

Современная наука и инновации.
2024. № 2 (46). С. 48-58.
Modern Science and Innovations.
2024;2(46):48-58.

Иван Митрофанович Першин
[Ivan M. Pershin]

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ /
TECHNICAL SCIENCE

Исследование характеристик
пространственных фильтров

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ / INFORMATICS, COMPUTER
ENGINEERING AND MANAGEMENT

The investigation of the characteristics of
spatial filters

Научная статья / Original article

УДК 004.056
<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2024.2.5>

Северо-Кавказский федеральный университет, Пятигорский институт (филиал)
г. Пятигорск, Россия, ivmp@yandex.ru / North-Caucasus Federal University,
Pyatigorsk Institute (branch), Pyatigorsk, Russia, ivmp@yandex.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты исследований пространственных фильтров, используемых для выделения полезной информации из распределенных сигналов, подверженных существенным шумовым воздействиям. Показана настройка пространственного фильтра на выделение заданной пространственной моды, а также приводятся результаты моделирования работы рассматриваемого пространственного фильтра.

Ключевые слова: пространственные фильтры, система обработки распределенной информации, методы настройки пространственных фильтров

Для цитирования: Першин И. М. Исследование характеристик пространственных фильтров // Современная наука и инновации. 2024. № 2 (46). С. 48-58. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2024.2.5>

Abstract. The paper presents the results of studies of spatial filters used to extract useful information from distributed signals subject to significant noise influences. The adjustment of the spatial filter to the selection of a given spatial mode is shown, and the results of modeling the operation of the considered spatial filter are also presented.

Keywords: distributed filters, distributed information processing system, methods for configuring spatial filters

For citation: Pershin IM. The investigation of the characteristics of spatial filters. Modern science and innovations. 2024;2(46):48-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2024.2.5>

Введение.

Математические модели пространственных фильтров Описание процесса на физическом уровне

Известно [1,2], что математическая модель двумерного пространственного фильтра (см. рис.1), записывается в виде:

$$A \cdot \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + T(x, y, z, \tau) + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$
$$0 < z < Z_L, \quad 0 < y < Y_L, \quad 0 < x < X_L.$$

где: A – заданное число, x, y, z – пространственные координаты, τ – время, $T(x, y, z, \tau)$ – фазовая переменная, X_L, Y_L, Z_L – заданные величины.

Граничные условия, для уравнения (1), заданы в виде:

$$\begin{aligned} T(x=0, y, z, \tau) &= T(x=X_L, y, z, \tau) = 0, \\ \frac{\partial T(x, y, z=Z_L, \tau)}{\partial z} &= U(x, y, \tau), \quad \frac{\partial T(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial T(x, y=0, z, \tau)}{\partial z} &= \frac{\partial T(x, y=Y_L, z=Z_L, \tau)}{\partial z} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $U(x, y, \tau)$ – входное воздействие (см. рис.1).

Начальные условия полагаем нулевыми.

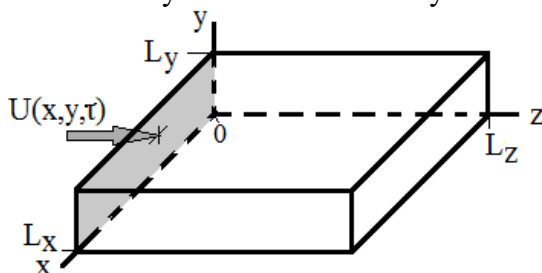


Рисунок 1 – Геометрические параметры объекта

Figure 1 – Geometric parameters of the object

Уравнения (1), (2) описывают математическую модель двумерного пространственного фильтра [1,2].

Используя пространственный фильтр (1),(2) можно выделить из входного воздействия

$$U(x, y, \tau) = \sum_{i,j=1}^{\infty} \bar{C}_{i,j}(\tau) \cdot \sin(\Psi_i \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\Psi}_j \cdot y), \quad \Psi_i = \frac{\pi \cdot i}{X_L}, \quad \tilde{\Psi}_j = \frac{\pi \cdot j}{Y_L}.$$

заданные пространственные моды: $\bar{C}_{k,v}(\tau) \cdot \sin(\Psi_k \cdot x) \cdot \sin(\Psi_v \cdot y)$, где k, v – фиксированные значения.

