интерфейсом DDR3/4 неоправданно усложняет техническую реализацию измерительного устройства из-за странной организации данных и пакетного доступа, что приводит к фрагментированным сеансам чтения.

Задачи спектрального анализа требуют также большого количества функций для различных частот. Поэтому следует рассмотреть альтернативные способы формирования коэффициентов вейвлет-функции. Таким способом является их синтез в реальном времени.

В работе предлагается формирование отсчетов вейвлет-функции на базе IP-ядер вычислителей CORDIC (*Coordinate Rotating Digital Interface Computer*). Алгоритм CORDIC подразумевает вычисление трансцендентных функций путем одновременного выполнения поворота вектора в аккумуляторной (полярной) и алгебраической (декартовой) форме. При этом достигается высокая точность вычислений в сочетании с предсказуемым временем получения результата (один такт на бит плюс возможная конвейеризация). Недостатком алгоритма является ограниченный диапазон аргумента. В частности, при вычислении экспоненты он ограничен величиной  $\pi/4$ . Однако для указанного выше примера, если пределы интегрирования  $\pm 13.5\pi$ , максимальный аргумент экспоненты составляет приблизительно 20.5.

Для вычисления экспоненты с расширенным диапазоном аргумента разработано IP-ядро, в котором выражение  $e^x$  разбивается на две составляющие согласно равенству  $e^{a+b} = e^a e^b$ . Представив аргумент экспоненты в виде двух слагаемых, можно вычислить экспоненту как произведение экспонент, одна из которых находится согласно алгоритму CORDIC, а вторая – выбирается из таблицы. Таблица реализуется в виде блока памяти.

Удобно представить в таблице значения экспонент для аргументов с шагом 0.5. Тогда при представлении аргумента в формате с фиксированной точкой старшая часть, включая один разряд после точки, является индексом элемента таблицы, а младшая часть используется как аргумент для CORDIC. Для пределов интегрирования  $\pm 13.5\pi$  размер таблицы составляет 41, что приемлемо при реализации в ПЛИС.

При таком подходе разрядность вейвлет-функции составляет:

$$R = N + M + L, \quad (6)$$

где  $N$  – разрядность экспоненты в табличном представлении;

$M$  – разрядность экспоненты от дробной части аргумента;

$L$  – разрядность гармонической составляющей вейвлет-функции.

При анализе (6) необходимо учитывать, что для представления экспоненты от аргумента в диапазоне 0–21 необходимо использовать 32 разряда. Поэтому итоговая разрядность отсчетов вейвлет-функции оказывается большой (вплоть до 96 разрядов при использовании 32-разрядного аргумента с соответствующей разрядностью компонентов, вычисляемых по алгоритмам CORDIC).

На рис. 3 показана структурная схема IP-ядра для аппаратного вычисления коэффициентов вейвлет-функции Морле с регулируемой частотой гармонической составляющей и коэффициентом затухания модулирующей функции Гаусса.

Устройство работает следующим образом. Линейный счетчик формирует последовательность отсчетов времени с возможностью регулирования периода гармонической составляющей путем применения в нем фазового аккумулятора с программно регулируемым шагом. Выход счетчика подается на IP-ядро CORDIC, вычисляющее компоненты гармонической функции  $\cos x$  и  $\sin x$ . Возводя номер отсчета времени в квадрат и умножая его на масштабирующий коэффициент  $k$  (программно регулируемый), можно вычислить аргумент функции Гаусса. Этот аргумент разбивается на два компонента –

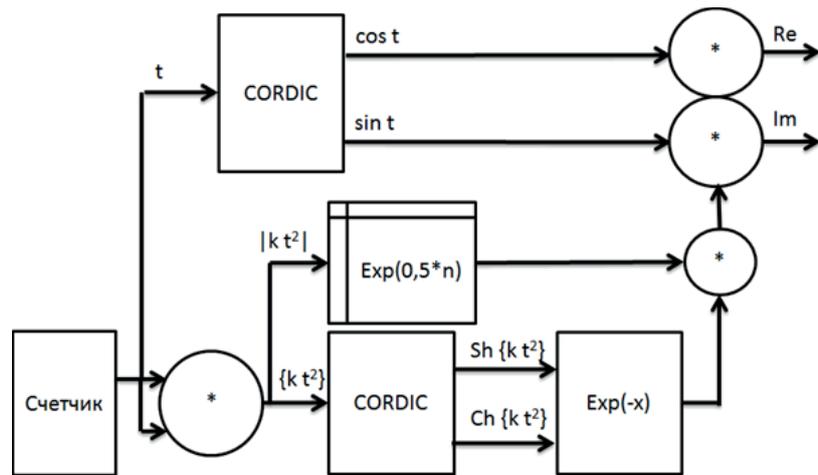


Рис. 3. Структурная схема IP-ядра синтеза вейвлет-функции Морле с вычислением гармонического ряда и модулирующей функции в реальном времени.

полуцелая часть (т. е. количество полуцелых частей аргумента), обозначенная на рис. 3 вертикальными скобками, и дробная часть, обозначенная на рис. 3 фигурными скобками. Вычисление полуцелой и дробной частей фактически не производится, так как данные компоненты располагаются в соответствующих частях разрядной сетки аргумента функции Гаусса, представленной в форме числа с фиксированной двоичной точкой.

Вычисление экспоненты от полуцелой части производится с помощью таблицы экспонент, поскольку количество возможных значений аргумента существенно ограничено, как было показано выше. На практике при использовании ПЛИС данная таблица реализуется в небольшом (несколько десятков) количестве модулей распределенной памяти LUTRAM. Данные аппаратные затраты пренебрежимо малы, так как количество ячеек LUT в современных FPGA исчисляется сотнями тысяч.

Вычисление экспоненты от дробной части осуществляется с помощью IP-ядра CORDIC, настроенного на вычисление гиперболической пары функций  $sh x$  и  $ch x$ . Компоненты вычисленной функции Гаусса перемножаются, причем происходит увеличение разрядности результата.

Полученная модулирующая функция Гаусса умножается на составляющие гармонической функции, при этом результатом являются вещественная и мнимая части вейвлет-функции. Разрядность такой функции завышена относительно практических требований, в частности, для 32-разрядных составляющих равняется 96 бит.

Реализация разработанного IP-ядра на языке описания аппаратуры VHDL с применением IP-ядер CORDIC выполнена в синхронном стиле с глубокой конвейеризацией, что позволяет сохранить высокую тактовую частоту – свыше 250 МГц для 28-нм ПЛИС Xilinx серии 7. Ввиду большой латентности исходных IP-ядер CORDIC (равной разрядности результата плюс 3) итоговая латентность IP-ядра находится в пределах 40–50 тактов, однако конвейеризованная схема обеспечивает постоянный поток данных. Данная схема интенсивно использует аппаратные блоки DSP48, реализующие операцию «умножение с накоплением». Например, типичным значением является 24 таких блока, с учетом требуемых для последующей операции свертки с анализируемым потоком данных с АЦП.

Такое интенсивное использование компонентов DSP48 представляется положитель-

ным свойством. Если рассматривать состав ПЛИС с архитектурой FPGA, в которой основными составляющими являются логические ячейки, накрystalная память и блоки DSP48, видно, что блоки памяти и ячейки имеют широкий спектр применения в цифровых системах, и на их базе могут быть построены и другие модули – например, процессор управления и интерфейсные контроллеры. Привлечение блоков памяти для хранения коэффициентов фильтра автоматически повлечет уменьшение размера памяти программ и данных процессора, буферов данных для периферийных контроллеров и т. п. Это приводит к ухудшению характеристик данных компонентов системы. Возможность вычисления коэффициентов фильтра в реальном времени в пределах СНК открывает широкие возможности синтеза сверточных функций и построения систем цифровой обработки сигналов с высокой пропускной способностью внутренних трактов данных.

### **3. Аппаратный синтез коэффициентов сверточных функций в системах программно-зависимого радио**

Реализация систем программно-зависимого радио (ПЗР) требует решения проблемы разработки методов расчета коэффициентов целочисленного цифрового фильтра с учетом эффектов квантования по уровню. Необходимо также разработать способ подавления зеркального канала с использованием фазовращательных звеньев, построенных на базе ортогональных КИХ-фильтров и обеспечивающих фазовый сдвиг в требуемом диапазоне частот, а также создание базовой платформы для программно-зависимого трансивера на их основе. Указанные задачи могут быть эффективно решены с применением аппаратных модулей синтеза сверточных функций. При условии применения высокоскоростных АЦП гигагерцового диапазона, интегрированных в СБИС СНК, например, как Zynq RFSOC, появляется возможность непосредственно обеспечить прямое преобразование высокочастотного радиосигнала.

На рис. 4 приведена структурная схема программно-зависимого приемника [10], построенного по схеме прямого преобразования входного радиочастотного сигнала. В схеме используется прямое аналого-цифровое преобразование входного аналогового сигнала с получением квадратурных составляющих фильтров с конечной импульсной характеристикой. Полученный сигнал промежуточной частоты подается на сверточный фильтр, построенный на базе описанного в статье подхода. Итоговый информационный сигнал низкой частоты обрабатывается процессором, выполненным на базе программируемых ячеек ПЛИС.

Преимущества сверточных функций сверхвысокого порядка проявляются в задачах прецизионных измерений, как уже было показано на примере цифровых мостов переменного тока. Приведенная на рис. 4 схема использована для приема сигнала эталона частоты-времени RBU, вещающего на частоте 66.(6) кГц [11]. Поскольку источником сигнала является атомный (цезиевый) стандарт частоты, сигнал может быть использован в качестве эталона для проверки характеристик радиоприемника. АЧХ синтезированных сверточных функций для приема ряда стандартов частоты (MSF, RBU, DCF) изображены на рис. 5.

Приемник сигнала RBU использован нами для реализации системы сличения стандартов частоты, где передатчик RBU выступал в качестве эталона для подстройки стандарта частоты-времени СЧВ-74 на основе рубидиевого генератора. Практические исследования показали возможность генерации сверточных функций с точностью, превышающей практические потребности для сличения двух атомных стандартов частоты.

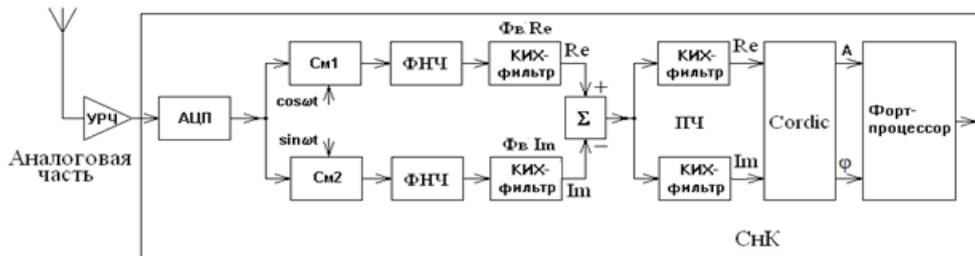


Рис. 4. Структурная схема программно-зависимого радиоприемника [10].

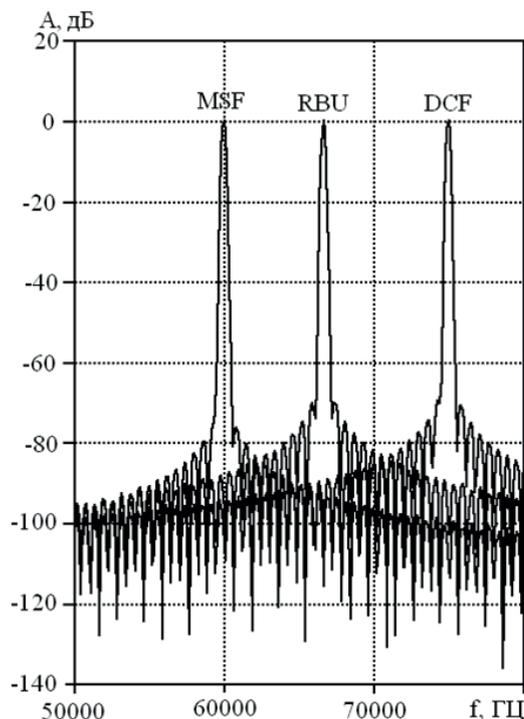


Рис. 5. АЧХ сверточных функций для приема сигналов некоторых стандартов частоты.

#### 4. Широкополосный спектральный анализ с применением аппаратного синтеза сверточных функций

С помощью изложенной методики был создан фильтр, АЧХ которого представлена на рис. 6 (а).

Фильтры имеют одинаковый порядок – 127 и имеют 18-разрядные коэффициенты. Разрядность выбрана с учетом реализации этих фильтров в ПЛИС Xilinx, которые имеют встроенный умножитель  $18 \times 18$ . Как видно из рис. 6, наименьший уровень подавления в полосе заграждения для фильтра из пакета FDATAool равен -50 дБ (б), а для фильтра, синтезированного с помощью вейвлет-функций (а), этот параметр имеет величину -120 дБ. ФЧХ фильтров фактически не отличаются друг от друга и поэтому не приведены.

Анализ современного состояния отрасли (например, [12–15]) свидетельствует о крайне ограниченном интересе, проявляемом исследователями к использованию вейвлет-фильтров высоких порядков, а тем более к аппаратной генерации их коэффициентов в режиме реального времени на базе СНК. Тем не менее представленный подход позволя-

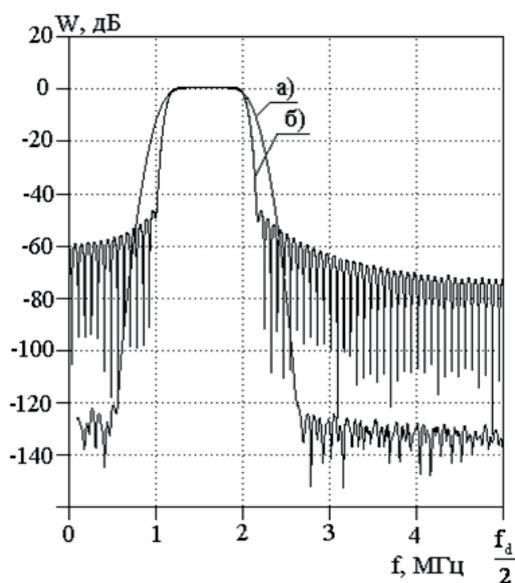


Рис. 6. АЧХ фильтра, синтезированного с помощью вейвлет-функций (а), и фильтра, синтезированного в пакете FDATool MatLab (б).

ет эффективно использовать аппаратные возможности ПЛИС с высокой производительностью вычислений типа «умножение с накоплением».

Техническая реализация широкополосного спектроанализатора выполнена на базе отладочной платы Xilinx KC705 с установленной ПЛИС XC7K325T. Для платы был разработан адаптер двухканального АЦП с интерфейсом FMC, а также аппаратные модули управляющего процессора, аппаратного ускорителя видеоконтроллера с разрешением FullHD и многоканального арбитра доступа к памяти DDR3. Внешний вид системы широкополосного спектрального анализа показан на рис. 7.

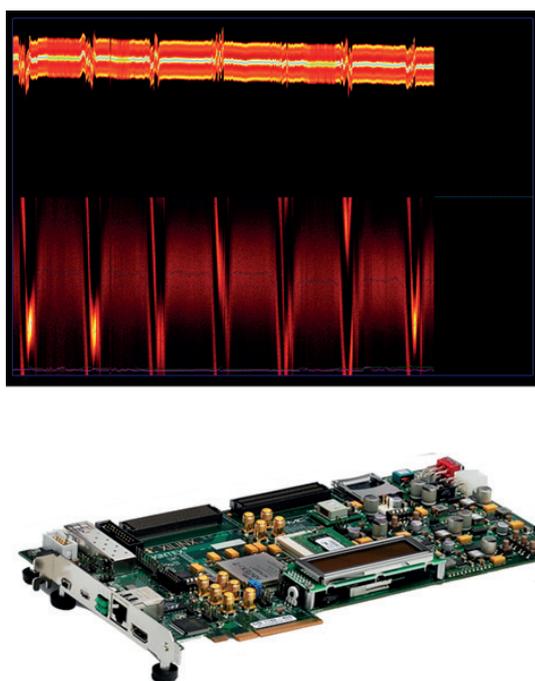


Рис. 7. Широкополосный спектроанализатор на базе отладочной платы KC705.

### Заключение

Разработанный подход, состоящий в аппаратной генерации сверточных функций на базе вейвлета Морле с регулируемыми частотно-временными характеристиками, показал достаточно высокую эффективность в задачах прецизионных фазочастотных измерений и обработки сигнала в программно-зависимом радио. Появление семейства ПЛИС с интегрированными модулями высокоскоростных АЦП и ЦАП открывает перспективы использования данного подхода для построения широкополосных систем обработки сигналов, в том числе с прямым преобразованием сигнала радиочастоты.

Аппаратная реализация предлагаемого подхода к проектированию систем цифровой обработки сигналов на базе генератора гармонических рядов, модулированных гауссовской функцией, исключает необходимость хранения коэффициентов на кристалле ПЛИ или СБИС и позволяет использовать сверточные функции высоких порядков. Практические рекомендации по выбору архитектуры системы позволяют эффективно использовать аппаратные ресурсы современных ПЛИС с архитектурой FPGA или RFSOC для реализации аппаратных генераторов сверточных функций, а также системы управления измерительным устройством на их основе.

### Литература:

1. Rabaey J.M., Chandrakasan A., Nikolic B. Digital Integrated Circuits (2nd Edition): Upper Saddle River, NJ; Prentice Hall, 2003.
2. Hennessy J.L., Patterson D.A. Computer Architecture (6th Edition). A Quantitative Approach. The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design, 2017. 936 p.
3. Harris S., Harris D. Digital Design and Computer Architecture: ARM Edition, 2015. 584 p.
4. Finnerty A., Lee M. Integrated SD-FEC in Zynq UltraScale+ RFSOCs for Higher Throughput and Power Efficiency // Xilinx. White Paper: Zynq UltraScale+ RFSOCs. WP498 (v1.1). May 29, 2018. [https://www.xilinx.com/support/documentation/white\\_papers/wp498-sdfec.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp498-sdfec.pdf)
5. Mallat S.G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation // IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell. 1989. V. 11(7). P. 674–693.
6. Meyer Y. Ondelettes et Operateurs, I: Ondelettes, II: Operateurs de Calderon-Zygmund, III. In: Coifman R. Operateurs multilinearities. Paris: Hermann, 1990. English translation of first volume, Wavelets and Operators, is published by Cambridge University Press, 1993.
7. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
8. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
9. Потехин Д.С., Тарасов И.Е., Тетерин Е.П. Влияние коэффициентов и пределов интегрирования вейвлет-функции Морле на точность результатов анализа гармонических сигналов с нестационарными параметрами // Научное приборостроение. 2002. Т. 12. № 1. С. 90–95.
10. Карпенков А.С., Тетерин Е.П. Использование вейвлет-функции Морле при построении радиоприемников с цифровой обработкой радиосигналов // Информационные технологии моделирования и управления. 2008. № 5(48). С. 593–599.
11. Потехин Д.С., Гришанович Ю.В. Построение цифрового приемника эталонных

частот // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 1. С. 59–63.

12. Harikrishnan B., Raghul R., Shibu R.M., Raveendran Nair K. All programmable SOC based standalone SDR platform for researchers and academia // 2014 First Int. Conf. on Computational Systems and Communications (ICCSC). DOI: 10.1109/COMPSC.2014.7032683

13. Ballesteros D.M., Renza D., Pedraza L.F. Hardware design of the discrete wavelet transform: an Analysis of complexity, accuracy and operating frequency // Ing. Cienc. 2016. V. 12. № 24. P. 129–148.

14. Szadkowski Z., Szadkowskia A. FPGA based wavelet trigger in radio detection of cosmic rays // Braz. J. Phys. 2014. V. 44. P. 805–810.

15. Anoop Suraj A., Francis M., Kavya T.S., Nirmal T.M. Discrete wavelet transform based image fusion and de-noising in FPGA // J. Electr. Syst. Inf. Techn. 2014. V. 1. Iss. 1. P. 72–81.

### References:

1. Rabaey J.M., Chandrakasan A., Nikolic B. Digital Integrated Circuits (2nd Edition): Upper Saddle River, NJ; Prentice Hall, 2003.

2. Hennessy J.L., Patterson D.A. Computer Architecture (6th Edition). A Quantitative Approach. The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design, 2017. 936 p.

3. Harris S., Harris D. Digital Design and Computer Architecture: ARM Edition, 2015. 584 p.

4. Finnerty A., Lee M. Integrated SD-FEC in Zynq UltraScale+ RFSocS for Higher Throughput and Power Efficiency. Xilinx. White Paper: Zynq UltraScale+ RFSocS. WP498 (v1.1). May 29, 2018. [https://www.xilinx.com/support/documentation/white\\_papers/wp498-sdfec.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp498-sdfec.pdf)

5. Mallat S.G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.* 1989; 11(7): 674-693.

6. Meyer Y. Ondelettes et Operateurs, I: Ondelettes, II: Operateurs de Calderon-Zygmund, III. In: Coifman R. Operateurs multilinearities. Paris: Hermann, 1990. English translation of first volume, Wavelets and Operators, is published by Cambridge University Press, 1993.

7. Astafeva N.M. Wavelet-analysis: Basic theory and some application. *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1996; 39: 1085-1108.

8. Diakonov V.P. Wavelets. From theory to practice. Moscow: Solon-R Publ., 2002. 448 p. (in Russ.)

9. Potekhin D.S., Tarasov I.E., Teterin E.P. An impact of coefficients anintegral limits of Morlet wavelet-function on the results precision of non-stationary parameters signals analysis. *Nauchnoe priborostroenie (Scientific Instrument Engineering)*. 2002; 12(1): 90-95. (in Russ.)

10. Karpenkov A.S., Teterin E.P. Usage Morlet wavelet-function in radio receivers with digital signal processing. *Informatsionnyye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya (Information Technologies of Modelling and Control)*. 2008; 5(48): 593-599. (in Russ.)

11. Potekhin D.S., Grishanovich Y.V. Design of digital receiver for etalon radiosignals. *Vestnik Nizegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo (Bulletin of N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod University)*. 2011; (1): 59-63. (in Russ.).

12. Harikrishnan B., Raghul R., Shibu R.M., Raveendran Nair K. All programmable SOC based standalone SDR platform for researchers and academia. 2014 First Int. Conf. on

Computational Systems and Communications (ICCSC). DOI: 10.1109/COMPSC.2014.7032683

13. Ballesteros D.M., Renza D., Pedraza L.F. Hardware design of the discrete wavelet transform: an Analysis of complexity, accuracy and operating frequency. *Ing. Cienc.* 2016; 12(24): 129-148.

14. Szadkowski Z., Szadkowskia A. FPGA based wavelet trigger in radio detection of cosmic rays. *Braz. J. Phys.* 2014; 44: 805-810.

15. Anoop Suraj A., Francis M., Kavya T.S., Nirmal T.M. Discrete wavelet transform based image fusion and de-noising in FPGA. *J. Electr. Syst. Inf. Techn.* 2014; 1(1): 72-81.

**Об авторах:**

**Тарасов Илья Евгеньевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Потехин Дмитрий Станиславович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**About the authors:**

**Ilya E. Tarasov**, D.Sc. (Engineering), Docent, Professor of the Chair of Corporate Information Systems, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Dmitry S. Potekhin**, D.Sc. (Engineering), Docent, Professor of the Chair of Corporate Information Systems, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Для цитирования:** Тарасов И.Е., Потехин Д.С. Синтез сверточных функций в реальном времени в системах программно-зависимого радио и фазо-частотных измерительных устройствах // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 41–54. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-41-54

**For citation:** Tarasov I.E., Potekhin D.S. Real-time kernel function synthesis for software-defined radio and phase-frequency measuring digital systems. *Rossiyskiy tekhnologicheskij zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 41-54. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-41-54

**ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ ИК-РАДИОМЕТРОВ,  
РАБОТАЮЩИХ В ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ  
АТМОСФЕРЫ 8–14 МКМ**

**А.П. Величко**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*

*@Автор для переписки, e-mail: velap57@yandex.ru*

В статье рассмотрена возможность применения в инфракрасной радиометрии дополнительных компенсаторов, «прозрачных» в рабочем спектральном диапазоне 8–14 мкм. Они обладают контролируемыми, с высокой точностью излучающими параметрами, которые позволят более простым способом осуществлять регистрацию радиационных потоков атмосферы под различными зенитными углами без учета аппаратной функции радиометра. Постоянный контроль указанной функции представляет достаточно сложную техническую задачу. В качестве компенсатора предлагается использовать полиэтиленовую пленку толщиной 10 мкм. В зависимости от величины радиационного потока в измерительный канал перед радиометром вводится определенное количество слоев такой пленки с постоянно контролируемыми параметрами, которая будет своеобразным «опорным излучателем». Выполнены расчеты, основанные на законах распространения инфракрасного излучения в земной атмосфере, а также приведены экспериментальные данные, подтверждающие целесообразность применения предлагаемой методики при дистанционном зондировании атмосферы в «окне прозрачности». Разработанная методика позволит расширить динамический диапазон радиометра в области низких (ниже 223 К) температур, что у большинства радиометров составляет порог чувствительности, а температура «чистой» атмосферы в зените бывает значительно ниже.

