

СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORK TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 621.37
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-53-59>

Спектральный анализ радиосигналов в реальном времени на основе применения эхо-эффекта

Игорь Александрович Третьяков^{1✉}, Владимир Васильевич Данилов²

*^{1,2}Донецкий национальный университет,
Донецк, Донецкая Народная Республика, i.tretiakov@mail.ru✉*

Аннотация. Перспективы исследований для создания устройств оптимальной обработки радиосигналов связаны с изучением ядерного и электронного спинового эха. Физическая природа эхо-эффекта заключается в том, что после приложения и снятия сигнала отклик системы исчезает вследствие нарушения когерентности различных спектральных компонент колебаний системы. Воздействие считывающего импульса благодаря нелинейности системы возбуждает компоненты колебаний с обратным изменением фазы, что приводит к восстановлению когерентности колебаний и возникновению эха. Носителем информации в этих случаях являются колебания спинов ядер или атомов решетки, а активной средой, таким образом, является объем твердого тела. Эффект спинового эха заключается в возможности записи сигнала в объеме твердого тела путем воздействия магнитного поля, несущего сигнал, на систему спинов электронов или ядер вещества. По истечении времени задержки записанный сигнал может быть считан. Для этого к объему твердого тела через определенное время после подачи сигнала прикладывается считывающий импульс. Практическая ценность использования эхо-эффекта состоит в том, что временное положение и форма эхо-сигнала однозначно связаны со спектром входных сигналов и их временной расстановкой, а изменение функций устройства можно легко получить путем изменения частоты, фазы, временного положения управляющих импульсов. Процесс анализа спектра в анализаторе на основе ядерного магнитного резонанса сводится к тому, что спектр анализируемых сигналов записывается в виде углов поворота ядерной намагниченности рабочего материала в пределах его спектра. В отличие от традиционных анализаторов спектра ЯМР-анализаторы определяют спектр каждого поступающего импульса. Рассмотренные особенности эхо-эффекта позволяют сделать вывод о перспективности и больших возможностях применения ядерного магнитного резонанса при передаче, приеме и обработке аналоговой и дискретной информации.

Ключевые слова: спиновое эхо, эхо-сигнал, эхо-эффект, ядерный магнитный резонанс, линейно-частотно-модулирующий сигнал, ядерные спины, спиновое тело, вспомогательный импульс

Для цитирования: Третьяков И. А., Данилов В. В. Спектральный анализ радиосигналов в реальном времени на основе применения эхо-эффекта // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 1. С. 53–59. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-53-59>.

Spectral analysis of radio signals in real time by using echo effect

Igor A. Tretiakov^{1✉}, Vladimir V. Danilov²

^{1,2}Donetsk National University,
Donetsk, Donetsk People's Republic, i.tretiakov@mail.ru[✉]

Abstract. The prospects of research in creating devices for optimal processing radio signals are associated with the study of nuclear and electron spin echo. The physical nature of the echo effect lies in the fact that after the application and removal of the signal, the response of the system disappears due to a violation of the coherence of the various spectral components of the system oscillations. The effect of the reading pulse, due to the nonlinearity of the system, generates oscillation components with an inverse phase change, which leads to the restoration of oscillation coherence and causes an echo. The information carrier in these cases is the vibrations of the spins of the nuclei or lattice atoms, and the active medium, thus, is the volume of a solid. The effect of spin echo consists in the possibility of recording a signal in the volume of a solid body by the action of a magnetic field carrying the signal on the system of spins of electrons or nuclei of matter. After the delay time has elapsed, the recorded signal can be read. To do this, a reading pulse is applied to the volume of the solid after a certain time after the signal is given. The practical value of using the echo effect is that the time position and shape of the echo signal are uniquely related to the spectrum of input signals and their temporal arrangement, and a change in the functions of the device can be easily obtained by changing the frequency, phase, and time position of the control pulses. The process of spectrum analysis in an analyzer based on nuclear magnetic resonance is reduced to the fact that the spectrum of the analyzed signals is recorded in the form of rotation angles of the nuclear magnetization of the working material within its spectrum. Unlike traditional spectrum analyzers, NMR analyzers determine the spectrum of each incoming pulse. The considered features of the echo effect allow to conclude about the prospects and great possibilities of using nuclear magnetic resonance in the transmitting, receiving and processing the analog and discrete information.