Сравнение процессов в колебательном контуре и в пространственном фильтре приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение процессов в колебательном контуре и процессов в пространственном фильтре

Table 1 – Comparison of processes in an oscillatory circuit and processes in a spatial filter

Колебательный контур	Пространственный фильтр
Как известно (//ru.wikipedia.org/wiki/), открытие электрического колебательного контура связано с трудами многих ученых на протяжении нескольких десятков лет (Феликс Савари (работы 1826г.), Джозеф Генри (работы 1842г.), Уильям Томсон (работы 1853), и др.) Описание процесса колебаний тока в контуре без потерь, получено 1845г. немецким физиком Г. Р. Кирхгофом $\frac{d^2 i(\tau)}{d\tau^2} + \omega^2 \cdot i(\tau) = 0.$ Резонансная циклическая частота колебаний в идеальном контуре Томпсона записывается в виде:	Математическая модель пространственного фильтра: $A \cdot \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + T(x, y, z, \tau) + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} = 0$ Граничные условия $T(x=0, y, z, \tau) = T(x=X_L, y, z, \tau) = 0,$ $\frac{\partial T(x, y, z=Z_L, \tau)}{\partial z} = U(x, y, \tau), \quad \frac{\partial T(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = 0,$ $\frac{\partial T(x, y=0, z, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial T(x, y=Y_L, z=Z_L, \tau)}{\partial z} = 0,$ С помощью пространственного фильтра (выбором значения A), из входного воздействия, содержащего спектр пространственных мод:

$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}},$ L-индуктивность катушки, C-емкость конденсатора <i>С помощью колебательного контура выделяется заданная несущая частота электромагнитных колебаний из всего спектра частот, поступающих на вход.</i>	$U(x, y, \tau) = \sum_{i,j=1}^{\infty} \bar{C}_{i,j}(\tau) \cdot \sin(\Psi_i \cdot x) \cdot \sin(\tilde{\Psi}_j \cdot y),$ $\Psi_i = \frac{\pi \cdot i}{X_L}, \quad \tilde{\Psi}_j = \frac{\pi \cdot j}{Y_L},$ <i>выделяется, заданная (k, γ) пространственная мода:</i> $\bar{C}_{k,\gamma}(\tau) \cdot \sin(\Psi_k \cdot x) \cdot \sin(\Psi_\gamma \cdot y)$, где k, γ-фиксированные значения переменных i, j.
---	--

Математические модели пространственных фильтров различной мерности приведены в [1-6].

Исследование характеристики одномерного пространственного фильтра.
Запишем математическую модель одномерного пространственного фильтра.

Полагая в (2) $L_y=0$, уравнения объекта могут быть представлены в виде:

$$A \cdot \frac{\partial^2 T(x, z, \tau)}{\partial x^2} + T(x, z, \tau) + \frac{\partial^2 T(x, z, \tau)}{\partial z^2} = 0, \quad (3)$$

$$0 < z < Z_L, \quad 0 < x < X_L.$$

$$T(x=0, z, \tau) = T(x=X_L, z, \tau) = 0,$$

$$\frac{\partial T(x, z=Z_L, \tau)}{\partial z} = U(x, \tau),$$

$$\frac{\partial T(x, z=0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial z} = \frac{\partial T(x, z=Z_L, \tau)}{\partial z} = 0,$$

где $U(x, \tau)$ —входное воздействие.

Положим, что входное воздействие представлено в виде ряда Фурье по пространственной координате, которое, с учетом граничного условия (3) записывается в виде:

$$U(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{C}_\eta(\tau) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x), \quad \Psi_\eta = \frac{\pi \cdot \eta}{X_L}, \quad (5)$$

$\bar{C}_\eta(\tau)$ —заданные функции (несущие информацию о полезном сигнале).

Коэффициент передачи ($K_\eta = T_\eta(x, Z, \tau) / (\bar{C}_\eta(\tau) \cdot \sin(\Psi_\eta \cdot x))$) по каждой пространственной моде определяется из следующего соотношения

$$K_\eta = \frac{e^{\beta_\eta \cdot Z} + e^{-\beta_\eta \cdot Z}}{\beta_\eta \cdot (e^{\beta_\eta \cdot Z_L} - e^{-\beta_\eta \cdot Z_L})}, \quad \eta = \overline{1, \infty}, \quad (6)$$

где: $\beta_\eta = (A \cdot \Psi_\eta^2 - 1)^{1/2}$.

Если $A=1/G$ (где G непрерывна функция (названная обобщенной координатой[2,3]). При изменении $\Psi_1^2 \leq G < \infty$, охватываются все значения функции Ψ_η^2 , ($\eta = \overline{1, \infty}$). Для значений $G \rightarrow \Psi_\eta^2$, ($\eta = \overline{1, \infty}$) $\text{abs}(K_\eta) \rightarrow \infty$ (см.(5)).

На рис.2 показан график изменения $\text{abs}(K_\eta)$.

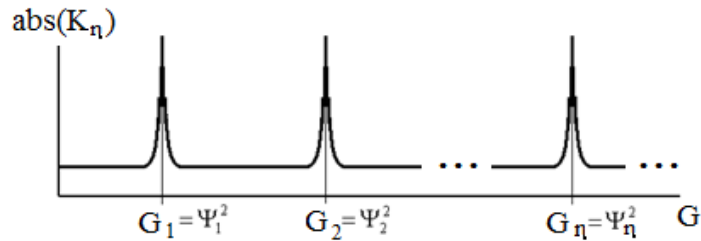


Рисунок 2 – График изменения $\text{abs}(K_n)$ одномерного пространственного фильтра
Figure 2 – Graph of changes in the $\text{abs}(K_p)$ of a one-dimensional spatial filter

Дискретная модель пространственного фильтра

Запишем уравнения (3)–(4) в дискретном виде. Схема дискретизации показана на рис. 3.

