



**URAL JOURNAL**  
**RADIO ENGINEERING**

[urj.urfu.ru](http://urj.urfu.ru)

## **Ural Radio Engineering Journal**

**2018, vol. 2, № 3**

## Ural Radio Engineering Journal

2018, vol. 2, № 3  
Scientific and Technical Journal

Established in 2017  
Published four times a year

The articles appear in Russian and English

International journal  
Issued in Russia

© Ural Federal University, 2018

Founded by Ural Federal University  
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
19, Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russia

---

### Editor in Chief

*Knyazev Sergey*, Ekaterinburg, Russia

### Editorial council

*Abramov Igor*, Minsk, Belarus

*Akhmetov Bakytzhan*, Almaty, Republic of Kazakhstan

*Akulinichev Yuri*, Tomsk, Russia

*Darovskikh Stanislav*, Chelyabinsk, Russia

*Dorosinskij Leonid*, Ekaterinburg, Russia

*Gimpilevich Yurij*, Sevastopol Russia

*Gusevskij Vladlen*, Moscow, Russia

*Isembergenov Nalik*, Almaty, Republic of Kazakhstan

*Ivanov Vyacheslav*, Ekaterinburg, Russia

*Klette Reinhard*, Auckland, New Zealand

*Kobernichenko Victor*, Ekaterinburg, Russia

*Noskov Vladislav*, Ekaterinburg, Russia

*Ochin Evgeny*, Szczecin, Poland

*Panchenko Boris*, Ekaterinburg, Russia

*Sazonov Vladimir*, Moscow, Russia

*Shabunin Sergey*, Ekaterinburg, Russia

*Vojtovich Nikolaj*, Chelyabinsk, Russia

## Уральский радиотехнический журнал

2018, том 2, № 3  
Научно-технический журнал

Журнал основан в 2017 г.  
Выходит четыре раза в год

Статьи приводятся на русском и английском

Международный журнал  
Издается в России

© Уральский федеральный университет, 2018

Учредитель — Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина  
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

### Главный редактор

*Князев Сергей Тихонович*, Екатеринбург, Россия

### Редакционный совет

*Абрамов Игорь Иванович*, Минск, Беларусь

*Акулиничев Юрий Павлович*, Томск, Россия

*Ахметов Бакытжан Сражатдинович*, Алматы, Республика Казахстан

*Войтович Николай Иванович*, Челябинск, Россия

*Гимпилевич Юрий Борисович*, Севастополь, Россия

*Гусевский Владлен Ильич*, Москва, Россия

*Даровских Станислав Никифорович*, Челябинск, Россия

*Доросинский Леонид Григорьевич*, Екатеринбург, Россия

*Иванов Вячеслав Элизбарович*, Екатеринбург, Россия

*Исембергенов Налик Турегалиевич*, Алматы, Республика Казахстан

*Клетте Рейнхард*, Окленд, Новая Зеландия

*Коберниченко Виктор Григорьевич*, Екатеринбург, Россия

*Носков Владислав Яковлевич*, Екатеринбург, Россия

*Очин Евгений*, Щецин, Польша

*Панченко Борис Алексеевич*, Екатеринбург, Россия

*Сазонов Владимир Васильевич*, Москва, Россия

*Шабунин Сергей Николаевич*, Екатеринбург, Россия

## CONTENTS

---

<i>Likhansky S. G., Alekseev S. B., Tarasenko A. M.</i> Influence of Bistatic Radar System Configuration on its Resolution.....	7
<hr/>	
<i>Ponomarev O. P.</i> Modeling of Mechanical Properties of a Parabolic Antenna with Composite Radome in ANSYS Software Environment .....	20
<hr/>	
<i>Musikhin V. I.</i> Polyspectral Processing in Adaptive Filtering .....	32
<hr/>	
<i>Belkov K.S.</i> Algorithms of Blind Separation of Signals Based on the Recurrent Neural Network .....	43
<hr/>	
Publication Requirements for Articles Submitted to “Ural Radio Engineering Journal” .....	59
<hr/>	
Publication Ethics .....	66
<hr/>	
Article Submission Guidelines .....	74

## СОДЕРЖАНИЕ

---

<i>Лиханский С. Г., Алексеев С. Б., Тарасенко А. М.</i> Влияние конфигурации радиолокационной бистатической системы на ее разрешающую способность.....	7
<hr/>	
<i>Пономарев О. П.</i> Моделирование механических свойств параболической антенны с композитным обтекателем в программной среде ANSYS.....	20
<hr/>	
<i>Мусихин В. И.</i> Применение полиспектральной обработки в адаптивной фильтрации.....	32
<hr/>	
<i>Белков К. С.</i> Анализ алгоритмов слепого разделения сигналов на основе рекуррентной нейронной сети.....	43
<hr/>	
Требования к статьям, публикуемым в журнале Ural Radio Engineering Journal.....	62
<hr/>	
Публикационная этика.....	69
<hr/>	
Правила оформления статьи.....	74



**URAL JOURNAL**  
RADIO ENGINEERING

## Влияние конфигурации радиолокационной бистатической системы на ее разрешающую способность

*С. Г. Лиханский\**, *С. Б. Алексеев*, *А. М. Тарасенко*

АО «Концерн «Вега», Москва, Россия

tatonika@inbox.ru

**Аннотация.** Представлены результаты имитационного моделирования, иллюстрирующие влияние законов движения самолетов-носителей РСА (активного и пассивного) относительно исследуемого участка поверхности Земли на разрешающую способность результирующей бистатической радиолокационной системы. Изложены методы расчета вторичных информационных массивов для синтеза изображения, включая семейство опорных функций, на основе первичной навигационной информации, представлены как формулы, так и результаты моделирования. Выявлены специфические черты бистатических обзоров общей конфигурации по сравнению с моностатическими. Проиллюстрирована процедура синтеза применительно к самолетной бистатике.

**Ключевые слова.** Преобразование Фурье, преобразование Лежандра, прямая свертка, бинарный ряд, бистатический обзор, радиолокатор с синтезированной апертурой, опорная функция.

## Influence of Bistatic Radar System Configuration on its Resolution

*Sergey G. Likhansky*, *Sanal B. Alekseev*, *Anna M. Tarasenko*

Joint-Stock Corporation “Vega”, Moscow, Russia

tatonika@inbox.ru

**Abstract.** The results of simulation modeling, which illustrate the influence of the laws of the carrier aircraft motion (active and passive) relating to investigated part of the Earth’s surface on the resulting bistatic radar system resolution, are presented in this article. Calculating methods of secondary information arrays for image synthesis, including assemblage support function, based on primary navigation information, are presented both as formulas and as simulation results. Specific features of the general configuration bistatic looks are revealed in comparison with monostatic ones. The procedure of synthesis in the context of the aircraft bistatic is presented.

**Keywords.** Fourier transform, Legendre transform, Taylor series, direct convolution, binary series, bistatic look, synthetic aperture radar, reference function.

## Введение

Большинство ранних моделей [1–4] синтеза радиолокационных изображений (РЛИ) разработано для бокового (слабо-скошенного) моностатического обзора, координат «дальность» и «азимут» (путь), разрешения  $\sim 5$  м, ЛЧМ-структуры радиоимпульса (Chirp-Scaling-Algorithm (CSA), SPECAN).

Рост популярности бистатической обработки и повышение требований к дешифрируемости РЛИ привели к необходимости получения изображений дециметрового разрешения при сложном относительном движении носителей с активным и пассивным РСА (синтез «с подсветкой»).

Сказанное инициировало поиск более точных (и быстрых) алгоритмов [5, 6], основанных на редукции оператора синтеза РЛИ очень точным (и очень медленным) алгоритмом Back Projection к оператору двумерного преобразования Фурье заменой переменных в частотной области, которая максимально обобщает преобразование Столта [2] и дает изображение сразу в горизонтальных координатах сцены. Указанная редукция дополнена итерационной процедурой до-фокусировки [5, 6].

В статье рассмотрена априорная обработка, предваряющая синтез. Она состоит в вычислении интервала синтеза, частоты повторения, кратности когерентного накопления [4] голограммы и массивов, определяющих опорные функции синтеза — по данным навигации и требуемому разрешению.

Первая цель статьи — исследование специфики бистатических обзоров по сравнению с моностатическими обзорами (эта специфика проявляется уже на стадии априорной обработки).

Вторая цель статьи — демонстрация работоспособности алгоритма синтеза [6] в самолетных бистатических обзорах с подсветкой сцены лучом активного РСА-1, формирование голограммы в пассивном РСА-2 с конфигурацией повышенной общности геометрии обзора и движения носителей.

## Исследование влияния геометрии обзора на разрешающую способность радиолокационной системы

Пусть мгновенные трехмерные векторы координат, скорости носителей РСА-1 и РСА-2 и их модули есть  $\vec{X}^{(k)}, \vec{V}^{(k)}; X^{(k)}, V^{(k)}; k = 1, 2$ , система координат (СК)  $\vec{y} \equiv (X, Y, H)$  евклидова и имеет начало на поверхности Земли, совпадающее с текущим центром сцены, и носители (самолеты) летят на постоянных высотах с постоянными векторами скорости (с любым углом между ними).



Тогда озаглавленная задача решается априорным оцениванием следующих величин:

1. Интервал максимального горизонтального разрешения ( $m$ ) в центре сцены через градиент  $\nabla R$  дальности {РСА-1– $\bar{0}$ –РСА-2} по горизонтальным координатам  $\bar{y} \equiv (X, Y)$ :

$$\begin{aligned} \delta_{\min} &= c / B \cdot |\nabla R|^{-1} \equiv c / B \cdot (r_1^2 + r_2^2)^{-1/2} \equiv \\ &\equiv c / B \cdot \left( (X_1^{(1)} / X^{(1)})^2 + (X_2^{(2)} / X^{(2)})^2 \right)^{-1/2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f$  — несущая частота,  $B$  — ширина полосы частот рабочего диапазона,  $c$  — скорость света.

2. Временной интервал ( $\tau$ ) синтеза, реализующего разрешение (1) в центре сцены через градиент  $\nabla \delta f$  частоты Доплера по координатам  $\bar{y} \equiv (X, Y)$  и угол  $\vartheta$  между градиентами  $\nabla \delta f, \nabla R$ :

$$T_0 \approx \delta_{\min}^{-1} \cdot |\nabla \delta f|^{-1} \cdot |\sin \vartheta|^{-1} \equiv \delta_{\min}^{-1} \cdot (f_1^2 + f_2^2)^{-1/2} \cdot |\sin \vartheta|^{-1}, \quad (2)$$

где  $f_k \equiv f / c \cdot \begin{pmatrix} V_k^{(1)} / X^{(1)} + V_k^{(2)} / X^{(2)} - X_k^{(1)} \cdot (\bar{X}^{(1)}, \bar{V}^{(1)}) / (X^{(1)})^3 - \\ - X_k^{(2)} \cdot (\bar{X}^{(2)}, \bar{V}^{(2)}) / (X^{(2)})^3 \end{pmatrix}$ .

3. Графическое иллюстрирование зависимости разрешающей способности бистатической пары от положения цели на поверхности Земли для конфигурации бистатического обзора общего вида.

Траектории носителей: РСА-1 — желтая и РСА-2 — голубая, текущие положения — красная и синяя точки.

Угол между траекториями  $90^\circ$ , скорости носителей 280 м/с, их высоты 3,5 и 4,5 км; сдвиг от начального положения 5 с.

На рис. 1, *а* показаны линии одинаковой дальности по лучу (белые) и линии одинакового сдвига Доплера по лучу (цветные — цвета отражают величину сдвига частоты). Диапазон —  $S$ . На рис. 1, *б* и *в* показана яркостью величина, обратная интервалу разрешения ( $d_{\min} \approx 35$  см) и синтеза ( $T_{0, \min} \approx 4,8$  с) соответственно.

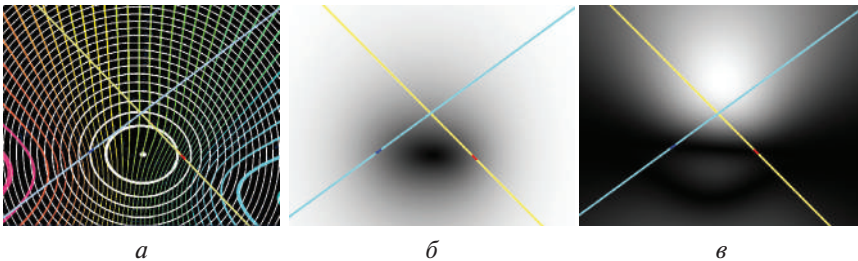


Рис. 1. Зависимость разрешающей способности от положения цели  
Fig. 1. The dependence between spatial resolution and position of target

## Вычисление данных для синтеза по данным навигации и требуемому разрешению

Пусть закон движения носителей, центр освещенной лучом РСА-1 сцены и СК обзора (с началом в центре сцены) фиксированы, первичные априорные оценки (формулы (1), (2)) получены.

Тогда озаглавленная задача решается следующей последовательностью этапов.

1. Компенсируем полную линейную часть закона миграции для центра сцены и момента  $t = 0$ :

$$R(\bar{y}; t) = R(\bar{y}; t) - \sum_{k=1}^2 (\bar{X}^{(k)}, \bar{V}^{(k)}) / X^{(k)} \cdot t - R(\bar{0}, 0) \equiv R(\bar{y}; t) - V_{\text{rad},0} \cdot t - R_0, \quad (3)$$

где  $R(\bar{y}; t) \equiv \sum_{k=1}^2 |\bar{X}^{(k)} - \bar{y} + \bar{V}^{(k)} \cdot t|$  — исходный закон миграции,  $V_{\text{rad},0}$  — относительная радиальная скорость сближения-удаления РСА-1 и РСА-2 по лучу {РСА-1– $\bar{0}$ –РСА-2} в момент  $t = 0$ .

Отвечающая редуцированному закону (3) центрированная радиальная скорость имеет вид:

$$v_{\text{rad}}(\bar{y}; t) = \sum_{k=1}^2 (\bar{X}^{(k)} - \bar{y} + \bar{V}^{(k)} \cdot t, \bar{V}^{(k)}) / |\bar{X}^{(k)} - \bar{y} + \bar{V}^{(k)} \cdot t| - \sum_{k=1}^2 (\bar{X}^{(k)}, \bar{V}^{(k)}) / X^{(k)}. \quad (4)$$

2. Получим формулы обратного геокодирования (IG — Inverse Geocoding), отображающие каждую точку  $\bar{y} \equiv (X, Y)$  сцены в стационарную точку  $\bar{x} \equiv IG(\bar{y}) \equiv (t(\bar{y}), R(t(\bar{y})))^T$  время-дальность отвечающего  $\bar{y}$  закона миграции (3), то есть время-дальность в момент  $t = t(\bar{y})$  обнуления радиальной скорости. (При сверточном синтезе отклик на цель в точке  $\bar{y}$  возникает в точке  $\bar{x} = IG(\bar{y})$ .)

Вычислим (методом Ньютона) время обнуления функции (4) для каждой точки сцены из «5-набора»  $\{\bar{y}_1 \equiv (\varepsilon \ 0), \{\bar{y}_2 \equiv (0 \ \varepsilon), \{\bar{y}_{11} \equiv (E \ 0), \bar{y}_{22} \equiv (0 \ E), \bar{y}_{12} \equiv (E \ E), \varepsilon, E (м) \sim 10^{-6}$  и  $\sim 10^{-3}$  от размера сцены. По полученным временам  $\{t_k; t_{mn}\}$  и дальностям  $\{R_k; R_{mn}\}$  ( $1 \leq k, m, n \leq 2$ ), которые отвечают временам согласно (3), восстановим закон IG во втором порядке точности

$$\bar{x} \equiv (t, R)^T : \approx X \cdot \bar{\mu}_1 + Y \cdot \bar{\mu}_2 + X^2 \cdot \bar{\mu}_{11} + XY \cdot \bar{\mu}_{12} + Y^2 \cdot \bar{\mu}_{22} \equiv \bar{M} \cdot \bar{y} + O(y^2), \quad (5)$$

оценивая векторы-коэффициенты через IG-образ «5-набора» (см. выше) в три шага (как описано):

- а)  $\bar{\mu}_k \approx \bar{x}_k / \varepsilon$ ;
- б)  $\bar{\mu}_{kk} \approx \bar{x}_{kk} / E^2 - \bar{\mu}_k / E$  ( $k = 1, 2$ );
- в)  $\bar{\mu}_{12} \approx \bar{x}_{12} / E^2 - (\bar{\mu}_1 + \bar{\mu}_2) / E - (\bar{\mu}_{11} + \bar{\mu}_{22})$ .

3. Оценим путевое разрешение  $\delta_x$  (м) по заданному горизонтальному разрешению  $\delta \geq \delta_{\min}$ .

Сечение-круг  $\bar{y}^T \bar{y} \leq \delta^2 \Leftrightarrow X^2 + Y^2 \leq \delta^2$  отклика разрешения  $\delta$  из координат сцены отобразим линейной частью (5)  $\bar{x} := \bar{M} \cdot \bar{y}$  в область время-дальность:  $\bar{y}^T \bar{y} \leq \delta^2 \Leftrightarrow \bar{x}^T \bar{M}^{-1, T} \bar{M}^{-1} \bar{x} \leq \delta^2$ , а затем, переходя от времени к пути РСА-2  $L \equiv t \cdot V_2$ , получим эллипсоид в области путь-дальность РСА-2:

$$h_{11} \cdot L^2 + 2h_{12} \cdot L \cdot R + h_{22} \cdot R^2 \leq \delta^2, \quad (6)$$

где  $h_{11} \equiv (\mu_{22}^2 + \mu_{21}^2) / V_2^2$ ,  $h_{22} \equiv \mu_{11}^2 + \mu_{12}^2$ ,  $h_{12} \equiv h_{21} \equiv -(\mu_{11} \mu_{21} + \mu_{22} \mu_{12}) / V_2$ ;

$$\bar{M} \equiv (\mu_{ij}) \equiv (5) \equiv (\bar{\mu}_1 \quad \bar{\mu}_2).$$

За интервал путевого разрешения (м) принимаем малую полуось эллипсоида (6) в области путь-дальность, деленную на корень из 2 (дабы повороты спектра не нарушали теорему Котельникова):

$$\delta_x \approx \delta \cdot \left( (h_{11} + h_{22}) + \left( (h_{11} - h_{22})^2 + 4h_{12}^2 \right)^{1/2} \right)^{-1/2}. \quad (7)$$

4. Апостериорно уточним интервал синтеза  $T$  (с), ранее грубо оцененный по формуле (2).

Интервал должен быть таким, чтобы вариация частоты Доплера на нем относительно центра сцены, сложенная с доплеровской шириной луча, равнялась частоте  $F_r = V_2 / \delta_x$  дискретизации сигнала по пути РСА-2 (частоте повторения РСА-1) для интервала путевого разрешения из формулы (7).

Интервал синтеза строим симметрично относительно нуля в радиально-скоростной области.