Keywords: spin echo, echo-signal, echo effect, nuclear magnetic resonance, linear frequency modulation signal, nuclear spins, spin body, auxiliary pulse

For citation: Tretiakov I. A., Danilov V. V. Spectral analysis of radio signals in real time by using echo effect. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2022; 1:53-59. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-53-59>.

Введение

Широкие перспективы создания устройств оптимальной обработки радиосигналов связаны с изучением таких физических явлений, как ядерное и электронное спиновое эхо. С помощью подобных устройств можно осуществлять задержку радиосигналов, сжатие ЧМ-сигналов, согласованную полосовую фильтрацию, корреляцию и автокорреляцию. Согласованные фильтры на основе спинового эха используются в модемах широкополосных систем связи с шумоподобными сигналами, которые обеспечивают малое время вхождения в синхронизм при базе сигналов в десятки тысяч бит.

Такие устройства могут успешно осуществлять обработку аналоговых сигналов, не нуждаясь в предварительной кодировке сигнала в цифровой, благодаря чему обработка совершается в режиме реального времени. Хорошие массогабаритные и энергетические характеристики, а также высокая надежность и быстродействие делают эхо-процессоры весьма перспективными модулями, способными обеспечить решение задач по созданию

телекоммуникационной аппаратуры нового поколения, использующей новые физические принципы и явления [1, 2].

Физическая природа эхо-эффекта заключается в том, что после приложения и снятия сигнала отклик системы исчезает вследствие нарушения когерентности различных спектральных компонент колебаний системы. Воздействие считывающего импульса благодаря нелинейности системы возбуждает компоненты колебаний с обратным изменением фазы, что приводит к восстановлению когерентности колебаний через время задержки τ_3 (возникновение эхо).

Для практической реализации эхо-процессоров используются явления спинового эха на системе ядерных спинов (ядерное эхо) или акустических колебаний в пьезоэлектронике (фононное эхо). Носителем информации в этих случаях являются колебания спинов ядер или атомов решетки, а активной средой, таким образом, является объем твердого тела (рис. 1).

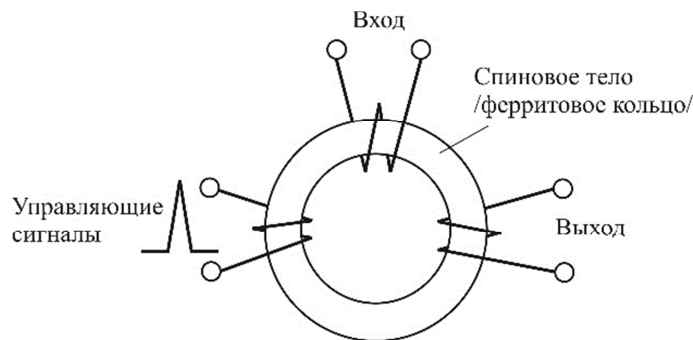


Рис. 1. Структура ядерно-магнитно-резонансного процессора

Fig. 1. Structure of a nuclear magnetic resonance processor

Ввод и вывод информации осуществляется индукторами магнитного или электрического поля соответственно. Представляет интерес явление длительного хранения сигнала в пьезоэлектрической активной среде, связанное с образованием заряженных дефектов кристаллической решетки, возникающих под действием интенсивной волны сигнала. Система дефектов служит своеобразной акустической голограммой, восстанавливающей волну сигнала после воздействия на нее считывающей волны. В перспективе возможно использование эффектов эха в сверхпроводнике, в котором носителем информации служат магнитные вихри. Технология изготовления спиновых устройств достаточно проста, поскольку формирование статических неоднородностей (доменных границ) обеспечивается за счет процесса кристаллизации порошкообразных окислов при их спекании. В этом случае, т. к. динамическая неоднородность не перемещается в объеме кристалла, требования к пространственной однородности синтезируемых материалов и степени очистки исходного сырья значительно снижаются. Кроме того, отпадает и необходимость точного сопряжения форм геометрических элементов.