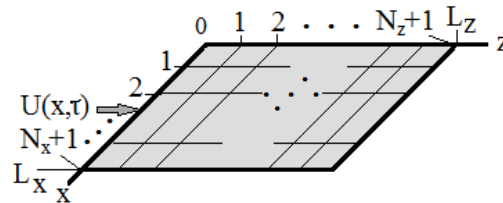


Рисунок 3 – Схема дискретизации
Figure 3 – Sampling scheme

Положим, что число точек дискретизации по осям следующее :

по оси X ($0 \dots N_x+1$), граничные точки 0 и N_x+1 ;

по оси z ($0 \dots N_z+1$), граничные точки 0 и N_z+1 .

Дискретная модель уравнений (3)-(4) может быть представлена в виде:

$$A \cdot \frac{T_{i-1,k} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i+1,k}}{\Delta x^2} + T_{i,k} + \frac{T_{i,k-1} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i,k+1}}{\Delta z^2} = 0, \quad i = \overline{1, N_x}, k = \overline{1, N_z}, \quad (6)$$

Учитывая граничные условия (3), получим:

$$T_{i, N_z+1} = T_{i, N_z}, \quad T_{0,k} = 0, T_{N_x+1,k} = 0,$$

$$\frac{T_{i,0} - T_{i,1}}{\Delta z} = U_i \rightarrow T_{i,0} = U_i \cdot \Delta z + T_{i,1}.$$

Полагая $k=1$ и преобразуя (6), получим:

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,1} - 2 \cdot T_{i,1} + T_{i+1,1}) + T_{i,1} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot (U_i \cdot \Delta z + T_{i,1} - 2 \cdot T_{i,1} + T_{i,2}) = 0,$$

$$(i = 1 \dots N_x, k = 1),$$

или

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i-1,1} + \left(1 - \frac{2A}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta z^2}\right) \cdot T_{i,1} + \frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i+1,1} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot T_{i,2} = -\frac{1}{\Delta z} \cdot U_i, \quad (7)$$

$$(i = 1 \dots N_x).$$

Полагая $1 < k < N_z$ и преобразуя (7), получим:

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,k} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i+1,k}) + T_{i,k} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot (T_{i,k-1} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i,k+1}) = 0,$$

$$(i = 1 \dots N_x, k = 2 \dots N_z - 1),$$

или

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i-1,k} + \left(1 - \frac{2A}{\Delta x^2} - \frac{2}{\Delta z^2}\right) \cdot T_{i,k} + \frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i+1,k} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot T_{i,k-1} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot T_{i,k+1} = 0, \quad (8)$$

(i = 1...N_x, k = 2...N_z - 1).

Для k=N_z, получим:

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot (T_{i-1,N_z} - 2 \cdot T_{i,N_z} + T_{i+1,N_z}) + T_{i,k} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot (T_{i,N_z-1} - T_{i,N_z}) = 0,$$

Или

$$\frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i-1,N_z} + \left(1 - \frac{2A}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta z^2}\right) \cdot T_{i,N_z} + \frac{A}{\Delta x^2} \cdot T_{i+1,N_z} + \frac{1}{\Delta z^2} \cdot T_{i,N_z-1} = 0, \quad (9)$$

i = 1...N_x, k = N_z.

Полученные уравнения (7) – (9) описывают дискретную математическую модель одномерного пространственного фильтра. Представим рассматриваемую модель в матричном виде:

$$D \cdot X = U, \quad (10)$$

где: D – блочная матрица; U – вектор входных воздействий; X – вектор функций выхода.

$$D = \begin{bmatrix} D_1^* & D_2 & 0 & \dots & 0 \\ D_2 & D_1 & D_2 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & D_2 & D_1 & D_2 \\ 0 & \dots & 0 & D_2 & D_1^* \end{bmatrix}_{(N_z \cdot N_z)}, \quad X = \begin{bmatrix} T_{1,1} \\ T_{1,2} \\ \vdots \\ T_{N_z, N_x-1} \\ T_{N_z, N_x} \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_z)}, \quad U = -1/\Delta z \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_{N_x} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_z)}, \quad (11)$$

$$D_1^* = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & 0 & \dots & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & C_2 & C_1 & C_2 \\ 0 & \dots & 0 & C_2 & C_1 \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_x)}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} C_3 & C_2 & 0 & \dots & 0 \\ C_2 & C_3 & C_2 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & C_2 & C_3 & C_2 \\ 0 & \dots & 0 & C_2 & C_3 \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_x)} \quad (12)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_4 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & 0 & & C_4 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & C_4 \end{bmatrix}_{(N_x \cdot N_x)} \quad (13)$$

$$C_1 = (1 - \frac{2 \cdot A}{\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta z^2}), \quad C_2 = \frac{A}{\Delta x^2}, \quad C_3 = (1 - \frac{2 \cdot A}{\Delta x^2} - \frac{2}{\Delta z^2}), \quad C_4 = \frac{1}{\Delta z^2}.$$

Преобразуя (10), получим:

$$X = D^{-1} \cdot U, \quad (14)$$

Матрица D^{-1} описывает дискретную модель одномерного *пространственного фильтра*. Этот пространственный фильтр, построенный для фиксированных значений A , выделяет из вектора входного воздействия U , дискретные аналоги пространственных мод, для которых $\Psi_{\eta}^2 = 1/A$ (выделяет магистрали передачи информации [1,2]). Характер изменения определителя матрицы D в окрестности G_{η} показан на рис. 3.