Верхнюю оценку доплеровской ширины луча РСА-2 получаем максимизацией по  $t$  (на интервале РЛ видимости) функции времени, выражаемой через градиент частоты Доплера в центре сцены при текущем положении носителей и радиус-вектор носителя РСА-2 относительно центра сцены:

$$\Delta \delta f_{\text{Ray}} \approx 2\lambda / D \cdot \max_t \left\{ \left| \bar{\nabla} \delta f(t) \right| \cdot X^{(2)}(t) / \left| \sin \left\langle \bar{\nabla} \delta f(t); \bar{X}^{(2)}(t) \right\rangle \right| \right\}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  — длина волны,  $D \times D$  — раскрыв антенны РСА-2.

Задаваясь в качестве нулевой итерации парой значений  $t_0^{(\pm)} := \pm 0,5 \cdot T_0$ , решаем (методом Ньютона) пару (для двух знаков  $\pm$ ) уравнений относительно пары моментов времени  $t^{(\pm)}$ :

$$v_{\text{rad}}(\bar{0}; t^{(\pm)}) = \pm 0,5 \cdot (F_r - \Delta \delta f_{\text{Ray}}) \cdot c / f \equiv \pm 0,5 \cdot (V_2 / \delta_x - \Delta \delta f_{\text{Ray}}) \cdot \lambda. \quad (9)$$

По итогам решения (9), интервал синтеза:  $[t^{(-)}, t^{(+)}]$ ,  $t^{(-)} < 0, t^{(+)} > 0$ , его длина (с):  $T \approx t^{(+)} - t^{(-)}$ , путевой размер ЦРГ:  $N_x = \text{Pow}(2, [\log_2(T \cdot F_r)] + 1)$  (база добита до степени 2).

Частоту квантования АЦП по дальности выбираем  $F_q := \max\{c/\delta_x, 1, 2 \cdot B\}$ , тогда размер ЦРГ по дальности:  $N_r = \text{Pow}(2, [\log_2(\max\{R(t^{(-)}), R(t^{(+)})\} \cdot F_q)] + 1)$  (база добита до степени 2).

5. Вычисляем кратности когерентного накопления полной голограммы по пути и по дальности.

Верхняя оценка глубины сцены по дальности {PCA-1 –  $\bar{y}$  – PCA-2} получается аналогично (8):

$$\Delta R_{\text{Ray}} \approx 2\lambda / D \cdot \max_r \{ |\bar{V}R(t)| \cdot X^{(2)}(t) / |\sin \langle \bar{V}R(t); \bar{X}^{(2)}(t) \rangle| \}. \quad (10)$$

С учетом (8), (10) кратности когерентного накопления голограммы по пути и дальности равны:

$$K_x = \text{Pow}(2, [\log_2(1 + F_r / \Delta \delta f_{\text{Ray}})] + 1),$$

$$K_r = \text{Pow}(2, [\max\{R(t^{(-)}), R(t^{(+)})\} / \Delta R_{\text{Ray}}] + 1).$$

Размеры когерентно-накопленной (свернутой в тор с самосуммированием) ЦРГ будут такими:

$$N_x = N_x / K_x, \quad N_r = N_r / K_r. \quad (11)$$

Свойства когерентного накопления изучены в статье [4]. В частности, при переходе в спектральную область когерентное накопление переходит в прореживание той же самой кратности [4].

Синтез РЛИ ведем по когерентно-накопленной ЦРГ размеров (11) по пути-дальности.

6. Вычисляем преобразования Лежандра закона миграции дальности (в виде отрезка ряда Тейлора по радиальной скорости) и его вариаций до второй степени по локальным координатам сцены.

Задачу решаем БПФ-методом с выходом в комплексную область значений скорости и времени.

Этап 1. Разложим в ряд Тейлора обратную к функции (4) функцию времени от централизованной радиальной скорости  $t = t(\bar{y}; v_{\text{rad}})$ ; точку  $\bar{y}$  сцены считаем переменным параметром, которому последовательно придаем каждое из шести значений.

Решим относительно  $t$  уравнение  $v_{\text{rad},m} = v_{\text{rad},0}(\bar{y}) + a_{\text{rad},0}(\bar{y}) \cdot t + o_2(\bar{y}, t)$  для каждой точки сцены из введенного «6-набора». В правой части уравнения  $v_{\text{rad},0}(\bar{y})$ ,  $a_{\text{rad},0}(\bar{y})$  — радиальные централизованные скорость и ускорение в момент  $t = 0$ ,  $o_2(\bar{y}, t)$  — сумма членов степени выше первой по времени формулы (4), в левой части — элемент мас-

сива  $v_{rad,m} \equiv 0,5V\omega_M^m \equiv 0,5V \exp(j2\pi m / M)$ ,  $m=0, \dots, M-1$  размера  $M = \text{Pow}(2, 11 \dots 12)$ , скоростная константа  $V \equiv \min\{v_{rad}(\bar{0}, t^{(\pm)})\}$ .

Для решения указанного уравнения запустим итерационную процедуру со счетчиком  $i$ .

Нулевая итерация  $i := 0$  — массив  $M$  комплексных чисел, считае-  
мых формулой:

$$t_0(\bar{y}; m) := (0,5V\omega_M^m - v_{rad,0}(\bar{y})) / a_{rad,0}(\bar{y}).$$

Шаг процедуры  $i := i + 1$  пересчитывает массив  $M$  комплексных чисел по формуле:

$$t_{i+1}(\bar{y}; m) := t_i(\bar{y}; m) + t_0(\bar{y}; m) - o_2(\bar{y}, t_i(\bar{y}; m)) / a_{rad,0}(\bar{y}). \quad (12)$$

Выходной массив (12)  $\tau(\bar{y}; m) \equiv t_{i+1}(\bar{y}; m)$ ,  $m=0, 1, \dots, M-1$ ;  $|t_{i+1} - t_{ii}| \leq 2^{-13}$  подвергнем нешифтованному БПФ на базе  $M$ , выход БПФ нормируем:  $\tau_{\text{FFT}}(\bar{y}; m) := \tau_{\text{FFT}}(\bar{y}; m) / \sqrt{M} \cdot (2/V)^m$ , получая коэффициенты Тейлора искомой обратной функции; степень усекаем  $M \approx \text{Pow}(2, 5 \dots 6)$ :

$$t = t(\bar{y}; v_{rad}) \approx \sum_{m=0}^{M-1} \tau_{\text{FFT}}(\bar{y}; m) \cdot v_{rad}^m. \quad (13)$$

Этап 2. Разложим в ряд Тейлора по централизованной радиальной скорости преобразование Лежандра и его вариации по координатам сцены.

Преобразование Лежандра (LT — Legendre Transform) закона миграции (3) имеет вид [3, 5, 6]:

$$L(\bar{y}; v_{rad}) \equiv t(\bar{y}; v_{rad}) \cdot v_{rad} - R(\bar{y}; t(\bar{y}; v_{rad})), \text{ где } t(\bar{y}; v_{rad}) \text{ — разложе-}$$

ние из формулы (13).

Вычисляя LT в точках  $v_{rad,l} \equiv 0,5V\omega_L^l \equiv 0,5V \exp(j2\pi l / L)$ ,  $l=0, \dots, L-1$ , с использованием (9), получим массив  $h(\bar{y}; l) \equiv L(\bar{y}; 0,5V\omega_L^l)$ ,  $l=0, \dots, L-1$ . Подвергнем его нешифтованному БПФ на базе  $L \approx M$ , выход БПФ нормируем:  $h_{\text{FFT}}(\bar{y}; l) := h_{\text{FFT}}(\bar{y}; l) / \sqrt{L} \cdot (2/V)^l$ , получая коэффициенты ряда Тейлора LT; степень усекаем: сверху  $L \approx M$ , снизу 2 — обеспечение подвижности отклика:

$$L(\bar{y}; v_{rad}) \approx \sum_{l=2}^{L-1} \{ h_{\text{FFT}}(\bar{y}; l) \approx c_0^{(l)} + c_1^{(l)} X + c_2^{(l)} Y + c_{11}^{(l)} X^2 + c_{12}^{(l)} XY + c_{22}^{(l)} Y^2 \} \cdot v_{rad}^l \quad (14)$$

Оценим для каждого  $l$ -коэффициента-функции ряда (14) коэффициенты-константы  $c_i^{(l)}$ ,  $c_{jk}^{(l)}$ :

$$\text{а) } c_0^{(l)} \approx h_{\text{FFT}}(\bar{0}; l); c_k^{(l)} \approx (h_{\text{FFT}}(\bar{y}_k; l) - c_0^{(l)}) / \varepsilon;$$

$$\text{б) } c_{kk}^{(l)} \approx h_{\text{FFT}}(\bar{y}_{kk}; l) / E^2 - c_k^{(l)} / E - c_0^{(l)} / E^2 (k=1, 2);$$

в)  $c_{12}^{(l)} \approx h_{\text{FFT}}(\bar{y}_{12}; l) / E^2 - (c_{11}^{(l)} + c_{22}^{(l)}) - (c_1^{(l)} + c_2^{(l)}) / E - c_0^{(l)} / E^2$  — в три шага (как описано).

7. Переведем преобразование Лежандра в спектральную область и получим наборы коэффициентов, определяющих фазу спектральной опоры синтеза и ее вариаций по сцене до второй степени.

Нормируем коэффициенты-константы (14) под переход из скоростного масштаба в масштаб номеров  $p, q$  отсчетов спектра и переход от баз дальности  $N_r$  и азимута  $N_x$  к базе  $K$  РЛИ сцены:

$$\begin{aligned} a_k^{(l)} &:= S_l \cdot c_k^{(l)}, \quad 0 \leq k \leq 2; \quad a_{ij}^{(l)} := S_l \cdot c_{ij}^{(l)}, \quad 1 \leq i, j \leq 2; \\ S_l &\equiv \{def\} \equiv c^{l-1} \cdot KN_r^{l-1} / N_x^l \cdot F_r^l / F_q^{l-1}. \end{aligned} \quad (15)$$

Несущую частоту  $f$  переведем в масштаб номеров дальностных отсчетов, координаты сцены переведем (с шагом (м)  $s \leq \delta$ ) из (м) в масштаб номеров отсчетов РЛИ размера  $K \approx \max\{N_x, N_r\}$ :

$$Q := f \cdot N_q / F_q; \quad x := X / s, \quad y := Y / s. \quad (16)$$

8. Переведем закон обратного геокодирования из области время-дальность и области сдвигов по сцене в область безразмерных номеров отсчетов и по пути, и по дальности, и по массиву сцены.

Берем за основу формулу (5) и выполняем некоторые масштабирования на входе (13) и выходе:

$$\begin{aligned} (x(x, y) \quad r(x, y))^T &:= (\mu_{ij})(x \quad y)^T + \\ &+ x^2 \cdot (\eta_{11}^1 \quad \eta_{11}^2)^T + xy \cdot (\eta_{12}^1 \quad \eta_{12}^2)^T + y^2 \cdot (\eta_{22}^1 \quad \eta_{22}^2)^T. \end{aligned} \quad (18)$$

Связь коэффициентов нормированной (18), исходной (5) формул IG такова:

$$\mu_{1k} \equiv \mu_{1k} / s \cdot F_r; \quad \eta_{ij}^1 \equiv \eta_{ij}^1 / s \cdot F_r; \quad \mu_{2k} \equiv \mu_{2k} / s \cdot F_q / c; \quad \eta_{ij}^2 \equiv \eta_{ij}^2 / s \cdot F_q / c \quad (19) \quad (1 \leq i, j, k \leq 2)$$

Закон IG (18) в лице констант (19) и выходных номеров отсчетов РЛИ (16) явно фигурирует в формуле интегрального оператора построения массива РЛИ по массиву спектра ЦРГ  $F(p, q) \rightarrow I(x, y)$ , приведенной ниже, а именно — в фазе первой Фурье-экспоненты (не в фазе опор):

$$\begin{aligned} I(x, y) &\approx \iint dpdq \cdot F(p, q) \cdot \exp(j \cdot (2\pi / N_x \cdot p \cdot x(x, y) + 2\pi / N_r \cdot q \cdot r(x, y))) \times \\ &\times \exp(j2\pi / K \cdot \sum_{l=2}^{L-1} (a_0^{(l)} + a_1^{(l)}x + a_2^{(l)}y + a_{11}^{(l)}x^2 + a_{12}^{(l)}xy + a_{22}^{(l)}y^2) \cdot p^l / (Q + q)^{l-1}). \end{aligned} \quad (20)$$

В фазе опор синтеза (вторая экспонента (20)) фигурируют константы и переменные из (15), (16).

Итак, все необходимые для синтеза РЛИ в горизонтальных координатах сцены массивы констант построены и фигурируют в формуле синтеза (20) — тем самым априорная обработка завершена.

### Моделирование синтеза РЛИ в бистатистическом обзоре общего вида и его иллюстрирование

Дадим графические иллюстрации ряда промежуточных и конечных результатов при синтезе в самолетном бистатистическом обзоре общего вида алгоритмом [6], далеко обобщающим Омега-КА [2].

Рис. 2 в целом иллюстрирует, как GST искаженную координатную сетку (рис. 2, а) превращает в строго прямоугольную сетку с равными шагами по преобразованным координатам  $w, z$  в спектральной области:  $w \equiv w_1(p, q)$ ,  $z \equiv w_2(p, q)$ , тем самым иллюстрируя правильность работы GST.

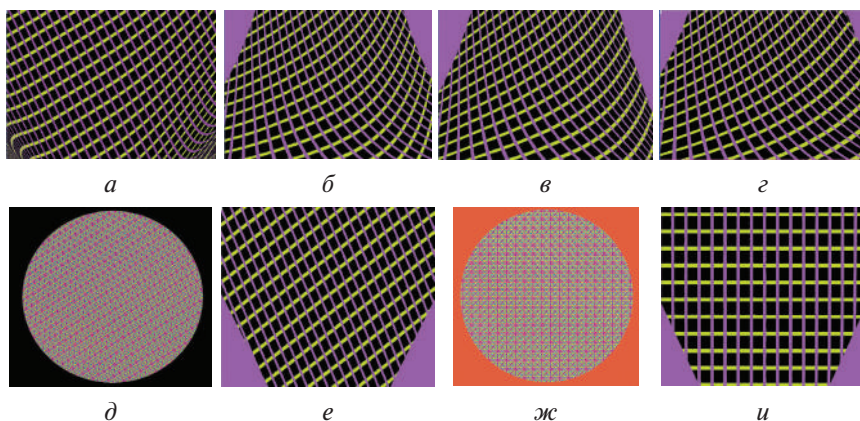


Рис. 2. Иллюстрация основных этапов работы обобщенного преобразования Столта (Generalized Stolt Transform — GST [5, 6])

Fig. 2 Illustration of the Generalized Stolt Transform (GST) main steps

Координаты  $w, z$  двойственны по Фурье отсчетам  $x, y$  сцены [6], и в них оператор (20) принимает вид Обратного преобразования Фурье от спектра ЦРГ с компенсированной центральной фазой:  $f(p, q) \equiv F(p, q) \cdot \exp\left(j2\pi / K \cdot a_0^{(l)} \cdot p^l / (Q + q)^{l-1}\right)$ , если пренебречь вторыми степенями  $x, y$ .

На рис. 2, а — спектральная координатная сетка, задаваемая функциями  $w_k(p, q) \equiv \left(2\pi / N_x \cdot \mu_{k1} \cdot p + 2\pi / N_r \cdot \mu_{k2} \cdot q\right) + 2\pi / K \cdot \sum_{l=2}^{L-1} a_k^{(l)} \cdot p^l / (Q + q)^{l-1}$ ;

$k=1, 2$  —  $p, q$ -коэффициентами при координатных отсчетах  $x, y$  в первой степени в фазе полной экспоненты (20).

Рис. 2, б-г и е иллюстрируют подробно описанные в [5, 6] шаги 1–4 GST (одномерные масштабирования), приводящие исходную искривленную сетку (рис. 2, а) к аффинно-искаженной, но выпрямленной сетке (рис. 2, е). Это переход от исходных отсчетов  $p, q$  к спектральным координатам  $W, Z$ , двойственным по Фурье путевым координатам  $x, r$ .

Рис. 2, и иллюстрирует финальный шаг GST [6] — снятие аффинного искажения путем линейного преобразования  $W, Z \rightarrow w, z$  к координатам, двойственным горизонтальным отсчетам сцены, задаваемого матрицей обратного геокодирования из линейного слагаемого формулы (5).

Рис. 2, д, ж — круговые вырезки спектра на этапах GST с рис. 2 е, и.

Итерационная процедура до-фокусировки [6] с целью компенсации вторых вариаций фазы опор здесь не иллюстрирована.

На рис. 3, а видно аффинное искажение картинки, на рис. 3, б оно отсутствует.

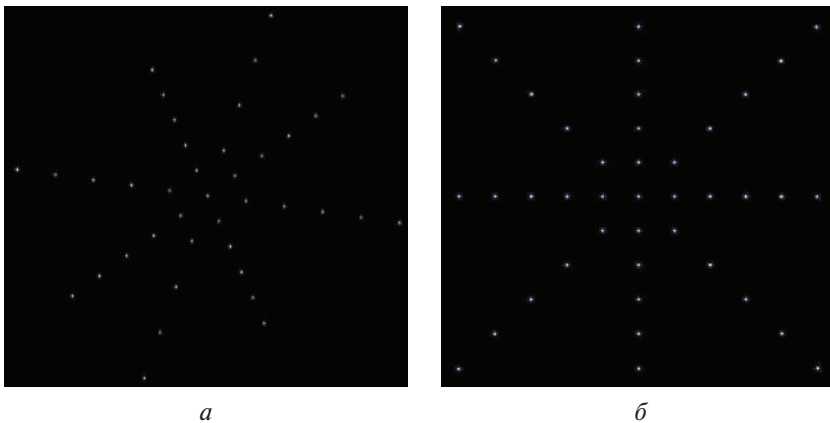


Рис. 3. Амплитудные РЛИ модели 41 точки, полученные в путевых координатах (а) и в горизонтальных координатах сцены (б)

Fig. 3. The amplitude radar image of 41 points models acquired in the waypoints (a) and the horizontal coordinate (b) of the stage

Рис. 3, а, б получены ОБПФ из вырезок спектра рис. 2, д, ж.

**Параметры модели.** РСА-1 и РСА-2 летят со скоростями 220 и 250 м/с под углом  $75^\circ$  на высотах 4 и 3 км, начальные положения — в точке пересечения горизонтальных проекций траекторий, сцена расположена под траекторией пассивного РСА-2 (в надире) на 7 км от начального положения РСА-2. Рабочий диапазон  $S$ , ширина полосы 1 ГГц. Рельефом пренебрегаем (равнина). Число целей — 41, 4 луча из ря-



дов целей под  $45^\circ$  между соседними лучами, шаг между целями 15 м.

(В моностатике рассмотренный здесь синтез РЛИ при угле скоса  $\pm 90^\circ$  (надир) невозможен.)