**Ключевые слова:** атмосфера, окно прозрачности, ИК-радиометр, аэрозоль, водяной пар, длина волны.

**FEATURES OF CALIBRATION OF INFRARED RADIOMETERS  
WORKING IN WINDOW OF TRANSPARENCY  
OF THE ATMOSPHERE 8–14 MICRONS**

**A.P. Velichko**

*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

*@Corresponding author e-mail: velap57@yandex.ru*

This article considers the possibility of using additional infrared radiometry compensators "transparent" in the operating spectral range of 8–14  $\mu\text{m}$  and having radiating parameters controlled with high accuracy. This will allow a simpler way to register the radiation fluxes of the atmosphere at different zenithal angles without taking into account the hardware function of the radiometer. The constant monitoring of this function is quite a difficult technical task. It is proposed to use a polyethylene film with a thickness of 10  $\mu\text{m}$  as a compensator. Depending on the value of the radiation flow, a certain number of layers of such a film with constantly controlled parameters, which will be a kind of a "reference radiator", are introduced into the measuring channel in front of the radiometer. The article presents theoretical calculations based on the laws of infrared radiation propagation in the Earth's atmosphere, as well as experimental data confirming the expediency of this technique in remote sensing of the atmosphere in the "transparency window". This technique extends the dynamic range of the radiometer in the low temperature range (below 223 K), which is the sensitivity threshold of most radiometers. The temperature of the "clean" atmosphere at the zenith is much lower.

**Keywords:** atmosphere, transparency window, IR radiometer, aerosol, water vapor, wavelength.

На кафедре «Приборы и информационно-измерительные системы» РТУ МИРЭА разработана аппаратура, обеспечивающая исследования оптических параметров атмосферы одновременно в видимом и ИК-диапазоне длин волн [1]. Особый интерес представляет применение ИК-радиометрии для изучения влияния содержащегося в атмосфере водяного пара и аэрозоля на уровень нисходящего теплового излучения атмосферы в окне прозрачности 8–14 мкм [2, 3].

Обратим внимание на то, что излучение атмосферы даже в окне прозрачности 8–14 мкм по спектральному диапазону распределено неравномерно (рис. 1).

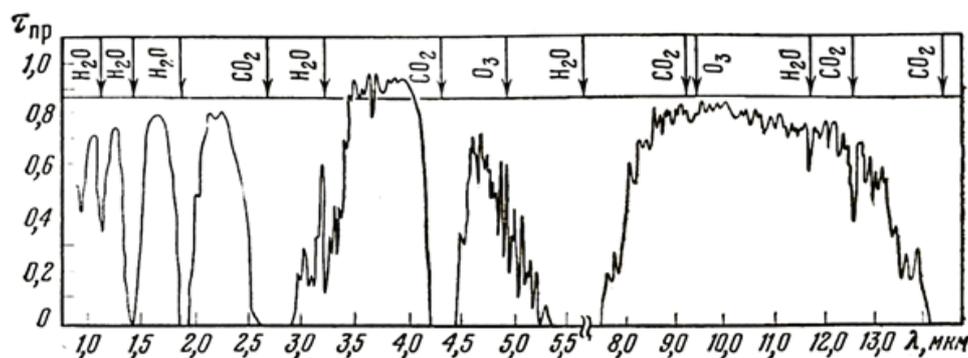


Рис. 1. Пропускание атмосферы в ИК-диапазоне на горизонтальной трассе протяженностью 1.8 км на уровне моря при толщине слоя осажденной воды 17 мм.

Коэффициент  $\varepsilon_a$ , определяющий излучающую способность водяного пара, углекислого газа и аэрозоля, является величиной переменной, зависящей от сезона года, метеоусловий и состояния атмосферы. Для городских условий особенно велико влияние аэрозоля на перенос ИК-излучения в окне прозрачности 8–14 мкм при повышенной влажности воздуха, когда в атмосфере образуется смог, мгла или дымка. Уровень спектральной мощности излучения, обусловленный аэрозолем, зависит не только от количества аэрозоля, содержащегося в атмосфере, но и от его высотного распределения. Влияние же водяного

пара, углекислого газа и озона на различных спектральных участках в полосе 8–14 мкм различно. Так, в области 8–10 мкм в летний, весенний и осенний сезоны водяной пар вносит значительный вклад в принимаемое ИК-радиометром излучение по сравнению с тем, которое фиксируется в области 12–14 мкм [4, 5].

Поэтому при использовании стандартных калибровочных графиков, полученных по заводским или лабораторным «черным» или «серым» телам, возникают сложности для тех случаев, когда ИК-радиометр применяется для исследования излучающих свойств атмосферы и, тем более, когда предпринимаются попытки сопоставить показания радиометра с термодинамическим состоянием атмосферы и содержанием в ней водяного пара и аэрозоля.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы выполнить расчеты, которые позволили бы облегчить интерпретацию радиометрических данных, когда объектом исследования является реальная атмосфера.

Следует отметить, что создать калибровочные тела, при помощи которых можно было бы имитировать излучающие свойства атмосферы, невозможно, вследствие изменчивости коэффициента излучения  $\varepsilon_a(\lambda)$ , а изменение температуры и высотного распределения поглощающих веществ в реальной атмосфере заранее неизвестно [6]. Поэтому приходится искать иные пути, которые позволили бы подойти к решению этой сложной проблемы – перехода от радиационных температур  $r(\lambda)d\lambda$  [К], где  $d\lambda$  – спектральные диапазоны, в которых регистрируются радиационные потоки, к плотности радиационных потоков  $R(\lambda)d\lambda$  [Вт/см<sup>2</sup>].

Первоначально получим некоторые исходные соотношения, которые позволят в дальнейшем произвести расчеты, облегчающие интерпретацию экспериментальных данных по излучению свободной атмосферы [5, 7, 8].

Воспользовавшись формулами, вытекающими из закона Планка, приведем некоторые соотношения и рассчитанные по ним значения потоков, привязанные к длине волны и величинам радиационных температур. Обратим внимание, что значение радиационных потоков безоблачной атмосферы, которые соответствуют радиационным температурам ниже 220 К, характерны для околоразенитной области неба. При этом известные ИК-радиометры способны зарегистрировать температуру не ниже 223 К. Чтобы появилась возможность оценить радиационную температуру в зените, приходится проводить измерения при углах места, меньших 90°, а затем, интерполируя околоразенитные температурные значения, определять температуру в зените. Это влечет за собой значительную погрешность: так, например, при угле места 30° уровень радиационного потока при его малых значениях удваивается.

Получение необходимого уровня теплового излучения атмосферы возможно при установлении взаимосвязи между радиационной  $T_p$  и кинетической температурой  $T_k$ . Решение этой задачи потребовало проведения расчетов, для которых использовали функцию Планка, представленную в обобщенных координатах  $x$ – $y$ , а также таблицы и методики, подробно изложенные в [9, 10].

Лучистость атмосферы определяется выражением:

$$B(\theta) = \int_0^{\infty} p_a(\lambda) \int r(\lambda, T(H)) dF(\lambda, w) d\lambda$$

где  $F(\lambda, w)$  – спектральная функция пропускания в направлении угла визирования  $\beta$ ;

$$w = \frac{1}{\cos \beta} \int_0^H p_i(\beta) \left[ \frac{P(H)}{P(0)} \right]^{N_i} dh \quad - \text{приведенная масса вещества на пути распространения:}$$

$P(H), P(0)$  – давление, соответственно, на высоте  $H$  и на уровне Земли;

$p_i(\beta)$  – пропускание атмосферного слоя толщиной  $dH_i$  при угле визирования  $\beta$ ;

$N_i$  – коэффициент, равный для  $H_2O - 0.3$ ;  $CO_2 - 1$ ;  $O_3 - 0.2$  [9].

Вклад в суммарный радиационный поток различных участков спектра в полосе 8–14 мкм различен. Если обратиться к анализу данных о спектральной прозрачности атмосферы в различных участках спектра 8–14 мкм (рис. 1), то нетрудно заметить, что в диапазоне от 8 до 9 мкм вклад водяного пара в радиационный поток – в зависимости от его содержания в атмосфере – может изменяться практически от нуля (зимой) до 100% (летом, при очень высокой влажности атмосферы). Следовательно, в зависимости от погодных условий и сезона происходит перераспределение вклада различных участков спектра в суммарное нисходящее излучение атмосферы.

Вклад содержащегося в атмосфере углекислого газа более предсказуем: он проявляется в основном в области 13–14 мкм. Значение  $\varepsilon_{\lambda(CO_2)}$  – более консервативно, и его можно учитывать в виде отдельной добавки.

В первом приближении будем считать, что роль обводненного аэрозоля (а возможно, и сухого), а также жидкокапельной облачности в формировании нисходящего излучения сводится к тому, что их вклады пропорциональны содержанию и зависят также от термодинамической температуры, при которой находятся облачность или аэрозоль. Таким образом, ярко выраженной зависимости коэффициента  $\varepsilon$  от длины волны  $\lambda$  нет, а, значит, излучающие (поглощающие) свойства неселективны [11].

Для расчетов радиационных потоков воспользуемся функцией Планка, представленной в обобщенных координатах  $x, y, z$ , где

$$x = \frac{\lambda}{\lambda_m}, \quad y = \frac{r_\lambda}{r_{\lambda_{max}}}, \quad z = \frac{\int_0^x y(x) dx}{\int_0^\infty y(x) dx}.$$

Функция Планка в обобщенных координатах записывается в виде  $y(x)$ :

$$y(x) = 142,3x^{-5} / (\exp(4,96x) - 1).$$

Значение  $\lambda_m$  (для абсолютно черного тела (АЧТ)  $\varepsilon = 1$ ) определяется из закона смещения Вина, где  $T$  – термодинамическая температура объекта в градусах Кельвина:

$$\lambda_m T = 2898 [K \cdot \text{мкм}],$$

максимальные значения спектральной мощности излучения этого тела находятся, как

$$r_{\lambda,m} = 1,286 \cdot 10^{-15} T^5 \left[ \frac{Вт}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}} \right],$$

а суммарный поток (плотность потока) равен  $R_z = \sigma T^4$ ,

где  $\sigma$  – постоянная Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{Вт}{\text{см}^2 \cdot K^4} \right]$ .

Табулированные значения  $y$  и  $z$  для различных значений  $x$  приведены в пособии по основам ИК-техники [5] и в монографии [9].

Расчеты спектральных потоков проводили по методике, изложенной в [9], исходя из допущения, что узкополосный ИК-радиометр работает в диапазоне длин волн, «приводимом к длинам волн» 8, 10, 12 и 14 мкм. Методика [9] использует функцию Планка, представленную в обобщенных координатах  $x-y$  и  $x-y-z$ , где

$$z_a = \frac{\int_0^{\lambda_a} y(x) dx}{\int_0^{\infty} y(x) dx}, \quad z_b = \frac{\int_0^{\lambda_b} y(x) dx}{\int_0^{\infty} y(x) dx}.$$

Обобщенную координату  $\Delta z$  в полосе длин волн  $\lambda_b - \lambda_a$  можно представить в виде следующего соотношения:

$$\Delta z = z_b - z_a,$$

а лучистый поток в полосе  $\lambda_b - \lambda_a$ :

$$R_{\lambda_a - \lambda_b} = \int_0^{\infty} y(x) dx \cdot \Delta z.$$

Учитывая, что мощность излучения, падающая на единицу поверхности  $\sigma T^4$ , получим

$$R_{\lambda_a - \lambda_b} = \sigma T^4 \cdot \Delta z.$$

Значения  $\sigma T^4$  для АЧТ при различных температурах представлены ниже в таблице (см. стр. 62).

Как указывалось выше, при «ясном» небе и «чистой» (почти не загрязненной аэрозолями) атмосфере ее радиационная температура при вертикальном зондировании в полосе 8–14 мкм может быть ниже 220 К. Тогда радиационный поток лежит ниже пороговых значений, которые регистрируются применяемой ИК-радиометрической аппаратурой. Чтобы зарегистрировать столь малые потоки, целесообразно воспользоваться известными методами, описанными в [2]. Согласно одному из них, например, ИК-радиометр устанавливается на платформе, которая позволяет регистрировать излучение атмосферы при различных углах визирования. При этом используется долготный метод Бугера: спектральная мощность излучения  $r_\lambda$  возрастает при малых значениях поглощения в атмосфере пропорционально  $r_{\lambda_{90^\circ}} / \sin \beta$  ( $r_{\lambda_{90^\circ}}$  – излучение атмосферы на длине волны  $\lambda$  при вертикальном зондировании, а  $\beta$  – угол места, при котором проведены измерения). Однако долготный метод Бугера, ввиду определенной и ограниченной степени точности, дает значительные погрешности.

Воспользовавшись измерениями при различных углах  $\beta$ , можно попытаться перейти от радиационных значений температур к радиационным потокам. Этот процесс достаточно сложен, тем более, если неизвестна аппаратная функция ИК-радиометра. Отсюда возникает необходимость поиска иных путей решения данной проблемы.

Один из таких путей состоит в том, чтобы использовать специальные насадки, пропускающие которых  $\tau(\lambda)$  заранее известно и, следовательно, известна их излучающая способность.

Такой насадкой может являться тонкая полиэтиленовая пленка. Ее излучающая способность определяется из соотношения

$$\varepsilon_{\text{пленки}}(\lambda) = 1 - \tau_{\text{пленки}}(\lambda)$$

Пленка добавляет к измеряемому потоку некоторую величину, изменяя тем самым радиационную температуру  $\Delta T = \varepsilon(\lambda)r(\lambda, T)\Delta\lambda$ .

Пропускание полиэтиленовой пленки  $\tau(\lambda)$  в диапазоне длин волн 1–15 мкм представлено на рис. 2.

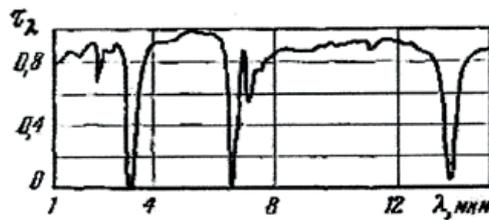


Рис. 2. Спектральный коэффициент пропускания полиэтилена толщиной 0,1 мм.

Величина  $r(\lambda, T)$  для известной температуры пленки  $T$ , которая равна температуре окружающей ее среды, рассчитывается по формуле Планка.

Основное соотношение, из которого определяется спектральная мощность  $R_\lambda$  в полосе  $\Delta\lambda$  на длине волны  $\lambda$ , соответствующей максимальному значению  $r_\lambda$  ( $r_{\lambda\max}$ ), можно записать в виде:

$$R_{\lambda\max} = r_{\lambda\max}\Delta\lambda = 1,28(T^5) \cdot 10^{-15} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{мкм}} \cdot \Delta\lambda = 1,28(T^5) \cdot 10^{-11} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}} \cdot \Delta\lambda,$$

где  $\Delta\lambda$  выражается в мкм.

Выражение для  $R_\lambda$  при любой другой длине волны может быть записано в виде следующего соотношения:

$$R_\lambda = r_\lambda\Delta\lambda = \varepsilon_\lambda 1,28(T^5) \cdot 10^{-11} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}} \cdot y \cdot \Delta\lambda,$$

где  $\varepsilon_\lambda$  — излучающая способность объекта исследования;

$y = \frac{r_\lambda}{r_{\lambda\max}}$  — безразмерная величина, отношение излучающей способности АЧТ на длине волны  $\lambda$  к излучающей способности того же тела на длине волны, на которой регистрируется максимальное значение по излучению.

Выполнены расчеты  $R_\lambda$  для длин волн, в которых предположительно может работать ИК-радиометр, т. е. 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 мкм и температур  $T = 150, 175, 200, 225, 250, 273, 300, 325$  и  $373$  К. Результаты расчетов приведены на рис. 3, 4. Поскольку аппаратная функция используемого в наших работах фильтра в диапазоне длин волн  $\lambda_a - \lambda_b$  неизвестна, то расчет выполнен для полос пропускания фильтров 8–10, 8–12, 8–14, 10–12, 10–14, 12–14 мкм, которые расположены перед приемником ИК-излучения. Считаем, что термоэлектрический приемник неселективен [11].

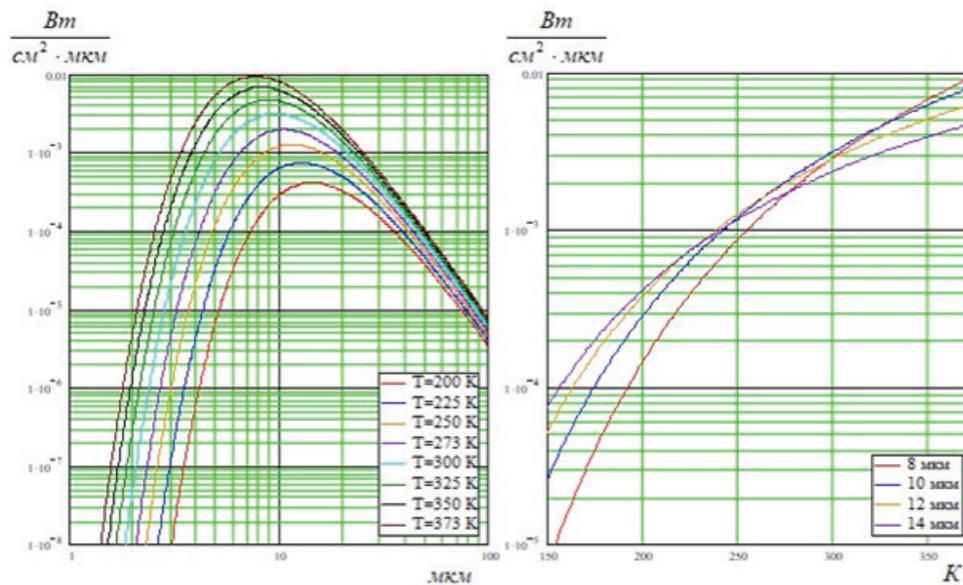


Рис. 3. Кривые Планка.

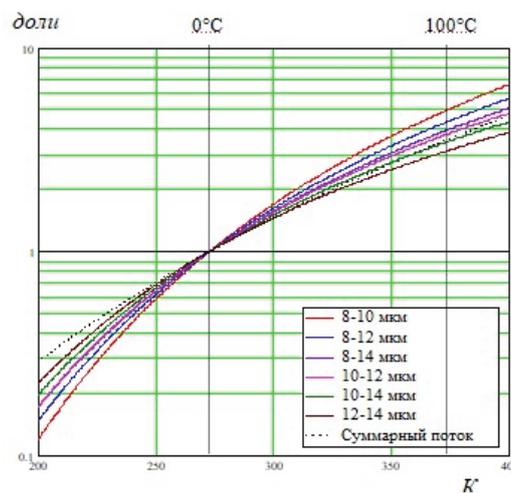


Рис. 4. Относительная спектральная плотность излучения в полосах длин волн в диапазоне 8–14 мкм.

Анализ полученных данных показывает, что разница между плотностью излучения в различных поддиапазонах длин волн может изменяться качественно в зависимости от температуры измеряемого объекта. Так, например, при температуре объекта 200 К в диапазоне длин волн 8–10 мкм плотность излучения ниже, чем в диапазоне 10–12 мкм, которая, в свою очередь, ниже, чем в диапазоне 12–14 мкм. При температуре объекта 300 К наблюдается противоположная картина.

На рис. 5 приведены результаты расчетов спектральной плотности излучения при разных температурах, если ИК-радиометр работает в полосе 8–14 мкм.

Очевидно, что вклад, вносимый пленкой в излучение, поступающее на радиометр, различается на разных длинах волн внутри диапазона 8–14 мкм. Так, спектральная плотность излучения на длине волны 8 мкм при температуре измеряемого объекта 200 К при наличии насадки с пленкой на радиометре в 2.6 раза больше, чем без нее. На длине волны

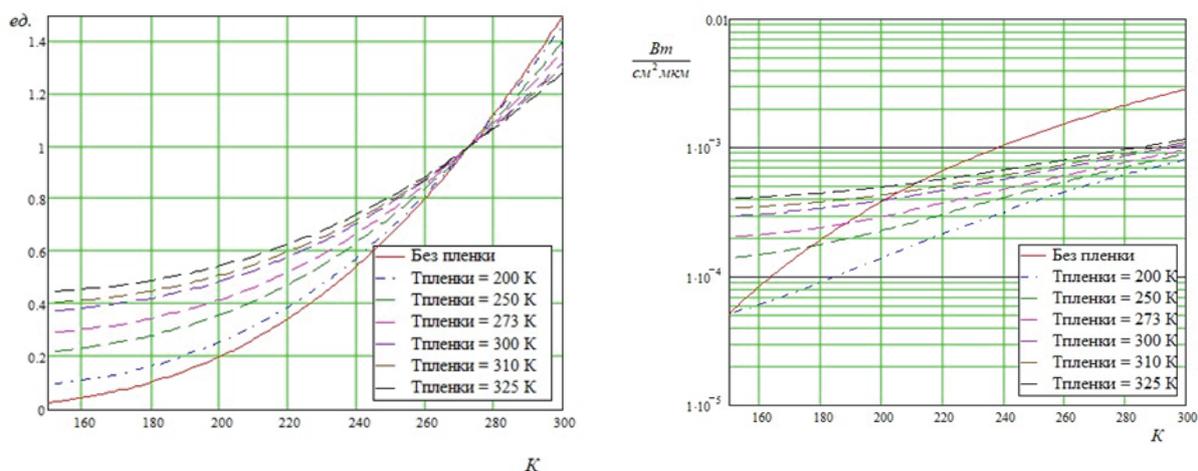


Рис. 5. Спектральная плотность излучения (в относительном и абсолютном представлении) на длине волны 12 мкм при использовании пленки различной температуры.

10 мкм это отношение уже равно 1.3, а на 13 мкм – 1.0. Такая разница обусловлена различными спектральными характеристиками атмосферы и водяного пара внутри указанного диапазона [12].

Проведенный расчет показывает, что применение описанной выше методики будет полезно при температуре пленки 300 К и выше. В этом случае постоянное увеличение излучения может компенсировать ограничение снизу на величину измеряемого радиометром сигнала.

В таблице приведены ожидаемые значения спектральной плотности излучения для различных длин волн 8–14 мкм и термодинамических температур 200–350 К, полученные в предположении, что измеряемый объект излучает как АЧТ.

Результаты расчета величин потоков для различных длин волн и температур

$T, K$	$T, K^4 \cdot 10^8$	$T, K^5 \cdot 10^{10}$	$\lambda_m, \text{ мкм}$	$R_{\lambda_{\max}}, \frac{Вт}{\text{см}^2}$	$\sigma T^4, \frac{Вт}{\text{см}^2}$
200	16	32	14.49	0.000412	0.009
225	25.629	57.665	12.88	0.000742	0.015
250	39.063	97.656	11.592	0.00126	0.022
275	57.191	157.276	10.538	0.00202	0.032
280	61.466	172.104	10.35	0.00221	0.035
290	70.728	205.111	9.993	0.00264	0.04
300	81	243	9.66	0.00313	0.046
310	92.352	286.292	9.348	0.00368	0.052
325	111.566	362.591	8.917	0.00466	0.063
350	150.063	525.219	8.28	0.00675	0.085

Если перед ИК-радиометром установлено дополнительное устройство, которое имеет свой коэффициент излучения  $\epsilon$ , температура которого совпадает с температурой окружающей среды  $T$ , то необходимо величины, приведенные в таблице и на рис. 3–5, умножить

на значение  $\varepsilon$ . Если температура фильтра  $T$  много больше, чем температура излучающего тела (например, радиационная температура измеряемого объекта равна 220 К, а окружающей среды – 290 К), то к потоку, соответствующему 220 К, необходимо добавить поток, который поступает непосредственно от фильтра, т.е.  $\varepsilon$  среды при температуре  $T = 290$  К. При фиксации излучения от высокотемпературного источника  $T_{\text{объекта}} \gg T_{\text{среды}}$  идущий от фильтра поток при  $\varepsilon \ll 1$  практически не скажется на показаниях прибора. Однако при этом уровень излучения, зафиксированного ИК-радиометром, существенно упадет, так как его показания будут соответствовать изменению суммарного потока на величину  $\Delta R$  объекта, где  $\tau(\lambda)$  – пропускание фильтра ( $\tau = 1 - \varepsilon_\lambda$ ).

Уменьшение потока на  $\Delta R$  может восприниматься как изменение радиационной температуры объекта на величину  $\Delta T$ . Таким образом,  $\Delta R$  и  $\Delta T$  – функционально связанные величины. Чтобы устанавливать количественно эти связи, воспользуемся результатами расчетов (см. таблицу). Фильтром может служить тонкая полиэтиленовая пленка, а для высокотемпературных источников – даже тонкий слой бумаги.

При использовании ИК-терморadiометра, работающего в окне прозрачности 8–14 мкм, для определения влагосодержания атмосферы и содержания аэрозоля, внимание обращено на то, что поглощение, а, следовательно, и излучение атмосферы при радиометре, направленном в зенит, в указанном диапазоне невелико, и редко для безоблачной атмосферы ее излучающая способность  $\varepsilon$  превышает 0.5. Поэтому угловую зависимость потока излучения, приходящего из атмосферы на вход ИК-радиометра с малым углом поля зрения, до углов  $20^\circ$  вполне удовлетворительно можно описать при помощи следующего простого соотношения:

$$R = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} R(\lambda, T) \left[ 1 - e^{-\tau_\lambda / \sin \beta} \right] d\lambda$$

где  $\beta$  – угол визирования, отсчитанный от горизонта;

$\tau_\lambda$  – оптическая толщина атмосферы при  $\beta=90^\circ$ .