Как известно[5,6], свойства дискретных моделей распределенных систем отличаются от свойств исходных моделей в частных производных.

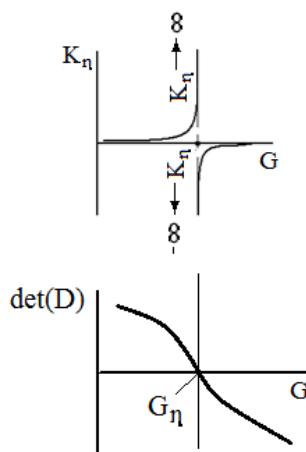


Рисунок 3 – Характер изменения значения определителя в окрестности G_{η}
Figure 3 – The nature of the change in the value of the determinant in the vicinity of G_{η}

Так например, по заданным значениям пространственных мод $G_{\eta} = \Psi_{\eta}^2$ (см. рис. 2), точно определяется значение параметра A для которого значение $\text{abs}(K_{\eta}) \rightarrow \infty$. Результаты исследований показывают, что свойства дискретной модели пространственного фильтра (6)–(9) отличаются от свойств исходной модели, описываемой уравнениями в частных производных. В связи с этим, для обеспечения $\text{abs}(K_{\eta}) \rightarrow \infty$, будем осуществлять корректировку дискретной модели, путем подстройкой параметров модели (при заданном значении параметра $A = 1/G_{\eta}$), для обеспечения $\det(D) \rightarrow 0$ (см. рис.3). В рассматриваемом случае будем корректировать параметр Δz .

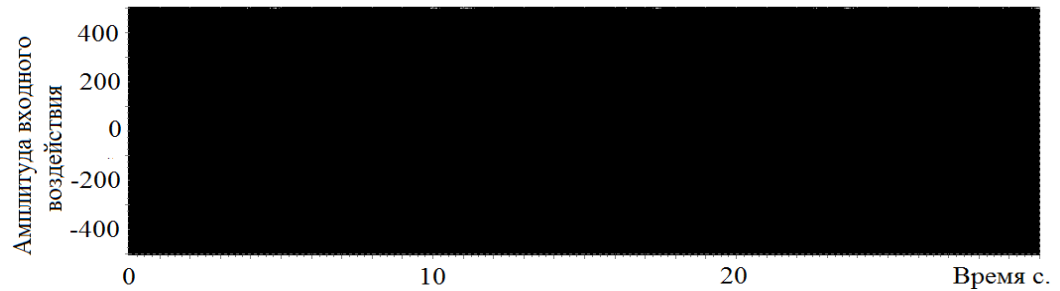
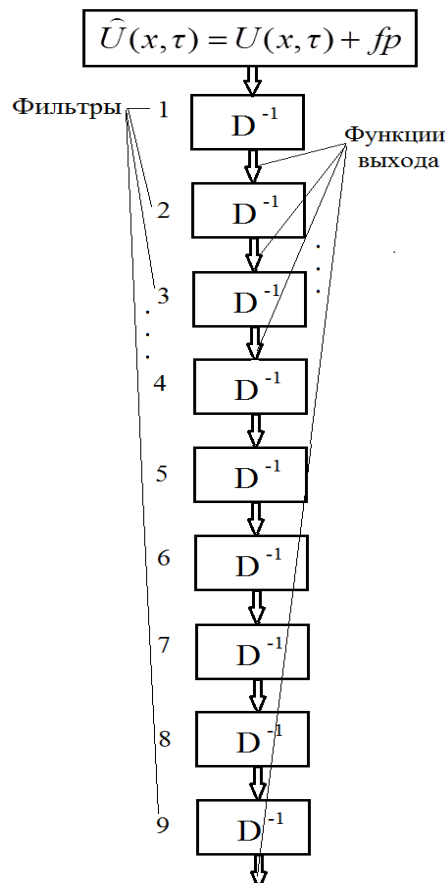
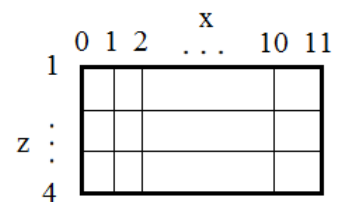
Постановка задачи: для заданного входного воздействия (15), поступающего на пространственный фильтр, выделить заданную пространственную моду (магистраль передачи информации [1,2]) и определить «полезную» информацию.