**Разрешение РЛИ.** В путевых координатах — 18 см, в горизонтальных координатах — 27 см.

### Заключение

Имитационное моделирование синтеза в бистатических обзорах выявило особенности, резко контрастирующие с моностатикой: например, возможность синтезировать РЛИ целей, находящихся под траекторией носителя пассивного РСА-2, то есть при угле скоса  $\pm 90^\circ$ , а также целей в надире.

Также выявлена сильная зависимость разрешающей способности бистатической пары от положения цели на поверхности Земли и наличие на Земле вырожденных точек и кривых, в окрестности которых синтез проблематичен даже при боковой геометрии обзора.

Алгоритм синтеза [6], ранее разработанный для моностатики и космоса, доказал пригодность для получения в бистатическом самолётном обзоре общего вида РЛИ высокого разрешения и качества для невырожденных сцен, не выходящих за пределы видимости на расчётном интервале синтеза.

Выявлена типичность эквивалентно-сильно-скошенного обзора (со скосом  $\sim 30\text{--}45^\circ$ ). Однако, поскольку РЛИ строим в горизонтальных прямоугольных координатах по вырезанному из спектра круглому куску должного размера, а интервал синтеза взят с должным запасом, не происходит характерных для сильно скошенных обзоров искажения координатной сетки или деформации отклика.

Выявлена невозможность полноценной адаптации алгоритмов CSA и SPECAN к бистатике.

### Литература/References

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба [и др.]. М. : Радиотехника, 2010.
2. Verba V. S., Neronskij L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* [Space-borne Earth Surveillance Radar Systems]. Radiotekhnika, 2010. (In Russian)
3. Mittermayer J., Moreira A., Loffeld O. High Precision Processing of Spotlight SAR Data Using the Extended Chirp Scaling Algorithm. *EU-SAR'98*, pp. 561–564, Friedrichshafen, Germany, May, 1998.
4. Cumming I. G., Wong F. H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation*. ArtechHouse, Boston & London, 1992.
4. Лиханский С. Г. Модифицированный метод скользящего окна как способ компенсации стробэффекта и одновременно повышения

производительности сверточных алгоритмов синтеза в прожекторном режиме // Наукоемкие технологии. 2006. № 10.

Lihanskij S. G. Modificirovannyj metod skol'zyashchego okna kak sposob kompensacii strobeffekta i odnovremenno povysheniya proizvoditel'nosti svertochnyh algoritmov sinteza v prozhektornom rezhime [Modified sliding window method as the way of stroboscopic-effect compensation and simultaneously improvement productivity of convolution synthesizing algorithms in Spotlight Mode]. *Naukoemkie tekhnologii*, 2006, № 10. (In Russian)

5. Лиханский С. Г. Модифицированный алгоритм Omega-KA синтеза радиолокационных изображений повышенной точности в прожекторном режиме в космических РСА и его баллистическое обеспечение // Труды международной конференции по научно-техническим проблемам землеобзора, дозора и управления и комплексов с беспилотными летательными аппаратами. М. : ОАО «Концерн «Вега», 2013.

Lihanskij S. G. Modificirovannyj algoritm Omega-KA sinteza radiolokacionnyh izobrazhenij povyshennoj tochnosti v prozhektornom rezhime v kosmicheskikh RSA i ego ballisticheskoe obespechenie [Modified algorithm Omega-KA for high-precision radar image synthesizing in Spotlight Mode in space-based SAR and it's ballistic support]. *Trudy mezhdunarodnoj konferencii po nauchno-tekhnicheskim problemam zemleobzora, dozora i upravleniya i kompleksov s bespilotnymi le-tatel'nymi apparatami* [The Proceedings of the International Conference devoted to scientific and technical problems of Earth Surveillance, patrol and control of complexes of pilotless flying apparatuses]. Moscow, Konzern "Vega", 2013. (In Russian)

6. Лиханский С. Г. Синтез геокодированного изображения высокого разрешения с учетом полного набора искажающих факторов в прожекторном режиме в РСА воздушного и космического базирования // Труды юбилейной научно-технической конференции ОАО «Концерн «Вега». М., 2014.

Lihanskij S. G. Sintez geokodirovaniya izobrazheniya vysokogo razresheniya s uchetom polnogo nabora iskazhayushchikh faktorov v prozhektornom rezhime RSA vozdušnogo i kos-micheskogo bazirovaniya [High-resolution image geocoding synthesis with full set of distorting factors in the search mode of space-based and airborne SAR]. *Trudy yubileynoy nauchno-tekhnicheskoy konftrentsii*. Moscow, Konzern "Vega", 2014. (In Russian)

### Информация об авторах

**Алексеев Санал Баатрович** — инженер второй категории АО «Концерн «Вега». Контакты: Alex90\_sb@mail.ru. Москва, Россия.

**Лиханский Сергей Германович** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Концерн «Вега». Контакты: tatonika@inbox.ru. Москва, Россия.

**Тарасенко Анна Максимовна** — ведущий инженер АО «Концерн «Вега». Контакты: asianna@list.ru. Москва, Россия.

### Information about authors

**Alekseev Sanal Baatrovich** — Engineer, Joint-Stock Corporation “Vega”.  
E-mail: Alex90\_sb@mail.ru. Moscow, Russia.

**Likhansky Sergey Germanovich** — Ph. D. in Engineering Science, Senior Research Scientist, Joint-Stock Corporation “Vega”. E-mail: tatonika@inbox.ru. Moscow, Russia.

**Tarassenko Anna Maksimovna** — Senior Research Scientist, Joint-Stock Corporation “Vega”. E-mail: asianna@list.ru. Moscow, Russia.

Поступила / Receiver: 03.09.2018

Принята в печать / Accepted: 14.10.2018

## Моделирование механических свойств параболической антенны с композитным обтекателем в программной среде ANSYS

*О. П. Пономарев*

АО «Уральское производственное предприятие «Вектор»,  
Екатеринбург, Россия  
ponomarev7713@mail.ru

**Аннотация.** Актуальность работы связана с обеспечением надежности конструктивных элементов антенных постов радиолокационных станций при проектировании. С этой целью в среде ANSYS выполнено компьютерное конечно-элементное моделирование термонапряженного состояния алюминиевого параболического зеркала, закрепленного на кронштейне, закрытого композитным радиопрозрачным обтекателем, под действием собственного веса, ветрового воздействия и температуры. При моделировании слоистого композитного материала обтекателя использованы многослойные оболочечные элементы. Исследованы упругие деформации в зеркале при фиксированном воздействии ветровой нагрузки в диапазоне температур окружающей среды от  $-40$  до  $+50$  °С, в частности радиальные, осевые и нормальные перемещения. Установлено, что «развертывание» зеркала происходит при его охлаждении до  $-40$  °С на величину 1,2–1,3 мм, что сказывается на искажении амплитудно-фазового распределения поля в его раскрыве.

**Ключевые слова.** Радиолокационная станция, термонапряженное состояние, обтекатель, конечно-элементная сетка.

## Modeling of Mechanical Properties of a Parabolic Antenna with Composite Radome in ANSYS Software Environment

*Oleg P. Ponomarev*

JSK “Ural Manufacturing Company “Vector”,  
Ekaterinburg, Russia  
ponomarev7713@mail.ru

**Abstract.** Modeling of thermostressed states of a parabolic aluminium mirror covered by radio transparent radome under gravity, wind and temperature effects is performed. A procedure is described to prepare a geometrical model for calculations in the ANSYS

software environment, and to create finite-element meshes. The calculated results are presented for the temperature range of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Keywords.** Radar, thermostressed states, radome, finite-element meshes.

---

© Ponomarev O. P., 2018

## 1. Introduction

The most troubles and failures in radars refer to mechanics of power electric drives and structural elements of antenna posts in particular. Issues of radar structural strength influenced by mechanical loads appearing in the process of operation have been considered in papers [1–3]. Thermal strains developing in structural elements of radars due to nonuniform heating can result in additional errors in measurement of object coordinates [4–6].

Studies of various problems in mechanics being carried out at the engineering stage are generally performed with the use of analytical methods or experimental base. The idea of general behavior of structure under external influences is generated on the basis of analytical methods. Experimental base collected from similar structures, which however differ from a design project, allows the evaluation of structural behavior under various external factors. Despite a great number of studies performed both with the use of analytical and experimental methods, the problem of elimination of elastic strains arising in radar structural elements under various external influences and affecting their radio technical characteristics remains unsolved. The applied methods of analysis do not always meet the up-to-date requirements for the manufacturing accuracy of structural elements, or these methods cannot be applied at the design phase.

The solution of these problems considering all peculiarities of the radar mechanics with the required degree of accuracy at the design phase can effectively be performed with the use of finite-element (FE) modeling.

## 2. Statement of a Problem

### 2.1. Subject of Research

The basic elements of a typical radar antenna post are a parabolic aluminium mirror secured on a bracket, and a radome made of radio transparent composite material for reducing the external factors influencing the antenna system electrical performance (fig. 1). It is obvious that under the influence of wind, gravitation and temperature variations, the mirror reflective surface profile can distort what affects the radar accuracy characteristics.

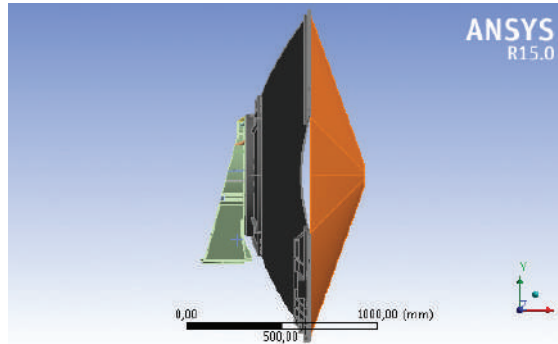


Fig. 1. Subject of research

Calculations of thermal strains have been carried out in the ANSYS Workbench software environment with the use of the following modules: ANSYS DesignModeler (preparation of CAD geometry for calculation, ANSYS Meshing (meshing for calculations by finite element method), ANSYS Composite PrepPost (setting of composite material properties), ANSYS Mechanical (statement and solution of problems in mechanics, analysis of results) [7].

### 2.2. Geometrical Model

As a rule, a computing engineer is given a design geometrical model developed in a CAD — modeling package of solid body properties. These models are highly to create accurate design documentation. However to prepare a FE model and carry out calculations, this elaboration seems to be unnecessary as it results in generation of a great number of small-sized finite elements. This increases the required computer calculations and does not improve calculation accuracy. Therefore, as a rule, the model is idealized and simplified. The model geometry is represented by shell bodies wherever possible. The thickness of a shell is assigned in accordance to the 3D-model of the structure. Considerable thickenings and massive blocks appeared in the geometry may be left in the form of solid bodies, i. e. bodies having a volume (fig. 2).

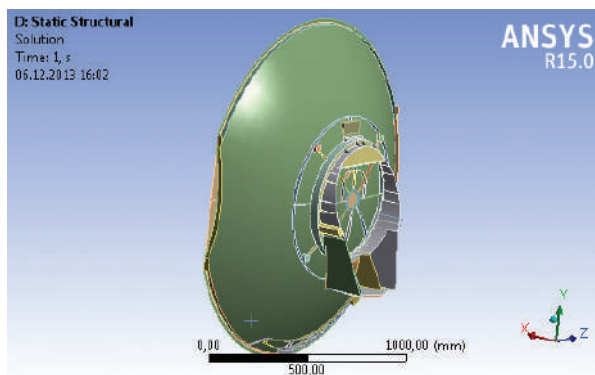


Fig. 2. Geometrical model of a problem

### 2.3. Finite-Element Model

In some places of geometrical model, the shells may be difficult to connect. Besides, it may turn out, that such places for connection are in great numbers Packages in automatic tool in CAD to correct the geometry in such cases are known to the authors of this paper. An alternative variant of connecting geometrical objects is presented by the objects of a final-element model. They are contact regions and mesh connections.

The formation of contact regions involves framing of some special elements which provide the deficiency of mutual penetration of surfaces. In the case under consideration, the only type of contact interaction that makes sense is a bonded connection. With this type of contact interaction, bonds are created between the surfaces, which do not allow them to move relative to each other in the space (fig. 3).

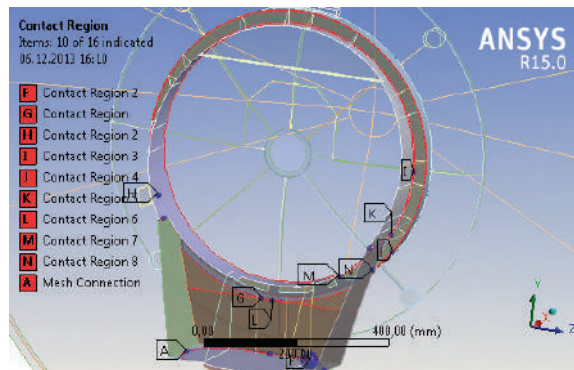


Fig. 3. Bonded connections in model

By default, the contact interaction is realized by means of penalty functions. The penetration of surfaces is possible. However, it is restricted by the force of contact springs. Nevertheless, this decision is practically equivalent to creating a rigid constraint of surfaces. If necessary, it is possible to eliminate the movement of surfaces completely by using formulation MPC (Multipoint Constraints, equations of constraints between sets of points) in settings of a contact region.

Unlike the contact regions, the Mesh Connections make no additional contact elements. The mesh is generated on the connectable surfaces separately, whereupon the joints, which fall on the Ribs, selected for connection, are contracted and merged. This results in some distortion of the model geometry, which may be allowable with small geometrical dimensions of gaps.

### 2.4. Setting of Radome Composite Properties

One of the objects under consideration in the problem is a radome made of composite material. The radome has certain rigidity and, when secured to the mirror, it exerts some effect on the mirror deformation under the in-

fluence of external loads. The properties of a composite material used in the radome (Young modulus, coefficient of thermal expansion) differ from those of aluminium. Besides, the composite material is anisotropic. Since the effective (average) mechanical properties of a laminated composite material are unknown, then the modeling by means of multilayer shell elements is used.

The mirror radome is a fiberglass honeycomb-cored sandwich-panel. As an example, reinforced plates (sandwich-panels) are made of monolayers based on glass cloth T-10–80, using special technology. The glass-honeycomb panels SSP-1 is used as a honeycomb core. The mechanical properties of materials taken for carrying out these calculations are given in Table 1.

Table 1

**Mechanical properties of composite materials**

Mechanical Properties		T-10–80	SSP-1
Young modulus	$E_x$ , MPa	27 000,0	1,0
	$E_y$ , MPa	17 500,0	1,0
	$E_z$ , MPa	17 500,0	255,0
Poisson ratio	$\nu_{xy}$	0,6	0,49
	$\nu_{zy}$	0,3	0,001
	$\nu_{xz}$	0,3	0,001
Modulus of shearing	$G_{xy}$ , MPa	8 437,5	$1,0 \cdot 10^{-6}$
	$G_{zy}$ , MPa	6 730,8	37,8
	$G_{xz}$ , MPa	6 730,8	70,8
Coefficient of linear thermal expansion	$\alpha_x$ , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	—
	$\alpha_y$ , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	—
	$\alpha_z$ , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	—

The conjugation of layers in the mirror radome composite material as ideal, and the properties of the adhesive film between the honeycomb core and reinforcing plates as neglected are usually assumed while modeling. According to the manufacturing technique, the cloth is spread out over the cone surface to cover it in sectors. The sector width is  $30^{\circ}$ , and additionally, there is a 10 mm strip to provide overlapping with the next sector. One layer employs 12 sectors of this type. The reinforcing fibers in the layers are oriented differently: there are layers with fiber orientation “G”, “V”, and “F”. For layer “V”, the reinforcement axis direction is parallel to the bisectrix of the sector being covered, where the thickness of a monolayer is 0,25 mm. For layer



“G”, the reinforcement axis direction is perpendicular to the bisectrix of the sector being covered, where the thickness of a monolayer is 0,25 mm. Layer “F” is arranged in the form of a ribbon running along the radome flange (at a radius of more than 1594 mm) and consists of two monolayers of cloth T-10–80 with the perpendicular reinforcement axis direction: along and perpendicularly to the cone generatrix where the monolayer thickness is 0,5 mm.

### 2.5. External Influences and Kinematic Restrictions

Temperature variation is one of the external loads. A value of plus 22 °C is taken as a temperature required when performing the antenna post mechanical assembly. Therefore, any deviation of this temperature will cause thermal expansion (contraction) of the structural elements. Since the reflector is represented by a composite material, and the parabolic mirror, by aluminium, and moreover they are attached along the perimeter by screwed connections, elastic strains are expected to appear in the mirror, which result in distortion of its form.

In the antenna-to-isolated structure part attaching point, we “secure” all the displacements of antenna structure, attaining a fixed-ended connection (zone A in fig. 4). In this case, the bracket acts as a cantilever taking the loads from the mirror.

Apart from gravitation and constant temperature, the model is influenced by a load from wind pressure. The wind pressure may act from any side; however, the most hazardous event is when the full force vector direction coincides with the axis of cylinder. In this case, a peak torque appears in the fixed-ended connection. The wind pressure value is adopted according to the Russian third wind zone. The sum of the static and pulse components of the wind pressure equal to 600 Pa is assumed. To simplify the solution of the problem, the total pressure may be applied statically without solving the dynamical problem. Thus, a stress-strain state conservative estimation is performed.

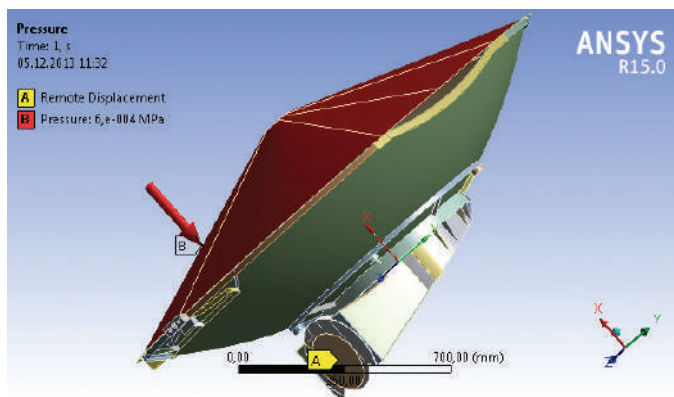


Fig. 4. Securing the structure in the bracket base and wind pressure

### 3. Analysis of Obtained Results

#### 3.1. Plotting of Normal Displacement Diagrams

Displacement of each point of the mirror surface is a sum of a mirror rigid-body displacement and a mirror deformation. The bracket strain may result in the mirror displacements which cause no distortion of the reflective surface. Since the result of the analysis is the mirror distortion under the influence of applied loads, then it is necessary to have a component extracted from the calculated displacements, which is conventionally called as “rigid”. Since the mirror paraboloid is a body of revolution, then, practically all the estimated results are convenient to consider in cylindrical coordinate system, the center of which coincides with the vertex of paraboloid.

For subsequent calculations, the radial coordinates of the mirror points in the earlier cylindrical coordinate system is used.

Compiling this data table will make it possible to considerably automate the plotting procedure for the basic diagrams of interest. Knowing the paraboloid equation in the cylindrical coordinate system, the angle between the normal and Z-axis for each point may be determined. Later on, this data table is used for determination of the displacement vector projection onto the normal surface.