Из последней формулы следует, что оптическая толщина атмосферы при уменьшении угла визирования до  $30^\circ$  возрастает в два раза. Это соотношение позволяет рассчитать при известной температурной стратификации атмосферы содержание в ней водяного пара и значение  $R$ . Если известно пропускание фильтра (т. е. его избирательная способность) или угол  $\beta$ , то можно добиться совпадения расчетного значения  $R$  с измеренным. Одновременно фиксируется радиационная температура  $T_p$ , что открывает возможность определения  $R$ . Методика расчета  $R$  для атмосферы по данным радиозондирования достаточно подробно изложена в [4].

В дальнейшем представляет интерес получить данные о величине радиационного потока и оптической толщине атмосферы.

### Литература:

1. Величко А.П. Разработка наземных средств дистанционного контроля атмосферы // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 5. С. 116–123.
2. Величко А.П., Пчелкина Н.В., Шишков П.О. Дистанционные исследования основных характеристик облаков различных типов в ИК и видимом диапазонах спектра //

Вестник МГУПИ. Серия: Приборостроение и информационные технологии. 2009. № 21. С. 3–12.

3. Ходунков В.П. Термометрия и инфракрасная радиометрия многофазных и много-объектных систем. СПб.: Политехника, 2013. 258 с.

4. Новокрещенова А.С., Щукин Г.Г. К методике определения содержания водяного пара в атмосфере по совместным ИК и СВЧ радиометрическим измерениям // Труды ГГО (Главной геофизической обсерватории). 1982. Вып. 451. С. 40–49.

5. Михеев С.В. Основы инфракрасной техники. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 127 с.

6. Пономаренко В., Филачев А. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений. 1946–2016. М.: Физматкнига, 2016. 448 с.

7. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: 2-е изд., доп. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 544 с.

8. Волф У., Цисис Г. (ред.) Справочник по инфракрасной технике в 4-х томах. Т. 4. Проектирование инфракрасных систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 472 с.

9. Величко А.П., Гарипов В.К., Слепцов В.В., Шишков П.О. Системы дистанционного контроля параметров окружающей среды (атмосферы) на основе ИК-радиометрии. Концепция проектирования. М.: Машиностроение-1, 2007.

10. Скворцов Л.А. Основы фототермической радиометрии и лазерной термографии. М.: Техносфера, 2017. 218 с.

11. Шрайбер Г. Инфракрасное излучение в электронике: Пер. с франц. М.: ДМК Пресс, 2009. 240 с.

12. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 122 с.

### References:

1. Velichko A.P. Development of ground-based means of remote monitoring of the atmosphere. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta (Aerospace MAI Journal). 2014; 5: 116-123. (in Russ.)

2. Velichko A.P., Pchelkina N.V., Shishkov P.O. Remote researches of main clouds characteristics in IR and visible regions of spectrum. Vestnik MGUPI. Seriya: Priborostroyeniye i informatsionnyye tekhnologii (Bulletin of MGUPI. Series: Instrumentation and Information Technology). 2009; 21: 3-12. (in Russ.)

3. Khodunkov V.P. Thermometry and infrared radiometry of multiphase and multi-object systems. Saint-Petersburg: Politekhnik Publ., 2013. 258 p. (in Russ.)

4. Novokreschenova A.S., Shchukin G.G. To the method for determining the content of water vapor in the atmosphere by combined IR and microwave radiometric measurements. Trudy GGO (Proceed. of the Main Geophysical Observatory). 1982; 451: 40-49. (in Russ.)

5. Mikheev S.V. Fundamentals of infrared technology. Saint-Petersburg: Universitet ITMO Publ. (Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics), 2017. 127 p. (in Russ.)

6. Ponomarenko V., Filachev A. Infrared technology and electronic optics. Formation of scientific directions. 1946–2016. Moscow: Fizmatkniga Publ., 2016. 448 p. (in Russ.)

7. Vavilov V.P. Infrared thermography and thermal control. Moscow: Publishing House

"Spektr", 2013. 544 p. (in Russ.)

8. Volf U., Tsisis G. (ed.) Handbook of infrared technology in 4 volumes. V. 4. Design of infrared systems: transl. from Engl. Moscow: Mir Publ., 1999. 472 p. (in Russ.)

9. Velichko A.P., Garipov V.K., Sleptsov V.V., Shishkov P.O. Remote monitoring systems for environmental parameters (atmosphere) based on IR-radiometry. The concept of design. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ., 2007. (in Russ.)

10. Skvortsov L.A. Fundamentals of photothermal radiometry and laser thermography. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2017. 218 p. (in Russ.)

11. Schreiber G. Infrared radiation in electronics: transl. from French. Moscow: DMK Press Publ., 2009. 240 p. (in Russ.)

12. Korotaev V.V., Melnikov G.S., Mikheev S.V., Samkov V.M., Soldatov J.I. Fundamentals of thermal imaging. Saint-Petersburg: NIU ITMO Publ., 2012. 122 p. (in Russ.)

*Об авторе:*

*Величко Александр Павлович*, кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

*About the author:*

*Alexander P. Velichko*, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Chair "Devices and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

*Для цитирования:* Величко А.П. Особенности калибровки ИК-радиометров, работающих в окне прозрачности атмосферы 8–14 мкм // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 55–65. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-55-65

*For citation:* Velichko A.P. Features of calibration of infrared radiometers working in window of transparency of the atmosphere 8–14 microns. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 55-65. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-55-65

УДК 534.08:534.213

DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-66-73

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ В ЛИНЗОВОМ АКУСТИЧЕСКОМ МИКРОСКОПЕ С ДВУМЕРНОЙ РЕШЕТКОЙ

С.А. Титов<sup>1,@</sup>,  
А.Н. Богаченков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (ИБХФ РАН), Москва 119334, Россия

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: sergetitov@mail.ru

В статье обсуждается применение линзового многоэлементного акустического микроскопа для визуализации и количественной характеристики неоднородностей, размеры которых сравнимы с пространственной разрешающей способностью. В параксиальном приближении найдено, что регистрируемый пространственно-временной сигнал ультразвуковой решетки микроскопа может рассматриваться как оценка функции рассеяния визуализируемых объектов. Теоретически установлено, что функции рассеяния наблюдаемых неоднородностей могут быть использованы для интерпретации особенностей, наблюдаемых в формируемых акустических изображениях. Показано, что конечный размер элементов решетки ограничивает угловую разрешающую способность метода, приводя к сглаживанию результатов измерения функции рассеяния. Экспериментальная апробация предложенного метода выполнена с помощью разработанного прототипа микроскопа с двумерной решеткой квадратных элементов и полистироловой сферической акустической линзой. Подтверждено в эксперименте, что пространственная разрешающая способность прибора соответствует теоретической оценке, получаемой по классическому критерию. Приведены результаты формирования изображений малых плоских отражателей с разными углами наклона, полученные путем электронного сканирования. Показано, что сигнал решетки, являющийся оценкой функции рассеяния, является более информативным для количественной характеристики малых неоднородностей по сравнению с их акустическими изображениями.

**Ключевые слова:** акустическая микроскопия, ультразвуковая решетка, количественная характеристика.

---

---

## VISUALIZATION AND QUANTITATIVE CHARACTERIZATION OF SMALL OBJECTS IN A LENS ACOUSTIC MICROSCOPE WITH A TWO-DIMENSIONAL ARRAY

S.A. Titov<sup>1,@</sup>,  
A.N. Bogachenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences (IBCP RAS), Moscow 119334, Russia*

<sup>2</sup>*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

@Corresponding author e-mail: sergetitov@mail.ru

Application of a lens multi-element acoustic microscope for the visualization and quantitative characterization of small discontinuities with dimensions of the spatial resolution level is considered. On the basis of the paraxial approximation it was found that the recorded spatio-temporal signal of the microscope ultrasonic array can be treated as an estimation of the scattering function of visualized objects. It was theoretically established that the scattering functions of the observed inhomogeneities can be used for the interpretation of the generated acoustic images. It is shown that the finite size of the array elements constrains the angular resolution of the method due to smoothing of the measured scattering function. Experimental testing of the proposed method was carried out using the developed prototype microscope with a two-dimensional array of square elements and a polystyrene spherical acoustic lens. It was experimentally confirmed that the spatial resolution of the device corresponds to a theoretical estimate obtained by a classical criterion. The generated images of small flat reflectors with different angles of inclination obtained by means of electronic scanning are presented. It is shown that the output array data set is more informative for the quantitative characterization of the discontinuities than their acoustical images. In particular, on the basis of the obtained estimation of the scattering function it was possible to estimate the angle of inclination of the reflectors.

**Keywords:** acoustic microscopy, ultrasonic array, quantitative characterization.

В настоящее время разработаны различные методы ультразвуковой визуализации, позволяющие производить отображение пространственного распределения упруго-вязкостных параметров исследуемого объекта [1–3]. Информацию о структурно-механических свойствах, получаемых с помощью данных методов, очень часто оказывается затруднительно или невозможно получить другими способами. Наиболее острые проблемы возникают при характеристике неоднородностей, размеры которых сравнимы с пространственным разрешением используемого устройства ультразвуковой визуализации [4, 5].

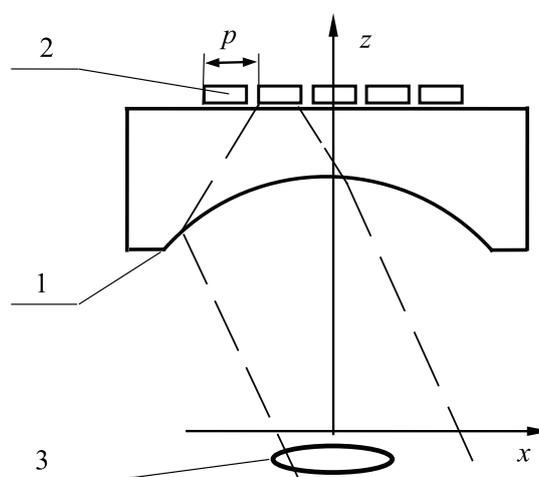
Высокие разрешение и чувствительность имеет линзовый акустический микроскоп с одиночным ультразвуковым преобразователем, построенный по конфокальной схеме [6–8]. Размер обнаруженной малой неоднородности или дефекта можно оценить по амплитуде отраженного сигнала, сравнивая ее с амплитудой отклика от тестового объекта с заданными размерами. Однако многие объекты, размеры которых сравнимы с разрешаю-

щей способностью, нередко дают одинаковые амплитуды отраженного отклика и неразличимы, несмотря на различия в форме и ориентации.

Более подробную характеристику малых объектов позволяют проводить устройства с фазированными решетками. Раздельная регистрация сигналов, которые дают различные пары приемопередающих элементов решетки, делает возможным оценку функции рассеяния объекта, которая показывает зависимости отраженного сигнала от углов распространения падающих и отраженных квазиплоских волн. Целесообразность использования функции рассеяния заключается в том, что изображение объекта представляется по существу суперпозицией всех составляющих функции рассеяния. И в этом случае разные объекты с разными функциями рассеяния могут давать одинаковые изображения и быть неразличимы.

В устройствах с ультразвуковыми решетками функцию рассеяния непосредственно получают путем раздельной регистрации сигналов ее элементов. Однако в силу ряда причин такие устройства являются сравнительно низкочастотными, и в них используются одномерные решетки. Недавно было разработано устройство акустической визуализации, в котором двумерная решетка сопрягалась с акустической линзой [9]. В таком устройстве волны, излучаемые элементами решетки, сводятся линзой в ее околофокальной области, что позволяет использовать высокочастотные решетки с крупными элементами и достигать высокого разрешения при электронном сканировании. Кроме того, волны, излучаемые и принимаемые элементами решетками, являются приблизительно плоскими за счет преломления на поверхности линзы, поэтому выходной сигнал оказывается пропорциональным функции рассеяния. Данная работа посвящена разработке и исследованию метода характеристики объектов в линзовом микроскопе с двумерной решеткой путем измерения их функций рассеяния.

Схема микроскопа представлена на рис. 1. Акустическая линза микроскопа (1) выполнена в виде сферического углубления на одной стороне звукопровода, а на его противоположной стороне располагается двумерная ультразвуковая решетка (2). Пространство между объектом исследования (3) и линзой заполнено иммерсионной жидкостью.



**Рис. 1.** Схема многоэлементного линзового акустического микроскопа:  
1 – акустическая линза; 2 – ультразвуковая решетка; 3 – объект.

Пусть излучающий элемент решетки создает пространственное распределение поля  $u_0(\mathbf{r}_1)$ , где  $\mathbf{r}_1 = (x, y)$ , а  $U_0(\mathbf{k}_1)$ , где  $\mathbf{k}_1 = (k_x, k_y)$ , которое представляет собой двумерное преобразование Фурье этого распределения. Тогда в фокальной плоскости линзы в параксиальном приближении распределение поля может быть представлено в виде [10]:

$$u_f(\mathbf{r}_1) = \frac{1}{iF\lambda} U_0\left(k_0 \frac{\mathbf{r}_1}{F}\right), \quad (1)$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы;

$k_0$  – волновое число в иммерсионной жидкости.

Данная формула является выражением известного свойства линзы выполнять преобразование Фурье. Спектр волны в фокальной плоскости соответственно равен:

$$U_F(\mathbf{k}_1) = i\lambda F u_0\left(-\frac{F}{k_0} \mathbf{k}_1\right), \quad (2)$$

а спектр рассеянной объектом волны представим в виде суперпозиции по спектральным составляющим падающей волны:

$$U_S(\mathbf{k}_2) = \int_{-\infty}^{\infty} U_F(\mathbf{k}_1) S(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) d\mathbf{k}_1, \quad (3)$$

где функция рассеяния  $S(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)$  выражает спектральную плотность рассеянной волны с проекцией волнового вектора  $\mathbf{k}_2$ , которая вызвана падающей плоской волной с проекцией  $\mathbf{k}_1$ .

Пусть положения передающего и приемного элементов задаются в плоскости решетки векторами  $\mathbf{r}_t$  и  $\mathbf{r}_r$ , соответственно. Тогда выходной пространственный сигнал решетки может быть представлен в виде свертки функции рассеяния объекта с импульсными откликами элементов решетки на излучение  $h_t(\mathbf{r})$  и прием  $h_r(\mathbf{r})$ :

$$\nu(-\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = \left(\frac{k_0}{F}\right)^2 \iint_{\infty} h_t(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_t) h_r(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_r) S\left(k_0 \frac{\mathbf{r}_1}{F}, k_0 \frac{\mathbf{r}_2}{F}\right) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2, \quad (4)$$

Если считать размеры элементов решетки достаточно малыми по сравнению с характерным пространственным периодом падающей на решетку волны, то справедливо приближенное выражение:

$$\nu(-\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) \approx \left(\frac{k_0}{F}\right)^2 S\left(k_0 \frac{\mathbf{r}_1}{F}, k_0 \frac{\mathbf{r}_2}{F}\right), \quad (5)$$

показывающее, что функция рассеяния объекта пропорциональна измеряемому пространственному сигналу решетки. Учет конечного размера элементов решетки и ширины их пространственного импульсного отклика приводит к погрешности измерения функции рассеяния по сигналам решетки. Такие искажения проявляются в виде сглаживания результата измерения согласно выражению (4). Считая, что ширина импульсного отклика примерно равна периоду решетки  $p$ , угловая разрешающая способность может быть оценена следующим образом:

$$\Delta\theta = \frac{p}{2F}. \quad (6)$$

Для экспериментальной апробации предложенного метода разработан прототип микроскопа с двумерной решеткой квадратных элементов. Период расположения равен  $p = 1.25$  мм с числом элементов вдоль каждой стороны, равным 8. Решетку использовали в импульсном режиме, при этом центральная частота излучаемых и принимаемых сигналов была примерно равна 15 МГц при относительной полосе 60–70%. Материалом акустической линзы служил полистирол, а ее фокусное расстояние и апертурный угол линзы были равны  $F = 29$  мм и  $\theta_m \approx 10^\circ$ , соответственно. Пространственное разрешение экспериментального прототипа микроскопа для центральной рабочей частоты может быть оценено в соответствии с классическим критерием [11]:

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{2 \sin \theta_m} = 0.29 \text{ мм} \quad (7)$$

Формирование изображений в многоэлементном микроскопе проводили путем электронного сканирования точки фокуса в околофокальной области линзы. Для этого сигналы элементов решетки подвергались временным смещениям, которые компенсировали задержки откликов падающих и отраженных волн при распространении до точки фокусировки, и осуществлялось суммирование этих смещенных сигналов по всей апертуре решетки.

В качестве примера на рис. 2, 3 приведены результаты визуализации плоского отражателя, которым служил плоский полированный торец стального стержня. Торец имел диаметр 0.3 мм и был ориентирован перпендикулярно оси стержня. Стержень наклонен по отношению к вертикальной оси на различные углы  $\theta_x$ :  $-4^\circ$ ,  $0^\circ$  и  $4^\circ$ . На рис. 2 результат визуализации приведен в виде двумерного распределения в фокальной плоскости амплитуды синтезируемого отклика  $|s(x, y)|$ . Поскольку размер отражателя примерно равен разрешающей способности прибора (7), получаемые изображения являются практически неразличимыми и оценить по ним угол наклона отражателя не представляется возможным. Рис. 3 показывает результат визуализации в виде зависимостей отклика от пространственной координаты  $x$  и времени  $t$ :  $s(x, t)$ , взятых при постоянной второй координате сканирования  $y = 0$  мм. Отклик в этом формате представлен в виде оттенков серого в соответствии со шкалой, приведенной справа от диаграмм. Обычно такой формат используется для ультразвуковой визуализации в плоскостях, параллельных продольной акустической оси  $z$ . Как видно из сравнения этих изображений, оценить угол наклона отражателя также не представляется возможным.

Приведенный пример показывает, что обработка пространственно-временного сигнала, проводимая для построения изображения, позволяет произвести фокусировку в ту или иную точку. Однако при суммировании исходных сигналов по апертуре решетки теряются их детали, которые могут быть использованы для характеристики свойств объекта. Данное положение подтверждается данными, представленными на рис. 4. Здесь в виде матрицы условно показано расположение элементов ультразвуковой решетки, а амплитуды принятых сигналов отображены цветом в соответствии со шкалами справа от диаграмм. Следует отметить, что подобное распределение записывается для каждого передающего элемента решетки. В данном конкретном

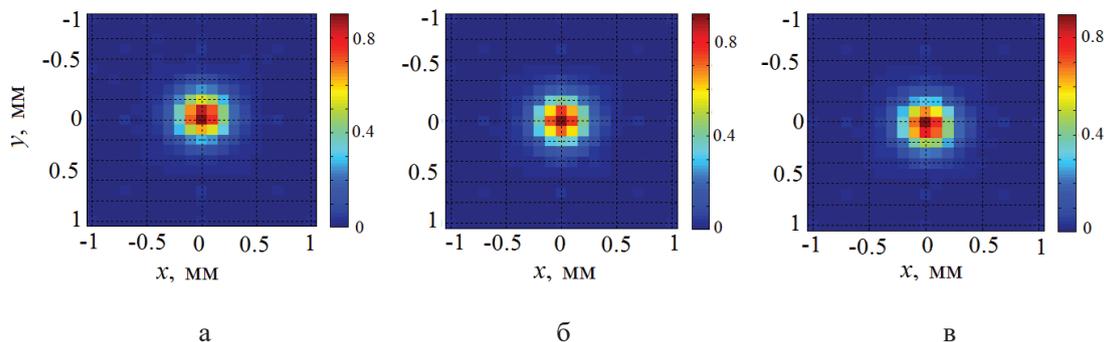


Рис. 2. Изображения плоского отражателя  $|s(x, y)|$  при углах наклона  $\theta_x = -4^\circ$  (а),  $0^\circ$  (б) и  $4^\circ$  (в).

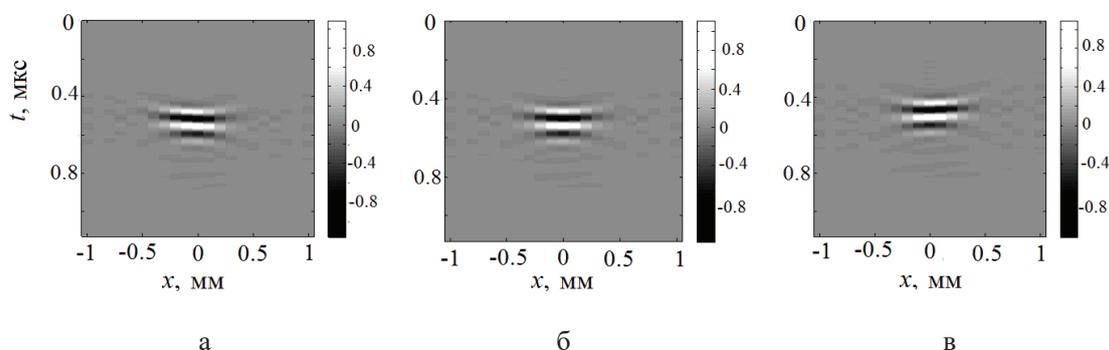


Рис. 3. Отклики  $|s(x, y)|$  при  $y = 0$  мм и углах наклона  $\theta_x = -4^\circ$  (а),  $0^\circ$  (б) и  $4^\circ$  (в).

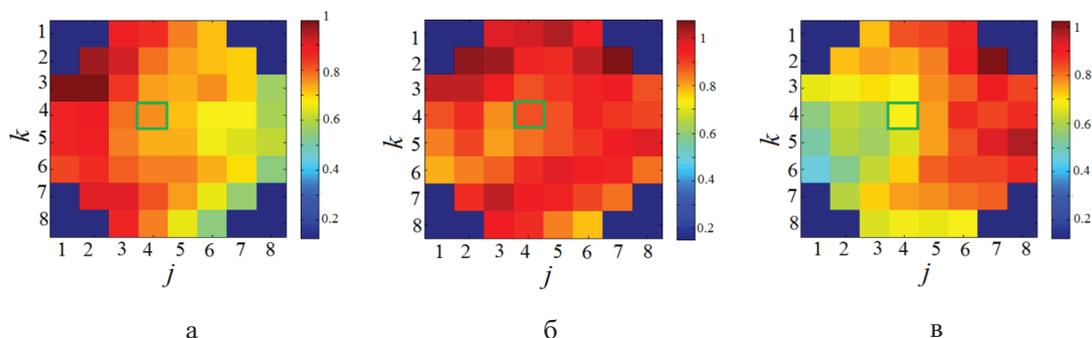


Рис. 4. Амплитуды сигналов элементов решетки при углах наклона отражателя  $\theta_x = -4^\circ$  (а),  $0^\circ$  (б) и  $4^\circ$  (в).

случае в качестве передающего использовался элемент с номерами  $(j, k) = (4, 4)$ , положение которого помечено зеленым квадратом.

Размер рассеивающего объекта сравним с длиной волны ультразвука (0.1 мм), поэтому рассеивание волн происходит в широком угловом диапазоне, и все элементы решетки принимают заметный сигнал. При горизонтальной ориентации отражателя  $\theta_x = 0^\circ$  рассеивание волн носит симметричный характер, функция рассеяния также является симметричной. Поэтому распределение амплитуды сигналов по апертуре решетки, которое может рассматриваться как оценка функции рассеяния, является приблизительно равномерным (рис. 4б). Однако при наклоне отражателя распределение меняется (рис. 4а, в).

Для оценки угла наклона по наблюдаемым распределениям производили усреднение вдоль вертикальной оси (по индексу  $k$ ). Нормированные значения усредненных амплитуд  $A$  показаны на рис. 5 сплошными линиями.

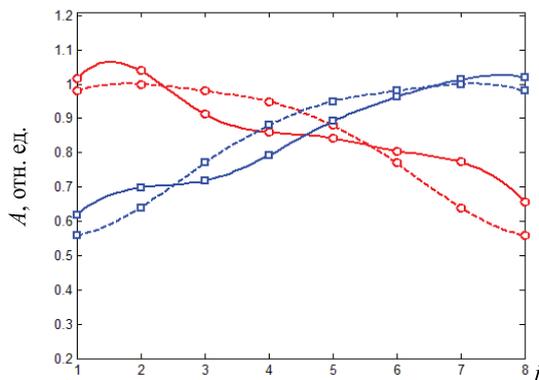


Рис. 5. Нормированные амплитуды  $A$  и диаграммы направленности отражателя (пунктир) при  $\theta_x = -4^\circ$  (—○—) и  $4^\circ$  (—□—).

Для сравнения приведены также рассчитанные диаграммы направленности наклоненного на соответствующие углы отражателя, которые могут в данном случае рассматриваться как теоретические оценки функции рассеяния.