$$U(x, \tau) = \sum_{\eta=1}^7 \bar{C}_{\eta}(\tau) \cdot \sin(\Psi_{\eta} \cdot x), \quad \Psi_{\eta} = \frac{\pi \cdot \eta}{X_L},$$

$$\bar{C}_1(\tau) = \text{abs}(\sin(0.3 \cdot \tau)); \bar{C}_2(\tau) = 1 \text{ if } \sin(\tau) > 0, \text{ else } \bar{C}_2(\tau) = 0; \bar{C}_3(\tau) = 2 - \sin(\tau);$$

$$\bar{C}_4(\tau) = \sin(4 \cdot \tau); \bar{C}_5(\tau) = \sin(5 \cdot \tau); \bar{C}_6(\tau) = \sin(6 \cdot \tau); \bar{C}_7(\tau) \sin(7 \cdot \tau).$$

(15)

Рисунок 4 – График входного воздействия ($\hat{U}(x, \tau) = U(x, \tau) + 500 \cdot \sin(500 \cdot \tau)$)Figure 4 – Input impact graph ($\hat{U}(x, \tau) = U(x, \tau) + 500 \cdot \sin(500 \cdot \tau)$)Рисунок 5 – Схема моделирования
Figure 5 – Simulation diagramРисунок 6 – Схема дискретизации
Figure 6 – Sampling scheme

Наложим на входное воздействие помеху ($fp = 500 \cdot \sin(500 \cdot \tau)$) и дискретный аналог воздействия, вместе с помехой $\hat{U}(x, \tau) = U(x, \tau) + fp$ (см. рис.4, рис.5) подадим на вход рассматриваемого пространственного фильтра, схема дискретизации которого приведена на рис. 6.

В качестве примера была выбрана шестая магистраль передачи информации ($\bar{C}_6(\tau) = \sin(6 \cdot \tau)$), при этом параметр $A = 1/G_6 = 1/(\pi \cdot 6 / (11 \cdot \Delta x))^2$, ($L_x = 11$, $\Delta x = 1$, начальное значение $\Delta z = 3/4$ (размеры в м.)). Схема дискретизации, используемая при моделировании работы пространственных фильтров, приведена на рис.6. Корректируя значение Δz (при заданном значении параметра $A = 1/G_6$), получим, при $\Delta z = 0.760500$, $\det(D) = 0.00000030$.