When plotting the axial displacement diagram, it is necessary to take into account the rigid component determined from the displacements in the joint-connection. For different boundary conditions, the rigid component will be different. The obtained displacements as UV is designated (fig. 5, *a*). If the radial displacements in the cylindrical coordinate system is built, then there is a rigid displacement component along the global Y-axis (fig. 5, *b*).

It is necessary to take into account the earlier calculated displacements of the mirror as a rigid body, calculating the radial displacements in the cylindrical coordinate system connected with the center of parabolic mirror. It is necessary to perform a Y-shift for the loads under consideration. In subsequent research and temperature change, it is necessary to take into account the fact that the mirror rigid-body displacements will differ. The analysis is performed in the Cartesian coordinate system connected with the paraboloid vertex. Then, having the earlier obtained table of the radial coordinates for each joint, as well as the coordinates in the Cartesian system, the radial displacements without the rigid component of motion may be determined (fig. 6).

The need of calculations in the Cartesian coordinate system is determined by the fact that the rigid displacement component shall be deducted before the transformation of the displacement vectors into the cylindrical coordinate system.

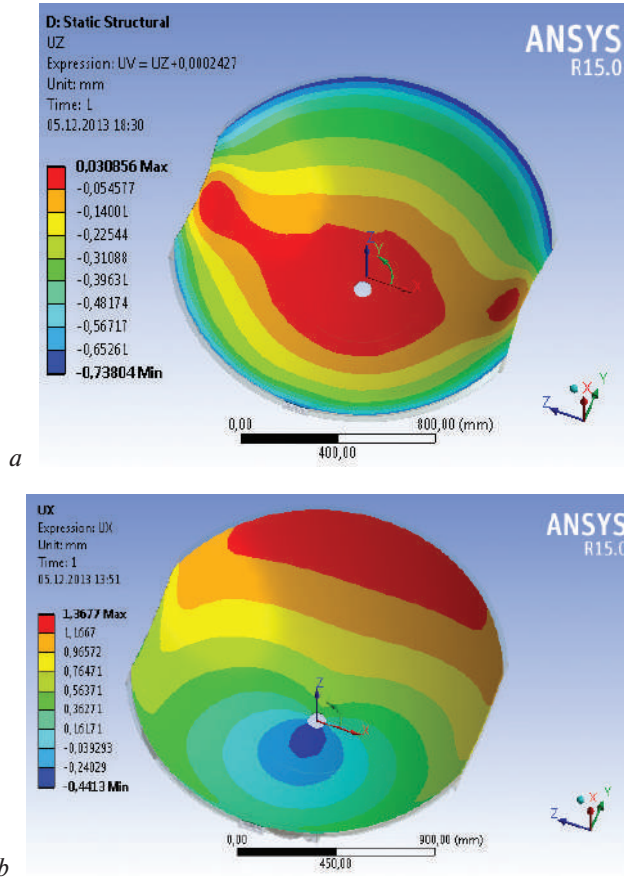


Fig. 5. Axial displacements minus rigid component (a); radial displacements (full) (b)

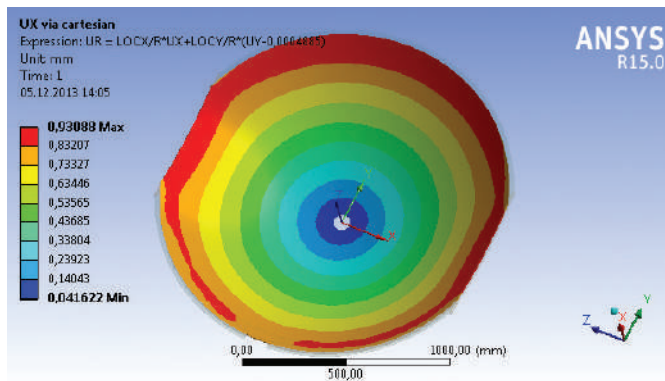


Fig. 6. Radial displacements minus rigid component

Upon compiling a table of radial and axial displacements in the cylindrical coordinate system with the table of angles between the normal and the axis of paraboloid being taken into account, the normal displacements of the mirror surface, which set conditions for its distortion may be determined.

### **3.2. Study of temperature variation influencing the mirror surface distortion**

Let us perform a parametric study and plot maximal displacements being normal to the mirror surface versus the applied temperature load. The temperature step equal to 10 °C is assumed. It is necessary to trace the deformation behavior since not only the temperature loads are presented in the model. Therefore, let us plot normal displacement diagrams for given temperature values. The study of the calculation data shows that the deformation behavior at a temperature of 40 °C is practically the same as that at 50 °C (fig.7), with the only difference that the observed displacements differ in value. Maximal displacements arise along the mirror perimeter and they are positive, i. e. the mirror “curls up (contract)”.

The modeling has shown that at the temperature of plus 30 °C, the displacements deviate from the axially symmetric shape as far as the temperature strain value reduces with the temperature approaching to plus 22 °C. Increasingly more relative influence is exerted by gravitation and wind pressure. However, in bulk, their influence on the mirror deformation is insignificant, and therefore the maximal normal displacement value keeps on reducing. In the design temperature range, a value of plus 20 °C is the closest to the initial temperature of mechanical assembly. Thermal strains are practically absent, and the mirror distortion, caused by the other loads, is insignificant. The displacement diagram differs significantly in its behavior from the previous diagrams and represents a transition to a cooled state. When the temperature decreases from plus 10 °C, the behavior of the normal displacement distributions becomes increasingly more axially symmetric. In this case normal displacements, maximal in modulus, will arise along the perimeter, however, they are negative. In the cooled state, the mirror tends “uncurl (expand)”.

Fig. 8 illustrates a maximal mirror surface deflection (distortion) versus temperature. To evaluate a degree of the mirror surface distortion, the modulus of normal displacements are used.

The practically piecewise-linear function is obtained with a point of inflection at a plus 22 °C. In this case, the coefficient of linear expansion of material was supposed to be independent of temperature. To increase the calculation accuracy, it is necessary to introduce this characteristic into the calculation model, as a material property.

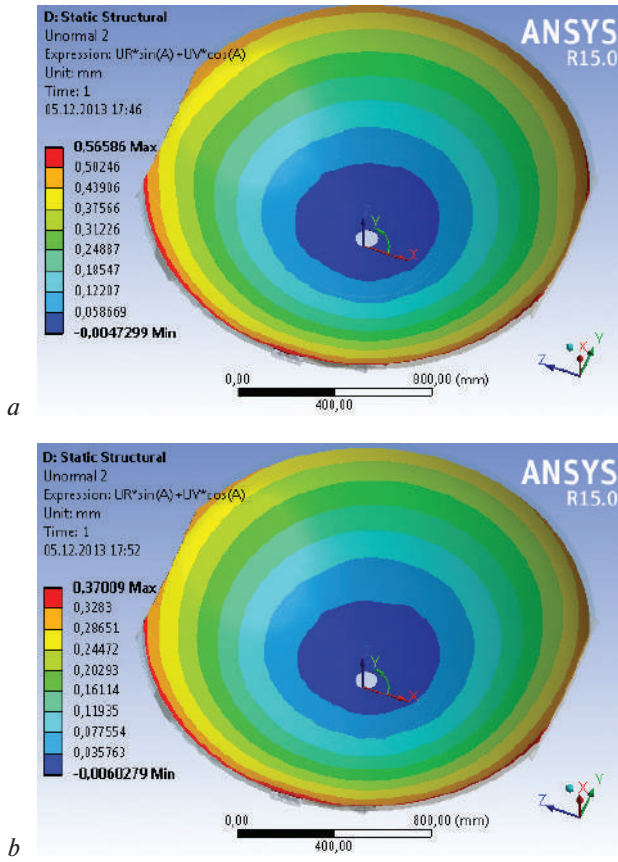


Fig. 7. Displacements in the normal to the mirror surface at plus 50 °C (a) and at plus 40 °C (b)

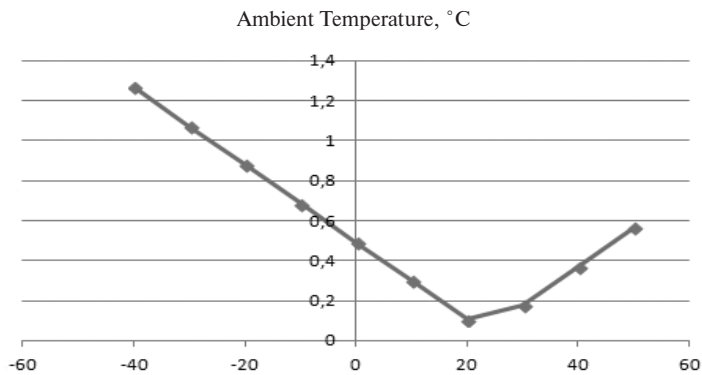


Fig. 8. Maximal normal displacements (mm) versus temperature

#### 4. Conclusion

The mirror expands by 1.2–1.3 mm, being cooled to a temperature of minus 40 °C, which leads to changing the amplitude-phase field distribution in the parabolic antenna aperture, and thereby to distortion of the antenna pattern. The evaluation of this distortion is a subject of further study. The ANSYS software makes it possible to perform quickly and accurately the modeling of thermostressed states of a parabolic aluminium mirror. Moreover, the automated preparation of the model geometry for calculations and the possibility of setting the composite material properties provide the consideration of all peculiarities of the designed structure.

#### 5. Acknowledgment

The research work has been backed up by the Institute of Radio Electronics and Information Technologies of Ural Federal University. The author is grateful to specialists of CADFEM CIS Co. and personally to Mr. Dmitry Mikhalyuk for kindly provided software and consultations.

#### References

1. Kalachev P. D. Zhestkost parabolicheskogo reflector nagruzhennogo sobstvennym vesom [Rigidity of parabolic reflector loaded by gravity]. *Trudy LEBEDEV FIAN*, 1967, vol. 38. (In Russian)
2. Korpeev B. R. *Issledovanie vliyaniya teplootrazhayuxhchikh pokrytiy na temperaturnyy rezhim parabolicheskikh otrazhatel'ey* [Study of the heat reflecting cover influencing the parabolic reflector temperature conditions]. Ashkh., FTI AN TSSR, 1982, 158 p. (In Russian)
3. Popov A. S. *O besprovolochnoy telegrafii* [On wireless telegraphy]. Ed. & introd. by Berg A. I. Moscow, Fizmatgiz, 1959. (In Russian)
4. Bayramov R. B., Toyliev K. T., Galkanov A. N. *Teplovoy rezhim paraboloidnogo otrazhatelya* [Thermal conditions of parabolic reflector]. *Izv. AN TSSR*, 1973, no. 6, p. 9–14. (In Russian)
5. Bapbyev Yu. R. *Formirovanie temperaturnykh poley i termodeformatsiy* [Formation of temperature fields and thermal deformations]. Ashkh. NPO “Solntse”, 1988. P. 132. (In Russian)
6. Borovkov A. I., Zubov A. V. *Konechno elementnoe reshenie statsionarnykh i nestatsionarnykh nelineynykh zadach teploprovodnosti geterogennykh anizotropnykh sred* [Finite-element solution of stationary and nonstationary nonlinear problems of heat conductivity in heterogeneous anisotropic media]. Moscow, VINITI, N897-B94, 1994. 44 p. (In Russian)
7. ANSYS. Theory reference. Rel. 14.5/ANSYS Inc.

### Information about the author

**Oleg P. Ponomarev** received Ph.D. degrees in Military Antiaircraft Defense Academy (Kiev, Ukraine) in 1992 and the Doctor of Technical Sciences at the Ural Federal Univ. named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia), specialty "Antennas and microwave devices and technology" in 2011. From 2006 to 2012 he is a Head of Chair of Information Security of Baltic Fishing Fleet State Academy (Kaliningrad, Russia). From 2012 he is Professor of Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems of Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin.

In 2010 he received a diploma and silver medal at the 38th Salon International Inventions in Geneva (Switzerland). Shown project "The concept of synthesis of antenna systems space, ground and sea-based". The project was implemented jointly with the Institute of Mathematics and Mechanics of Ural branch of Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg, Russia).

Oleg P. Ponomarev is the author and co-author of more than 90 scientific publications. Research interests: microwave equipment and antennas, modeling of electrodynamic properties of quantum dots and their use in ophthalmology, the use of metamaterials to improve the electrical characteristics of microstrip antennas and materials.

Поступила / Receiver: 10.09.2018

Принята в печать / Accepted: 14.10.2018

## Применение полиспектральной обработки в адаптивной фильтрации

*В. И. Мусихин*

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия  
v. i. musikhin@urfu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрено полиспектральное преобразование, в частности биспектр, а также адаптивная фильтрация сигналов и использование биспектров в данной области. Разработана модель адаптивного компенсатора в биспектральной области с последующим исследованием влияния некоррелированных гауссовых помех в каналах.

**Ключевые слова.** Полиспектральный анализ, биспектральный анализ, адаптивная фильтрация, спектральная плотность мощности, спектры высоких порядков.

## Polyspectral Processing in Adaptive Filtering

*Vladislav I. Musikhin*

Ural Federal University  
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia  
v. i. musikhin@urfu.ru

**Abstract.** The polyspectral estimation, in particular, the bispectrum, is considered. Adaptive filtering of signals and the use of bispectra in this area are also considered. The model of the adaptive compensator in the bispectral range was developed with subsequent investigation of the effect of uncorrelated Gaussian noise in the channels. As a result, it was found that in the presence of uncorrelated Gaussian noise in the channels of the adaptive compensator, the system using the bispectral processing shows better results than the compensator in the spectral region without using a bispectrum. The difference is about 14 dB. It was also noted that for the compensator with the bispectral processing the third-order cumulant of the signal should be non-zero.

**Keywords.** Polyspectral analysis, bispectral analysis, adaptive filtering, power spectral density, high-order spectra.

---

© Musikhin V. I., 2018



## Введение

Одним из фундаментальных средств цифровой обработки сигналов является оценивание спектральной плотности мощности, или просто спектра мощности, дискретных детерминированных и стохастических процессов [1, 2].

При оценивании спектра мощности рассматриваемый процесс считается результатом наложения статистически некоррелированных гармонических составляющих, оценка распределения мощности производится среди этих частотных составляющих. При этом исследуются только линейные механизмы, определяющие ход процесса, поскольку фазовые соотношения между частотными составляющими исключаются. Содержащаяся в спектре мощности информация по существу совпадает с информацией, имеющейся в автокорреляционной последовательности. Однако на практике для получения в ряде случаев информации, касающейся отклонений от гауссовости и наличия нелинейности, одного лишь спектра мощности оказывается уже недостаточно. Подобную информацию дают спектры более высокого порядка, называемые полиспектрами, определяемые для данного процесса по его семиинвариантам высоких порядков. К частным случаям таких спектров относятся спектр третьего порядка — биспектр и спектр четвертого порядка — триспектр, которые определяются как преобразования Фурье для последовательностей семиинвариантов третьего и четвертого порядков стационарного случайного процесса соответственно [1].

Применение биспектральной обработки в адаптивной фильтрации в данной статье обусловлено прежде всего тем, что полиспектры порядка, большего двух, тождественно обращаются в ноль для гауссового процесса [1]. Таким образом, появляется возможность уменьшить влияние аддитивных помех в виде некоррелированного шума в каналах, не поддающихся компенсации в адаптивной системе и являющихся нестационарными гауссовыми процессами.

## Влияние помех в каналах адаптивного компенсатора

Обобщенная структурная схема адаптивного компенсатора представлена на рис. 1. В качестве входного сигнала выступает смесь сигнала  $S$  и не коррелированной с ним помехи  $n_0$ . Эталонным сигналом является помеха  $\hat{n}_0$ , не коррелированная с сигналом, но некоторым неизвестным образом коррелированная с помехой  $n_0$ . В результате фильтрации помехи  $\hat{n}_0$  формируется сигнал  $y$ , который приблизительно представляет собой копию  $n_0$ . Этот сигнал вычитается

из входного сигнала  $S + n_0$  для того, чтобы сформировать выходной сигнал систем  $S + n_0 - y$ . Ключ  $K$  может быть замкнут в случае, если это система с обратной связью, и разомкнут, если обратная связь отсутствует.

Адаптивные системы могут быть без обратной связи и с обратной связью. Процесс адаптации без обратной связи состоит из измерений характеристик входного сигнала или окружающей среды, введения этой информации в формулу или вычислительный алгоритм и использования результатов для регулирования адаптивной системы. При адаптации с обратной связью, кроме того, автоматически вносятся коррекции, с целью оптимизации параметров функционирования системы определяется их влияние на выходной сигнал. Этот процесс можно назвать адаптацией с функциональной обратной связью [5].

В данной статье рассматривается адаптивная система без обратной связи. В качестве примера такой системы в частотной области может выступать адаптивный компенсатор с синтезом оптимального коэффициента передачи адаптивного фильтра по критерию наименьших средних квадратов (LMS) [6], который является самым распространенным критерием для адаптивных систем:

$$K_{\text{opt}}(\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_x(\omega)}, \quad (1)$$

где  $S_{xy}(\omega)$  — взаимная спектральная плотность мощности входного и эталонного сигналов адаптивной системы;  $S_x(\omega)$  — спектральная плотность мощности эталонного сигнала адаптивной системы.

Как было сказано выше, для успешного применения адаптивной компенсации необходимо, чтобы помеха, подаваемая в опорный канал в качестве эталонного сигнала, была некоторым образом коррелирована с помехой, которая в смеси с полезным сигналом поступает на вход фильтра. Тем не менее в реальных системах зачастую имеет место быть аддитивный широкополосный гауссовский шум в каналах адаптивного компенсатора. При этом условие коррелированности этих шумов в каналах не выполняется.

На рис. 1 показана схема воздействия аддитивных гауссовских шумов на адаптивный компенсатор. Из-за того, что шумы  $n_1$  и  $n_2$  в каналах являются некоррелированными, они значительно снижают эффективность фильтрации, так как шум  $n_1$  практически беспрепятственно проникает на выход адаптивной системы, а шум  $n_2$  при этом снижает эффективность алгоритма адаптации.

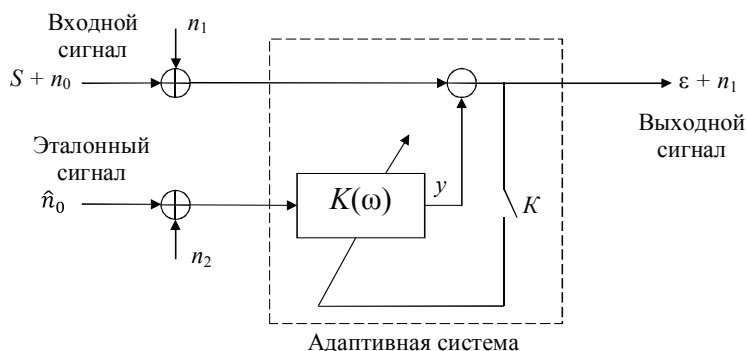


Рис. 1. Адаптивный компенсатор под воздействием шумов в каналах  
 Fig. 1. Adaptive compensator which is affected by the noise in the channels

Цель нашей работы состоит в разработке адаптивного компенсатора в бичастотной (биспектральной) области, который является устойчивым к некоррелированным гауссовым помехам за счет применения биспектров.