Согласие, наблюдаемое между экспериментальными и расчетными данными, подтверждает справедливость предложенного метода оценки параметров акустических неоднородностей по распределению амплитуд пространственно-временного сигнала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-07-01236.*

#### Литература:

1. Azhari H. Basic of biomedical ultrasound for engineers. Hoboken, New Jersey, USA: John Willey & Sons, 2010. 173 p.
2. Гаврилов Л.Р. Фокусированный ультразвук высокой интенсивности в медицине. М.: Фазис, 2013. 656 с.
3. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
4. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont. 2008. V. 55. № 10. P. 2254–2265.
5. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D., Hunter A.J. Defect detection using ultrasonic arrays: the multimode total focusing method // NDTE Int. 2010. V. 43. № 2. P. 123–133.
6. Maev R. Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: From principles to applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2013. 400 p.
7. Левин В.М., Петронюк Ю.С., Титов С.А. Обработка пространственно-временного сигнала акустического микроскопа для определения скоростей объемных ультразвуковых волн и толщины слоистых объектов // Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5. № 4 (21). С. 86–95.
8. Титов С.А., Маев Р.Г., Богаченков А.Н. Линзовый акустический микроскоп с линейной решеткой в режиме измерения параметров слоистых объектов // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 2. С. 25–30.

9. Титов С.А., Маев Р.Г. Линзовый акустический микроскоп с двумерной ультразвуковой решеткой // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 9. С. 8–15.
10. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. С. 13–83.
11. Кайно Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990. С. 199–232.

### References:

1. Azhari H. Basic of biomedical ultrasound for engineers. Hoboken, New Jersey, USA: John Willey & Sons, 2010. 173 p.
2. Gavrilov L.R. High intensity focused ultrasound in medicine. Moscow: Fazis Publ., 2013. 656 p. (in Russ.).
3. Ermolov I.N., Lange U.V. Ultrasound control. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p. (in Russ.).
4. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont.* 2008; 55(10): 2254-2265.
5. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D., Hunter A.J. Defect detection using ultrasonic arrays: The multimode total focusing method. *NDTE Int.* 2010; 43(2): 123-133.
6. Maev R. Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: From principles to applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 2013. 400 p.
7. Levin V.M., Petronyuk Y.S., Titov S.A. Processing of acoustic microscope spatio-temporal signal for measurement of bulk ultrasonic wave velocities and thickness of a layered sample. *Phizicheskyye osnovy priborostroeniya* (Physical Bases of Instrumentation). 2016; 5(4): 86-95. (in Russ.)
8. Titov S.A., Maev R.G., Bogachenkov A.N. Lens acoustic microscope with a linear array for quantitative characterization of layered objects. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2016; 4(2): 25-30. (in Russ.).
9. Titov S.A., Maev R.G. A lens acoustic microscope with a two-dimensional ultrasonic array. *Technical Physics Letters*. 2016; 42(5): 447-450.
10. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. Second edition. New York: McGraw-Hill. 1996. P. 1-62.
11. Kino G.S. Acoustic waves: Devices, imaging, and analog signal processing. Englewood Cliff, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1987. P. 182-210.

#### Об авторах:

**Титов Сергей Александрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (119334, Россия, Москва, ул. Косыгина, 4).

**Богаченков Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиосистем передачи информации Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

#### About the authors:

**Sergey A. Titov**, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher of Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences (4, Kosygina St., Moscow 119334, Russia).

**Alexey N. Bogachenkov**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Chair of Radio Systems of Information Transfer, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Для цитирования:** Титов С.А., Богаченков А.Н. Визуализация и характеристика малых объектов в линзовом акустическом микроскопе с двумерной решеткой // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 66–73. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-66-73

**For citation:** Titov S.A., Bogachenkov A.N. Visualization and quantitative characterization of small objects in lens acoustic microscope with a two-dimensional array. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 66-73. (in Russ.) DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-66-73

## СВОЙСТВА ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРЕТО

**И.С. Пулькин<sup>@</sup>,  
А.В. Татаринцев**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*

*<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: pulkin@mirea.ru*

В настоящей работе исследуются статистические свойства оценки максимального правдоподобия показателя распределения Парето. Степенные законы распределения, такие, как распределение Парето, в последнее время привлекают пристальное внимание исследователей в самых различных областях науки и техники, от экономики и лингвистики до анализа интернет-трафика. Поэтому задача определения показателя степенного закона по заданной выборке имеет исключительную практическую важность. Аналитически доказано, что предлагаемая оценка является смещенной, хотя и состоятельной, и предложена формула, устраняющая смещение. Аналитически выведена формула для дисперсии несмещенной оценки. Кроме того, поставлена и аналитически решена задача о нахождении функции распределения и плотности вероятности этой оценки как случайной величины. Далее получены те же формулы для математического ожидания и дисперсии, но уже исходя из ранее найденной плотности вероятности. Полученные результаты могут быть использованы в различных областях человеческой деятельности, например, для предсказания интенсивности природных и техногенных катастроф.

**Ключевые слова:** распределение Парето, метод максимального правдоподобия, несмещенная оценка.

## PROPERTIES OF THE MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATES OF THE EXPONENT OF PARETO DISTRIBUTION

**I.S. Pulkin<sup>@</sup>,  
A.V. Tatarintsev**

*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

*<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: pulkin@mirea.ru*

This paper investigates the statistical properties of maximum likelihood estimation index of the Pareto distribution. In recent years, power distribution laws such as Pareto distribution attract the attention of researchers in various fields of science and technology, from economics and linguistics to Internet traffic analysis. Therefore, the problem of determining the exponent of the power law for a given sample is of exceptional practical importance. It is analytically proved that this estimate is biased, although valid. A formula that eliminates the bias is proposed. Besides, a formula for the variance of the unbiased estimate is analytically derived. In addition, the problem of finding the distribution function and probability density of this estimate as a random variable is set and analytically solved. Next, a formula for mathematical expectation and dispersion based on previously determined probability density is found. The obtained results can be used in various fields of human activity, for example, to predict the intensity of natural and man-made disasters.

**Keywords:** Pareto distribution, method of maximum likelihood, unbiased estimation.

В последнее время задачи, связанные с нахождением оценок параметров распределения Парето и его аналогов, привлекают внимание исследователей по всему миру. Таким исследованиям посвящены, в частности, работы [1–6].

Распределение Парето задается плотностью вероятностей

$$\rho(x) = \frac{\alpha}{\theta} \left( \frac{\theta}{x} \right)^{\alpha+1}$$

при  $x > \theta$ . При  $x < \theta$  плотность вероятности равна нулю.

Функция распределения случайной величины  $X$ , распределенной по Парето, описывается формулой

$$F_x(x) = 1 - \left( \frac{\theta}{x} \right)^\alpha, \text{ где } x > \theta.$$

Ее математическое ожидание и дисперсия равны соответственно:

$$MX = \frac{\alpha\theta}{\alpha-1}, DX = \left( \frac{\theta}{\alpha-1} \right)^2 \frac{\alpha}{\alpha-2}.$$

При  $\alpha \leq 2$  дисперсия бесконечна, а при  $\alpha \geq 1$  бесконечно и математическое ожидание.

Это распределение впервые появилось в работах Вильфредо Парето по экономической статистике. Оно описывает распределение доходов в обществе при условии, что все они превышают некоторый базовый уровень  $\theta$ .

Впоследствии были открыты многие новые важные области применения этого распределения:

- лингвистика: частота употребления слов;
- сейсмология: закон Гутенберга-Рихтера;
- распределение размеров файлов в интернет-трафике;
- популярность имен;

- размер паводка;
- природные и техногенные катастрофы.

Важность предсказания интенсивности катастроф – природных и техногенных – переоценить невозможно. Вот, например, что сказано по этому поводу в [7]: «...В ряду ущербов от катастроф изредка встречаются *суперэкстремальные значения*, несоизмеримые по величине со значениями для подавляющей части событий. Ущерб от этих суперэкстремальных событий сравним с *суммарным ущербом* от всех катастроф за тот же период времени».

При планировании необходимо знать, какой интенсивности катастроф следует опасаться, а какие маловероятны. Для этого надо уметь определять параметры распределения Парето по предыдущим наблюдениям. Это приводит к такой математической постановке задачи: получена выборка  $x_1, \dots, x_n$ , подчиняющаяся распределению Парето. Требуется определить или с достаточной точностью оценить параметры  $\alpha$  и  $\theta$ .

Сразу заметим, что, как правило, достаточно определить параметр  $\alpha$ , поскольку параметр  $\theta$  обычно известен заранее: это – минимальный порог, и значения, меньшие  $\theta$ , просто не попадают в выборку. Если мы исследуем, например, землетрясения, то в выборку попадают только те из них, чья интенсивность (энергия, магнитуда) больше определенного порога.

Если мы возьмем другую выборку, с другим порогом, то параметр  $\alpha$  окажется тем же самым. Такой вывод следует из такого свойства распределения Парето: если  $X$  – случайная величина, распределенная по Парето, с параметрами  $\alpha$  и  $\theta$ , то условное распределение  $X$  при условии  $X > x_1$  также подчиняется распределению Парето с параметрами  $\alpha$  и  $x_1$ .

Таким образом, следует сосредоточиться на задаче оценивания по выборке параметра  $\alpha$ , считая, что параметр  $\theta$  известен.

Для оценки параметров распределения по выборке наиболее часто используется метод максимального правдоподобия. В случае распределения Парето он приводит к следующей формуле

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\ln x_1 + \dots + \ln x_n - n \ln \theta},$$

где  $x_1, \dots, x_n$  – выборка,  $n$  – объем выборки.

Ее можно представить в виде

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\ln \frac{x_1}{\theta} + \dots + \ln \frac{x_n}{\theta}},$$

откуда следует, что без ограничения общности можно считать, что  $\theta = 1$ .

В дальнейшем мы будем это подразумевать, не указывая специально.

Настоящая работа посвящена исследованию статистических свойств оценки максимального правдоподобия параметра  $\alpha$ . В [7] обсуждаются различные, в основном эмпирические, подходы к этой оценке, в частности, предпринимается попытка интервального оценивания.

В [8] описан следующий вычислительный эксперимент. Генерировалось 5000 выборок, подчиненных распределению Парето с параметрами  $\alpha = 0.8$  и  $\alpha = 2.5$ . Объемы выборок были равны 10, 20 и 50. Для каждой выборки вычислялась оценка  $\hat{\alpha}$ . Результаты вычислительного эксперимента указывают на то, что оценка  $\hat{\alpha}$  – смещенная, и позволяют предложить эмпирическую формулу для несмещенной оценки:

$$\tilde{\alpha} = \frac{n-1}{n} \hat{\alpha}.$$

Результаты численного эксперимента можно представить в виде таблиц. В них указана как оценка максимального правдоподобия (ОМП)  $\hat{\alpha}$ , так и исправленная в соответствии с предыдущей формулой оценка  $\tilde{\alpha}$ .

Для  $\alpha = 0.8$

Объем выборки	10	20	50
ОМП $\hat{\alpha}$	0.890	0.843	0.813
Исправленная ОМП $\tilde{\alpha}$	0.801	0.801	0.797

Для  $\alpha = 2.5$

Объем выборки	10	20	50
ОМП $\hat{\alpha}$	2.782	2.635	2.550
Исправленная ОМП $\tilde{\alpha}$	2.504	2.503	2.499

Аналитические свойства этой оценки ранее не исследовались, в частности, никакие свойства этой оценки не нашли отражения в подробном и всеобъемлющем справочнике [9]. Настоящая работа восполняет этот пробел.

Среднее значение оценки максимального правдоподобия  $\hat{\alpha}$ , как оказалось, можно вычислить аналитически. Это значение равно

$$\begin{aligned} M\hat{\alpha} &= \int_1^{+\infty} \dots \int_1^{+\infty} \frac{n\rho(x_1) \cdot \dots \cdot \rho(x_n) dx_1 \dots dx_n}{\ln(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)} = \\ &= \int_1^{+\infty} \dots \int_1^{+\infty} \frac{n\alpha^n dx_1 \dots dx_n}{(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)^{\alpha+1} \ln(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)} = n\alpha^n I_n(\alpha). \end{aligned}$$

Вычислим интеграл:

$$I_n(\alpha) = \int_1^{+\infty} \dots \int_1^{+\infty} \frac{dx_1 \cdot \dots \cdot dx_n}{(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)^{1+\alpha} \ln(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)}$$

После замены переменных  $x_1 = e^{t_1}; \dots; x_n = e^{t_n}$  интеграл преобразуется к виду:

$$I_n(\alpha) = \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} e^{-\alpha(t_1 + \dots + t_n)} \cdot \frac{dt_1 \cdot \dots \cdot dt_n}{t_1 + \dots + t_n}.$$

Используя интегральное представление:

$$\frac{1}{A} = \int_0^{+\infty} e^{-As} ds, \quad A > 0,$$

приходим к следующему выражению:

$$I_n(\alpha) = \int_0^{+\infty} dt_1 \dots \int_0^{+\infty} dt_n e^{-\alpha(t_1+\dots+t_n)} \cdot \int_0^{+\infty} e^{-s(t_1+\dots+t_n)} ds = \int_0^{+\infty} ds \int_0^{+\infty} dt_1 \dots \int_0^{+\infty} dt_n e^{-(\alpha+s)(t_1+\dots+t_n)}.$$

Далее вычисляем интегралы по  $t_1, \dots, t_n$  и затем по переменной  $s$ .

Заметим, что этот интеграл сходится при  $n > 1$ :

$$I_n(\alpha) = \int_0^{+\infty} \frac{ds}{(\alpha+s)^n} = \frac{1}{(n-1)\alpha^{n-1}}.$$

Поэтому окончательно получаем

$$M\hat{\alpha} = \frac{n}{n-1}\alpha,$$

несмещенная оценка параметра  $\alpha$  равна

$$\tilde{\alpha} = \frac{n-1}{n}\hat{\alpha},$$

и обе оценки состоятельные.

Для вычисления дисперсии оценки  $\hat{\alpha}$  вычислим среднее значение квадрата этой оценки

$$M(\hat{\alpha}^2) = \int_1^{+\infty} \dots \int_1^{+\infty} \hat{\alpha}^2 \rho(x_1) \dots \rho(x_n) dx_1 \dots dx_n = \int_1^{+\infty} \dots \int_1^{+\infty} \frac{n^2 \alpha^n dx_1 \dots dx_n}{(x_1 \dots x_n)^{\alpha+1} \ln^2(x_1 \dots x_n)} = n^2 \alpha^n D_n(\alpha).$$

Вычисление интеграла

$$D_n(\alpha) = \int_1^{+\infty} \dots \int_1^{+\infty} \frac{dx_1 \dots dx_n}{(x_1 \dots x_n)^{\alpha+1} \ln^2(x_1 \dots x_n)}$$

во многом аналогично первому интегралу. Замена  $x_1 = e^{t_1}; \dots; x_n = e^{t_n}$  преобразует интеграл к виду:

$$D_n(\alpha) = \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} e^{-\alpha(t_1+\dots+t_n)} \cdot \frac{dt_1 \dots dt_n}{(t_1 + \dots + t_n)^2}.$$

Используем интегральное представление дважды:

$$D_n(\alpha) = \int_0^{+\infty} dt_1 \dots \int_0^{+\infty} dt_n e^{-\alpha(t_1+\dots+t_n)} \cdot \int_0^{+\infty} e^{-s(t_1+\dots+t_n)} ds \cdot \int_0^{+\infty} e^{-\sigma(t_1+\dots+t_n)} d\sigma.$$

Меняем порядок интегрирования:

$$D_n(\alpha) = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} ds d\sigma \int_0^{+\infty} dt_1 \dots \int_0^{+\infty} dt_n e^{-(\alpha+s+\sigma)(t_n+\dots+t_1)}.$$

Вычисляем интегралы по  $t_1, \dots, t_n$  и затем по переменным  $s, \sigma$ . Заметим, что этот интеграл сходится при  $n > 2$ :

$$D(\alpha) = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{ds d\sigma}{(\alpha+s+\sigma)^n} = \frac{1}{(n-1)(n-2)\alpha^{n-2}}.$$

Поэтому

$$M(\hat{\alpha}^2) = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)} \alpha^2.$$

Теперь из формулы  $DX = MX^2 - (MX)^2$  следует

$$D\hat{\alpha} = \frac{n^2}{(n-1)^2(n-2)} \alpha^2,$$

а для дисперсии несмещенной оценки

$$D\tilde{\alpha} = \frac{\alpha^2}{n-2}.$$

Для несмещенной оценки  $\tilde{\alpha}$  можно поставить задачу нахождения функции распределения. Пусть  $F(a) = P(\tilde{\alpha} < a)$ . Поскольку

$$\tilde{\alpha} = \frac{n-1}{\ln(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)},$$

то неравенство  $\tilde{\alpha} < a$  приводится к виду

$$\frac{n-1}{\ln(x_1 \cdot \dots \cdot x_n)} < a.$$

Поскольку все  $x_i > 1$ , логарифм положителен, следовательно, получаем неравенство

$$e^{\frac{n-1}{a}} < x_1 \cdot \dots \cdot x_n.$$

Обозначим область, в которой все точки  $x_1, \dots, x_n$  удовлетворяют этому неравенству, через  $\Omega(a)$ .

Тогда

$$P(\tilde{\alpha} < a) = \int_{\Omega(a)} \dots \int \rho(x_1) \dots \rho(x_n) dx_1 \dots dx_n = \int_{\Omega(a)} \dots \int \frac{\alpha^n dx_1 \dots dx_n}{(x_1 \dots x_n)^{\alpha+1}}.$$

Уместно сделать замену  $t_i = \ln x_i$ , тогда

$$P(\tilde{\alpha} < a) = \alpha^n \int_{\tilde{\Omega}(a)} \int \frac{dt_1 \dots dt_n}{e^{\alpha(t_1 + \dots + t_n)}}$$

Здесь  $\tilde{\Omega}(a)$  – та же область, только в переменных  $t_i$ . Она задается неравенствами

$$\frac{n-1}{a} < t_1 + \dots + t_n; t_i > 0, i = 1 \dots n.$$

Поскольку интеграл по всему гипероктанту  $t_i > 0, i = 1 \dots n$  равен единице, задачу можно свести к интегралу по конечной области –  $n$ -мерному симплексу

$$\Delta(z) = \{t_1 + \dots + t_n < z; t_i > 0, i = 1 \dots n\},$$

где  $z = \frac{n-1}{a}$ .

Вычислим интеграл:

$$J_n(z) = \int_{\Delta(z)} \int e^{-\alpha(t_1 + \dots + t_n)} dt_1 \dots dt_n$$

по области  $\Delta(z): t_1 > 0; \dots; t_n > 0; t_1 + \dots + t_n < z$ . После замены переменных  $\alpha t_1 = \tau_1; \dots; \alpha t_n = \tau_n; \alpha z = \zeta$  интеграл преобразуется к виду:

$$J_n(\zeta) = \frac{1}{\alpha^n} \int_{\Delta(\zeta)} \int e^{-(\tau_1 + \dots + \tau_n)} d\tau_1 \dots d\tau_n = \frac{1}{\alpha^n} \int_0^\zeta e^{-\tau_1} d\tau_1 \int_0^{\zeta - \tau_1} e^{-\tau_2} d\tau_2 \dots \int_0^{\zeta - \tau_1 - \dots - \tau_{n-1}} e^{-\tau_n} d\tau_n.$$

Используя начальные значения:

$$J_1(\zeta) = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\zeta});$$

$$J_2(\zeta) = \frac{1}{\alpha^2} (1 - e^{-\zeta} (1 + \zeta));$$

$$J_3(\zeta) = \frac{1}{\alpha^3} (1 - e^{-\zeta} (1 + \zeta + \zeta^2 / 2));$$

получаем гипотезу:

$$J_n(\zeta) = \frac{1}{\alpha^n} \left( 1 - e^{-\zeta} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\zeta^k}{k!} \right).$$

Имеем также рекуррентное равенство:

$$J_{n+1}(\zeta) = \frac{1}{\alpha} \int_0^\zeta J_n(\zeta - \tau_1) \cdot e^{-\tau_1} d\tau_1,$$

с помощью которого правильность гипотезы доказывается по индукции.

Возвращаясь к переменной  $a$ , получим выражение для функции распределения

$$F(a) = P(\tilde{\alpha} < a) = e^{-\zeta} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\zeta^k}{k!},$$

где по-прежнему

$$\zeta = \frac{\alpha(n-1)}{a}.$$

В общем случае, когда  $\theta \neq 1$ , следует написать

$$\zeta = \frac{\alpha\theta(n-1)}{a}.$$

Плотность вероятности находим дифференцированием

$$\rho(a) = \frac{dF(a)}{da} = \frac{dF(a)}{d\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{da} = \left( -e^{-\zeta} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\zeta^k}{k!} + e^{-\zeta} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\zeta^{k-1}}{(k-1)!} \right) \cdot \frac{\alpha(n-1)}{-a^2}.$$

Заменяя во второй сумме индекс суммирования на  $k_1 = k - 1$ , получим, что все слагаемые, кроме одного, сокращаются. Остается:

$$\rho(a) = \frac{dF(a)}{da} = e^{-\zeta} \frac{\zeta^{n-1}}{(n-1)!} \cdot \frac{\alpha(n-1)}{a^2} = \frac{1}{a(n-1)!} \cdot \zeta^n e^{-\zeta},$$

где, как и ранее

$$\zeta = \frac{\alpha\theta(n-1)}{a}.$$

Вычисленные ранее математическое ожидание и дисперсия могут быть получены непосредственно исходя из найденной функции распределения. Математическое ожидание равно

$$M\tilde{\alpha} = \int_0^{+\infty} a \cdot \frac{dF}{da} da = \frac{1}{(n-1)!} \int_0^{+\infty} \zeta^n e^{-\zeta} da.$$

После замены переменной интегрирования  $a = \alpha(n-1) / \zeta$  получим:

$$M\tilde{\alpha} = \frac{\alpha}{(n-2)!} \int_0^{+\infty} \zeta^{n-2} e^{-\zeta} d\zeta = \frac{\alpha}{(n-2)!} \cdot (n-2)! = \alpha.$$

Интеграл легко вычисляется через Гамма-функцию Эйлера. Аналогично вычисляется математическое ожидание квадрата:

$$M(\tilde{\alpha}^2) = \frac{1}{(n-1)!} \int_0^{+\infty} a^2 \zeta^n e^{-\zeta} da = \frac{\alpha^2(n-1)}{(n-2)!} \int_0^{+\infty} \zeta^{n-3} e^{-\zeta} d\zeta = \alpha^2 \frac{(n-1)}{(n-2)!} \cdot (n-3)! = \alpha^2 \frac{n-1}{n-2}.$$

Теперь, применяя известную формулу для дисперсии, получим:

$$D\tilde{\alpha} = M(\tilde{\alpha}^2) - (M\tilde{\alpha})^2 = \alpha^2 \frac{n-1}{n-2} - \alpha^2 = \frac{\alpha^2}{n-2}.$$

Сформулируем полученные результаты в виде теоремы.

**Теорема.** Пусть  $x_1, \dots, x_n$  – выборка, подчиняющаяся распределению Парето с параметрами  $\alpha$  и  $\theta$ . Тогда величина

$$\tilde{\alpha} = \frac{n-1}{\ln x_1 + \dots + \ln x_n - n \ln \theta}$$

является случайной величиной, обладающей следующими свойствами:

1. Ее функция распределения равна при  $a > 0$

$$F(a) = P(\tilde{\alpha} < a) = e^{-\zeta} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\zeta^k}{k!},$$

плотность вероятностей

$$\rho(a) = \frac{1}{a(n-1)!} \cdot \zeta^n e^{-\zeta},$$

где

$$\zeta = \frac{\alpha\theta(n-1)}{a}.$$

2. Ее математическое ожидание и дисперсия равны соответственно

$$M\tilde{\alpha} = \alpha; D\tilde{\alpha} = \frac{\alpha^2}{n-2}.$$

Таким образом, величина  $\tilde{\alpha}$  является несмещенной оценкой параметра  $\alpha$ .

### Литература:

1. Afify A.Z., Yousof H.M., Butt N.S., Hamedani G.G. The transmuted Weibull-Pareto distribution // Pak. J. Statist. 2016. V. 32(3). P. 183–206.
2. Alzaghal A., Ghosh I., Alzaatreh A. On shifted Weibull-Pareto distribution // Int. J. Statistics and Probability. 2016. V. 5. № 4. P. 139–149.
3. Chhetri S.B., Akinsete A.A., Aryal G., Long H. The Kumaraswamy transmuted Pareto distribution // J. Stat. Distrib. Applicat. 2017. V. 4. P. 11–35.
4. Dixit U.J., Nooghabi M.J. Comments on the estimate for Pareto distribution // Stat. Methodology. 2010. V. 7. P. 687–691.
5. Mdziniso N.C., Cooray K. Odd Pareto families of distributions for modelling loss payment data // Scand. Actuar. J. 2018. V. 3. P. 1–22. <http://dx.doi.org/10.1080/03461238.2017.1280527>
6. Nofal Z.M., ElGebaly Y.M. New characterizations of the Pareto distribution // Pak. J. Stat. Oper. Res. 2017. V. 13. № 1. P. 63–74.
7. Владимиров В.А., Воробьев Ю.Л., Малинецкий Г.Г. [и др.] Управление риском. Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://>

www.keldysh.ru/papers/2003/source/book/gmalin/titul.htm

8. Пулькин И.С. Методы оценки параметров распределения Парето // В сб. Математика, физика, информатика и их приложения в науке и образовании. Междунар. школа-конф. молодых ученых: сб. тез. докл. М.: МИРЭА, 12–15 декабря 2016 г. С. 123–124.

9. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 816 с.

### References:

1. Afify A.Z., Yousof H.M., Butt N.S., Hamedani G.G. The transmuted Weibull-Pareto distribution. *Pak. J. Statist.* 2016; 32(3): 183-206.

2. Alzaghal A., Ghosh I., Alzaatreh A. On shifted Weibull-Pareto distribution. *Int. J. Statistics and Probability.* 2016; 5(4): 139-149.

3. Chhetri S.B., Akinsete A.A., Aryal G., Long H. The Kumaraswamy transmuted Pareto distribution. *J. Stat. Distrib. Applicat.* 2017; 4: 11-35.

4. Dixit U.J., Nooghabi M.J. Comments on the estimate for Pareto distribution. *Stat. Methodology.* 2010; 7: 687-691.

5. Mdziniso N.C., Cooray K. Odd Pareto families of distributions for modelling loss payment data. *Scand. Actuar. J.* 2018; 3: 1-22. <http://dx.doi.org/10.1080/03461238.2017.1280527>

6. Nofal Z.M., ElGebaly Y.M. New characterizations of the Pareto distribution. *Pak. J. Stat. Oper. Res.* 2017; 13I(1): 63-74.

7. Vladimirov V.A., Vorobyev Yu.L., Malinetsky G.G. [et al.] Risk management. Risk. Sustainable development. Synergetics. [Electronic resource]. <http://www.keldysh.ru/papers/2003/source/book/gmalin/titul.htm> (in Russ.).

8. Pulkin I.S. Methods for estimating the parameters of the Pareto distribution. Mathematics, Physics, Computer Science and Their Applications in Science and Education. Int. School-Conference of Young Scientists: a collection of abstracts. Moscow: MIREA, December 12–15, 2016. P. 123-124. (in Russ.).

9. Kobzar A.I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2005. 816 p. (in Russ.).

### Об авторах:

**Пулькин Игорь Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Татаринцев Андрей Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики-2 Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

### About the authors:

**Igor S. Pulkin**, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Chair Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Andrey V. Tatarintsev**, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Chair Mathematics - 2, Institute of Physics and Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Для цитирования:** Пулькин И.С., Татаринцев А.В. Свойства оценки максимального правдоподобия показателя распределения Парето // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 74–83. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-74-83

**For citation:** Pulkin I.S., Tatarintsev A.V. Properties of the maximum likelihood estimates of the exponent of pareto distribution. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 74-83. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-74-83.

**ФИЛОСОФСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ  
В РУССКОЙ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ МЫСЛИ**

**О.Г. Арапов,  
Э.А. Арапова,  
О.А. Вольнякова,  
Д.В. Солодухин<sup>@</sup>**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия  
<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: DV-S@yandex.ru*

В статье особый акцент сделан на философском осмыслении выдающимися российскими учеными проблем высшего образования в контексте современной философии образования. Рассмотрены фундаментальные принципы развития высшего образования, которые разработаны и изложены М.В. Ломоносовым, Д.И. Менделеевым, В.И. Вернадским – великими учеными-естествоиспытателями, представляющими российскую науку, начиная с XVIII века, вплоть до нашего времени. Показаны подходы к организации университетского образования в России, а также к пониманию его смысла и содержания как в вопросе подготовки профессиональных кадров, так и в процессе воспитания личности специалиста, формирования культуры гуманистически ориентированного творческого мышления, выработки устойчивой мировоззренческой позиции. Обоснована необходимость синтеза различных сфер и направлений научной мысли, показана важность проблемы оптимального сочетания естественнонаучного, специального и философского, абстрактного знания в системе образования. Отмечено, что успех в преодолении многих современных проблем зависит от степени понимания важности укрепления связи науки с нравственными и духовными основами жизни человека и общества. Актуализируется вопрос о повышении роли гуманитарного знания в процессе формирования ученого-исследователя как социально ответственной личности.

**Ключевые слова:** образование, философия образования, российские ученые, университет, гуманитарное знание, глобальные проблемы.

**PHILOSOPHICAL PROBLEMS OF EDUCATION  
IN THE RUSSIAN NATURAL SCIENTIFIC THOUGHT**

**O.G. Arapov,  
E.A. Arapova,  
O.A. Volnyakova,  
D.V. Solodukhin<sup>@</sup>**

*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia  
<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: DV-S@yandex.ru*

The article is specially devoted to the study of the philosophical understanding of the higher education problem in the context of modern philosophy by Russian scientists. Fundamental principles of higher education development worked out and represented by M. V. Lomonosov, D.I. Mendeleev, V.I. Vernadsky – the greatest naturalists representing Russian science starting from the 18th century up to our times – are considered. Approaches to organizing university education in Russia, to understanding its content and meaning in preparing professional personnel and educating specialist's character, to forming humanistically oriented creative thinking and to forming stable worldview are shown. The necessity of various spheres and directions of scientific thought is substantiated. The importance of optimal combination of natural-science, special, abstract philosophical knowledge in the education system is shown. It is noted that the success in overcoming many contemporary problems depends on the degree of understanding the importance of strengthening the relation between science and moral and spiritual basis of human and society life. The question of enhancing the role of humanitarian knowledge in the process of forming the research scientist as socially responsible personality is shown to be topical.

**Keywords:** education, philosophy of education, Russian scientists, university, humanitarian knowledge, global problems.

Система образования имеет длительную историю, уходит своими корнями в Античность, и на каждом этапе ее развития возникают новые проблемы, требующие глобальных подходов к их решению. Основные проблемы образования с давних пор находились на пересечении интересов многих областей знания, они также всегда являлись предметом изучения философии. С начала XX века формируется новая область философского знания – философия образования, что означает переход проблемы на уровень философского осмысления, философской рефлексии таких проблем образования, как место и смысл образования в культуре, тенденции его развития, формирование идеала образованности.

В настоящее время философия образования – это развивающаяся самостоятельная область научных знаний, предметом которой стали наиболее общие основания образования и его функционирования. Новая область философского знания представляет собой концептуальный фундамент для выявления исходных культурных ценностей, необходимых для образования современного человека, формирования его мировоззренческих установок в процессе построения гражданского общества, социализации и становления личности в современных условиях.

Несмотря на то, что в последнее время в качестве задачи высшего образования декларируется воспитание творчески мыслящего специалиста, на деле превалирует подход, который базируется на передаче знаний студенту и нацелен на формирование профессионала в той или иной области. Со времен Античной Греции для мудрецов и философов было очевидно, что «многознание уму не научает», а для полноценного образования необходимо также овладение совокупностью моральных норм и нравственных правил, а главное – развитие мыслительных способностей человека. Преемственность именно такого подхода отражается в процессе философского осмысления проблем образования в русской научной, философской, педагогической традиции, когда наряду с накоплением знаний происходит формирование свободной, творческой, ответственной личности,

обладающей мировоззренческим кругозором, сочетающей профессиональную компетентность с осознанной нравственностью.

Проблемы образования и понимания, каким оно должно быть, всегда находили место в философских концепциях на протяжении всего периода развития философской мысли. Этими вопросами задавались не только философы, но и выдающиеся русские ученые-естествоиспытатели, поднимающиеся в своих размышлениях до уровня философских обобщений, осмысления таких проблем образования, которые нуждаются как в философской рефлексии, так и в практической реализации задач по формированию образа развитой личности.

Обращаясь к творчеству выдающихся отечественных ученых XVIII–XX веков – М.В. Ломоносова, Д.И. Менделеева, В.И. Вернадского, а также известного российского ученого Н.Н. Моисеева – важно показать, что их подходы способствовали решению проблем российского образования на различных этапах его развития и заложили основу традиции его философского осмысления [1, 2].

Исключительно важный вклад в развитие светского образования в России внес **Михаил Васильевич Ломоносов** (1711–1765). Истоки университетского образования в России связаны с созданием Московского университета (1755 г.), план которого был разработан великим русским ученым. В Московском университете было учреждено три факультета: факультет медицины, факультет философии и факультет права [3; Т. 10, с. 460]. Медицинский факультет, как его мыслил М.В. Ломоносов, был факультетом естествознания, основные кафедры здесь занимали профессора химии, натуральной истории и анатомии. Философский же факультет объединял философию (логику, метафизику и нравоучение), физику, риторику, поэзию, историю и изучение древностей. И только юридический факультет строго отвечал своему названию. В такой нетрадиционной для европейских университетов структуре проявилась мировоззренческая позиция русского ученого [4; с. 4–8]. В средние века понятие «университет» толковалось как корпорация преподавателей и студентов (*universitas magistrorum et scholarium*); в Новое время это понятие наполняется новым смыслом: университет понимается как «соединение наук» (*Universitas litterarum*). Ломоносов выступал за светское, свободное от религиозных догматов образование. Так, в структуру Московского университета не был включен факультет теологии, что явилось, безусловно, новаторским решением того времени.

Структуру Московского университета М.В. Ломоносов проработал до мелочей: принципы управления, число кафедр, профессоров, перечень льгот для них, перечень обязанностей и даже регламент для обучающихся. Первые два года все студенты должны были учиться на философском факультете, на котором они изучали метафизику (умозрительную философию), логику, нравоучение и другие названные выше дисциплины, и лишь затем могли продолжать образование на избранном факультете. По мнению Ломоносова, такой подход позволял, прежде всего, сформировать саму личность будущего ученого. Ломоносову чужда была идея образования как приобретения определенной суммы знаний. Русский ученый отдавал приоритет формированию духовно-нравственных качеств, которыми должен обладать образованный человек. К наиважнейшим из них он относил такие качества, как мудрость, добросовестность, непредубежденность, трудолюбие, скромность. Он считал, что в целом научную деятельность необходимо подчинить

идее бескорыстного служения истине и делу просвещения. Нельзя допускать отношение к науке как к ремеслу, как только к орудию «для заработка средств к жизни» [3; Т. 3, с. 201–232].

Выдающийся русский теоретик и естествоиспытатель, один из основателей российской науки, Ломоносов твердо верил в особую интеллектуальную и социальную миссию научного знания, радуя за утверждение в университетах не только специальных естественных и точных дисциплин, но также и обширного комплекса гуманитарного знания, или наук о духе, как их стали позже именовать. Гуманитарные науки, согласно его глубокому убеждению, играют свою важную роль в деле познания, образования и просвещения в целом: они прививают студенту навык свободно и критически мыслить, обобщать, обосновывать научные идеи и выбирать «дорогу к правильному суждению» [3; Т. 1, с. 114–115]. Гуманитарная образованность формирует необходимую для научной деятельности свободу духовной жизни, гибкость ума, всеохватность мышления, ответственность и глубину суждений. Он писал, что мы особо благодарны Декарту за то, что он утвердил ученых людей в их праве спорить и тем открыл дорогу к вольному философствованию. Необходимо при этом учитывать, что понятие «вольное философствование» употреблялось русским ученым, как и многими учеными того времени, не только в отношении философии, но и в отношении теоретической мысли в целом, включая, в первую очередь, теоретическое естествознание. Понятие «вольного философствования» означало у Ломоносова, прежде всего, свободу творческой мысли в познании мира, свободу обогащенной философски творческой мысли. Именно в этом смысле Ломоносов писал о важности изучения философского знания.

Ломоносов полагал, что студент – будущий ученый – должен не только усвоить научную мысль во всей полноте и единстве, но и обрести стремление «исследовать и открывать то, что еще неизвестно» [3; Т. 10, с. 122]. Он был убежден, что ученому нельзя замыкаться в своей узкой области, потому что сама наука едина и все научные дисциплины взаимосвязаны. Поэтому, помимо близких своей сфере научной деятельности дисциплин, ученый также должен иметь познания в математике, истории и философии. Знание едино, прежде всего, потому, что един сам мир, природа как предмет познания. Природа гармонична во всем своем бесконечном многообразии, и познание этой объективной гармонии мира определяет гармоничность знания, внутреннюю связь наук. Идея единства познания как важнейший мировоззренческий принцип – это условие успеха в достижении истины, так считал Ломоносов и неоднократно подчеркивал важность этой идеи. Он писал о том, что химия неразрывно связана с физикой, тогда как математика – «глаза» физики. Ломоносов был убежден в том, что идея связи наук должна стать основополагающей в университетском образовании.

Несомненную пользу Ломоносов видел в изучении студентами словесных наук [5; с. 17–20], так как каждый ученый должен в «чистом и порядочном стиле» писать свои научные труды. Кроме достойного знания своего родного языка, Ломоносов всем ученым людям предписывал знания иностранных языков, чтобы читать новейшие публикации своих иностранных коллег и вести с ними научную переписку.

Ломоносов был тем мыслителем, который одним из первых перешел от узкометодологических проблем формирования научных понятий и представлений к общим фило-

софским проблемам онтологии языка и попытался выделить его познавательные, мировоззренческие, антропологические и ценностные аспекты. Прежде всего, его интересуют те стороны языка, глубины слова, которые обращены к самой природе вещей. В своем «Кратком руководстве на пользу любителей сладкоречия» он, рассуждая о роли языка в мировосприятии человека и в бытии самих вещей, говорит о том, что язык «избранными речью представлять и пристойными словами изобразить всякую предложенную материю может» и «о справедливости ее удостоверить» [3; Т. 7, с. 23]. Слово раскрывает перед человеком различные стороны вещей: практическую, эстетическую, интеллектуальную и пр., а также представляет уровни их существования – от материального и низкого до высокого, духовного. «Как материи, которые словом человеческим изображаются, различаются по мере разной своей важности, так и... язык... по приличности имеет разные степени: высокий, посредственный и низкий» [3; Т. 7, с. 588].

Говоря о роли языка в культуре, Ломоносов, прежде всего, указывает на такую важную его функцию, как сохранение исторической памяти народа. Без знания истории, которая «пишет» себя в тех или иных «сакральных» текстах культуры – устных или письменных источниках, формирующих культурную традицию, не развивается культурно-историческое самосознание народа. Культура, не имея достаточных оснований для самопознания своего, не может осознавать себя в полной мере, не видит реальных смыслов и целей, определяющих ее существование и предназначение, а также место в мировой истории, не видит будущего, не имеет ориентиров исторического эволюционирования.

Согласно Ломоносову, язык, будучи основой культуры, является также основой духовного единства народа. И здесь Ломоносов отмечает ту особенность русского языка, что язык наш, как никакой иной, единство это сохраняет, служа связующей нитью различных поколений людей и надежным фундаментом для традиции отечественной культуры. При этом им отмечается особая роль поэтов как создателей и охранителей языка, «его верных и неусыпных жрецов». Поэт воистину голос и совесть культуры. Он возвещает потомкам о делах дней минувших, но при этом, говоря о временах стародавних, прошедших, раскрывает истинную историческую и духовную природу дня сегодняшнего. Так великий русский ученый и выдающийся деятель отечественного образования связывает в сознании своих современников и будущих поколений российских интеллектуалов культуру языка, мышления и само развитие национальной культуры.

Особое внимание Ломоносов уделял этическим проблемам развития науки и образования. Так, ученым были сформулированы правила ведения научной полемики, а также ряд требований, предъявляемых им интерпретаторам, популяризаторам научных знаний и критикам науки. Приведем здесь некоторые из них, как не потерявшие своей актуальности и сегодня. Чтобы быть в состоянии выносить справедливые решения о тех или иных научных знаниях и в различных сложных вопросах познания, необходимо изгнать из ума всякое предубеждение, всякую предвзятость и не требовать от авторов научных идей «рабского» подчинения идеям и мыслям, которые властвуют над умами общества, пусть даже и просвещенного. По отношению к сочинениям, которые становятся предметом полемического суждения, необходимо соблюдать естественные законы справедливости и благопристойности. Прежде, чем бранить и осуждать, следует не один раз взвесить свое собственное мнение, чтобы быть в состоянии, если потребуется, защитить

и оправдать свои слова. Опрометчивые суждения о сложном предмете тем более постыдны, если допущены невнимательность, малое усердие в усвоении предмета, словом, если в них скрываются небрежность, невежество, поспешность, дух пристрастия и недобросовестность. Критик и ниспровергатель должен хорошо усвоить учение автора, проанализировать все его доказательства и противопоставить им действительные возражения и основательные рассуждения, прежде, чем присвоить себе право осудить его.

Оппонент и критик, равно как и популяризатор научного знания, не должны спешить с осуждением гипотез. Они дозволены в многотрудных для понимания исследователей предметах и даже представляют единственный путь, которым величайшие умы дошли до открытия важных истин. Нет ничего более позорного, чем красть у кого-либо из собратьев высказанные последними мысли и идеи и присваивать их себе. Наконец, ученый, исследователь, никогда не должен иметь слишком высокое представление о своем превосходстве, о своей авторитетности, о ценности своего видения предмета науки и своего ученого мнения.

Всякий, кто берет на себя труд осведомлять общественность о новых достижениях науки, должен правильно рассчитывать свои силы и реальные возможности, так как он затевает трудную и очень сложную работу, при которой приходится докладывать и судить о вещах необыкновенных и учениях, создаваемых выдающимися умами. Высказывать при этом неточные и безвкусные суждения, значит, сделать себя предметом презрения и насмешки; это значит уподобиться карлику, который хотел бы поднять горы.

Основание Московского университета стало венцом творчества и общественной деятельности М.В. Ломоносова и знаковым событием для всей русской культуры. Указ императрицы Елизаветы об основании университета, подписанный в Татьянин день 12 (25) января 1755 года, знаменовал собой закрепление за Российским государством особой роли в развитии науки и образования [4; с. 4–8].

Традиция, заложенная Ломоносовым, была продолжена в России другими учеными, среди которых особое место занимает творчество русского химика, ученого-энциклопедиста *Дмитрия Ивановича Менделеева* (1834–1907). В 1905 г. была издана его книга «Заветные мысли», которая является духовным завещанием Д.И. Менделеева будущим поколениям. Среди проблем, которые он поднимает в своем труде (народонаселение, внешняя торговля, промышленность, устройство правительства), особое место занимают главы «Об образовании, преимущественно высшем» и «О подготовке учителей и профессоров». В книге есть также небольшая глава «Мировоззрение», где изложены философские взгляды ученого-химика. Многие из идей Д.И. Менделеева остаются актуальными в настоящее время. Автор дает в своей работе исторический обзор формирования и развития системы образования от Древней Греции и Рима до начала XX века, когда университеты продолжают играть первостепенную роль в образовании народов. Именно они служат образцом для всех прочих высших учебных заведений, так как здесь развиваются одновременно специализация и философское направление высшего образования.

Приступая к исследованию вопроса о высшем образовании в России, Д.И. Менделеев рассматривает его наряду с правительственной системой и промышленным строем, которые всегда нуждаются в улучшении, их часто критикуют, но, как пишет автор, одного критического отношения недостаточно, необходимо обсуждение планов и действия.

Менделеев подчеркивает взаимосвязь деятельности правительства и развития промышленности с вопросами образования и утверждает, что там, где они не развиты, нет спроса на высшее образование; образованный человек найдет себе место тогда, когда в нем будет нуждаться образованное общество, а иначе – «горе от ума».

Ученый-химик высказывает интересную мысль о том, что начальное и среднее образование преследует преимущественно личное развитие, а высшее образование – общественное и государственное, тем самым он диалектически связывает единичное и общее, индивидуальное и социальное. Он пишет: личное предшествует государственному, как детство предшествует зрелости. «Начальное и даже всё среднее и общее образование должны иметь дело преимущественно со словом, а высшее – с делом, с жизнью, с общественными, так сказать, внеиндивидуальными отношениями» [6; с. 233]. Тем самым Д.И. Менделеев демонстрирует государственный подход к вопросу образования, отмечая, что «человек тем более совершенен, чем более он полезен для широкого круга интересов общественных, государственных и всего человечества». [6; с. 226].

Уже в начале XX века Менделеев отмечает два исторических изменения, произошедших в высшем образовании. К ним он относит более широкую доступность людей к образованию в отличие от сословности прежнего времени, а также перемены, касающиеся содержания образования: если раньше считалось возможным охватить всю совокупность знаний времени, то сейчас образование имеет характер специализации. Эта тенденция сохраняется и спустя 100 лет, в начале XXI века. По мысли Д.И. Менделеева, такие перемены заставляют искать новые подходы к содержанию образования, но принципы, заложенные предшественниками, должны сохраняться. Одним из важнейших является вопрос об оптимальном сочетании естественнонаучного и философского знания в системе образования. Он уверен, что юноша в 17 лет способен уже понимать философские начала, неизбежные при высшем образовании, и пишет, что в соединении абстрактно-бесконечного с конкретной действительностью состоит весь смысл высших учебных заведений.

Выдающийся ученый, профессор, много лет проработавший в Петербургском университете, не только высказывает свою принципиальную позицию по этому вопросу, но и аргументирует ее. Он утверждает, что только преподавание философии и других абстрактных наук в сочетании со специальными практическими дисциплинами дает уверенность в результате. А результат заключается в том, что университет должен воспитывать людей, способных видеть вперед, предвидеть будущее на основе прошлого и существующего. Д.И. Менделеев пишет, что высшие заведения должны воспитывать лиц, «могущих самостоятельно затем идти в область неизвестного, пытливых, обладающих всеми основными способами, необходимыми для достижения еще неизвестных областей знания... Каждое новое поколение должно превосходить предыдущее, так как это является фундаментом прогресса» [6; с. 248].

Особое внимание Д.И. Менделеев уделяет подготовке отечественных специалистов, считая, что необходимо направлять средства для «развития русской научной самостоятельности». Д.И. Менделеев поддерживал такую форму организации высших учебных заведений, как университеты, при этом подчеркивая, что это должно относиться также к техническим учебным заведениям, объединение которых необходимо в политехнические институты. Одним из аргументов явился тот факт, что в университетах студенты находятся не только под влиянием профессоров, но, общаясь с товарищами разнообразных

специальностей, получают большую широту просвещения.

Обращаясь к творчеству великого ученого-химика, необходимо отметить непреходящее значение его идей для развития российского образования как на протяжении предыдущих ста лет, так и на перспективу. Поднятые им проблемы составляют содержание философии образования, дают ответы на вопрос, каким должно быть высшее образование. Менделеев демонстрирует государственное мышление в вопросах образования, ратует за подготовку отечественных профессионалов, настаивает на оптимальном сочетании абстрактных и специальных дисциплин в программе университетского образования, подробно рассматривает пути реализации планов по улучшению подготовки специалистов в области естествознания.

В XX веке схожий подход развивал выдающийся ученый **Владимир Иванович Вернадский** (1863–1945). Его мысли представляются тем более значимыми, что это рефлексия не только крупного ученого, но одновременно практика, непосредственно знакомого с потребностями научной жизни организатора многочисленных академических учреждений разного масштаба. Эрудированный естествоиспытатель, он ясно отдавал себе отчет в том, что научно-техническое знание само по себе, в отрыве от гуманитарных наук и от мировоззренческой составляющей, неполно и недостаточно, особенно в вузовском обучении.

Вернадский ратовал за целостный подход, символом которого был для него университет: уже само слово предполагает целостность (лат. *universitas* – «совокупность», «общность», «объединение»). «Только в университете есть возможность каждому в свободном общении с разнообразнейшими по интересам и занятиям работниками войти в круг мирового знания, науки во всем ее недоступном отдельному человеку величии» [7; Т. 12, с. 113]. Для русского ученого важен принцип взаимодополнительности и взаимоперехода, важно именно «соединение вместе разнообразных предметов преподавания и тысяч студенческой молодежи». Оно само по себе имеет «такое образовательное значение, которое не может быть заменено никаким другим образом» [7; Т. 12, с. 79]. Недооценка и элиминирование какого-либо из составных компонентов такого целого извращает сам замысел университета, в титулатуру которого даже включен соответствующий термин.

В реформировании высшей школы Вернадский выступал за сохранение преемственности: здесь недопустимо радикальное отступление от исторически сложившейся почвы и осуществления исконных идеалов. Вместе с тем высшее образование должно быть организовано на общечеловеческой основе, то есть в контексте гуманистических ценностей.

Само собой, необходима связь различных образовательных ступеней, в частности, связь высшей школы со средней школой. При этом не стоит забывать, что «каждая высшая школа является не только школой, но в то же время и научной организацией, ведет огромную научную работу» [7; Т. 12, с. 79]. Иными словами, должна существовать возможность продолжения профессионально-академического роста, вызревания ученых, в том числе, при всестороннем непосредственном межличностном взаимодействии со старшими коллегами – и не только в обмене знаниями, но и жизненным опытом. Уже сами академические порядки призваны создавать творческую атмосферу, благоприятствующую подобной трансляции и формированию подлинных ученых.

Вернадский хорошо осознает ключевое значение вузовского преподавателя. В университетском образовании личность профессора, лектора по своему значению приближается к той роли, которую играл учитель в традиционных культурах древности. По мысли ученого, «хороший профессор, может быть, более редок, чем хороший певец или актер» [7; Т. 12, с. 79]. Вот почему жизненно важно ценить университетского преподавателя; принципиально обеспечить достойные материальные условия, чтоб у него не было необходимости заботиться о том, как прокормить себя и свою семью. При этом необходимо, чтоб оставалось достаточно свободного времени не только для лекционной работы в аудитории, но также для исследований и научного творчества.