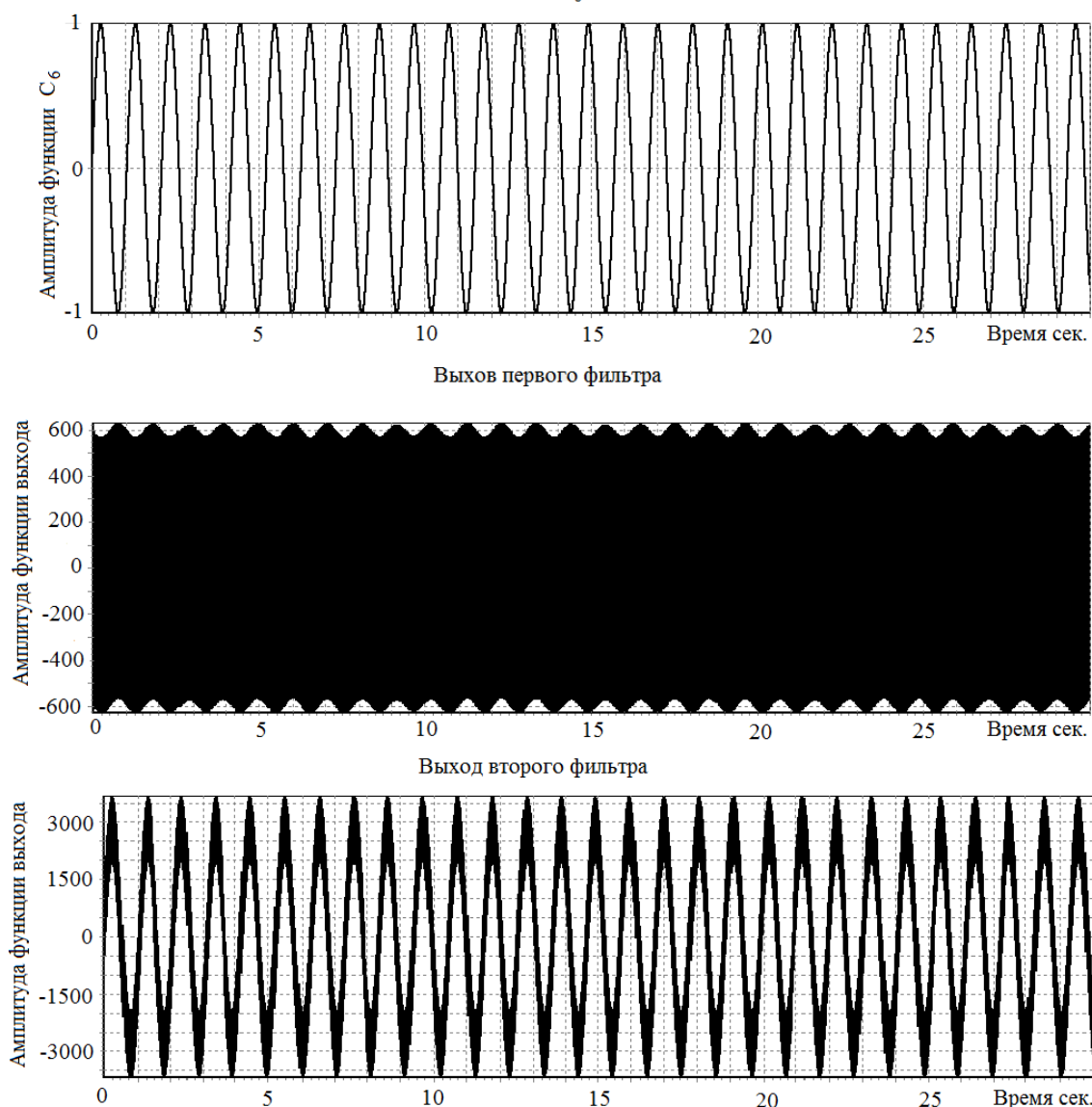


Рисунок 7 – Результаты моделирования работы функции C_6 , первого и второго пространственных фильтров

Figure 7 – The results of modeling the operation of the function C_6 , the first and second spatial filters

На рис. 7, 8, 9 показаны график функции C_6 и графики функций выхода пространственных фильтров.

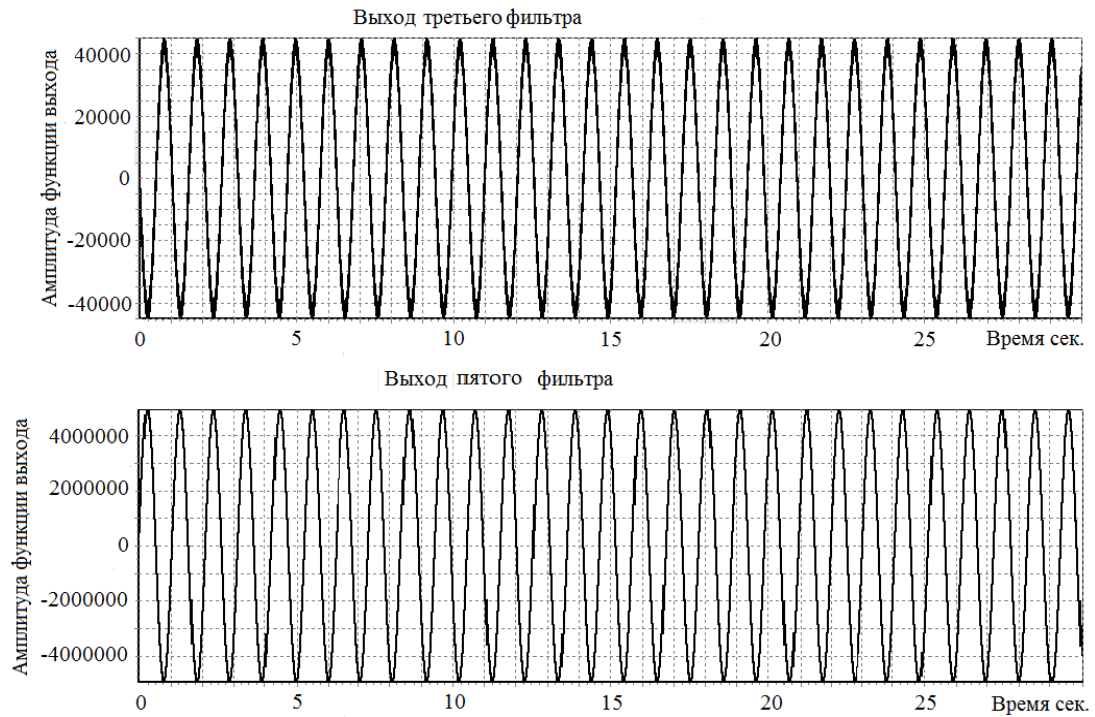


Рисунок 8 – Результаты моделирования работы третьего и пятого пространственных фильтров

Figure 8 – Results of modeling the operation of the third and fifth spatial filters