### Адаптивная компенсация в биспектральной области

Как было отмечено выше, одним из основных свойств биспектра является то, что он тождественно обращается в нуль для стационарного гауссовского процесса с нулевым средним значением. Из этого следует, что адаптивная система, функционирующая в биспектральной области, способна решить рассматриваемую проблему с шумами в каналах. При этом следует учесть, что гауссова помеха обращается в ноль лишь при бесконечно большом количестве усреднений биспектров и в реальной системе будет стоять задача подбора оптимального числа усреднений [1].

Схема адаптивного компенсатора в биспектральной области аналогична схеме адаптивного компенсатора в частотной области с тем отличием, что вместо процедуры оценки спектральной плотности входного и эталонного сигнала используется процедура оценки биспектральной плотности [3]. Соответственно, вместо процедуры обратного преобразования сигнала из частотной области во временную производится восстановление сигнала по биспектру [1].

В схеме на рис. 2 биспектры входного и эталонного сигналов на входе адаптивной системы можно представить в виде:

$$S_y(\omega_1, \omega_2) = S_\epsilon(\omega_1, \omega_2) + S_d(\omega_1, \omega_2), \quad (2)$$

$$S_x(\omega_1, \omega_2) = S_d(\omega_1, \omega_2)H(\omega_1)H(\omega_2)H^*(\omega_1 + \omega_2), \quad (3)$$

где  $S_\xi(\omega_1, \omega_2)$  и  $S_d(\omega_1, \omega_2)$  — биспектры полезного сигнала и помехи соответственно;  $H(\omega)$  — коэффициент передачи канала, искажающего помеху.

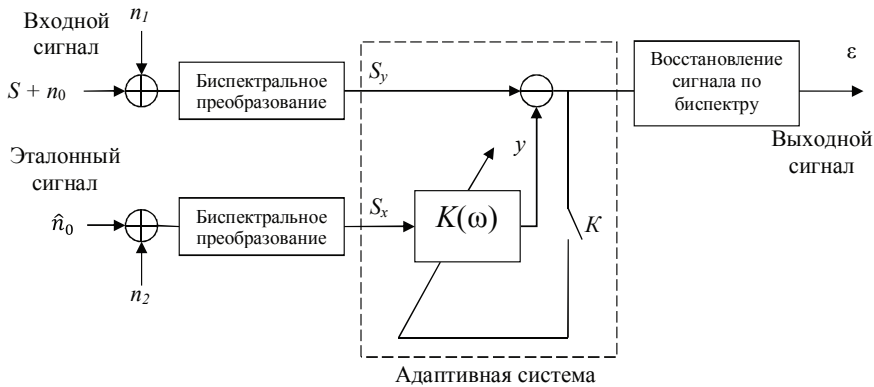


Рис. 2. Адаптивный компенсатор в биспектральной области

Fig. 2. Adaptive compensator using bispectrum

В данной работе был применен прямой метод оценки биспектральной плотности, поскольку он отличается от косвенного более высоким быстродействием за счет применения БПФ [3].

Зная, что биспектр — это двумерное преобразование Фурье ТАКФ или моментной функции третьего порядка, для воспроизведения биспектра помехи на выходе фильтра выберем критерий минимизации абсолютной ошибки третьей степени. Для определения данного критерия необходимо получить смешанные моментные функции входного и эталонного сигналов (4)–(5), вывод которых описан в [4].

$$M_{21}^{xy}(\tau_1, \tau_2) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau) M_3^x(\tau_1, \tau_2 - \tau) d\tau. \quad (4)$$

$$M_{12}^{xy}(\tau_1, \tau_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(u)w(v) M_3^x(\tau_1 + u - v, \tau_2 + u) dudv, \quad (5)$$

где  $w(\dots)$  импульсная характеристика,  $M_3^x(\dots, \dots)$  — моментная функция эталонного сигнала.

Далее проводится двойное преобразование Фурье данных функций (6) и (7) [4].

$$\begin{aligned}
 S_{xyx}(\omega_1, \omega_2) &= 4 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_{12}^{xy}(\tau_1, \tau_2) e^{-i(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 = 4 \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau) \times \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_3^x(\tau_1, \tau_2 - \tau) e^{-i(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 d\tau = \left| \begin{matrix} z_1 = \tau_1 \\ z_2 = \tau_2 - \tau \end{matrix} \right| = 4 \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau) \times \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} M_3^x(z_1, z_2) e^{-i(\omega_1 z_1 + \omega_2 z_2 + \omega_2 \tau)} dz_1 dz_2 d\tau = 4 \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau) \times \tag{6} \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_3^x(z_1, z_2) e^{-i(\omega_1 z_1 + \omega_2 z_2)} dz_1 dz_2 e^{-i\omega_2 \tau} d\tau = S_x(\omega_1, \omega_2) \times \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau) e^{-i\omega_2 \tau} d\tau = S_x(\omega_1, \omega_2) k(i\omega_2).
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{yyx}(\omega_1, \omega_2) &= 4 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_{12}^{xy}(\tau_1, \tau_2) e^{-i(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 = 4 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(u)w(v) \times \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_3^x(\tau_1 + u - v, \tau_2 + u) e^{-i(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 dudv = \left| \begin{matrix} z_1 = \tau_1 + u - v \\ z_2 = \tau_2 + u \end{matrix} \right| = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(u)w(v) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_3^x(z_1, z_2) e^{-i(\omega_1 z_1 + \omega_1 v - \omega_1 u + \omega_2 z_2 - \omega_2 u)} dz_1 dz_2 dudv = \tag{7} \\
 &= 4 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(u)w(v) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_3^x(z_1, z_2) e^{-i(\omega_1 z_1 + \omega_2 z_2)} dz_1 dz_2 e^{-i(\omega_1 v - \omega_1 u - \omega_2 u)} dudv = \\
 &= S_x(\omega_1, \omega_2) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(u)w(v) e^{-i(\omega_1 v - \omega_1 u - \omega_2 u + \omega_2 \tau)} dudv = S_x(\omega_1, \omega_2) \times \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(u) e^{i(\omega_1 u + \omega_2 u)} w(v) e^{-i\omega_1 v} dudv = S_x(\omega_1, \omega_2) k(i\omega_1) k(-i(\omega_1 + \omega_2)).
 \end{aligned}$$

Из выражений (6) и (7) можно получить оптимальную передаточную функцию адаптивного фильтра в биспектральной области [4]:

$$K_{\text{opt}}(\omega_1, \omega_2) = k(i\omega_1) k(i\omega_2) k(-i(\omega_1 + \omega_2)) = \frac{S_{xyx}(\omega_1, \omega_2) S_{yyx}(\omega_1, \omega_2)}{S_x(\omega_1, \omega_2) S_x(\omega_1, \omega_2)}. \tag{8}$$

Таким образом, используя критерий минимизации модуля ошибки третьей степени (8), можно воспроизвести биспектр помехи на выходе фильтра, из чего следует ее компенсация в адаптивной системе.

## Компьютерное моделирование

Для создания модели был использован пакет Simulink, который является подсистемой (расширением) MATLAB, предназначенной для блочного моделирования. Разработанная схема представляет собой систему адаптивной компенсации помех с источниками шума, простой системой передачи и приема информации на основе амплитудной манипуляции, параметры которых можно изменять в широких пределах. Также модель включает средства наблюдения за выходными параметрами, которые позволяют оценивать правильность работы системы и ее эффективность.

Как уже говорилось выше, для эффективной компенсации гауссовой помехи необходимо производить наибольшее возможное количество усреднений биспектра. В полученной модели биспектр усредняется последовательно с компенсацией таким образом, что вычитание биспектра помехи из биспектра входного сигнала производится уже после усреднения.

Для сравнения результатов моделирования с аналогичной системой без биспектральной обработки была разработана модель адаптивного компенсатора в частотной области, которая функционирует по критерию (1).

Также было проведено моделирование работы обоих типов фильтров без влияния некоррелированных гауссовых шумов в каналах компенсатора, которое показало эффективность этих систем. Эталонный сигнал при этом представлял собой шум с распределением Рэля, некоторым образом коррелированный с шумом во входном сигнале. Данное условие сохранилось и в последующем эксперименте с добавлением гауссова шума в каналы адаптивного компенсатора.

Для анализа получившегося адаптивного компенсатора было решено подавать на вход последовательность из 900 символов и сравнивать с последовательностью, полученной на выходе. Путем сравнения этих последовательностей производится вычисление вероятности ошибки.

Точность определения вероятности ошибки определяется по формуле:

$$\Delta p = \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (9)$$

где  $N$  — общее число бит, по которому производится оценка. Из (9) следует, что при 900 реализациях будет достигаться точность 1/30.

Определение ОСШ описывается выражением:

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{A_s}{A_n}, \quad (10)$$

где  $A_s$  — среднеквадратическое значение амплитуды сигнала,  $A_n$  — среднеквадратическое значение амплитуды шума.

В таблице 1 представлены результаты моделирования. Оценивается вероятность ошибки при различных соотношениях сигнал/шум на входе системы.

Таблица 1

**Зависимость вероятности ошибки от ОСШ для компенсатора с применением биспектров**

Table 1

**Dependence of the error rate on the SNR for the compensator using bispectra**

ОСШ в каналах, дБ	-19	-18,1	-16,6	-15,1	-13,9	-12	-10,7	-9,1	-7
РОШ	0,467	0,267	0,233	0,2	0,133	0,067	0,033	0,033	0

На рис. 3 построена зависимость вероятности ошибки от ОСШ в каналах для адаптивного компенсатора с биспектральной обработкой.

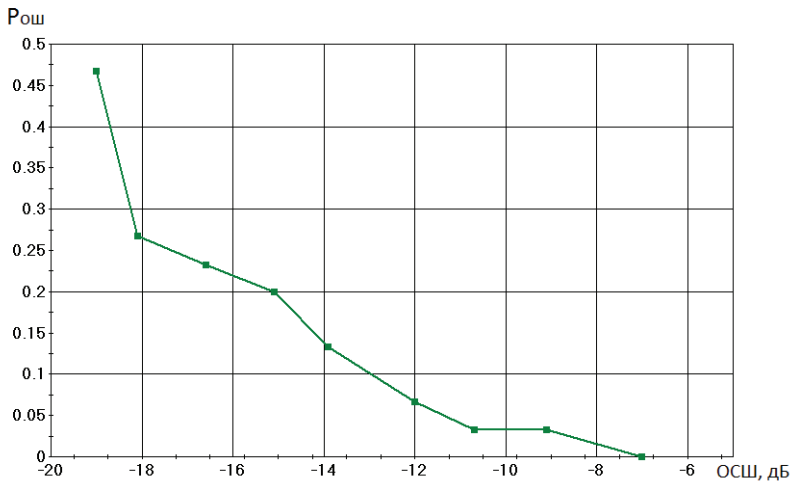


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки от ОСШ в каналах для адаптивного компенсатора с использованием биспектров

Fig. 3. Dependence of the error rate on the SNR for the compensator using bispectra

Проведем моделирование для аналогичной системы без применения биспектральной обработки, описанной в предыдущем пункте. В таблице 2 приведены результаты такого моделирования.

Таблица 2

**Зависимость вероятности ошибки от ОСШ для компенсатора без применения биспектров**

Table 2

**Dependence of the error rate on the SNR for the compensator without using bispectra**

ОСШ в каналах, дБ	-3,9	-2,6	-1,3	0,2	1,9	3,4	5,2	7	8,2
РОШ	0,333	0,233	0,167	0,133	0,1	0,067	0,033	0,033	0

На рис. 4 построена зависимость вероятности ошибки от ОСШ в каналах компенсатора без применения биспектральной обработки.

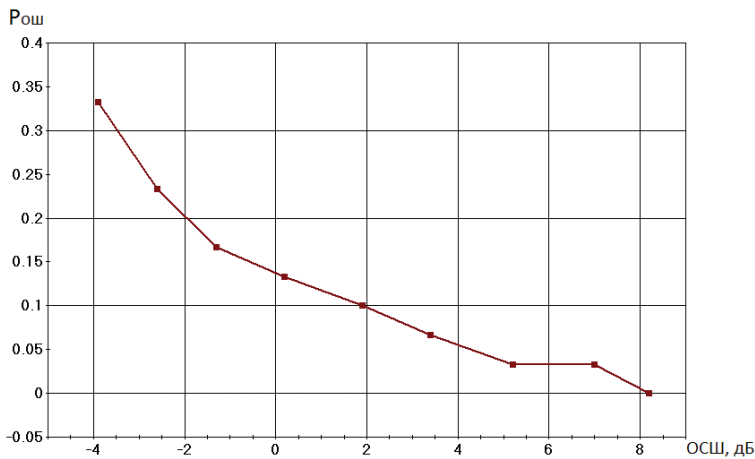


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибки от ОСШ в каналах для адаптивного компенсатора в частотной области без использования биспектров

Fig. 4. Dependence of the error rate on the SNR for the compensator without using bispectra

Из полученных результатов можно сделать вывод, что оба компенсатора справляются с задачей выделения сигнала на фоне помехи при условии, что помехи во входном и эталонном каналах коррелированы между собой. Однако при появлении некоррелированных аддитивных гауссовских помех в каналах использование биспектров дает значительное преимущество.



## Выводы

В данной статье была рассмотрена адаптивная фильтрация сигналов в частотной области и биспектральная обработка. Разработана модель адаптивного компенсатора с использованием биспектральной обработки в среде Simulink. Также был смоделирован адаптивный компенсатор в частотной области без использования биспектров. Было проведено моделирование с целью выявления зависимостей вероятности появления ошибочного бита на выходе системы от величины шумового воздействия в каналах компенсатора. Также проведен сравнительный анализ адаптивного компенсатора в биспектральной и спектральной областях при некоррелированном шумовом воздействии в каналах. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Адаптивный компенсатор с использованием биспектральной обработки эффективен при выделении прямоугольного импульса на фоне шума с распределением Рэлея. Адаптивный компенсатор в частотной области также справляется с этой задачей. Тем не менее при использовании других типов сигналов важно учитывать, что для компенсатора с биспектральной обработкой ТАКФ сигнала должна быть отличной от нуля.

2. При наличии в каналах компенсатора некоррелированного гауссовского шума система с использованием биспектральной обработки показывает лучшие результаты по сравнению с обычным компенсатором в спектральной области. Выигрыш составил порядка 14 дБ. Такой результат обеспечивается за счет свойства минимизации гауссовских процессов при биспектральной обработке.

3. При использовании биспектральной обработки необходимо учитывать, что, в отличие от спектральной обработки, одним из достоинств которой является низкая потребность в вычислительных ресурсах [6], использование биспектров требует большого числа усреднений, причем степень минимизации гауссовского шума, как и эффективности компенсации, напрямую зависит от их количества. Поэтому при проектировании таких систем придется находить оптимальный баланс между степенью подавления помех, то есть вероятностью ошибки приема бита, и скоростью обработки информационной последовательности.

## Литература/References

1. Nikias C. L., Raghuveer M. R. Bispectrum estimation: A digital signal processing framework. *Proc. IEEE*, 1987, vol. 75, pp. 869–91.
2. Bartelt H., Lohman A. W., Wirtzner B. Phase and amplitude recovery from bispectra. *Applied Optics*, 1984, vol. 23.
3. Zelensky A. A., Kravchenko V. F., Pavlikov V. V., Totsky A. V. Bispectrum analysis in digital signal processing and applications. *Fizicheskie osnovy priborostroeniya*, 2013, 2 (3), pp. 4–39.

4. Манохин А. Е., Зародов А. А. О разработке оптимального фильтра выделения полезного сигнала в биспектральной области по критерию минимума абсолютной ошибки третьей степени // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. 2016. № 10 (12). URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/1/text.pdf> (дата обращения: 30.10.2018).

Manokhin A. E., Zarodov A. A. O razrabotke optimal'nogo fil'tra vydeleniya poleznogo signala v bispektral'noj oblasti po kriteriyu minimumaabsolyutnoj oshibki tret'ej stepeni [The designing an optimal filter of a useful signal in a bispectral domain by the criteria of the least mean absolute third error]. *ZHurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2016, no. 10(12). Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/1/text.pdf> (accessed 30.10.18). (In Russian)

5. Widrow B., Stearns S. P. *Adaptive Signal Processing of Englewood Cliffs*. Prentice-Hall, Inc., 1985.

6. Cowan C. F. N., Grant P. M. *Adaptive Filters*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.

#### Информация об авторе

**Владислав Игоревич Мусихин** — аспирант департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (ул. Мира, 32, Екатеринбург, Россия).

#### Information about the authors

**Vladislav Igorevich Musikhin** — postgraduate of the Department of Radioelectronics and Communications of Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems of Ural Federal University the first President of Russia B. N. Yeltsin (Mira street 32, Ekaterinburg, Russian Federation).

Поступила / Receiver: 19.08.2018

Принята в печать / Accepted: 14.10.2018

## Анализ алгоритмов слепого разделения сигналов на основе рекуррентной нейронной сети

*К. С. Белков*

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия  
belkov.k.s.8@yandex.ru

**Аннотация.** В работе решалась задача исследования эффективности алгоритмов слепого разделения сигналов на фоне шумов: была изучена чувствительность алгоритмов Жуттена — Эро и минимизации взаимной информации к изменению их параметров. В результате были выявлены достоинства и недостатки представленных алгоритмов.

**Ключевые слова.** Слепое разделение сигналов, алгоритм Жуттена — Эро, минимизация взаимной информации, слепая обработка, OFDM-сигнал, меры Кульбака — Лейблера.

## Algorithms of Blind Separation of Signals Based on the Recurrent Neural Network

*Kirill S. Belkov*

Ural Federal University  
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia  
belkov.k.s.8@yandex.ru

**Abstract.** This paper focuses on the study of the efficiency of the separation of blind signal affected by noise. The purpose of this article is to explore the sensitivity of algorithms Jutten-Herault and the minimization of mutual information when the algorithm parameters are changed. Simulink software which allows building and simulating dynamic model algorithms has been used to examine the sensitivity of algorithms. The research revealed that algorithm Jutten-Herault shows the most stable work. It shows the shortage of sensitivity to change settings, but at the same time the algorithm based on minimization of the mutual information is efficient. The main advantage of studied algorithms is in not complicated computational processes in comparison with their equivalents.

**Keywords.** Blind signal separation, Jutten-Herault algorithm, minimization of mutual information, blind processing, OFDM-signal, Kullback-Leibler measures.

## Введение

В настоящее время для анализа и обработки сигналов применяют различные статистические методы. Однако недостатком классических методов оптимальной обработки сигналов является обязательное знание параметров и (или) распределений сигналов и помех. Для преодоления априорной неопределенности все чаще используются слепые методы разделения (выделения) сигналов. Наиболее простыми в реализации алгоритмами являются алгоритм слепого разделения сигнала Жуттенна — Эро и алгоритм слепого разделения сигнала на основе минимизации взаимной информации.