Существенно, что сама научная деятельность не сводится к логической составляющей (хотя без нее наука существовать не может!). «Научная творческая мысль, – читаем у Вернадского, – выходит за пределы логики (включая в логику и диалектику в разных ее пониманиях). Личность опирается в своих научных достижениях на явления, логикой (как бы расширено мы ее ни понимали) не охватываемые». Рациональный дискурс попросту «не охватывает всего знания человека о реальности» [7; Т. 10, с. 118], вот почему его значение не стоит переоценивать [8; с. 155–170]. И хотя во времена Вернадского технические науки стали господствующими в высшей школе и глубоко проникли в ее структуру, образование не должно быть узко техницистским. Совершенно очевидно, что оно «никогда не будет слагаться только из одних данных науки, но должно включать в себя создания и всех других проявлений духовной жизни человечества» [7, Т. 13; с. 243]. Иными словами, университет «должен открывать молодым людям не только образовательные, но и нравственные, художественные, в целом, культурные горизонты, расширять их представления об окружающем мире и самом человеке» [9]. Словом, вуз призван стать формой «организации учащегося народа», которая не просто сохраняет культуру и национальное существование, но сама творит эту культуру и кует «национальную силу» [7, Т. 12; с. 76].

Вернадский в образовании стремится провести такой же междисциплинарный подход, что и в естественнонаучной сфере, а это предполагает, в том числе, и значительную роль социально-гуманитарных дисциплин. На рубеже двадцатых годов XX века, в условиях только закончившейся Гражданской войны факультет общественных наук порой рассматривался как непозволительная роскошь. «Философию за борт!» – выразился в 1922 г. С.К. Минин, будущий ректор Ленинградского государственного университета, в своей одноименной статье в журнале «Под знаменем марксизма». По мысли советских идеологов, философия как форма общественного сознания «своё отжила». В новых социально-политических и исторических условиях она оказывается вредной, ибо является формой сознания, характерной для классовой буржуазии, а потому враждебна пролетариату. Философия должна объединиться с наукой, стать «научной» философией, каковой и является «диалектический материализм». Словом, кредо нового уклада стало доминирование позитивной науки, точнее, естествознания и технических дисциплин [10; с. 209].

Напротив, академик Вернадский, энциклопедически образованный представитель классической русской научной школы, практик и талантливый организатор академических институтов, закрытие факультета общественных наук считал недопустимым, ибо без него прекратилось бы систематическое изучение вопросов, касающихся создания

нового общественного строя. Работа факультета сосредоточена вокруг проблем оптимизации общественного развития, в частности, вопросов мировоззренческого, народно-хозяйственного значения и т. д. По убеждению ученого, от их успешной научной разработки напрямую зависят политические, хозяйственные, демографические и иные аспекты общественной жизни.

В условиях угрозы распада Таврического университета Вернадский отстаивал необходимость сохранения всех факультетов: не только «технических» (физико-математического, медицинского и агрономического), но также гуманитарных. «В философско-словесном факультете сосредоточено изучение и углубление философских дисциплин, без которых не может существовать университет, и не может идти жизнь цивилизованного человечества. В нем идет изучение драгоценного орудия всякого школьного преподавателя – языка и духовной культуры народа» [7; Т. 12, с. 112]. Общественно-гуманитарная составляющая университетского образования важна также в плане формирования морально-нравственной ответственности за возможные последствия своей деятельности и открытий. Такая ответственность является профилактикой любой нечистоплотности в науке и околонаучной среде. «Вопрос о моральной стороне науки ...становится действенной силой» [7; Т. 10, с. 72].

Русский ученый также не забывал и о студентах. Так, в октябре 1920 г., вскоре после избрания ректором, в беседе с журналистом симферопольской газеты «Таврический голос» Вернадский коснулся роли студенчества в жизни университета. Роль эту он считал «весьма важной и крупной, но именно в жизни университета, а не в управлении им». Речь, прежде всего, об участии в научной жизни университета, в то время как управление «всецело должно принадлежать Совету университета. В массах российского студенчества одно время бродила идея о привлечении его к управлению университетами, но практического осуществления она нигде не получила». Участие студенчества в управлении университетом, по Вернадскому, совершенно не нужно. Недопустимо, чтоб преподаватель зависел от субъективного волюнтаристского мнения студента: такое положение извращает нормальные отношения преподавателя и ученика, развращает студенчество и подрывает авторитет вузовского преподавателя. Ректор сожалел, что в Таврическом университете «не чувствуется довольно яркой, полнозвучной жизни студенчества» и винил в этом те «тяжелые условия современности, которые отнимают у студентов все время на поиски заработков» [цит. по 11].

Итак, материально-финансовая составляющая является хоть и недостаточным, но чрезвычайно важным, даже необходимым, условием научной деятельности: высшая школа, правильно поставленная, стоит дорого.

Таким образом, к философским проблемам высшего образования Вернадский подходил с тех же принципов целостности и междисциплинарности, которые стремился проводить и в науке. Для него была важна, прежде всего, разносторонность подготовки профессионалов, специалистов, ученых. В образовании и обучении наиболее значимо развивать не какие-то формальные моменты, а именно способность к эвристическому мышлению и творческому поиску. В этом ключевую роль играет живая личность – как преподавателя, так и студента.

**Никита Николаевич Моисеев** (1917–2000), российский ученый-исследователь и теоре-

тик-мыслитель второй половины XX столетия, в своем понимании современной науки и сути образования исходил из общей мировоззренческой позиции, разделяемой современной философской антропологией, согласно которой человек является не внешним созерцателем системы мироздания, но действующим – продуктивно и непродуктивно – участником мирового эволюционного процесса. Он постигает эту систему изнутри нее самой и уже этим ее изменяет. Моисеев убежден в том, что, когда происходит формирование новой схемы взаимоотношения Человека и Природы, когда накопленные знания постепенно рожают новое понимание реальности, это означает и новые действия, как-то меняющие окружающий мир, а, следовательно, и характер его эволюции. «Даже знания, даже та картина Мира, которая рождается в умах мыслителей и ученых, как оказалось, влияет на характер эволюции окружающего мира, в котором мы живем» [12; с. 97–98]. Это существенным образом меняет научные представления о месте и назначении человека в Универсуме, вынуждает в совершенно новом свете видеть место исследователя и оценивать меру его способности познавать окружающий мир. И здесь на первый план выдвигается уже не когнитивный, не познавательный-технический, а духовно-нравственный аспект проблемы отношения человека с миром.

Моисеевым ставится проблема сохранения человека как биосоциального существа, раскрывающего, аккумулирующего и сохраняющего в различных формах культурного опыта и системах знания структурообразующие образы и смыслы бытия, в условиях нарастания экологического кризиса (широко им понимаемого). В основе его лежит возросшее до планетарного масштаба противоречие между техносферой и биосферой, суть которого заключается в исчерпании разного рода энергоресурсов, необходимых человеку для выживания и дальнейшей его эволюции. Говорится о необходимости выработки таких способов взаимодействия, которые могли бы оказаться перспективными и для человечества, и для Природы, о насущности поиска синергетических форм их будущего развития. Все это «ставит перед науками об обществе (и философии истории, в частности) совершенно новые нетрадиционные задачи. Может быть, и проблему нового миропонимания» [13; с. 12]. Важнейшей из них ему видится создание – причем, в кратчайшие сроки – нового нравственного императива, включающего в себя не только человека, но также и биосферу, весь природный мир. По существу, он требует переосмысления характера взаимоотношений людей между собой и Природой. Эта задача, однако, не может быть успешно решена без комплексного постижения человека, углубления процессов самопознания, всестороннего изучения различных сфер человеческого бытия (внутреннего мира, социальной сферы и области планетарно-космического существования), видов и форм его деятельности. Таким образом, ее решение в качестве неперемennого условия предполагает возрастание интереса со стороны общества к проблемам человеческого существования (в его настоящем, прошлом и будущем как биологическом, так и историческом времени), а следовательно, значительного расширения областей гуманитарного знания (прежде всего, научного). Оно также требует выработки новой стратегии образования – в особенности на уровне высшей школы, – реализуемой на его основе.

Образование, представляющее целостную систему, которая включает в себя производство, сохранение и транслирование знаний, а также воспитание и морально-нравственное совершенствование человека, помимо прочего, должно иметь целью формирование

развитого, гуманистически ориентированного мировоззрения человека. Мировоззрение современного человека, интеллектуально и духовно развитой личности, должно основываться на приоритете обретения нового единства цивилизации и Природы, единства, направленного «не на эксплуатацию природы и даже не на сохранение ее в первоизданном виде, а на ее развитие, способное содействовать развитию общества» [14; с. 24]. В этом, по мнению Моисеева, и состоит принцип современного антропоцентризма, который базируется на безусловном принятии необходимости освобождения от «рудиментов атавистического неандертализма», с одной стороны, и готовности к напряженному умственному (в вопросах знания) и духовному труду (в вопросах нравственности и морали) формирования новой человеческой личности, с другой, всё – во имя созидания возможного будущего человеческой цивилизации. «Всё должно быть поставлено на службу главной задаче – формированию личности эпохи ноосферы, способной обеспечить коэволюцию биосферы и техносферы, новую шкалу ценностей, переоценку всего, чем до сих пор жил человек» [15; с. 9].

В решении стоящих перед человечеством гуманитарных, естественнонаучных и технических проблем Моисеевым постулируется приоритетная роль нравственности [15; с. 5]. И здесь, конечно же, неопределимую роль играет гуманитарное знание, которое должно быть широко представлено в системе университетского образования. Вообще, вопросы комплексного, многоуровневого и разностороннего образования становятся в настоящее время наиболее актуальными при развитии стратегий будущего. Лидером XXI века, по его мнению, сделается именно то культурное сообщество, которое сумеет создать более совершенную систему образования. Совершенствуя образование, важно сознавать реальные потребности общества, видеть перспективу их развития, представлять себе того человека, которому предстоит решать проблемы будущего. Более того, существенным моментом создания такой системы, которая призвана определить сами направление и логику следующего витка развития человечества, является понимание того, что она должна основываться «на новой этике и новом понимании места человека и задачах его цивилизации. И новой нравственности!» [16; с. 11]. При этом возрастает не только значение образования, но также и роль Учителя в судьбах отдельных народов и цивилизации в целом. Учитель как духовный наставник всех рангов (от дошкольного и школьного образования до университета) должен стать одной из авторитетнейших фигур, а профессия педагога, соответственно, одной из самых социально престижных профессий в обществе.

Подытоживая вышеизложенное, мы можем сказать со всей определенностью, что человечество стоит на пороге нового этапа антропогенеза, а современная культура в своем существе характеризуется остротой проблемы выбора будущих путей развития, так как потенциальные возможности цивилизации потребительства исчерпаны или близки к исчерпанию. В этих условиях поле деятельности высшей школы резко расширяется: предстоит не только подготовка специалистов в традиционных сферах деятельности, но также формирование основ цивилизации, способной реализовать коэволюции техносферы и биосферы, культуры и Природы. «Я думаю, – пишет Моисеев, – что уже сейчас можно говорить о некоторых особенностях высшей школы XXI века. И пришло время ее совершенствования для того, чтобы она оказалась способной принять на себя и новые обязанности, и новую ответственность» [17; с. 118]. Главным предназначением системы

образования до сих пор было накопление опыта, обращение его в знания и подготовка специалистов, способных применять знания на практике, а также передавать их обществу и последующим поколениям людей. Теперь этого недостаточно по той причине, что опыта перехода к новой, нам еще малопонятной цивилизации просто нет. Значит, система образования, и прежде всего, университеты, должны выпускать не просто специалистов, владеющих «экстрактом опыта» предшествующих поколений, конкретными знаниями, навыками и умениями, но – и это становится главным! – готовых к встрече с неизвестным, к непрерывной учебе, самосовершенствованию и поиску – поиску во всех сферах деятельности. Трудно не согласиться с Моисеевым, когда он пишет о том, что «самое главное в университетском образовании: поставить на службу будущему творческий потенциал людей» [17; с. 120–121].

Для понимания многих сторон жизненных процессов, человека и аспектов его деятельного существования в мире, «истории развития рода человеческого» необходимы различные ракурсы рассмотрения, способы проблематизации, а также подходы к решению проблем. Только в этом случае в сознании человека возникает «та голографическая картина», которая и означает необходимое понимание широко трактуемого и всеохватывающего исторического процесса. Степень сложности такой голограммы и характеризует уровень понимания истории, а следовательно, и той эвристической ценности в оценках перспектив будущего развития, которой обладает предлагаемая интерпретация. Кроме того, изучение социально-исторического мира из объекта чисто академических исследований превращается в практически важную область знания, лежащую, между прочим, на стыке гуманитарных, социальных и даже естественных наук. Природное на уровне общества переходит в культурно-историческое существование, тогда как культура, в свою очередь, служит одним из источников многих трансформаций и развития различных природно-космических сфер. Например, напомним, что тот же Вернадский рассматривал человеческую деятельность как мощный геологический фактор. Вообще идея взаимозависимости Природы и человека – одна из центральных идей современного рационализма, на что, как на одну из парадигм университетского образования, также указывает Моисеев.

Широкая образованность населения планеты необходима для становления новой морали и духовного мира людей. Только по-настоящему образованное и интеллигентное общество способно вступить в эпоху ноосферы, то есть в период своей истории, когда оно сможет реализовать режим коэволюции природы и общества. Университетское образование, являясь верхним звеном системы накопления и передачи знаний, культуры, цивилизационных установок следующим поколениям, обязательно должно быть достаточно открытым, тогда как узкая профессионализация – лишь его завершением. Университет призван осуществить синтез научных направлений под эгидой гуманитарных проблем. Задача в том, чтобы на основе широчайшего круга знаний сформировать культуру мышления, причем гуманистически ориентированного мышления, которое руководствуется не только практическими потребностями, но и духовными запросами человека и общества и направляется идеей нравственно-ответственного познания. Сама широта образования должна достигаться, прежде всего, за счет объединения гуманитарного и естественнонаучного знания. По мысли Моисеева, пришло время, когда человечество должно ликвидиро-

вать пропасть между двумя «цивилизациями» – гуманитарной и естественнонаучно-инженерной. В осуществлении этого синтеза он видит не просто потребность нашей эпохи, но ее миссию и смысл, ведь сами знания, технические и естественнонаучные, необходимы для решения гуманитарных проблем, проблем человека. «И только совместными усилиями гуманитариев и естественников, совместными усилиями обеих культур мы сможем решить задачи, возникшие перед человечеством. Пропасть между двумя цивилизациями должна засыпаться с обеих сторон. И здесь университетам пришло время сказать свое слово» [17; с. 122–123].

Наконец, как это следует из вышесказанного, важной составляющей взглядов Моисеева является критика узконаправленного сциентизма. «Математика, физика, биология и другие науки усваиваются сравнительно легко и быстро, между тем, для воспитания гуманистических традиций и чувства добра требуется вся жизнь» [15; с. 10]. В этих его словах заключен глубокий смысл, понимание которого совершенно необходимо для восприятия каждым образованным человеком своей деятельности как исполнения миссии жизнестроения во имя будущего. В последнее время в этом вопросе наметилась новая перспектива. Единство мира требует и единства науки и, по прогнозу Моисеева, постепенно получит свое развитие некая метанаука, «наука о том, как роду человеческому сохранить себя, как сохранить и развить то удивительное, что произошло в эволюции Вселенной, создавшей в лице Человека инструмент, способный познавать саму себя и влиять, тем самым, на дальнейшее развитие Универсума» [18; с. 54–55].

Человечество, считает Моисеев, подошло к порогу, за которым нужна и новая нравственность, и новые знания, новый менталитет, новая система ценностей. От того, как следующие поколения смогут понять и реализовать собственную ответственность в таких формах культурного развития как наука и образование, и зависит это будущее. Центральная задача университетов состоит в том, чтобы научить будущих специалистов, вне зависимости от их профиля, смотреть на свою деятельность с общечеловеческой точки зрения, с позиции взаимоотношений общества и природы. «Ростки новой цивилизации должны зарождаться и пестоваться в университетах – в этом их обязанность и ответственность» [17; с. 123].

Философское осмысление проблем образования, показанное на примере творчества выдающихся русских ученых, в значительной степени стало почвой для возникновения новой области знания – философии образования. Необходимо отметить, что все рассмотренные проблемы и фундаментальные принципы, разработанные и изложенные великими российскими учеными-естествоиспытателями XVIII, XIX и XX вв. на уровне философской рефлексии, не утратили своей значимости и актуальности в наше время, а приобрели еще более глубокий смысл. Идея синтеза различных сфер и направлений научной мысли, проблема выявления оптимального сочетания естественнонаучного, специального и философского знания в системе образования является особенностью русской традиции в осмыслении фундаментальных проблем образования.

### Литература:

1. Арапов О., Арапова Е., Volnyakova O., Ivanova A., Krivolapova J., Solodukhin D. Philosophy as rational knowledge // Indian Journal of Science and Technology. 2016. V. 9(46).

URL: <http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/107529>

2. Вольнякова О.А. Рассмотрение экономического вопроса с нравственной точки зрения в русской философии на рубеже XIX и XX веков // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 5 С. 101–107.

URL: [https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/886/101\\_107watermark.pdf](https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/886/101_107watermark.pdf)

3. Ломоносов М.В. Полное собрание сочинений. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1952–1955. [Электронный ресурс]. URL: <http://feb-web.ru/feb/lomonos/default.asp>

4. Маслин М.А., Вольнякова О.А. Мироззрение М.В. Ломоносова. К 300-летию великого ученого // Вестник МИТХТ. 2011. Т. 6. № 5. С. 4–8.

5. Арапов О.Г. «Языка нашего небесна красота». Философские взгляды М.В. Ломоносова по проблемам языка и самопознания русской культуры // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2013. № 5 (133). С. 17–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19072464>

6. Менделеев Д.И. Заветные мысли. М.: Мысль, 1995. 413 с.

7. Вернадский В.И. Собр. соч.: в 24 т. М.: Наука, 2013.

8. Солодухин Д.В. Роль интуиции в жизни и учении В.И. Вернадского // Эпистемология и философия науки. 2014. Т. 42. № 4 (42). С. 155–170. URL : <http://elibrary.ru/item.asp?id=22801462>

9. Алексеева Л.А. О системных основаниях философии образования В.И. Вернадского. [Электронный ресурс] URL: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/1517/1/alekseeva.htm>

10. На переломе. Философские дискуссии 20-х годов: Философия и мироззрение / Сост. и вступ. ст. д.филос.н., проф. П.В. Алексеев. М.: Политиздат, 1990. 528 с. С. 203–209.

11. Филимонов С. История главного университета Крыма – яркая страница в истории интеллигенции, науки, культуры и просвещения полуострова. Крым-Информ. 14 октября 2016 г. URL: <http://www.cinform.info/interviews/id/189>

12. Моисеев Н.Н. Быть или не быть человечеству? М.: Ульяновский Дом печати, 1999. 288 с.

13. Моисеев Н.Н. Современный антропогенез и цивилизационные разломы. Эколого-политологический анализ. М.: МНЭПУ, 1994. 47 с. URL: <http://alt-future.narod.ru/Future/mois.htm>

14. Моисеев Н.Н. Экологическое образование и экологизация образования // в кн: Моисеев Н.Н. Экология и образование. М.: ЮНИСАМ, 1996. 192 с. URL: <http://www.den-za-dnem.ru/page.php?article=812>

15. Моисеев Н.Н. Актуальные проблемы глобальной нравственности // Глобальная нравственность. Специализированная информация по проблемам экологии. М.: АН СССР, ИНИОН, 1990. 31 с.

16. Моисеев Н.Н. Система «Учитель» и современная экологическая обстановка. М.: МНЭПУ, 1994. 16 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23434330>

17. Моисеев Н.Н. Цивилизация XXI века: роль университетов // В кн. Моисеев Н.Н. Экология и образование. М.: ЮНИСАМ, 1996. 192 с.

18. Моисеев Н.Н. Идеи обществознания и общественные науки. М.: ВЦ АН СССР, 1991. 55 с.

### References:

1. Arapov O., Arapova E., Volnyakova O., Ivanova A., Krivolapova J., Solodukhin D. Philosophy as rational knowledge // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9(46). URL: <http://www.indjst.org/index.php/indjst/article/view/107529>
2. Volnyakova O.A. Consideration of the economic issue from the moral point of view in Russian philosophy at the turn of the XIX and XX centuries. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2016; 4(5): 101-107. (in Russ.). URL: [https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/886/101\\_107watermark.pdf](https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/886/101_107watermark.pdf)
3. Lomonosov M.V. Complete Set of Works. Moscow; Leningrad: AN SSSR (Academy of Sciences of the USSR), 1952–1955. (in Russ.). [Electronic resource] URL: <http://feb-web.ru/feb/lomonos/default.asp>
4. Maslin M.A., Volnyakova O.A. Worldview of M.V. Lomonosov. To the 300th anniversary of the great scientist. *Vestnik MITHT* (Fine Chem. Technol). 2011; 6(5): 4-8. (in Russ.).
5. Arapov O.G. "Our language is heavenly beauty". Philosophical views of M.V. Lomonosov on the problems of language and self-knowledge of Russian culture. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* (Bulletin of Tomsk State Pedagogical University), 2013; 5(133): 17-20. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19072464>
6. Mendeleev D.I. *Zavetnye mysli* [Treasured thoughts]. Moscow: Mysl' Publ., 1995, 233 p. (in Russ.).
7. Vernadsky V.I. *Collected Works: in 24 volumes*. M.: Nauka Publ., 2013. (in Russ.).
8. Solodukhin D.V. The role of intuition in life and the teachings of V.I. Vernadsky. *Epistemologiya i filosofiya nauki* (Epistemology and Philosophy of Science). 2014; 42(4): 155-170. (in Russ.). URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22801462>
9. Alekseeva L.A. On the systemic foundations of the V.I. Vernadsky philosophy of education. (in Russ.). [Electronic resource] URL: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/1517/1/alekseeva.htm>
10. At the turn. Philosophical discussions of the 20s years: Philosophy and worldview / Comp. and entry of prof. P.V. Alekseev. Moscow: Politizdat Publ., 1990. 528 p. (in Russ.).
11. Filimonov S. The history of the main university of Crimea is a bright page in the history of the intelligentsia, science, culture and education of the peninsula. *Krym-Inform Publ.* October 14, 2016. <http://www.cinform.info/interviews/id/189> (Data of access: June 12, 2017) (in Russ.).
12. Moiseev N.N. *To be or not to be humanity?* Moscow: Ulyanovsk Press House, 1999. 288 p. (in Russ.)
13. Moiseev N.N. *Modern anthropogenesis and civilizational faults. Ecological and political analysis*. Moscow: MNEPU Publ., 1994. 47 p. (in Russ.). URL: <http://altfuture.narod.ru/Future/mois.htm> (Data of access: June 12, 2017)
14. Moiseev N.N. *Ekologicheskoe obrazovanie i ekologizacija obrazovaniya. Ekologiya i obrazovanie*. [Ecological education and ecologization of education. Ecology and education]. Moscow: UNISAM Publ., 1996. 192 p. (in Russ.). URL: <http://www.den-za-dnem.ru/page.php?article=812> ((Data of access: June 12, 2017)
15. Moiseev N.N. *Actual problems of global morality. Global morality. Specialized information on the problems of ecology*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, Institute for Scientific Information in Social Sciences, 1990. 31 p. (in Russ.).

16. Moiseev N.N. The "Teacher" system and the modern ecological situation]. Moscow, MNEPU Publ., 1994. 16 p. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23434330> ((Data of access: June 12, 2017).

17. Moiseev N.N. XXI Century Civilization: Universities' Role. In: Moiseev N.N. Ecology and Education. Moscow: YUNISAM Publ., 1996. 192 p. (in Russ.)

18. Moiseev N.N. Ideas of social science and social sciences. Moscow: Computing Center of the Academy of Sciences of the USSR, 1991. 55 p. (in Russ.).