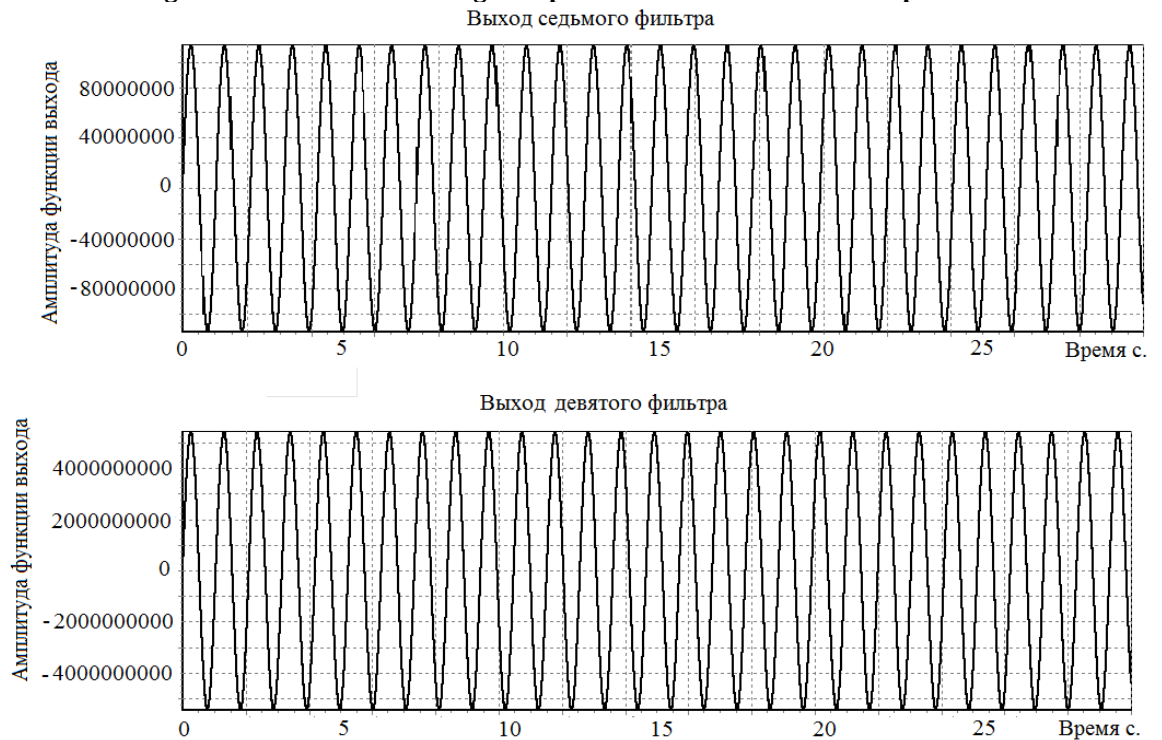


Рисунок 9 – Результаты моделирования работы седьмого и девятого пространственных фильтров

Figure 9 – The results of modeling the operation of the seventh and ninth spatial filters

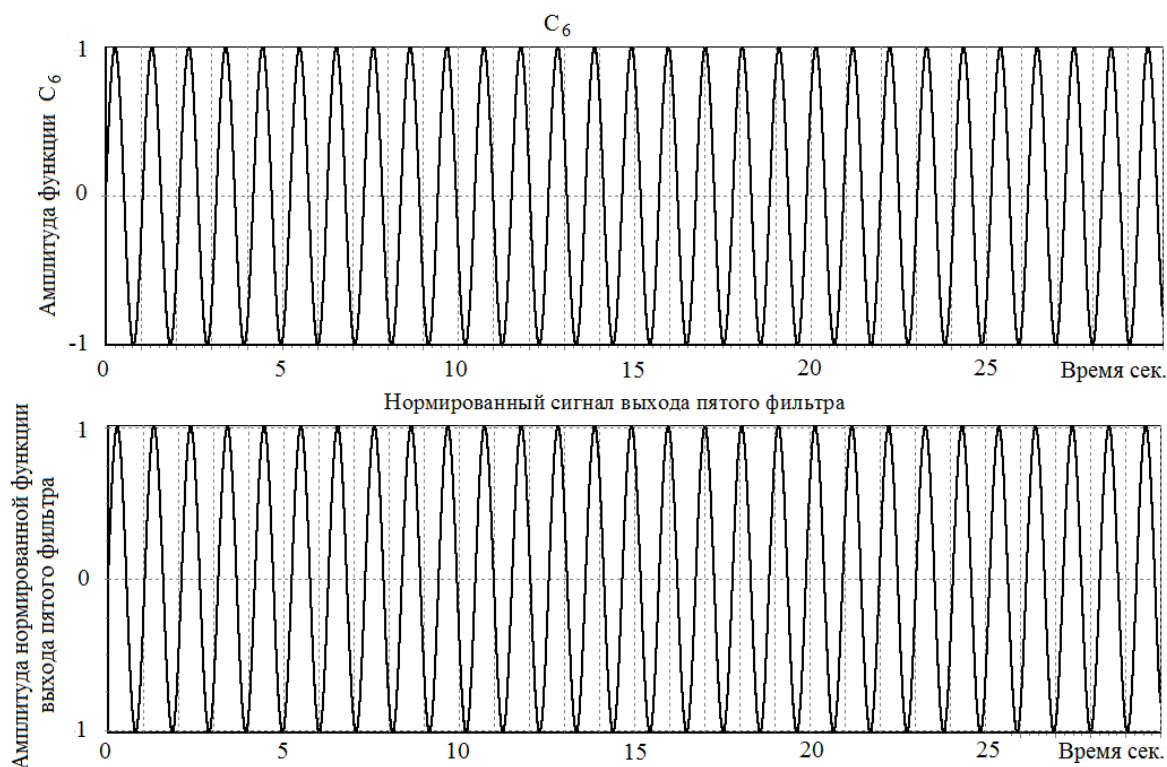


Рисунок 10 – Сигнал C_6 и нормированный сигнал выхода пятого фильтра
Figure 10 – The signal from 6 and the normalized output signal of the fifth filter

Заключение. Результаты моделирования показывают эффективность использования пространственных фильтров, при выделении заданной магистрали передачи информации (заданной пространственной моды).