Результаты некоторых исследований данных алгоритмов также можно найти в статьях Манохина А. Е. [1, 2]

Для исследования параметров указанных алгоритмов был использован OFDM-сигнал с двумя поднесущими. OFDM-сигнал (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) позволяет быстро и эффективно передавать данные даже в каналах с многолучевым распространением сигнала. Передача ведется одновременно на большом количестве несущих частот (рис. 1). Каждая поднесущая модулируется по обычной схеме модуляции (например, квадратурная амплитудная модуляция) на низкой символьной скорости, сохраняя общую скорость передачи данных, как и у обычных схем модуляции одной несущей в той же полосе пропускания. На практике сигналы OFDM получают путем использования процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ).

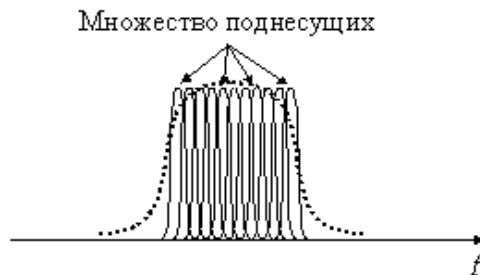


Рис. 1. Спектр OFDM-сигнала

Fig. 1. OFDM signal spectrum

## Постановка задачи

Вводится предположение, что разделяемые процессы  $S_1 \dots S_n$  — независимые. В качестве устройства разделения используется нейронная сеть с обратными связями (рис. 2).

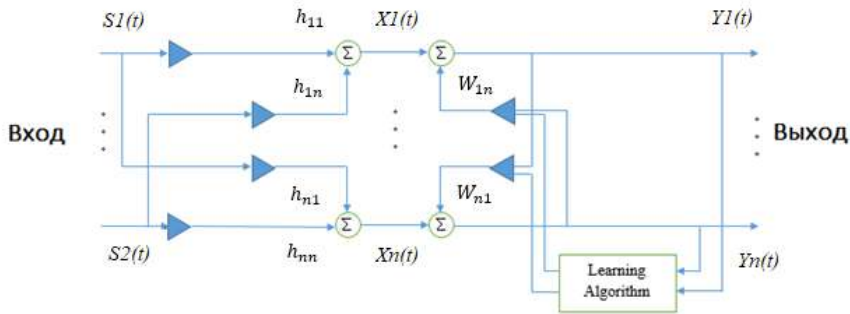


Рис. 2. Нейронная сеть для разделения сигналов

Fig. 2. Neural network of signal separation

Алгоритм Жуттена — Эро реализован с помощью рекуррентного уравнения [2]:

$$W(t+1) = W(t) + \mu(t) \left[ \Lambda - f(\hat{d}(t)) g^T(\hat{d}(t)) \right], \quad (1)$$

где  $\Lambda$  — диагональная матрица с элементами, обычно равными единице;  $f(\hat{d})$  и  $g(\hat{d})$  — нечетные функции активации (например, можно использовать нечетные функции  $\tanh(\hat{d})$  и  $\hat{d}^3$ ).

Диагональные коэффициенты нейронной сети  $w_{ii}$  обеспечивают самонормализацию дисперсий выходных сигналов, что улучшает характеристики сети, даже если смешивающая матрица является плохо обусловленной [1, 2].

Для синтеза алгоритма на основе минимизации взаимной информации в качестве критерия разделения [4–6] предлагается использовать меру Кульбака — Лейблера:

$$K(f|g) = \int_s f(s) \log \left( \frac{f(s)}{g(s)} \right) ds, \quad (2)$$

где  $f(s)$  и  $g(s)$  — функции плотности вероятности.

Эта мера показывает близость двух распределений. Если распределения полностью совпадают, то мера Кульбака — Лейблера принимает нулевое значение при условии, что интеграл (2) существует. Частными случаями этой меры являются критерии максимального правдоподобия, минимума энтропии (или максимума отрицательной энтропии).

Необходимо отметить, что эти критерии не позволяют эффективно разделять гауссовы процессы. В самом деле, пусть два разделяемых независимых процесса являются широкополосными гауссовыми и имеют распределения  $g_1(s_1)$  и  $g_2(s_2)$ . Тогда совместная плотность

вероятности гауссовых процессов  $f(s_1, s_2)$  будет равна произведению их плотностей вероятностей и легко может быть факторизована. Мера Кульбака — Лейблера будет определяться логарифмической функцией от отношения определителей корреляционных матриц выходных сигналов и эталонных сигналов, которые являются независимыми многомерными гауссовыми процессами, а равно отношениями их дисперсий. Такая функция недостаточно выпукла или вообще не имеет экстремума, поэтому затруднительно, а порой невозможно найти разделяющую матрицу [1, 2].

Однако если среди двух разделяемых процессов один гауссов, а другой негауссов, то разделение возможно. Аналогично можно утверждать и в случае смеси случайных процессов, среди которых только один имеет гауссово распределение.

Взаимная информация выходов нейронной сети может быть выражена:

$$I(y) = -H(y) + \sum_{i=1}^m H(y_i), \quad (3)$$

где  $H(y_i)$  — энтропии оцениваемых после разделения сигналов с выходов  $y_i$ ;

$H(y)$  — взаимная энтропия процессов на выходах нейронной сети;

$m$  — число выходов нейронной сети (количество разделяемых процессов).

Внимательно анализируя (3) и учитывая суть слепого разделения сигналов, можно заметить, что при полном их разделении на соответствующих выходах нейронной сети будут присутствовать только процессы с искомыми распределениями, а взаимная информация по всем выходам будет равна нулю, и соответственно, сумма их энтропий будет минимальна, что эквивалентно минимизации функционала:

$$J = -\sum_{i=1}^m E\{\log \Theta_i(y_i)\}, \quad (4)$$

где  $\Theta_i(y_i)$  — функции плотности вероятности разделяемых процессов;

$E$  — оператор усреднения.

Запишем сигналы выходов рекуррентной нейронной сети (рис. 2) в векторно-матричной форме следующим образом:

$$y(\tau) = x(\tau) - \sum_{p=1}^L W_p y(\tau - p), \quad (5)$$

где  $W_p$  —  $p$ -ая разделяющая матрица  $W$ , имеющая нулевые диагональные элементы ( $w_{ii} = 0$ ) и зависящая от сдвига на  $p$  отсчетов суммируе-

мых сигналов в цепи обратной связи ИНС;  $L$  — число весовых коэффициентов фильтров в цепи обратной связи нейронной сети;  $\tau$  — время, измеряемое в отсчетах.

Дифференциал функционала (3):

$$dJ = - \sum_{i=1}^m E \left\{ \frac{d \log \Theta_i(y_i)}{dy_i} dy_i \right\} = E \{ f^T(y) dy(\tau) \}, \quad (6)$$

где  $f(y)$  — вектор-столбец производных от функций логарифмической плотности вероятности  $\frac{d \log \Theta_i(y_i)}{dy_i}$  (функций активации).

Из выражения (5) найдем дифференциал вектора выходных сигналов по разделяющей матрице:

$$dy(\tau) = - \left[ \sum_{p=1}^L [dW_p y(\tau-p) + W_p y(\tau-p)] \right] \approx - \sum_{p=1}^L dW_p y(\tau-p). \quad (7)$$

Упрощение выражения (7) связано с тем, что на малые изменения выходных сигналов влияют только малые изменения элементов матриц  $W_p$ .

Обычный градиентный поиск элементов разделяющих матриц приводит к следующему выражению:

$$W_p(\tau+1) = W_p(\tau) - \mu(\tau) \frac{dJ}{dW_p}, \quad (8)$$

где  $\mu(\tau)$  — коэффициент адаптации алгоритма, который также может зависеть от времени.

Градиент функционала (4) с учетом выражений (6) и (7) равен:

$$\frac{dJ}{dW_p} = - \frac{E \{ f^T(y) \sum_{p=1}^L dW_p y(\tau-p) \}}{dW_p} = - E \{ f(y) y^T(\tau-p) \}. \quad (9)$$

Усреднение заменим на скользящее среднее и получим алгоритм градиентного поиска коэффициентов  $p$ -разделяющих матриц:

$$W_p(\tau+1) = W_p(\tau) + \mu(\tau) R_{f_y}(p), \quad (10)$$

где  $R_{f_y}^{(\tau)}(p) = (1 - \mu_0) R_{f_y}^{(\tau-1)}(p) + \mu_0 f(y) y^T(\tau-p)$  — матрица взаимной корреляции функции активации от выходных сигналов и выходных сигналов ИНС;  $\mu_0$  — произвольно выбираемый коэффициент меньше единицы.

Преимущество алгоритма слепого разделения на основе минимизации взаимной информации перед алгоритмами Жуттена — Эро

состоит в том, что разделяются помехи, не только имеющие разные задержки и уровни, но и подвергнутые различным линейным преобразованиям в канале распространения.

**Результаты моделирования**

*Алгоритм слепого разделения сигналов Жуттена — Эро*

Основными параметрами, влияющими на разделение сигналов, являются:

- $H(n, m)$  — диагональная матрица с элементами  $E\{f(y_i)g(y_i)\}$ ;
- $\mu$  — коэффициент адаптации алгоритма.

Рассмотрев результаты изменения значений  $H(n, m)$  (табл. 1–4), влияния коэффициентов диагональной матрицы на отношение сигнал/шум и на установку времени адаптации, можно сделать следующие выводы: отношение сигнал/шум при изменении коэффициентов диагональной матрицы не изменяется, так же как установка времени адаптации [7].

*Таблица 1*

**Влияние коэффициента диагональной матрицы на отношение сигнал/шум без добавления шума**

*Table 1*

**The effect of the diagonal matrix coefficient on the signal-to-noise ratio without noise addition**

$H(n, m)$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$Ps1'/Ps2$ , дБ	—	2,959	2,958	2,955	2,948	—	2,969	2,966	2,965
$Ps2'/Ps1$ , дБ	—	2,952	2,95	2,947	2,938	—	2,961	2,959	2,958

*Таблица 2*

**Влияние коэффициента диагональной матрицы на отношение сигнал/шум с добавлением шума**

*Table 2*

**The effect of the diagonal matrix coefficient on the signal-to-noise ratio with noise addition**

$H(n, m)$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$Ps1'/Ps2$ , дБ	—	3,017	3,016	3,013	3,006	—	3,032	3,026	3,024
$Ps2'/Ps1$ , дБ	—	2,995	2,994	2,993	2,987	—	3,004	3	2,999



Таблица 3

**Влияние коэффициента диагональной матрицы на установку времени адаптации без добавления шума**

Table 3

**The effect of the diagonal matrix coefficient on the adaptation time setting without noise addition**

$H(n, m)$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$t_1, c$	—	0,205	0,205	0,205	0,205	—	0,205	0,205	0,205
$t_2, c$	—	0,205	0,205	0,205	0,205	—	0,205	0,205	0,205

Таблица 4

**Влияние коэффициента диагональной матрицы на установку времени адаптации с добавлением шума**

Table 4

**The effect of the diagonal matrix coefficient on the adjustment of the adaptation time with noise addition**

$H(n, m)$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$t_1, c$	—	0,2	0,2	0,2	0,2	—	0,2	0,2	0,2
$t_2, c$	—	0,2	0,2	0,2	0,2	—	0,2	0,2	0,2

Диагональная матрица влияет на разделение двух сигналов в том случае, если матрица является единичной, то есть, например, квадратной матрицей, элементы главной диагонали которой равны единице, а остальные не равны единице и нулю, то получаем удовлетворительное разделение двух сигналов, в противном случае разделения сигналов не происходит.

Результат изменения  $\mu$  показал (табл. 5–8), что коэффициент адаптации алгоритма особо не влияет на отношение сигнал/шум и на установку времени адаптации [7].

Таблица 5

**Влияние коэффициентов адаптации на отношения сигнал/шум без добавления шума**

Table 5

**The effect of adaptation factors on signal-to-noise ratios without noise addition**

$\mu$	0,00000001	0,0000001	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1
$Ps1'/Ps2,$ дБ	2,961	2,961	2,961	2,961	2,96	2,958	2,916	2,385	—
$Ps2'/Ps1,$ дБ	2,955	2,955	2,955	2,955	2,955	2,95	2,901	2,375	—

Таблица 6

**Влияние коэффициентов адаптации на отношения сигнал/шум с добавлением шума**

Table 6

**The effect of adaptation factors on signal-to-noise ratios with noise addition**

$\mu$	0,00000001	0,0000001	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1
$P_{s1}'/P_{s2}$ , дБ	3,019	3,019	3,019	3,019	3,019	3,016	2,972	2,457	—
$P_{s2}'/P_{s1}$ , дБ	2,995	2,995	2,995	2,995	2,995	2,994	2,95	2,436	—

Таблица 7

**Влияние коэффициента адаптации на установку времени адаптации без добавления шума**

Table 7

**The effect of adaptation factor on setting the adaptation time without noise addition**

$\mu$	0,00000001	0,0000001	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1
$t_1$ , с	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	—
$t_2$ , с	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,220	—

Таблица 8

**Влияние коэффициента адаптации на установку времени адаптации с добавлением шума**

Table 8

**The effect of adaptation factor on setting the adaptation time with noise addition**

$\mu$	0,00000001	0,0000001	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1
$t_1$ , с	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	—
$t_2$ , с	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,215	—

При увеличении коэффициента адаптации с 0,00001 до 0,01 происходит разделение двух сигналов, при увеличении коэффициента до 0,1 получаем неполноценное разделение двух сигналов (рис. 3), это выражено появлением амплитудной модуляции у второго сигнала, если продолжать увеличивать коэффициент адаптации, то алгоритм перестает работать. Также можно заметить, что при установке коэффициента от 0,01 до 0,1 происходит незначительное изменение отно-

шения сигнал/шум и установки времени адаптации, это объясняется появлением амплитудной модуляции у второго сигнала.

В целом можно сказать, что этот алгоритм является устойчивым к изменению параметров [7].

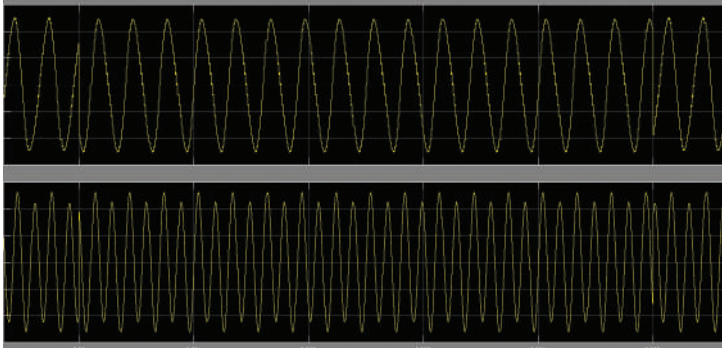


Рис. 3. Результат разделения двух сигналов с использованием алгоритма Жуттена — Эро с коэффициентом адаптации алгоритма, равным 0,1

Fig. 3. The result of the separation of two signals using the Jutten–Herault algorithm with an adaptation coefficient of the algorithm equal to 0.1

#### *Алгоритм на основе минимизации взаимной информации*

Основными параметрами, влияющими на разделение сигналов в этом алгоритме, являются:

- $H(n, m)$  — диагональная матрица с элементами,
- $\mu$  — коэффициент адаптации алгоритма,
- $\mu_0$  — произвольно выбираемый коэффициент адаптации.

Результат изменения значений  $H(n, m)$  показал (табл. 9–12), что разделения сигнала не происходит, если матрица является единичной, а также было замечено, что при увеличении значения элементов не главной диагонали происходит деградация амплитуды второго сигнала (рис. 4, а, б) после разделения [7].

Таблица 9

#### **Влияние весовых коэффициентов диагональной матрицы на отношение сигнал/шум без добавления шума**

Table 9

#### **The effect of the weight coefficients of the diagonal matrix on the signal-to-noise ratio without noise addition**

$H(n, m)$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$Ps1'/Ps2$ , дБ	—	14,3	18,86	21,6	23,56	25,07	26,26	27,22	28,02
$Ps2'/Ps1$ , дБ	—	11,83	13,1	13,46	13,69	13,92	14,18	14,47	14,79

Таблица 10

**Влияние весовых коэффициента диагональной матрицы на отношение сигнал/шум с добавлением шума**

Table 10

**The effect of the weights of the diagonal matrix on the signal-to-noise ratio with noise addition**

$H(n, m)$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$Ps1'/Ps2$ , дБ	—	13,36	18,34	21,28	23,35	24,92	26,15	27,14	28,6
$Ps2'/Ps1$ , дБ	—	10,98	12,91	13,57	13,35	14,32	14,66	15,01	15,32

Таблица 11

**Влияние весовых коэффициентов диагональной матрицы на установку времени адаптации без добавления шума**

Table 11

**The effect of the weights of the diagonal matrix on the installation of the adaptation time without noise addition**

$H(n, m)$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$t_1$ , с	—	0,55	0,35	0,27	0,215	0,195	0,18	0,16	0,135
$t_2$ , с	—	0,59	0,38	0,29	0,25	0,21	0,19	0,18	0,16

Таблица 12

**Влияние весовых коэффициента диагональной матрицы на установку времени адаптации с добавлением шума**

Table 12

**The effect of the weights of the diagonal matrix on the adjustment of the adaptation time with noise addition**

$H(n, m)$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6
$t_1$ , с	—	0,55	0,34	0,265	0,21	0,19	0,17	0,15	0,135
$t_2$ , с	—	0,58	0,37	0,285	0,23	0,205	0,185	0,165	0,15

Рост отношения сигнал/шум можно объяснить тем, что происходит искажение сигнала в канале с увеличением значения элементов диагональной матрицы после разделения, за счет чего происходит незначительное уменьшение времени адаптации.

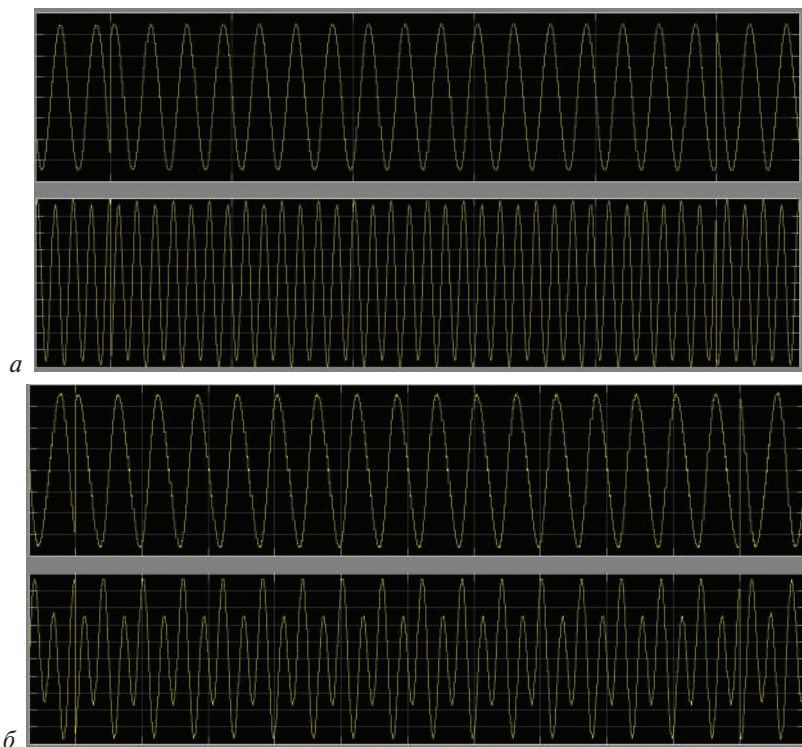


Рис. 4. Результат разделения двух сигналов с использованием алгоритма слепого разделения сигналов на основе минимума взаимной информации:

$$a - H(n, m) = 0,2, \quad б - H(n, m) = 1,6$$

Fig. 4. The result of the separation of two signals using the algorithm of blind separation of signals based on the minimum of mutual information:

$$a - H(n, m) = 0,2, \quad b - H(n, m) = 1,6$$

Анализ влияния коэффициентов адаптации показал (табл. 13–16), что он не влияет на отношение сигнал/шум, на установку времени адаптации и на разделение сигнала [7].