*Об авторах:*

*Арапов Олег Геннадьевич*, кандидат философских наук, доцент кафедры гуманитарных и общественных наук Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

*Арапова Эльмира Асфаровна*, доцент, кандидат философских наук, доцент кафедры гуманитарных и общественных наук Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

*Вольнякова Ольга Александровна*, доцент, кандидат философских наук, профессор кафедры гуманитарных и общественных наук Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

*Солодухин Денис Витальевич*, доцент, кандидат философских наук, доцент кафедры гуманитарных и общественных наук Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

*About the authors:*

*Oleg G. Arapov*, Ph.D. (Philosophy), Associate Professor of the Chair of Social and Humanitarian Sciences, Institute of Innovative Technologies and Public Administration, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

*Elmira A. Arapova*, Docent, Ph.D. (Philosophy), Associate Professor of the Chair of Social and Humanitarian Sciences, Institute of Innovative Technologies and Public Administration, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

*Olga A. Volnyakova*, Docent, Ph.D. (Philosophy), Professor of the Chair of Social and Humanitarian Sciences, Institute of Innovative Technologies and Public Administration, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

*Denis V. Solodukhin*, Docent, Ph.D. (Philosophy), Associate Professor of the Chair of Social and Humanitarian Sciences, Institute of Innovative Technologies and Public Administration, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

*Для цитирования:* Арапов О.Г., Арапова Э.А., Вольнякова О.А., Солодухин Д.В. Философские проблемы образования в русской естественнонаучной мысли // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 84–100. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-84-100

*For citation:* Arapov O.G., Arapova E.A., Volnyakova O.A., Solodukhin D.V. Philosophical problems of education in the Russian natural scientific thought. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 84-100. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-84-100

## **ПОСТМОДЕРНИЗМ: ШАГ В «НЕТОЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ»**

**И.Н. Крижановский**

*Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементо-органических соединений (ГНЦ РФ «ГНИИХТЭОС»), Москва 105118, Россия*

*@Автор для переписки, e-mail: ilya.krizhanovskiy@mail.ru*

Статья посвящена рассмотрению и осмыслению постмодернизма в контексте его влияния на различные сферы жизни общества. В ней предпринята попытка ответить на вопрос, как наступление новой смысловой эры в совокупности с развитием информационных технологий отразится на состоянии общества в целом и научной сферы – в частности. Обсуждается воздействие данного явления на культуру, искусство, общественную жизнь и науку. На основании анализа научных, публицистических и художественных литературных источников, а также привлечения материалов из средств массовой информации установлен характер тенденций, индуцируемых рассматриваемым социокультурным феноменом. В статье проанализированы работы апологетов постмодернизма (Р. Барта, М. Фуко, И.С. Скоропановой, В.В. Ерофеева) и его противников (Ж. Бодрийяра, А.Г. Дугина, В.С. Стёпина, С.Г. Кара-Мурзы). Обсуждаются сравнительно новые явления, непосредственно связанные с преобладанием философских принципов постмодернизма в мировом информационном поле (например, «колумбайнеры», клиповое мышление, постдемократия и некоторые другие). Дана оценка отношения постмодернизма к традиционной культуре и традиционным ценностям. Установлен опосредованный характер его влияния на научную деятельность. Автор склоняется к негативной оценке постмодернизма в его нынешнем виде, как основного мировоззренческого принципа.

**Ключевые слова:** влияние постмодернизма, общество, наука, культура, искусство, тенденции.

## **POSTMODERNISM: A STEP IN AN "INEXACT DIRECTION"**

**I.N. Krizhanovskiy**

*State Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds (SSC RF "GNIITEOS"), Moscow 105118, Russia,*

*@Corresponding author e-mail: ilya.krizhanovskiy@mail.ru*

The article is devoted to the consideration and understanding of postmodernism in the context of its impact on various spheres of society. The author attempts to answer the question of how the onset of a new semantic era coupled with the development of information technologies will affect the state of the society in general and the scientific sphere in particular. The impact of this phenomenon on culture, art (in view of the breadth of the concept, only literature is chosen), social life and science is discussed. Based on the analysis of scientific, publicistic and artistic literary sources, as well as materials from the media, the nature of the trends induced by the sociocultural phenomenon under discussion is established. The author of the article analyzes the works of both apologists of postmodernism (for example, R. Bart, M. Foucault, I. Skoropanova, V. Erofeev) and opponents (for example, J. Baudrillard, A. Dugin, V. Stepin, S. Kara-Murza). We consider relatively new phenomena directly related to the predominance of the philosophical principles of postmodernism in the world information field (for example, “columbiners”, clip thinking, postdemocracy, and some others). The article assesses the attitude of postmodernism to traditional culture and values. The author ascertains the mediated nature of its influence on scientific activity and leans towards a negative assessment of postmodernism (in its present form) as the main ideological principle.

**Keywords:** the influence of postmodernism, society, science, culture, art, trends.

### **Введение: постмодернизм – что это и откуда?**

Люди, интересующиеся историей, философией, искусством и тенденциями их развития, нередко встречаются с таким понятием, как постмодернизм. Данное явление тесно сопряжено с эпохой постмодерна (постиндустриальной, информационной) и, по сложившемуся на данный момент мнению, служит для обозначения: нового периода в развитии культуры; стиля постнеклассического научного мышления; нового художественного направления в искусстве; художественно-эстетической системы, сложившейся во второй половине XX века; рефлексии на вышеозначенные темы [1, с. 9]. Философский энциклопедический словарь определяет постмодернизм как «широкое культурное течение, в чью орбиту в последние два десятилетия XX века попадают философия, эстетика, искусство, наука». Основной его чертой считается разочарование «в идеалах и ценностях Возрождения и Просвещения с их верой в прогресс» [2]. По мнению И.С. Скоропановой, в рамках этого течения человечество переосмысляет «весь многовековой опыт», который «служит базой для выявления объединяющих человечество ценностей, не привязанных к какой-либо одной центрирующей идеологии, религии, философии» [1, с. 8].

Говоря более простым и приземленным языком, постмодернизм есть следствие усталости общества от идей, преобладавших с конца XIX до середины XX вв. Помимо бурного прогресса и связанного с ним несомненного улучшения уровня жизни, это время породило две мировые войны и ядерное оружие. Суть постмодернизма – это равноправие всех смыслов, всех оценок. Любой подход к культуре в рамках постмодерна одинаково верен или одинаково неверен, что одно и то же [3]. Интересна также точка зрения А.В. Рыкова, который считает постмодернизм радикальным консерватизмом. Сравнивая консерватизм с постмодернизмом, он пишет: «Это замкнутые автономные системы (не имеющие истории и не поддающиеся реформам), образующие некую враждебную человеку вторую природу». Далее он поясняет свое видение понятия консерватизм: «консерватизм – не только отказ от идеологии прогресса, не только новая «концепция времени»; прежде

всего, консерватизм – это идеология замкнутости, накладывающая ограничения на свободную деятельность человека, сдерживающая его познавательные способности» [4, с. 6].

Чтобы рассуждать о явлении, необходимо выделить его основные черты. Классический анализ постмодернизма приводит теоретик американской контр-культуры Ихаб Хассан. Вот некоторые его характеристики: неточность, фрагментация, деканонизация, утрата «я» и внутреннего мира, ирония, гибридизация, карнавализация, перформанс и соучастие, интертекстуальность жизни (жизнь – связка сопряженных значений) [5, с. 381–382]. Если обобщить это, то останутся два понятия – деконструкция и субверсия. Первое означает использование слов в качестве некоего общепринятого набора звуков для обозначения того или иного предмета/явления без его смысла или научной подоплеки; второе (субверсия) – равнозначность всех возможных мнений по одному и тому же вопросу.

Основная отличительная черта нашего времени – глобальность потоков информации, доступность огромных ее массивов людям практически всех возрастов через телевидение, радио и Интернет. Более того, воздействие информации на людей становится более управляемым, и одновременно увеличивается ее «проникающая способность». Поэтому любое масштабное течение в мировом смысловом поле тем или иным образом отразится на нашем сознании и сферах деятельности.

В связи с вышеизложенным основная цель данной статьи – попытаться проанализировать постмодернизм, как смысловую тенденцию последних десятилетий, в немалой степени формирующую мировую ноосферу, и выдвинуть предположение о его влиянии на состояние науки.

### **Влияние постмодернизма на культуру и искусство**

И.П. Ильин в своей книге «Постструктурализм. Деконструктивизм. Постмодернизм» пишет об истоках постмодернизма в литературе. По его мнению, теория постмодернизма впитала важнейшие открытия постструктурализма и деконструктивизма, что позволяет говорить о едином «постструктуралистско-деконструктивистско-постмодернистском комплексе», охватывающем различные стороны гуманитарного знания [6]. В рамках этого комплекса, в частности, пересматривается понятие текста. По терминологии французского теоретика постструктурализма Ролана Барта, текст – это «не эстетический продукт, а знаковая деятельность; это не структура, а структурообразующий процесс; это не пассивный объект, а работа и игра; это не совокупность замкнутых в себе знаков, наделенная смыслом, который можно восстановить, а пространство, где прочерчены линии смысловых сдвигов» [7]. Мы хотели бы особо выделить «смысловое пространство», пришедшее на смену конкретному смыслу. Ролан Барт также разработал концепцию «смерти автора», в рамках которой автор становится «скриптором», источником текста, смысл которого генерирует сам читатель. Задача автора – не в задуманном при создании текста содержании, но в создании гибких образов, возбуждающих самое разное содержание [8]. Несколькоими годами позже эта тема также была затронута Мишелем Фуко в эссе 1969 г. «Что такое автор?». В нем он писал: «Маркер писателя теперь – не более чем своеобразие его отсутствия» [9].

Если попытаться проанализировать концепции, описанные выше, то можно отметить, что они снимают с автора ответственность за произведения. В этом, а также в

«многосмысловом пространстве», пришедшем на смену конкретному смыслу, кроется негативная, по мнению людей традиционалистских и модернистских взглядов, сторона постмодернизма. Ведь в неопределенном, «заигрывающим с читателем» произведении задача научить чему-то отсутствует изначально. Некоторые произведения и вовсе напоминают «ощущалку» из «Дивного нового мира» Хаксли, не только эмоциональную, но еще и смысловую. Примером такой постмодернистской «ощущалки» (с долей реализма) являются некоторые произведения Романа Сенчина, в частности – сборник рассказов «Напрямик» [10].

Для культуры постмодернизма характерны всепроникающая и бесконечная ирония над собой и всеми другими культурами, «обилие значений и недостаток оценочных критериев» и перепроизводство. Ж. Бодрийяр называет ее культурой избытка [11]. Отчасти это утверждение имеет объективные причины. В связи с прогрессом и ростом благосостояния отдельных регионов нашей планеты число людей, желающих попробовать себя в искусстве, неуклонно росло и продолжает расти. Искусство становится все более массовым, а иногда и примитивным, поскольку значительная часть его производится людьми, которые не обладают необходимыми качествами и умениями. Весьма интересное рассуждение о ситуации критического перепроизводства в искусстве приведено в рассказе Робинсона Спайдера «Жизнь коротка...». В нем автор моделирует ситуацию далекого будущего, в которой из-за высокой степени автоматизации число людей, занятых в искусстве, стало настолько большим, что создать нечто оригинальное стало невозможно. Рассуждая об ограниченности тем и способов самовыражения через искусство, Робинсон пишет: «Существует предел «осмысленному невозможному»; и мы быстро достигаем его» [12].

Еще одна острая проблема, характерная для постмодернистского искусства – это полное отсутствие оригинальности, то есть постоянное паразитирование на всем том, что было ранее, с изменением заложенного в оригинал смысла и/или формы. Данный факт рассматривается сторонниками постмодернизма как нечто новое, живое и оригинальное, но, на наш взгляд, является прямым доказательством того, что постмодернистское искусство – не отдельное направление, а способ зарабатывать имитацией творчества. Наиболее наглядно это можно наблюдать в литературе и музыке. Приведем слова американского публициста А. Парфрея. Характеризуя современное искусство в целом и музыкальную культуру в частности, он пишет, что они «создаются просто как обволакивающая реакция на свою собственную историю. Их практики легко воспроизводятся в постмодернизме, который схватывает форму, почти не отражая суть оригинала» [13, с. 11]. Весьма яркие примеры типичного постмодернистского литературного творчества можно найти в произведениях Игоря Яркевича. По мнению И.С. Скоропановой, Яркевич в своих произведениях «идет по пути растабуирования табуированного», в том числе в сексуальной сфере («Как меня не изнасиловали», «Красная роза любви»), и тем самым борется с «комплексом кастрации», которым типичного персонажа его рассказов награждает «государство маньяк» [1, с. 423–428]. Значительную часть его произведений составляют искаженные цитаты других писателей и поэтов, переписанные в пошловатом и нецензурном духе, с полным искажением (а иногда и извращением) смысла оригинала, но с сохранением мотива.

Однако наиболее яркими представителями русской постмодернистской литературы

являются Виктор Пелевин, Виктор Ерофеев и Владимир Сорокин. В 1997 г. вышла антология, составленная Ерофеевым, в которой, вместо предисловия, была его статья «Русские цветы зла». Данное произведение, по нашему мнению, является манифестом русской постмодернистской литературы. Основными учителями писателей этого направления Ерофеев называет «Гоголя и маркиза де Сада, декадентов начала века и сюрреалистов, мистиков и группу «Битлз», Андрея Платонова и никому не ведомого Леонида Добычина, Набокова и Борхеса». Источники вдохновения – «Паунд и заумь обэриутов, боевики Голливуда, поп-арт и блатные песни, сталинские небоскребы и западный постмодерн». Но самое интересное в данном произведении – то, как Виктор Ерофеев характеризует писателей данного течения. «Юродствующий» Венедикт Ерофеев, который предлагает «Биологический ритм алкоголической исповеди». В творчестве Евгения Харитонов, основавшего гей-культуру СССР в 1970-е, Виктор видит чистую любовь, сравнимую с Тургеневской. «Словесный хаос и бред Сорокина», который скрывается под коркой текста, похожего на «мясо, из которого вытекла кровь» и который изобилует описаниями сексуальных патологий и насилия. Он упоминает и Яркевича, который «сводит прошлые битвы к ярмарке тщеславия». Наиболее лестной оценке удостоен Пелевин, «который от постмодерна предпочел «пятиться» назад, ... к М. Булгакову» [14].

В статье «Игра на струнах пустоты» А.И. Солженицын пытается определить причину «опаснейшего падения человеческого духа». Писатель видит ее в «ложно понятом авангардизме», который «начинал еще до Первой мировой войны с разрушения общепринятых форм... в порыве построить некое «сверхискусство»». Но далее Солженицын пишет, что характерный для Советского Союза соцреализм стал «всеобщим обмороком культуры», с чем сложно согласиться. По нашему мнению, искусство СССР в основной своей массе занималось тем, чем должно традиционно заниматься: воспитывало человека и гражданина. В конце перестройки и начале 90-х была отменена цензура и, как писал Солженицын, нашлись те, «кто увидел главную ценность открывшейся бесцензурной ... деятельности ... в нестесненном самовыражении и только, ... со зримой душевной пустотой, ... безответственно перед нравственностью ... порой и с употреблением низкой брани, ... столетиями немислимой в печати» [15]. Александр Исаевич видит причину этих метаморфоз в «70-летнем тотальном унижении». Действительно, в оппозиционно настроенных творцах цензура рождала только стремление сбросить ее любой ценой. Однако вспомним также провальную информационную (и не только!) политику позднесоветского руководства и ухудшение материального положения граждан. Следует учитывать и фактическое предательство главы государства, разочарование в идеях, на которых базировалось советское общество. В девяностых же резко ухудшилась среда обитания позднесоветского человека – материально и информационно, когда на неподготовленные умы обрушился поток чуждых нашему обществу (в тот момент) веяний через СМИ и новую литературу [16].

Мировое искусство, которое когда-то несло воспитательную функцию, в котором люди находили идеалы, примеры для подражания, по мнению Ж. Бодрийера, выродилось в «потерявшую драматизм симуляцию», пытающуюся «развиваться до бесконечности» [17]. Он же в своей книге «Симулякры и симуляции» пишет: «перед нами ад симуляции, который уже не ад мучений и пыток, но ад неуловимого, зловредного, неопределимого

искривления смысла» [18].

Типичной симуляцией искусства, по мнению известного психолога Рамиля Гарифуллина, являются реалити-шоу. С одной стороны, участие актеров в бесконечных низкопробных сериалах порождает в обывателях мысль о том, что и они так могут. И они, со своей стороны, участвуют в этом общем спектакле, снимаясь в реалити-шоу, играя как актеры. И те, и другие считают, что причастны к искусству, но по большому счету не имеют к нему отношения. Это и есть симуляция [19].

В статье «Эстетика иллюзий» Жан Бодрийяр отмечает, что значительный сектор современного искусства «участвует в деле развенчания искусства как такового, сопрягая эстетику с обязательной тоской... Всё движение в области живописи отвлечено от будущего и обращено в прошлое». Автор отмечает повальную вторичность современного ему искусства, которое занималось (равно, как и сейчас) лишь самоцитированием, симуляцией. Главную черту постмодернизма – иронию Бодрийяр называет «могильной иронией», поскольку ее источник – «Ressentiment» (разочарование, обреченность) [17]. Добавим, что в лексиконе современных критиков есть интересное слово «саспенс» (англ. *suspense*), которое означает «Кинематографический прием затягивания драматической паузы, нагнетания страха, нервного беспокойства в ожидании дальнейшего развития сюжета» [20, с. 255]. Несмотря на традиционное использование указанного приема в кино, он крайне популярен и в современной литературе.

Тот же прием, но несколько иначе понятый, можно видеть в уже упомянутой нами книге «Напрямик», многих рассказах Захара Прилепина (например, «Собачатина»). В исполнении этих и многих других авторов «саспенсовость» произведения выражается в тяжелом, давящем и неприятном ощущении, возникающем без причины и (особенно у Сенчина) без сюжетной развязки и разрядки напряженности. По мнению многих современных критиков, наличие «атмосферы саспенса» является важным параметром качества произведения. Примеры использования данного понятия можно увидеть в многочисленных рецензиях на современные литературные и кинематографические произведения. Не об этом ли «сопряжении эстетики с обязательной тоской» говорил Бодрийяр?

### **Влияние постмодернизма на общество**

Исторически появление новых общественных и культурных процессов – это не резкий переход, а дополнение явлений предыдущей эпохи элементами следующей. Отсюда можно сделать вывод, что для нашего времени характерны черты всех трех этапов развития общества и культуры с соответствующими им мыслительными парадигмами. Следует помнить, что модернизм вырос из критики традиционализма, а постмодернизм появился из усталости от идей модернизма и отказа от традиций. Таким образом, в современном мире сосуществуют три, изначально не слишком дружелюбные друг к другу, концепции, вынужденные взаимодействовать, что неизбежно порождает конфликты между представителями тех групп, в которых один образ мысли из нескольких является доминирующим.

Яркий пример – инцидент с нападением на офис известного карикатурного журнала «Charlie Hebdo». С одной стороны, данный теракт – вполне обыденный для нашего времени элемент цивилизационного конфликта Ближнего Востока и Запада, вызванного

событиями последних столетий; с другой – налицо наглядное столкновение радикальной постмодернистской культуры и радикальной традиционной. Причем, если посмотреть на реакцию сочувствующих карикатуристам, то несложно заметить их искреннее непонимание причин такой реакции. Продажи журнала (особенно этого номера) выросли, а погибшие стали мучениками [21]. В итоге акт противостояния мировоззрений стал кровавой рекламой журнала: ведь до появления в СМИ сведений об этом теракте это издание было гораздо менее известно широкой публике.

В 1964 г. Г. Маркузе ввел термин «одномерный человек» («*One-Dimensional Man*»). Под этим термином он понимает одномерность мышления, которая является необходимой производной индустриального и постиндустриального общества [22]. Развивая и продолжая эту тему, Вячеслав Стёпин в своей книге «Теоретическое знание» пишет: «Современная индустриальная культура ... создает широкие возможности для манипуляций сознанием...», в результате которых «человек теряет способность рационально осмысливать бытие. При этом и манипулируемые и сами манипуляторы становятся заложниками массовой культуры» [23, с. 28–32]. Невольно вспоминается и «Общество спектакля» Ги Дебора, в котором он, руководствуясь похожими соображениями, называет средства массовой информации «настоящим троянским конем» [24].

Существует взгляд на постмодернизм через призму цивилизационного противостояния двух универсалистских систем: атлантистской и евразийской. Данный аспект развития явлений, связанных с постмодернизмом, подробно описывает Александр Дугин в книге «Геополитика постмодерна». В ней он интерпретирует мировую историю как историю противостояния двух систем: Суши и Моря (а позже евразийства и атлантизма). Евразийство – антиглобалистская, многополярная система многих империй, не отрицающая национальное, этническое и конфессиональное разнообразие народов мира. Атлантизм же базируется на «постепенной десоверенизации национальных государств» и размытии национальных, конфессиональных и прочих видов индивидуальности [25]. Исходя из такого толкования исторического процесса, постмодернизм – это некий набор деструктивных для самостоятельных стран духовных установок, в каком-то смысле подготавливающий почву для колонизации.

Мысль о развитии технологий манипуляций сознанием в эпоху постмодерна активно развивает Сергей Кара-Мурза в книге «Манипуляция сознанием». В ней он пишет: «Двадцатый век был переломным в деле манипуляции сознанием. ... Наука, которая занималась этой проблемой, – социальная психология...». Далее он отмечает, что тогда же возникли эффективные технологические средства для массовой пропаганды, и произошло «освоение политиками и даже учеными уголовного мышления... – мышления с полным нарушением и смешением всех норм» [16, с. 191]. В доказательство он приводит события последних десятилетий, во время которых совершались немыслимые преступления под благовидными предлогами, с последующим уходом от ответственности за содеянное: бомбежки Югославии, вторжения в Ирак, провоцирование и подготовка войн и цветных революций, танковый расстрел Дома Советов и пр.

Необходимым элементом, обуславливающим возможность таких действий, является создание «общества спектакля». Характеризуя этот процесс, С. Кара-Мурза пишет: «Речь идет о важном сдвиге в культуре, о сознательном стирании грани между жизнью и спектаклем, о придании самой жизни черт карнавала, условности и зыбкости» [14, с.

191–192]. Напомним, именно эти свойства фигурируют в характеристиках, которые дают постмодернизму и его противники, и сторонники.

Еще один аспект, который мы бы хотели отметить в контексте влияния постмодернизма на общество, это актуальная ныне проблема «колумбайнеров». По поводу недавних трагических событий в Керчи обозреватель информационного портала REGNUM пишет: «...Постмодернизм как социокультурное явление и концептуальная основа для современного неолиберализма коренным образом пересматривает все основы человеческого бытия: от отрицания авторитета и правды, до отрицания смысла и человека» [26]. Роль воспитания в наше время, действительно, сильно недооценена. В условиях отсутствия четких мировоззренческих ориентиров и неприятия авторитета взрослых, умственное и духовное развитие ребенка принимает абсолютно непредсказуемый характер. В итоге его сознание формируется неконтролируемым потоком информации и зависит от того, что и в какой момент его увлекло. И надо отметить, что постмодернизм имеет к таким инцидентам прямое отношение.

Есть еще два интересных явления, характеризующих нашу эпоху: «постистория» рассмотренная Бодрийяром, а впоследствии Дугиным, и «постдемократия». Термин «постистория» означает «такое состояние общества, в котором актуализированы все исторические потенциалности, а, следовательно, невозможно никакое подлинное новаторство. Единственным настроем остается горечь, цинизм, пассивность и серость» [27]. «Постдемократия» – прямое следствие развития манипулятивных техник и их применения в СМИ и политической жизни стран. Суть явления в том, что вне зависимости от количества кандидатов и стартового отношения к ним людей можно таким образом направить информационные потоки, что выберут именно его [28]. Примеры – 1996 год, Ельцина переизбирают, несмотря на стартовый рейтинг в 2%. Кстати, помогали ему в президентской кампании советники из страны, далеко обошедшей все прочие в своем развитии манипулятивных технологий [29]. Даже главный слоган «Голосуй или проиграешь» подозрительно похож на «Выбирай или проиграешь» из компании Клинтона 1992 г.

### **Влияние постмодернизма на науку**

Во введении отмечалось, что один из принципов постмодернизма – постнеклассическое научное мышление. Термин введен В.С. Стёпиным в 1989 г. В своей статье он предложил различать классическую, неклассическую и постнеклассическую рациональность. «В классической физике идеал объяснения и описания предполагал характеристику объекта без указания на средства его исследования», а в неклассической (квантово-релятивистской) «выдвигается требование четкой фиксации особенностей средств наблюдения» – так трактует Стёпин разницу между классической и неклассической рациональностью. Постнеклассическую науку он характеризует междисциплинарностью, взаимодействием «принципов и представлений картин реальности, формирующихся в различных науках» [30], он указывает, что в ней «наряду с познавательными целями все большую роль начинают играть цели экономического и социально-политического характера» [23 с. 650–660].

Сегодня в вопросе количества научных революций доминирует мнение В.С. Стёпина.

Однако есть мнения, отличные от общепринятого. Например, А.Л. Никифоров утверждает, что в постнеклассический период изменяется не структура науки как таковой (например, междисциплинарность, хоть и в меньшей степени, была и в неклассической), а «место науки в обществе». Это выражается в вытеснении «прикладными науками собственно науки – фундаментальной». Причину такого процесса Никифоров видит в превращении знаний в источник прибыли, «научное знание становится товаром, ученый – наемным работником... Вот почему происходит вытеснение внутринаучных ценностей «социальными ценностями и целями»». Таким образом, по мнению Никифорова, за термином постнеклассическая наука стоит перенаправление научных изысканий из фундаментальных областей (занимающихся познанием мира) в сугубо прикладное русло [31]. Данное перенаправление осуществляется грантовой системой науки. Иными словами, наука все более управляема, и следует признать, что этот процесс объективен в условиях постоянного удорожания научных исследований.

В качестве одной из научных основ философии постмодернизма можно назвать принцип «эпистемологического анархизма», который был разработан Полом Фейерабендом. Критикуя кумулятивную модель развития науки, он утверждает, что развитие науки идет не путем сравнения теории и эмпирических фактов, а путем взаимной критики несовместимых теорий, которые учитывают имеющиеся факты. По ходу размышлений о природе научного познания философ приходит к следующему выводу: «Существует лишь один принцип, который можно защищать при всех обстоятельствах на всех этапах человеческого развития – допустимо все» [32, с. 47]. Данная концепция представляется весьма интересной, однако Фейерабенд доводит ее до абсурда, выводя из тезиса о несоизмеримости теорий возможность защищать любую теорию от внешней критики. Отсюда следует принципиальное равенство всех теорий и суждений, что является одной из базовых установок постмодернизма.