Амплитуда помехи, которая воздействовала на совокупность пространственных мод ($U(x, \tau)$), в 500 раз больше амплитуды полезных сигналов $\bar{C}_i(\tau)$, $i = 1, \dots, 7$. Пространственный фильтр вырезает рассматриваемую помеху. В показанном выше примере, для шестой пространственной моды получено, что сигнал на выходе пятого фильтра, деленный на максимальную амплитуду (83000000) (нормированный сигнал, см. рис.10), по сути повторяет сигнал $\bar{C}_6(\tau) = \sin(6 \cdot \tau)$ (см. (15)). Аналогичным образом могут быть выделены и другие сигналы $\bar{C}_i(\tau)$, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 7$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Першин И. М. Распределенные системы обработки информации. Из-во РИА КМВ. 2008. 148 с.
2. Малков А. В, Першин И. М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. М.: Научный мир, 2012. 476 с.
3. Веселов Г. Е., Першин И. М. Системы передачи и обработки распределенной информации. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. № 5. С. 123–137.
4. Першин И. М., Шестопапов М. Ю. Проектирование распределенных систем. Теория и практика. 2-е издание, переработанное и дополненное. Отпечатано в типографии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Пятигорский институт (филиал) СКФУ, 2023. 252 с. 35700, Ставропольский край, г. Пятигорск, ул. Московская, 31.

5. Першин И. М., Русак С. Н., Цаплева В. В. Оценка влияния шага дискретизации математических моделей распределенных объектов на динамические характеристики. IX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов. Издательство Южного федерального университета, 2019. 542 с.
6. Першин И. М. Частотная концепция анализа и синтеза систем с распределенными параметрами. Изд-во ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Институт, сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ в г. Пятигорске. 357500, Ставропольский край, г. Пятигорск, ул. Московская, 31, 08.02.2021 г. 171 с.

REFERENCES

1. Pershin IM. Distributed information processing systems, RIA KMV Publishing House; 2008. 148 p. (In Russ.).
2. Malkov AV, Pershin IM. Systems with distributed parameters. Analysis and synthesis. Moscow: Scientific world; 2012. 476 p. (In Russ.).
3. Veselov GE, Pershin IM. Systems for transmission and processing of distributed information. Bulletin of the Southern Federal University. Technical sciences. 2015;5:123-137. (In Russ.).
4. Pershin IM, Shestopalov MYu. Design of distributed systems. Theory and practice. 2nd edition, revised and supplemented. Printed in the printing house of FGAOU VO "North-Caucasus Federal University" Pyatigorsk Institute (branch) of SKFU; 2023. 252 p. 35700, Stavropol Krai, Pyatigorsk, Moskovskaya str., 31. (In Russ.).
5. Pershin IM, Rusak SN, Tsapleva VV. Evaluation of the influence of the discretization step of mathematical models of distributed objects on the dynamic characteristics. IX All-Russian scientific conference "System synthesis and applied synergetics": collection of scientific papers. Southern Federal University Publishing House; 2019. 542 p. (In Russ.).
6. Pershin IM. Frequency concept of analysis and synthesis of systems with distributed parameters. Publishing house of the North-Caucasus Federal University, Institute of Service, Tourism and Design (branch) of NCFU in Pyatigorsk. 357500, Stavropol Krai, Pyatigorsk, Moskovskaya str., 31, 08.02.2021. 171 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Иван Митрофанович Першин – доктор технических наук, профессор, Пятигорский институт (филиал), Северо-Кавказский федеральный университет, ivmp@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivan M. Pershin – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Pyatigorsk Institute (branch), North-Caucasus Federal University, ivmp@yandex.ru.

Конфликт интересов: автор – доктор технических наук, профессор И. М. Першин является членом редакционного совета и редакционной коллегии журнала «Современная наука и инновации». Автору неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Conflict of interest: the author IM Pershin, Dr. Sci. (Techn.), Professor, is a member of the Editorial Council and the Editorial Board of the journal "Modern Science and Innovations". The author is unaware of any other potential conflict of interest related to this manuscript.

*Статья поступила в редакцию: 11.03.2024;
одобрена после рецензирования: 19.04.2024;
принята к публикации: 10.06.2024.*

*The article was submitted: 11.03.2024;
approved after reviewing: 19.04.2024;
accepted for publication: 10.06.2024.*