Таблица 13

**Влияние коэффициентов адаптации на отношение сигнал/шум без добавления шума**

Table 13

**The effect of adaptation factors on signal-to-noise ratios without noise addition**

$\mu$	0	0,0000001	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1
$Ps1'/Ps2$ , дБ	–	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3
$Ps2'/Ps1$ , дБ	–	11,83	11,83	11,83	11,83	11,83	11,83	11,83	11,83

Таблица 14

**Влияние коэффициентов адаптации на отношение сигнал/шум с добавлением шума**

Table 14

**The effect of coefficients on signal-to-noise ratios with noise addition**

$\mu$	0	0,0000001	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1
$P_{s1'}/P_{s2}$ , дБ	—	13,36	13,36	13,36	13,36	13,36	13,36	13,36	13,36
$P_{s2'}/P_{s1}$ , дБ	—	10,98	10,98	10,98	10,98	10,98	10,98	10,98	10,98

Таблица 15

**Влияние коэффициента адаптации на установку времени адаптации без добавления шума**

Table 15

**The effect of adaptation factor on setting the adaptation time without noise addition**

$\mu$	0	0,00000001	0,0000001	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1
$t_1$ , с	—	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
$t_2$ , с	—	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59

Таблица 16

**Влияние коэффициента адаптации на установку времени адаптации с добавлением шума**

Table 16

**The effect of adaptation coefficient on the adjustment of the adaptation time with noise addition**

$\mu$	0	0,00000001	0,0000001	0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1
$t_1$ , с	—	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
$t_2$ , с	—	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57

Изменение параметра  $\mu_0$  выявило (табл. 17–20), что произвольно выбираемый коэффициент  $\mu_0$  не только должен быть меньше единицы, но и быть в пределах  $0,01 \geq \mu_0 \geq 0,1$ , в противном случае не удастся разделить сигналы, а резкое изменение отношения сигнал/шум и времени адаптации говорит о чувствительности этого алгоритма к этому параметру [7].

Таблица 17

**Влияние произвольно выбираемого коэффициента адаптации  
на отношение сигнал/шум без добавления шума**

Table 17

**The effect of a randomly selected adaptation factor on signal-to-noise ratios  
without noise addition**

$\mu_0$	0,001	0,01	0,1	1
$Ps1'/Ps2$ , дБ	—	14,3	30,79	—
$Ps2'/Ps1$ , дБ	—	11,83	13,74	—

Таблица 18

**Влияние произвольно выбираемого коэффициента адаптации  
на отношение сигнал/шум с добавлением шума**

Table 18

**The effect of a randomly selected adaptation factor on signal-to-noise ratios  
with noise addition**

$\mu_0$	0,001	0,01	0,1	1
$Ps1'/Ps2$ , дБ	—	13,36	29,37	—
$Ps2'/Ps1$ , дБ	—	10,98	10,12	—

Таблица 19

**Влияние произвольно выбираемого коэффициента адаптации  
на установку времени адаптации без добавления шума**

Table 19

**The effect of an arbitrarily selectable adaptation factor on setting  
the adaptation time without noise addition**

$\mu_0$	0,001	0,01	0,1	1
$t_1$ , с	—	0,55	0,12	—
$t_2$ , с	—	0,59	0,18	—

Таблица 20

**Влияние произвольно выбираемого коэффициента адаптации на установку времени адаптации с добавлением шума**

Table 20

**The effect of an arbitrarily selectable adaptation factor on the adjustment of the adaptation time with noise addition**

$\mu_0$	0,001	0,01	0,1	1
$t_1, c$	—	0,55	0,145	—
$t_2, c$	—	0,58	0,185	—

**Заключение**

При сравнении алгоритма Жуттена — Эро и алгоритма на основе минимизации взаимной информации наиболее стабильную работу показал алгоритм Жуттена — Эро. Это показано его отсутствием к чувствительности параметров, а также выражено отсутствием амплитудных манипуляций после разделения сигналов, за счет этого отношение сигнал/шум у алгоритма Жуттена — Эро меньше (табл. 21, 22), но время сходимости лучше по сравнению с алгоритмом на основе минимизации взаимной информации.

Таблица 21

**Сводная таблица алгоритмов слепого разделения/выделения сигналов без добавления шума**

Table 21

**Summary table of algorithms of blind separation/extraction of signals without noise addition**

Измеряемый параметр	Алгоритм Жуттена — Эро		Алгоритм на основе минимума взаимной информации		
	$H(n, m) = 0,4$	$\mu = 0,001$	$H(n, m) = 0,2$	$\mu = 0,001$	$\mu_0 = 0,01$
$Ps1'/Ps2,$ дБ	2,958		14,3		
$Ps2'/Ps1,$ дБ	2,95		11,83		
$t_1, c$	0,205		0,55		
$t_2, c$	0,205		0,59		



Таблица 22

Сводная таблица алгоритмов слепого разделения/выделения сигналов с добавлением шум

Table 22

Summary table of algorithms of blind separation/selection of signals with noise addition

Измеряемый параметр	Алгоритм Жутена — Эро		Алгоритм на основе минимума взаимной информации		
	$H(n, m) = 0,4$	$\mu = 0,001$	$H(n, m) = 0,2$	$\mu = 0,001$	$\mu_0 = 0,01$
$Ps1'/Ps2$ , дБ	3,016		13,36		
$Ps2'/Ps1$ , дБ	2,994		10,98		
$t_1$ , с	0,2		0,55		
$t_2$ , с	0,2		0,58		

По представленным результатам, алгоритмы являются работоспособными и не имеют сложных вычислительных процессов, что говорит о явном преимуществе перед алгоритмами слепого разделения сигналов, основанных на преобразовании Фурье [7].

### Литература/References

1. Манохин А. Е. Многоканальный адаптивный со слепым разделением помех в опорных каналах [Электронный ресурс]. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/oct14/4/text.html> (дата обращения: 30.10.2018).

Manokhin A. E. *Multichannel adaptive with the blind separation of interference in the reference channels*. Available at: <http://jre.cplire.ru/alt/oct14/4/text.html> (accessed 30.10.2018). (In Russian)

2. Манохин А. Е. Применение алгоритма слепого разделения помех на основе минимизации взаимной информации в опорных каналах многоканального адаптивного компенсатора [Электронный ресурс]. URL: <http://jre.cplire.ru/win/mar16/6/text.html> (дата обращения: 30.10.2018).

Manokhin A. E. *Application of the algorithm of blind separation of interference based on minimization of mutual information in the reference channels of the multichannel adaptive compensator*. Available at: <http://jre.cplire.ru/win/mar16/6/text.html> (accessed 30.10.2018). (In Russian)

3. Долгих Д. А. Алгоритмы и устройства обработки сигналов на основе ортогонального частотного мультиплексирования. Томск : ТУСУР, 2008. 21 с.

Dolgh D. A. *Algorithms and signal processing devices based on orthogonal frequency multiplexing*. Tomsk, TUSUR, 2008, 21 p. (In Russian)

4. Cardoso J. F. Blind signal separation: statistical principles. *Proceeding of the IEEE*, 1998, vol. 10, no. 9, pp. 2009–2025.

5. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / под ред. В. Ф. Кравченко. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 544 с.

6. *Digital signal and image processing in radiophysical applications*. Ed. by V. F. Kravchenko. — Moscow, FIZMATLIT, 2007, 544 p. (In Russian)

7. Cichoki A., Amari S. *Adaptive Blind Signal and Image Processing: Learning Algorithms and Applications*, John Wiley & Sons, 2002.

8. Белков К. С. Разработка и исследование эффективности алгоритмов слепого разделения/выделения сигнала на фоне различных помех / К. С. Белков. Екатеринбург, 2017. 103 с.

Belkov K. S. *Development and study of the effectiveness of algorithms of blindly separating/extracting a signal against the background of various interferences*, Yekaterinburg, 2017, 103 p. (In Russian)

#### Информация об авторе

**Белков Кирилл Сергеевич** — аспирант департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (ул. Мира, 32, Екатеринбург, Россия).

#### Information about the authors

**Belkov Kirill Sergeevich** — postgraduate of the Department of Radioelectronics and Communications of Engineering School of Information Technologies, Telecommunications and Control Systems of Ural Federal University the first President of Russia B. N. Yeltsin (Mira street 32, Ekaterinburg, Russian Federation).

Поступила / Receiver: 07.08.2018

Принята в печать / Accepted: 14.10.2018

## Publication Requirements for Articles Submitted to “Ural Radio Engineering Journal”

The journal accepts for publication authors' original articles in Russian and English which correspond to the subject of the Ural Radio Engineering Journal.

The submitted papers should not be published in other scientific journals in parallel.

All papers are submitted over automated editorial media on the website of the journal (<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>) or via email ([urejournal@gmail.com](mailto:urejournal@gmail.com)). A paper is considered being submitted if a reply message with confirmation is received.

A paper is submitted in formats readable by MS Word. The final paper length should be between 8 to 30 pages (including references).

The text file of the paper should start with the information about the authors: complete name, affiliation (place of work, study, etc.), postal address for journal delivery, e-mail address, and phone numbers.

The text file of the paper should contain a required number of UDC classification codes, abstract, key words and the text of the article in Russian or English. The style of the paper should be scientific and meet the requirements of anonymization.

### ***Paper Title***

The paper title should be informative and concise. Only commonly accepted abbreviations should be used.

### ***Abstract***

Abstract functions as an autonomous source of information. It should be informative, intelligent, brief and structured. If the paper is published in Russian the English abstract should be more extensive (and differs from the Russian one).

Abstract may start with the phrases: *This paper focuses on...*, *This paper aims at explaining...*, *Our paper is concerned with...* and etc.

Abstract in English represents the main content of the paper and its conclusions. The abstract structure as in the paper is welcomed: Introduction, Target and Research Questions, Methodology, Results and Conclusion.

The results of the research are described accurately and informatively. The conclusion may include recommendations, assessments and proposals from the article.

The text of the abstract should be laconic and concrete, deprived of peripheral issues, extra parenthetical words and general enunciations.

### ***Keywords***

3–8 words or established terms. IEEE taxonomy is recommended.

### ***Mathematical Formulas***

All mathematical formulas in the paper should be unified. MathType, import from MatLab or analogous editable mathematical package are recommended.

### ***Tables***

All tables should have titles and a legend explaining any included abbreviations.

### ***Figures***

All figures should be prepared in the raster formats JPEG, TIFF with the resolution not less than 600 dpi. Lowercase letters (a, b и т. д.) are used for the identification of different parts of the figure. Symbols used for marking and heading the figures should be identical with their inscription in the paper.

Files with figures are duplicated in a separate folder. The number of the figure in the paper is the name of the file.

Figures, graphics and etc. in MS Excel should also be sent in Excel files.

### ***Acknowledgements***

Acknowledgements should be as short as possible. All grants required references should be listed. The full titles of financing organizations should be listed.

### ***References***

- The list of the references should be given at the end of the paper. References are numbered in brackets by order of appearance in the document (e.g. [1], [2], [3]).
- References should include only articles quoted in the paper and already published or accepted for publication. Articles published in the Internet should be quoted with Digital Object Identifier (DOI).

- References in the paper in Russian are also provided in English. Titles of the resources in Russian are provided transliterated and translated.

### ***Author Credentials***

Information about the authors is at the end of the article: full name, academic degree, position, place of work, e-mail, postal address. All is in two languages.

### ***Plagiarism***

Plagiarism in any form is a serious violation of the main principles of science and therefore is unacceptable.

Inadmissible:

1. Copying of parts of papers of other authors word for word without putting them between quotation marks in accordance to the rules of scientific citation.

2. Use of particularly unique term taken from science literature without its author's or source's indication.

3. Paraphrasing, abridgment or changing of ideas of other authors without their name indication.

4. Pseudo citation: the material doesn't apply to the source it is taken from.

5. Falsified data — data which is falsified or changed in laboratory or during an experiment (it is not practically a plagiarism though it is obvious academic fraud).

6. Unconfirmed co-authorship or co-operation: the contribution of every author or co-author should be absolutely defined.

7. Self-plagiarism/publication: presentation of one and the same or similar paper for two or more submissions concurrently.

Editorial board reserves the right to return a paper to the author if the paper doesn't meet the requirements. No explanation is given. The information about the reviewers can't be disclosed to the authors or the third person party.

## Требования к статьям, публикуемым в журнале Ural Radio Engineering Journal

Журнал принимает к публикации оригинальные авторские статьи на русском и английском языке, соответствующие тематике. Присланные на рассмотрение и рецензирование статьи не должны одновременно печататься в другом научном журнале.

Все статьи принимаются через автоматизированную редакционную среду на сайте журнала (<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>) или по электронной почте ([urejournal@gmail.com](mailto:urejournal@gmail.com)). Статья считается принятой в случае получения ответного сообщения/письма с подтверждением.

Статья принимается в форматах, читаемых MS Word. Объем статьи должен составлять не менее 8 страниц и не должен превышать 30 страниц.

Текстовый файл статьи следует начинать с информации об авторах: имена, аффилиация (место работы, учебы и др.), почтовый адрес для пересылки журнала, адрес электронной почты, номера контактных телефонов для связи.

В текстовом файле должны быть приведены: необходимое количество кодов классификации УДК, аннотация, ключевые слова и непосредственно текст статьи — **на русском и английском языках**. Изложение текста в статье должно отвечать научной стилистике и требованиям анонимизации.

### **Заглавие статьи**

Заглавие научной статьи должно быть информативным и кратким. Можно использовать только общепринятые сокращения.

### **Аннотация**

Аннотация призвана выполнять функцию независимого от статьи источника информации, она должна быть информативной, содержательной, компактной и структурированной. В случае публикации статьи на русском языке английский вариант аннотации должен быть более развернутым (он может отличаться от русского). Аннотация может начинаться со слов: „This paper focuses on...“, „This paper aims at explaining...“, „Our paper is concerned with...“ и т. п.

Аннотация на английском языке должна отражать основное содержание статьи и ее выводы. Приветствуется построение аннотации, повторяющее структуру статьи, включая введение, цели и задачи, методологию исследования, результаты, заключение. Результаты работы описываются предельно точно и информативно. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, приведенными в статье.

Текст аннотации должен быть лаконичен и конкретен, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих формулировок.

### ***Ключевые слова***

От 3 до 8 слов или устоявшихся словосочетаний. Рекомендуется использовать таксономию IEEE.

### ***Математические формулы***

Все математические формулы в тексте должны быть набраны единообразно. Рекомендуется использовать MathType, импорт из MatLab или аналогичных математических пакетов с возможностью редактирования.

### ***Таблицы***

Все таблицы должны иметь заглавие и легенду, объясняющую любые упомянутые в них сокращения.

### ***Рисунки***

Все иллюстрации должны быть подготовлены в растровом формате JPEG, TIFF, разрешение не менее 600 dpi. Для идентификации частей иллюстрации следует использовать строчные буквы (*a*, *b* и т. д.). Начертание символов, используемых для обозначений на рисунках и в подписях к ним, должно совпадать с их написанием в тексте статьи.

Файлы с рисунками дублируются в отдельной папке. В названиях файлов должны быть указаны номера иллюстраций в тексте статьи.

Иллюстрации, графики и проч., выполненные в MS Excel, необходимо дополнительно выслать в виде файла Excel.

### ***Благодарности***

Благодарности должны быть как можно более краткими. Следует указать все гранты, в правилах которых требуется упоминание. Названия финансирующих организаций нужно писать целиком.

### **Список литературы**

- В тексте и в сносках ссылки на источники должны приводиться в [квадратных скобках], нумерация сквозная. Описание всех ссылок дается в списке литературы в конце статьи.
- Список литературы должен включать только те работы, которые цитируются в тексте и которые были опубликованы или приняты к публикации. Статьи, опубликованные в интернете и не прошедшие в печать, должны цитироваться с использованием цифрового идентификатора объекта (Digital Object Identifier (DOI)). При наличии DOI также может быть добавлен и к опубликованным материалам из списка литературы.
- Для статьи на русском языке список литературы приводится также и на английском, при этом названия русскоязычных источников представляются как в транслитерации, так и в переводе.

### **Сведения об авторах**

В конце статьи приводится информация об авторах: ФИО, научная степень, должность, место работы, e-mail, почтовый адрес — также на двух языках.

### **Плагиат**

Плагиат в любой форме представляет собой серьезное нарушение одного из самых основных принципов науки и не может быть приемлем.

Недопустимы:

1. Копирование слово в слово частей чужой работы без заключения скопированного отрывка в кавычки и указания источника в соответствии с правилами научного цитирования.
2. Использование особо уникального термина или понятия, найденного при чтении литературы, без указания автора или источника.
3. Перефразирование или сокращенная, измененная формулировка чужой идеи без указания того, чей труд был взят за основу.
4. Ложное цитирование: материал не должен быть отнесен к источнику, из которого он не был получен.
5. Ложные данные — данные, которые были сфабрикованы или изменены в лаборатории или в процессе эксперимента (хотя и не являются буквально плагиатом, тем не менее представляют собой явное академическое мошенничество).
6. Неподтвержденное соавторство или сотрудничество: вклад каждого автора или соавтора должен быть совершенно определенным.



7. Самоплагиат/вторичная публикация: представление одной и той же или похожей до степени сродства статьи для двух или более публикаций одновременно.

Редакция оставляет за собой право на возвращение авторам любой рукописи, которая, по их мнению, не подходит для публикации, без объяснения причин. Ни при каких обстоятельствах личность рецензентов и референтов по отдельным статьям не может быть раскрыта авторам или третьей стороне.

## Publication Ethics

### General

The editorial board of the journal “Ural Radio Engineering Journal” honors the ethical criteria established for international scholarly publications, like integrity, confidentiality, transparency, conflict of interests and other aspects. We are guided by recommendations of the Committee on Publication Ethics. Being a member of Association of Science Editors and Publishers (ASEP), we adhere to the basic ethical principles manifested in the ASEP Declaration.