Сознание, мировоззренческие установки, цели и ценности человека формируются на протяжении всей его жизни. Они определяются совокупностью информации, полученной и усвоенной им на разных этапах жизни. И принципиальное отличие нашей эпохи от прошлого времени состоит в избыточности потока информации, который ежедневно окружает каждого из нас. На мышление и психику растущего человека этот поток оказывает огромное влияние, и его необходимо контролировать. Важно понимать, что на нас влияет не только сама информация, но и способ ее поглощения. Наиболее метко это влияние отражает появившийся недавно термин «клиповое мышление». Впервые термин «клип-культура» введен Элвином Тоффлером в книге «Третья волна» [33]. Подробный анализ явления приведен Н.А. Романовым. Он пишет, что клиповое мышление, или сознание – это особая оптика взгляда, позволяющая «фильтровать и воспринимать большое количество фрагментированной аудиовизуальной информации». Однако многие, в частности, социологи, не согласны с тем, что клиповое мышление относится к восприятию информации, а не к поверхностной фильтрации с целью поиска развлечений. Уже не раз социологи замечали, что для современной молодежи, много проводящей времени в Интернете, характерна «направленность на терминальные ценности развлечения и общения» [34]. Многие из них также считают, что данное явление способствует уменьшению у человека способности к системному мышлению [35], которое абсолютно необходимо для

хорошего ученого. Учитывая же сильную увлеченность школьников, студентов и многих взрослых Интернет-ресурсами, на которых мозаичность информации культивируется (ленты соцсетей), количество людей с расщепленным сознанием будет только расти.

И.С. Скоропанова утверждает: «Постмодернисты (зарубежные и русские) ... поколебали власть догматизма и «фаллоцентризма» в сфере познания, которым противопоставили релятивизм и плюрализм... попытались лучше понять людей, обратившись к сфере коллективного бессознательного, показали преимущество принципа «игры», принципа «удовольствия» над принципом «производства» ...» [1, с. 529]. Заметим, что фаллоцентризм для русского языка не характерен, а плюрализм и релятивизм хороши для критической проверки, но никак не в качестве ценностей, определяющих мировоззрение. И, наконец, принципы «игры» и «удовольствия», доминирующие в постмодернистском смысловом поле, отнюдь не способствуют появлению у человека желания активно заниматься духовным и научным развитием. Геймифицирование и виртуализирование сознания молодых людей, по нашему мнению, отнюдь не способствует формированию в них научного мировоззрения.

Основываясь на вышесказанном, необходимо подчеркнуть, что влияние постмодернизма на науку существует, но опосредованное, через умы людей, выросших в «ситуации постмодернизма». Эта ситуация отражается в лингвистике (постструктурализм), в философии (деконструктивизм), в искусствах, в религии (десакрализация), в экономике (приоритет рекламы над товаром, провоцирование спроса) и т.д. [36]. «Предметность и объективность – вот главные особенности научного познания» [31] – а значит, распространение на науку ситуации постмодернизма (с ее субверсивностью, деконструкцией и плюрализмом) либо невозможно, либо приведет к ее ослаблению.

### Заключение

По нашему мнению, термин «постмодернизм» стал неким ярлыком, который употребляют к месту и не очень и при том пытаются его конкретизировать, несмотря на невероятно расплывчатые сферы применения. Практически все авторы, исследователи датируют постмодернизм XX веком. Поскольку любое явление следует максимально конкретизировать, постараемся проанализировать рассмотренные нами аспекты влияния постмодернизма как смысловой тенденции, определяющей основные течения культурной и общественной жизни.

Следует признать, что многие интересные явления остались за рамками нашего исследования. Например, набирающий обороты китайский проект постмодерна и его культурно-смысловые течения, которые разительно отличаются от европейского постмодерна, но пока изучены слабо. В настоящее время трудно предвидеть, как скажется на состоянии общества развитых стран система социального кредита, явно введенная в некоторых городах Китая [37], проекты которой есть и в других странах. Также непонятно, к каким последствиям приведет всплеск популяризации науки. Данное явление нельзя не приветствовать, однако форма подачи материала многими «популяризаторами» вызывает стойкое ощущение, что это лишь еще один вид шоу (а иногда и маркетинга).

Два основных локомотива постмодернизма в культуре и искусстве – использование чужих форм с искажением или отбрасыванием смысла оригинала и ироничная насмеш-

ка над всем. Для представителей русской постмодернистской литературы характерно и обилие тем, завязанных на насилии, сексуальных патологиях, индивидуализме и социал-дарвинизме. Массовая поп-культура – главный инструмент постмодернизма. Она десятилетиями муссирует одни и те же темы, а иногда и приемы, никак не изменяя сути. Меняется только качество изображения и спецэффектов. Постмодернистской повесткой пронизаны практически все юмористические шоу, и именно такая форма пропаганды отсутствия смысла оказывается наиболее эффективной, поскольку высмеивание лучше всего подходит для десакрализации. А именно «десакрализация всего» и является декларируемой конечной целью постмодернизма. Свежий пример осмеяния святой для миллионов людей темы – съемки Алексеем Красовским черной комедии о блокаде Ленинграда.

Если попытаться разобрать постмодернистское искусство на составляющие, то получим сочетание ироничной пародии и деконструкции. Пародия – жанр не новый и зародилась еще в античности. Выделять вторую составную часть постмодернизма (деконструкцию), как признак самостоятельного жанра, мы также считаем неверным, так как это всего лишь упрощение, низведение явления, выраженного словом до набора символов, отражающего внешнюю сторону явления. На эти два понятия накладывается перепроизводство в сфере искусства вследствие прихода в него большого числа людей, для которых оно лишь способ заработка или эпатажа. В то же время не все пародии, которыми живет постмодернистское искусство сегодня, плохи. Мы лишь хотим напомнить, что они – не оригинальны, а значит, не являются искусством в полном смысле этого слова.

Теперь перейдем к постмодернистскому обществу. Корни явления – те же, что и в культуре. В обществах, на которые все равняются (или пытаются всех равнять) – крайне высокий уровень жизни, который позволяет большинству населения не думать о хлебе насущном, а жить в свое удовольствие. Это расслабляет, способствует росту эгоизма и инфантильности. Называть такое общество постмодернистским, характеризуя тем самым исключительно нашу эпоху – неверно. Тогда надо признать, что первое постмодернистское общество – это Рим в эпоху, предшествующую его падению. Постмодернистским обществом исследователи считают европейское общество. Сравнительно недавно Давид Энгельс в своей книге «На пути в империю» приводит сравнение Европейского Союза и его кризисов с кризисами Римской Империи [38]. Вообще постмодернизм в обществе (в нынешнем его понимании) – это процесс обесценивания или переоценки ценностей. В этом плане наша эпоха не уникальна. Что действительно отличает нашу эпоху, так это скачок в сфере технологий манипуляции сознанием. Однако и он – лишь следствие прогресса в области информационных и социально-психологических наук, наложенное на древнее как мир желание одних повелевать другими.

Хотелось бы отметить некую «детскость» основных установок постмодернизма. Во-первых, это «запрет запретов», вседозволенность – просто мечта капризного ребенка. Во-вторых – принципы игры и удовольствия, призванные заменить призывы к читателю задуматься о той или иной проблеме, много ли детей предпочтет серьезную книгу игре? В-третьих, подростки очень любят насмешки, чем не всепроникающая ирония? Все это, как нам представляется, подтверждает тезис об инфантильности постмодернистского общества. В том же лежит корень такого проблемного явления, как «постмодернистская семья». Это семья, члены которой слабо связаны между собой, так как инфантильность

каждого отдельного человека не позволяет ему осознать ответственность за жизнь потомков, он не считает воспитание своей обязанностью и не видит необходимости длительных, стабильных отношений. Это выражается в увеличении количества неполных и бездетных семей. Причем это касается не только семейных, но и общественных отношений. Здесь же кроется корень процесса атомизации общества, превращения его в манипулируемую «одинокую толпу».

Подведем итоги. В чистом виде такого явления, как «постмодернизм в академической естественной науке» в настоящее время не существует. Вообще для данного общественного института характерен некоторый иммунитет к таким воздействиям, поскольку он концентрирует в себе людей со строгим, системным (а не игровым) мышлением. Однако его опосредованное влияние на научное сообщество – неизбежно. Мы видим его в умах тех, кто еще только вступает в это сообщество. Оно может сказаться на интенсивности и на результатах работы, на целеустремленности и желании отстаивать свою позицию. Оно изменяет место ученых в обществе и то, чем им предстоит заниматься в будущем. И это – в условиях, когда наука и сама меняется, превращаясь в более управляемую структуру, в часть сферы услуг. Но как мы писали ранее – этот процесс объективен.

Как несложно заметить, мы склонны к негативной оценке постмодернизма в его нынешнем виде, как основного мировоззренческого принципа. На наш взгляд, этому и последующим поколениям следует осознать бесперспективность борьбы с прошлым, равно как и перманентного иронизирования над ним. Новая эпоха требует новых критериев и ориентиров, построенных с учетом прошлых ошибок.

#### Список использованных источников :

1. Скоропанова И.С. Русская постмодернистская литература: учеб. пособие. 6-е изд. М.: Флинта Наука, 2007. 608 с.
2. Философия: Энциклопедический словарь / Под ред. А.А. Ивина. М.: Гардарики, 2004. 1072 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_philosophy/956/ПОСТМОДЕРНИЗМ](https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/956/ПОСТМОДЕРНИЗМ)
3. Постмодернизм для чайников – Антон Луценко // YouTube канал «Наука внутри нас», 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=Mim0czGfbaw> (Дата обращения 15.10.2018)
4. Рыков А.В. Постмодернизм как «радикальный консерватизм»: Проблема художественно-теоретического консерватизма и американская теория современного искусства 1960-1990-х гг. СПб.: Алетейя, 2007. 376 с. (Серия «Тела мысли»).
5. Kamper D., van Reijen W. Die Unvollendete Vernunft: Moderne versus Postmoderne. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1987. 572 s.
6. Ильин И.П. Постструктурализм. Деконструктивизм. Постмодернизм. М.: Интрада, 1996. 253 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://lib.ru/CULTURE/ILIN/poststrukt.txt\\_with-big-pictures.html#](http://lib.ru/CULTURE/ILIN/poststrukt.txt_with-big-pictures.html#) (Дата обращения 20.10.2018)
7. Барт Р. Семиология как приключение. «Писать» – непереходный глагол? // Arbor Mundi / Мировое древо. 1993. Вып. 2. С. 81–82.

8. Барт Р. Избранные работы: Семиотика: Поэтика: Пер. с франц. / Сост., общ. ред. и вступ. ст. Г.К. Косикова. М.: Прогресс, 1989. 616 с.
9. Фуко Мишель. Воля к истине: по ту сторону знания, власти и сексуальности. Работы разных лет: Пер. с франц. М.: Касталь, 1996. 448 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://royallib.com/read/fuko\\_mishel/chto\\_takoe\\_avtor.html#0](https://royallib.com/read/fuko_mishel/chto_takoe_avtor.html#0) (Дата обращения 25.11.2018)
10. Сенчин Р. Напрямик: сборник рассказов. М.: Изд-во «Э», 2016. 378 с.
11. Зыкова Г.Н. Постмодернистская культура и социальное познание // Соционауки. 2001. Вып. 4(25). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/postmodernistskaya-kultura-i-sotsialnoe-roznanie> (Дата обращения 20.10.2018)
12. Робинсон С. Жизнь коротка... 1982. [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.domino-books.narod.ru/lib/robinson\\_melancholy\\_elephants.htm](http://www.domino-books.narod.ru/lib/robinson_melancholy_elephants.htm) (Дата обращения 20.10.2018)
13. Культура времен Апокалипсиса / Под ред. А. Парфрея; [Пер. с англ. А. Ведюшкина и др.]. Екатеринбург: Ультра. Культура, 2004. 592 с.
14. Ерофеев Виктор. Русские цветы зла. М.: Подкова, 1997. С. 7–30.
15. Солженицын А.И. Игра на струнах пустоты. Ответное слово на присуждение литературной награды американского национального клуба искусств // Новый мир. 1993. № 4 (816). С. 3–6.
16. Кара-Мурза С.Г. Манипуляция сознанием. М.: Эксмо, 2005. 832 с.
17. Бордийяр Ж. Эстетика иллюзий, эстетика утраты иллюзий // В кн.: Дугин А. Элементы #9. Постмодерн. 2000. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.libfox.ru/195209-16-aleksandr-dugin-elementy-9-postmodern.html#book> (Дата обращения 15.10.2018)
18. Бордийяр Ж. Симулякры и симуляции (Simulacres et simulation): пер. с франц. А. Качалова. М.: Постум, 2015. 238 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://lit.lib.ru/k/kachalow\\_a/simulacres\\_et\\_simulation.shtml](http://lit.lib.ru/k/kachalow_a/simulacres_et_simulation.shtml)(Дата обращения 15.10.2018);
19. Гарифуллин Р. Постмодернизм в психологии. 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://psyfactor.org/lib/postmodern-06.htm#12> (Дата обращения 15.10.2018);
20. Шагалова Е.Н. Самый новейший толковый словарь русского языка XXI века. М.: АСТ: Астрель, 2011. 413 с.
21. Нападение на редакцию журнала Charlie Hebdo в Париже. Хроника событий // ТАСС. 07.01.2015. – [Электронный ресурс]. <https://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/1686805> (Дата обращения 15.11.2018)
22. Маркузе Г. Одномерный человек. М.: REFL-book, 1994. 368 с.
23. Степин В.С. Теоретическое знание. Структура и историческая эволюция. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 743 с.
24. Дебор Г. Общество спектакля. 1967. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.theanarchistlibrary.org/library/gi-debor-obschestvo-spektaklya.pdf> (Дата обращения 15.10.2018)
25. Дугин А.Г. Геополитика постмодерна. 2007. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.e-reading.club/book.php?book=20824> (Дата обращения 15.10.2018)
26. Куликов Д. Постмодерн убил авторитет, а без него воспитание детей невозможно // Regnum. 18.10.2018. – [Электронный ресурс]. – <https://regnum.ru/news/2502832.html> (Дата обращения 18.10.2018)
27. Дугин А.Г. Постмодерн? // В кн.: Дугин А.Г. Элементы #9. Постмодерн. 2000. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.libfox.ru/195209-16-aleksandr-dugin->

elementy-9-postmodern.html#book (Дата обращения 15.10.2018)

28. Гринь М.В. «Постдемократия» К. Крауча и кризис западного демократического проекта // *Общество и право*. 2014. № 3 (49). С. 268–272.

29. (Exclusive) Rescuing Boris. The secret story of how four U.S. advisers used polls, focus groups, negative ads and all other techniques of American campaigning to help Boris Yeltsin win // *Time*. 15.07.1996. P. 28–37.

30. Стёпин В.С. Научное познание и ценности техногенной цивилизации // *Вопросы философии*. 1989. № 10. С. 3–18.

31. Никифоров А.Л. Что такое «постнеклассическая наука»? // *Эпистемология и философия науки*. 2013. Т. 36. № 2. С. 59–64.

32. Фейерабенд П. Против метода. Очерк анархистской теории познания: пер. англ. А.Л. Никифорова. М.: АСТ: АСТ Москва: Хранитель, 2007. 413 с.

33. Тоффлер Э. Третья волна. М.: АСТ, 1999. 776 с.

34. Романов Н.А. Клиповая культура в современном медиапространстве // *Человек. Культура. Образование*. 2017. № 3 (25). С. 97–106.

35. Докука С.В. Клиповое мышление как феномен информационного общества // *Общественные науки и современность*. 2013. № 2. С. 169–176.

36. Руцкова В.С. Оценка постмодернизма в современной российской социогуманитарной науке // *Гуманитарный вектор (Проблемы истории философии)*. 2015. № 2 (42). С. 24–28.

37. Цифровая диктатура: как в Китае вводят систему социального рейтинга // РБК – 11.12.2016 <https://www.rbc.ru/business/11/12/2016/584953bb9a79477c8a7c08a7> (Дата обращения 15.11.2018);

38. Engels D. Auf dem Weg ins Imperium: Die Krise der Europäischen Union und der Untergang der Römischen Republik. Historische Parallelen. Berlin: Europa Verlag, 2017. 541 p.

#### References:

1. Skoropanova I.S. Russian postmodern literature. 6th Ed. Moscow: Flint Nauka Publ., 2007. 608 p. (in Russ.)

2. Philosophy: Encyclopedic dictionary / Ed. by A.A. Ivin. Moscow: Gardariki, 2004. 1072 p. (in Russ.) [Electronic resource]. – Access mode: [https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_philosophy/956/POSTMODERNISM](https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/956/POSTMODERNISM) (Access date: 10/15/2018)

3. Postmodernism for teapots – Anton Lutsenko. YouTube channel “Science within us”, 2018. (in Russ.) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=Mim0czGf6aw> (Access date 10/15/2018);

4. Rykov A.V. Postmodernism as “Radical Conservatism”: The Problem of artistic and theoretical conservatism and the American theory of modern art of the 1960-1990. Saint-Petersburg: Alteya Publ., 2007. 376 p. (Series "The body of thought") (in Russ.).

5. Kamper D., van Reijen W. Die Unvollendete Vernunft: Moderne versus Postmoderne. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1987. 572 s.

6. Ilyin I.P. Poststructuralism. Deconstruction. Postmodernism. Moscow: Intrada Publ., 1996. 253 p. (in Russ.) [Electronic resource]. Access mode: [http://lib.ru/CULTURE/ILIN/poststrukt.txt\\_with-big-pictures.html#](http://lib.ru/CULTURE/ILIN/poststrukt.txt_with-big-pictures.html#) (Access date 10/20/2018).

7. Bart R. Semiology as an adventure. Is “writing” an intransitive verb? *Arbor Mundi* /

Mirovoe Drevo (World Tree). 1993; 2: 81-82. (in Russ.).

8. Bart R. Selected works: Semiotics: Poetics: Transl. from French. Comp., general. ed. and entry article by G.K. Kosikov. M.: Progress Publ, 1989. 616 p. (in Russ.);

9. Foucault Michel. The will to truth: On the other side of knowledge, power and sexuality. Works of different years. Transl. from with French. Moscow, Castal Publ., 1996. 448 p. (in Russ.) [Electronic resource]. Access mode: [https://royallib.com/read/fuko\\_mishel/chto\\_takoe\\_avtor.html#0](https://royallib.com/read/fuko_mishel/chto_takoe_avtor.html#0) (Access date 11/25/2018).

10. Senchin R. Napryamik (Direct): storybook. Moscow: "E" Publ., 2016. 378 p. (in Russ.).

11. Zyкова G.N. Postmodern culture and social cognition. Sotsionauki (Sociotics). 2001; 4(25). (in Russ.) [Electronic resource]. – Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/v/postmodernistskaya-kultura-i-sotsialnoe-poznanie> (Access date 10/20/2018).

12. Robinson S. Life is short ... 1982. [Electronic resource] – Access mode: [http://www.domino-books.narod.ru/lib/robinson\\_melancholy\\_elephants.htm](http://www.domino-books.narod.ru/lib/robinson_melancholy_elephants.htm) (Access date 10/20/2018).

13. The culture of the times of the Apocalypse / Ed. by A. Parfrey; [Transl. from English A. Vedyushkin et al.]. Ekaterinburg: Ultra. Kultura Publ., 2004. 592 p. (in Russ.)

14. Erofeev Viktor. Russian flowers of evil. M.: Podkova Publ., 1997. P. 7-30. (in Russ.)

15. Solzhenitsyn A.I. Playing on the strings of emptiness. Response word to the award of the literary award of the American National Art Club. Novyy mir (New World), 1993; No. 4 (816): 3-6. (in Russ.)

16. Kara-Murza S.G. Manipulation of consciousness. Moscow: Eksmo Publ., 2005. 832 p. (in Russ.)

17. Baudrillard J. Aesthetics of illusions, aesthetics of the loss of illusions. In book: Dugin A. Elements # 9. Postmodern. 2000 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.libfox.ru/195209-16-aleksandr-dugin-elementy-9-postmodern.html#book> (Access date 10/15/2018).

18. Baudrillard J. Simulacres and Simulations (Simulacres et simulation): transl. from French by A. Kachalov. Moscow: Postum Publ., 2015. 238 p. (in Russ.) [Electronic resource]. – Access mode: [http://lit.lib.ru/k/kachalov\\_a/simulacres\\_et\\_simulation.shtml](http://lit.lib.ru/k/kachalov_a/simulacres_et_simulation.shtml) (Access date 10/15/2018).

19. Garifullin R. Postmodernism in Psychology. 2010 [Electronic resource]. – Access mode: <https://psyfactor.org/lib/postmodern-06.htm#12> (Access date 10/15/2018).

20. Shagalova E.N. The newest explanatory dictionary of the Russian language of the XXI century. Moscow: AST: Astrel Publ., 2011. 413 p. (in Russ.)

21. The attack on the editors of Charlie Hebdo in Paris. Chronicle of events. TASS. 07/01/2015 – [Electronic resource]. – <https://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/1686805> (Access date 11/15/2018).

22. Marcuse G. One-Dimensional Man. M.: REFL-book Publ., 1994. 368 p. (in Russ.)

23. Stepin V.S. Theoretical knowledge. Structure and historical evolution. Moscow: Progress-Traditsiya Publ., 2000. 743 p. (in Russ.)

24. Debord G. Performance Society. 1967. (in Russ.) – [Electronic resource]. – Access mode: <https://ru.theanarchistlibrary.org/library/gi-debor-obschestvo-spektaklya.pdf> (Access date 10/15/2018).

25. Dugin A.G. Postmodern geopolitics. 2007. (in Russ.) – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.e-reading.club/book.php?book=20824> (Access date 10/15/2018).

26. Kulikov D. Postmodern killed authority, and without it, raising children is impossible.

Regnum. 10/18/2018. (in Russ.) – [Electronic resource]. – <https://regnum.ru/news/2502832.html> (Access date 10/18/2018).

27. Dugin A.G. Postmodern? In book: Dugin A.G. Elements # 9. Postmodern. 2000. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.libfox.ru/195209-16-aleksandr-dugin-elementy-9-postmodern.html#book> (Access date 10/15/2018).

28. Grin' M.V. "Post-democracy" of K. Crouch and the crisis of the Western democratic project. *Obshchestvo i pravo* (Society and Law). 2014; No. 3 (49): 268-272. (In Russ.)

29. (Exclusive) Rescuing Boris. The secret story of how four U.S. advisers used polls, focus groups, negative ads and all other techniques of American campaigning to help Boris Yeltsin win. *Time*. 07/15/1996. P. 28-37.

30. Stepin V.S. Scientific knowledge and values of technological civilization. *Voprosy filosofii* (Questions of Philosophy). 1989: (10); 3-18. (in Russ.)

31. Nikiforov A.L. What is "post-non-classical science"? *Epistemologiya i filosofiya nauki* (Epistemology and Philosophy of Science). 2013; 36(2): 59-64. (in Russ.)

32. Feyerabend P. Against the method. Essay on the anarchist theory of knowledge; transl. from English by A.L. Nikiforov. Moscow: AST: AST Moscow: Khranitel', 2007. 413 p. (in Russ.)

33. Toffler E. The third wave. Moscow: ACT Publ., 1999. 776 p. (in Russ.)

34. Romanov N.A. Clip culture in modern media space. *Chelovek. Kul'tura. Obrazovaniye*. (Man. Culture. Education). 2017; 3(25): 97-106. (in Russ.)

35. Dokuka S.V. Clip thinking as a phenomenon of the information society *Obshchestvennyye nauki i sovremennost'* (Social Sciences and Modernity). 2013; (2): 169-176. (in Russ.)

36. Rutsikova V.S. Evaluation of postmodernism in modern Russian social science and humanities *Gumanitarnyy vektor* (Problemy istorii filosofii) (Humanitarian Vector (Problems of the History of Philosophy)). 2015; 2(42): 24-28. (in Russ.)

37. Digital dictatorship: how the social rating system is introduced in China. RBC. 12/11/2016. (in Russ.). <https://www.rbc.ru/business/11/12/2016/584953bb9a79477c8a7c08a7> (Access date 11/15/2018)

38. Engels D. Auf dem Weg ins Imperium: Die Krise der Europäischen Union und der Untergang der Römischen Republik. Historische Parallelen. Berlin: Europa Verlag, 2017. 541

*Об авторе:*

*Крижановский Илья Николаевич*, инженер, Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений (105118, Россия, Москва, ш. Энтузиастов, д. 38).

*About the author:*

*Илья N. Krizhanovskiy*, Engineer, State Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds (38, Shosse Entuziastov, Moscow 105118, Russia).

*Для цитирования:* Крижановский И.Н. Постмодернизм: шаг в «неточном направлении» // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 101–116. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-101-116

*For citation:* Krizhanovskiy I.N. Postmodernism: A step in an "inexact direction". *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 101-116. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-101-116

---

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № *ФС77-65315* от 12 апреля 2016 г.

Дата опубликования *3 декабря 2018 г.*

МИРЭА – Российский технологический университет  
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<http://rtj.mirea.ru>