- The editorial board grants that all materials submitted for publication will be peer reviewed and accepted based on the principles of editorial independence and unbiased judgment.
- The editorial board is responsible for the quality of published scientific papers and supports the initiatives aimed at prevention of misconduct or unethical actions on the part of the authors or reviewers.
- Ethical rules are accepted as a must for all parties of the scholar publications: authors, reviewers, editorial board members, as well as persons and entities interested in the information disseminated by the Journal.
- Materials submitted to the editorial board are not returned to the authors. The authors will receive no remuneration (royalties) for the published materials. All scientific papers are published on free of charge basis.
- The editorial board adheres to the COPE ethical criteria, such as:
  - impartiality;
  - observance of scientific ethics when reviewing the papers, encouragement of scholarly discussions between the authors and reviewers;
  - assistance to protection of intellectual property and copyright;
  - papers will be rejected in case of plagiarism when another’s publications, words, or ideas are used without attribution to the original source, which is to be identified by the plagiarism detection software Antiplagiat;

- confidentiality (non-disclosure of the authors' and the reviewers' personal information and other information obtained within the professional interaction);
- making editorial correction in papers by agreement with authors.

### **Responsibilities and ethics of editors**

The editorial board should:

- strive to meet the needs of readers and authors;
- take appropriate measures to maintain a high quality of the material published;
- take appropriate measures to maintain a high quality of the material published;
- preclude commercial needs from compromising intellectual standards;
- always be willing to publish corrections, clarifications, retractions and apologies, if required.

### **Author's responsibilities and ethics**

The author shall cooperate with the editorial board throughout the publication process by introducing appropriate corrections, if required. The author is fully responsible for any plagiarisms in the text, illustrations or other materials.

The manuscripts submitted to the Journal's editorial staff should comply with the research paper manuscript formatting rules stated on the Journal web site.

The author is not entitled to submit the same paper for several scientific publications. The authors are obliged to observe the following ethical principles:

- compliance of the materials with the ethics and legal standards including copyright protection laws (in particular, the materials protected by the copyright including tables, digits or long quotations can be reproduced only by the owner's permission);
- research originality and scientific novelty;
- researchers should use best endeavors to describe the work performance methodology clear and definitely in such way that their results can be approved by other researchers, if required;
- impartial discussion of the research importance;
- acknowledgement of other persons' contributions, mandatory references to the deliberations used for the benefit of submitted materials;
- presentation of all major contributors to the research as co-authors;

- informing about significant errors or inaccuracies, if any, found in the publication and interacting with the editorial staff with the purpose of the quickest error correction or removal of the publication;
- no adoptions without proper references to primary sources (plagiarism).

The authors are fully responsible for reliability of the information contained in the submitted materials, for compliance of the materials with the statutory regulations, the moral rules and the ethics standards.

### **Responsibilities and ethics of authors**

According to the Journal policy the editorial board establishes the review procedures for the materials to be published. In the process of reviewing the manuscripts the information about the authors and the reviewers will be held in confidence. Disclosures in breach of the confidence are allowed only in case of suspected deception or falsification on the part of the authors or the reviewers. Reviewers are not entitled to use the reviewed manuscripts for personal purposes or provide these manuscripts to third parties without prior permission of senior editors. They are obliged to return or delete the manuscript copy after presenting the review. The manuscripts rejected by the editorial board are not preserved. The reviewer remarks are not published or made public otherwise without permission of the reviewer, the manuscript author or the editor. Reviewers shall provide fair and unbiased judgment of the manuscript, giving clearly and well-grounded comments to appraise the paper's scientific content only. Personal criticism of the author is unacceptable. The reviewers are obliged to be guided by the following ethical principles:

- to review only those manuscripts which the reviewer has sufficient knowledge to judge;
- to prepare a review in time based on the constructive approach;
- to maintain confidentiality;
- to be impartial preparing a review;
- to inform the editor in case the materials have been published earlier in this or another publication;
- to inform the editor and, if required, to pass the manuscript to another reviewer in case of potential conflict of interests (existing of financial, organizational or other relations between the reviewer and the author);
- the review contents should not be influenced by the manuscript origin, the authors' nationality, sex, religion or political commitments;
- not to use the information obtained within the reviewing process for the personal purposes and in the interests of other persons.

**Privacy**

E-mail addresses intimated by the authors will be used exclusively for communication with the authors and referees and shall not be disclosed to other persons or entities.

**Disclosure and conflict of interest policy**

Referees deemed to have conflicts of interest in view of personal, financial or organization benefits, as well as competition with any submitting authors (companies, organizations) will not be appointed to review the manuscripts in question.

## Публикационная этика

### Общие положения

- Редакция журнала Ural Radio Engineering Journal руководствуется в своей работе международными этическими правилами научных публикаций, в основе которых лежит порядочность, конфиденциальность, надзор за публикациями, разрешение возможных конфликтов интересов и др. В своей деятельности редакция следует рекомендациям Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics), опирается на принципы публикационной этики, принятые Декларацией АНРИ.
- Редакция гарантирует рассмотрение всех представленных к публикации материалов, соблюдение редакторской независимости и добросовестности, принятие объективных решений.
- Редакция несет ответственность за качество опубликованных научных статей и поддерживает инициативы, направленные на снижение числа некорректных действий со стороны авторов и рецензентов и нарушений норм этики.
- Этическим правилам журнала должны следовать все участники процесса публикации результатов научных исследований: авторы, рецензенты, члены редакционной коллегии, сотрудники редакции, а также лица и организации, заинтересованные в информации, представляемой журналом.
- Материалы, направляемые в редакцию журнала, авторам не возвращаются. Вознаграждение (гонорар) за опубликованные материалы не выплачивается. Все научные статьи публикуются в журнале на безвозмездной основе.
- Редакция журнала руководствуется такими этическими принципами COPE, как:
  - беспристрастность;
  - соблюдение научной этики при рецензировании статей, поощрение научной дискуссии между авторами и рецензентами;
  - содействие защите интеллектуальной собственности и авторских прав;
  - отклонение рукописи статьи при выявлении плагиата — опубликованных ранее материалов других авторов без ссылки

на первоисточники; проверка осуществляется с помощью системы «Антиплагиат»;

– конфиденциальность (неразглашение персональных данных авторов и рецензентов и прочей информации, полученной в ходе профессионального взаимодействия);

– внесение в статью редакционных правок после согласования с авторами.

### **Ответственность и этические принципы сотрудников редакции**

Редакция журнала:

- обеспечивает выполнение запросов читателей и авторов;
- предпринимает необходимые меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов;
- гарантирует свободу выражения мнений всем членам научного сообщества;
- не допускает превалирования коммерческих соображений над интеллектуальными критериями;
- по мере необходимости обеспечивает публикацию поправок, разъяснений, опровержений и извинений.

### **Ответственность и этические принципы авторов**

На протяжении всего процесса публикации автор обязан сотрудничать с редакцией журнала, исправляя статью в случае необходимости.

Автор полностью берет на себя ответственность за возможный плагиат текста, рисунков и других заимствованных материалов.

Рукописи, предоставляемые на рассмотрение в редакцию журнала, должны соответствовать правилам оформления рукописи научной статьи, представленным на сайте журнала.

Автор не имеет права представлять одну статью на публикацию в несколько научных изданий.

Авторам необходимо придерживаться следующих этических принципов:

- соответствие материалов этическим и юридическим нормам, в т. ч. законодательству о защите авторских прав (в частности, материалы, защищенные авторским правом, в т. ч. таблицы, цифры или крупные цитаты, могут воспроизводиться только с разрешения их владельцев);
- оригинальность и научная новизна исследований;
- достоверность полученных результатов;

- четкость в описании методологии выполнения работ, чтобы их результаты могли быть подтверждены при необходимости другими исследователями;
- объективное обсуждение значимости исследований;
- признание вклада других лиц, обязательное наличие библиографических ссылок на использованные работы;
- представление в качестве соавторов всех участников, внесших существенный вклад в исследование;
- информирование об обнаружении ошибок или неточностей в публикации и взаимодействие с редакцией с целью скорейшего исправления ошибок или изъятия публикации;
- отсутствие в статье заимствований без ссылок на первоисточники (плагиата).

Авторы несут всю ответственность за достоверность информации, содержащейся в представляемых материалах, за соответствие материалов нормам законодательства, морали и этики.

### **Ответственность и этические принципы рецензентов**

В соответствии с политикой журнала редакция устанавливает процедуру проведения рецензирования представленных к опубликованию материалов.

При рецензировании рукописей обеспечивается конфиденциальность информации об авторах и о рецензентах. Нарушение конфиденциальности допускается только при подозрении фальсификации со стороны авторов либо рецензентов.

Рецензенты не имеют права использовать полученные рукописи в личных целях или предоставлять их другим лицам без разрешения ответственного члена редколлегии. Замечания рецензентов не публикуются и не обнародуются иным образом без разрешения рецензента, авторов рукописи и редактора.

Рецензенты должны давать честную и объективную оценку рукописи, четко и аргументированно формулировать свои замечания, оценивая исключительно научное содержание статьи. Неприемлема критика личности автора.

Рецензент обязан руководствоваться следующими этическими принципами:

- осуществлять рецензирование только тех рукописей, для оценки которых он обладает достаточными знаниями;
- готовить рецензию своевременно на основе конструктивного подхода;
- соблюдать конфиденциальность;
- при составлении рецензии быть объективным;



- предупредить редактора о материалах, опубликованных ранее в данном или другом издании, при их наличии;
- предупредить редактора и, если необходимо, передать статью другому рецензенту в случае потенциального конфликта интересов (финансовых, организационных или других отношений между рецензентом и автором);
- не использовать информацию, полученную при рецензировании, в личных целях или интересах иных лиц.

На содержание рецензии не должно оказывать влияние происхождение рукописи, национальность, пол, религиозные или политические убеждения авторов.

### **Приватность**

Представленные авторами имена и адреса электронной почты используются исключительно в деловых целях (для контакта с авторами или с рецензентами при подготовке статьи к публикации) и не могут быть предоставлены другим лицам и организациям.

### **Политика раскрытия и конфликты интересов**

При наличии конфликтов интересов вследствие личной, финансовой или организационной заинтересованности, а также конкурентных отношений с любыми авторами (компаниями, организациями), представляющими рукопись, рецензенты не участвуют в ее рассмотрении.

## Правила оформления статьи

### Article Submission Guidelines

---

УДК 000.000

#### Название статьи

*И. О. Фамилия автора*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Место работы, город, страна

e-mail

**Аннотация.** Аннотация должна содержать не более 300 слов и представлять основную идею статьи.

**Ключевые слова.** От трех до восьми слов или устоявшихся словосочетаний. Рекомендуется использовать таксономию IEEE.

#### Paper Title

*Author Name*<sup>1</sup>

Author Affiliation, City, Country

e-mail address

**Abstract.** The abstract should contain no more than 300 words and represent the main idea of the article.

**Keywords.** 3–8 words or established terms. IEEE taxonomy is recommended.

#### Введение (Introduction)

Во введении необходимо представить основную идею работы, описать исследования, которые были проведены. И дать понять читателю, о чем пойдет речь в основной части статьи.

Introduction contains the main idea of the article and the description of the completed research. Introduction outlines the concept of the main part of the paper.

### Заголовок 1 (Heading 1)

Рисунки должны иметь подписи на русском и английском языке.

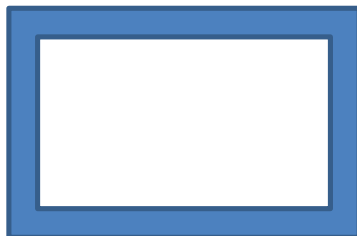


Рис. 1. Название рисунка  
Fig. 1. Example of a figure caption

Figure captions should be below the figures; table heads should appear above the tables. Insert figures and tables after they are cited in the text. Use the abbreviation “Fig. 1”, even at the beginning of a sentence.

### Заголовок 2 (Heading 2)

Название таблицы указывается на русском и английском языках. В конце таблицы необходимо указать источник, в противном случае вы являетесь автором таблицы.

Table heads are in Russian and English. The source of the table is indicated after the table, otherwise you are the author of the table.

*Таблица 1*

**Заголовок таблицы**

*Table 1*

**Table head**


Source/источник:

### Заголовок 3 (Heading 3)

Формулы должны быть набраны шрифтами Times New Roman и/или Symbol. Нельзя использовать встроенный редактор формул редактора Word версий 2010 и выше, так как он использует нестандарт-

ный математический шрифт. Используйте простой набор математических выражений в строку или редакторы MathType или MS Equation. Для создания многоуровневых формул используйте редакторы формул MathType или MS Equation.

Нумеруйте формулы последовательно. Нумерация выполняется с выравниванием по правому краю.

Названия переменных: латинские буквы наклонные, русские буквы прямые:  $U_{\text{ном}}$ . Названия функций и операторы: прямые латинские буквы:  $\pi = di/dt$ . Греческие буквы всегда прямые.

Помните, что формулы включаются в текст с использованием знаков препинания, например, следующая за этим текстом формула должна завершиться точкой, так как это будет конец предложения:

$$a + b = \gamma. \quad (1)$$

Удостоверьтесь, что все переменные, используемые в формуле, были определены до или сразу после формулы. Ссылаясь на формулу, пишите «... в (1)...», но не «... в уравнении (1)...», за исключением начала предложения: «Уравнение (1)...».

#### ***Несколько распространенных ошибок***

- Не используйте букву «o» вместо «0» (нуля), и наоборот: « $\mu_o$ », но не « $\mu_0$ ».
- Все греческие буквы в формулах должны быть прямые, хотя по умолчанию редакторы формул считают иначе.
- Запятые, точки и т. д. ставятся вплотную к словам, после этих знаков обязательно ставится пробел: «Запятые, точки...», но не «Запятые, точки..»
- Тире ставится одновременным нажатием клавиш ALT + SHIFT + «-» (на дополнительной цифровой клавиатуре). Не используйте дефис, или короткое тире, или минус вместо тире.

The equations are an exception to the prescribed specifications of this template. You will need to determine whether or not your equation should be typed using either the Times New Roman or the Symbol font (please no other font). To create multileveled equations, it may be necessary to treat the equation as a graphic and insert it into the text after your paper is styled.

Number equations consecutively. Equation numbers, within parentheses, are to position flush right, as in (1), using a right tab stop.

To make your equations more compact, you may use the solidus (/), the exp function, or appropriate exponents. Italicize Roman symbols for quantities and variables, but not Greek symbols. Use a long dash rather than a hyphen for a minus sign. Punctuate equations with commas or periods when they are part of a sentence, as in

$$\alpha + \beta = \varphi. \quad (1)$$

Note that the equation is centered using a center tab stop. Be sure that the symbols in your equation have been defined before or immediately following the equation. Use “(1),” not “Eq. (1)” or “equation (1),” except at the beginning of a sentence: “Equation (1) is ...”

### ***Some Common Mistakes***

- The word “data” is plural, not singular.
- The subscript for the permeability of vacuum  $m_0$ , and other common scientific constants, is zero with subscript formatting, not a lower-case letter “o”.
- In American English, commas, semi-/colons, periods, question and exclamation marks are located within quotation marks only when a complete thought or name is cited, such as a title or full quotation. When quotation marks are used, instead of a bold or italic typeface, to highlight a word or phrase, punctuation should appear outside of the quotation marks. A parenthetical phrase or statement at the end of a sentence is punctuated outside of the closing parenthesis (like this). (A parenthetical sentence is punctuated within the parentheses.)
- A graph within a graph is an “inset,” not an “insert.” The word alternatively is preferred to the word “alternately” (unless you really mean something that alternates).
- Do not use the word “essentially” to mean “approximately” or “effectively”.
- In your paper title, if the words “that uses” can accurately replace the word using, capitalize the “u”; if not, keep using lower-cased.
- Be aware of the different meanings of the homophones “affect” and “effect,” “complement” and “compliment,” “discreet” and “discrete,” “principal” and “principle”.
- Do not confuse “imply” and “infer”.
- The prefix “non” is not a word; it should be joined to the word it modifies, usually without a hyphen.
- There is no period after the “et” in the Latin abbreviation “et al.”.
- The abbreviation “i. e.” means “that is,” and the abbreviation “e. g.” means “for example”.

### **Заключение (Conclusion)**

В заключении должны быть сформулированы основные выводы по работе.

Conclusion contains the main outputs of the research/paper.

### **Благодарности (Acknowledgment)**

Здесь можно расположить благодарности, в том числе указать гранты и другие виды спонсорства, которые способствовали проведению исследований по теме публикации.

Here you can place the gratitude, including grants and other types of sponsorship that contributed to the research on the topic of publication.

The preferred spelling of the word “acknowledgment” in America is without an “e” after the “g.” Avoid the stilted expression “one of us (R. B. G.) thanks...”. Instead, try “R. B. G. thanks...”. Put sponsor acknowledgments in the unnumbered footnote on the first page.

### **Список литературы/References**

Библиографический список нумеруется. При цитировании номер ссылки включается в текст в квадратных скобках. Помните, что знаки препинания следуют после скобки: [1]. Ссылка делается без пояснений вида «... в статье [3]...», за исключением случая, когда она стоит в начале предложения: «Статья [4] содержит...»

The Reference list is numbered. When quoting, the reference number is included in the text in square brackets. Note that punctuation marks come before the parentheses [1]. The reference is made without explanation (“... in the article/paper [3]...”), except when it is at the beginning of a sentence: “The article/paper [4] ...”.

### **Информация об авторе**

Фамилия Имя Отчество, научная степень, должность, место работы, e-mail, город, страна.

### **Information about the author**

Full name, academic degree, position, place of work, e-mail, City, Country.

# URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL

2018, vol. 2, № 3

Founded by Ural Federal University  
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
19, Mira st., 620002, Ekaterinburg, Russia

Journal Registration Certificate  
PI № FS77-69790 as of 18.05.2017

## Address of Journal

Office 129a, Mira st.,  
620002, Ekaterinburg, Russia  
Phone: +7 343 375-97-02  
E-mail: [urejournal@gmail.com](mailto:urejournal@gmail.com)  
Website: <https://journals.urfu.ru/index.php/urj>

Format 70×100 1/16. Circulation 500 cop.

Publisher — Ural Federal University  
Publishing Center  
4, Turgenev st., 620083 Ekaterinburg, Russia  
Phone: +7 343 358-93-06, +7 343 350-58-20, +7 343 350-90-13  
Fax: +7 343 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>

# УРАЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2018, том 2, № 3

Учредитель — Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина  
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

---

Ответственный за выпуск Н. В. Папуловская  
Редактор В. О. Корионова  
Переводчик А. Г. Ковалева  
Верстка Е. В. Ровнушкиной  
Дизайн обложки — А. А. Кобелев

---

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-69790 от 18.05.2017

## Адрес журнала:

Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 32, оф. 129а  
Тел.: +7 (343) 375-97-02  
E-mail: [urejournal@gmail.com](mailto:urejournal@gmail.com)  
<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>

Формат 70×100 1/16. Тираж 500 экз. Уч.-изд. л. \_\_\_\_.  
Подписано в печать \_\_\_\_\_. Заказ \_\_\_\_.

Отпечатано в типографии  
Издательско-полиграфического центра УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: +7 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>