Вышеуказанные особенности существенно улучшают воспроизводимость технологических процессов, повышают надежность и увеличивают процент выхода качественных изделий и позволяют вполне обоснованно приблизиться к практической реализации систем и сетей телекоммуникаций на устройствах функциональной электроники, в частности на модулях из процессоров на эффекте спинового или электроакустического эха.

Эффект спинового эха заключается в возможности записи сигнала в объеме твердого тела путем воздействия магнитного поля, несущего сигнал, на систему спинов электронов или ядер вещества [1]. По истечении времени задержки τ_3 записанный сигнал может быть считан. Для этого к объему твердого тела через время $\tau_3/2$ после подачи сигнала прикладывается считывающий импульс.

Практическая ценность использования эхо-эффекта состоит в том, что временное положение

и форма эхо-сигнала однозначно связаны со спектром входных сигналов и их временной расстановкой, а изменение функций устройства можно легко получить путем изменения частоты, фазы, временного положения управляющих импульсов [2]. Возможность реализации вычислительных и телекоммуникационных устройств на примере использования ядерного магнитного резонанса (ЯМР) рассмотрена в [3–5]. Таким образом, имеются перспективы для исследования возможностей спектрального анализа на основе ЯМР.

Теоретическая часть

В общем виде для получения сигнала спинового эха образец, содержащий магнитные частицы с полуцелым спином (магнитным моментом ядер), помещают в постоянное магнитное поле и на него подают два радиочастотных импульса на частоте магнитного резонанса. При выполнении условий, налагаемых на импульсную последовательность, и спустя время, равное удвоенному временному интервалу между первым и вторым импульсами, возникает сигнал спинового эха. Первый импульс является входным (информационным) сигналом, второй – управляющим, регулирующим электрическим путем необходимую величину задержки в больших пределах, а эхо – задержанным входным сигналом [6].

Рассмотрим процесс образования сигнала ядерного эха. Пусть образец (рабочее тело) содержит в себе определенное количество ядерных магнитных моментов с гиромагнитным отношением γ . Если этот образец находится во внешнем магнитном поле \vec{H}_0 , то ядерные магнитные моменты прецессируют вокруг направления \vec{H}_0 с частотой $\omega_0 = \gamma \vec{H}_0$. Если на образец подать два радиочастотных импульса с частотой заполнения ω_0 , задержанных один относительно другого на время τ_{12} , то в момент времени τ_{12} возникает резко выраженный отклик ядерной системы в виде радиочастотного импульса. Это и будет сигналом ядерного эха (рис. 2).

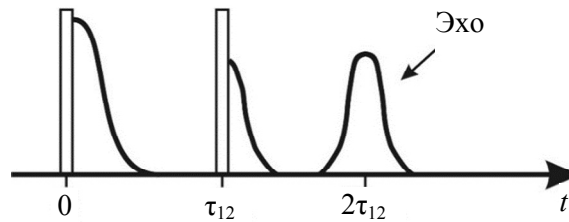


Рис. 2. Схема образования сигнала двухимпульсного эха

Fig. 2. Two-pulse echo signal generation circuit

Рассмотрим процесс сжатия линейных частотно-модулированных сигналов с помощью явления спинового эха (рис. 3).

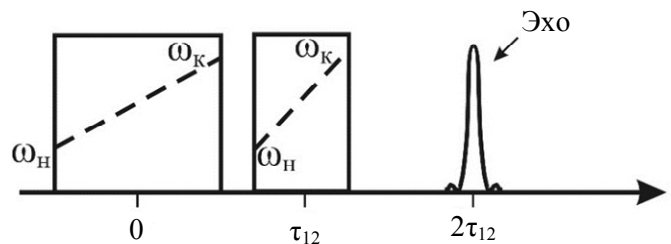


Рис. 3. Схема двухимпульсного метода сжатия линейных частотно-модулированных сигналов

Fig. 3. Circuit of a two-pulse method of compression of linear frequency modulated signals

Обычно в радиотехнических устройствах сжатие осуществляется следующим образом: линейный частотно-модулированный (ЧМ) сигнал с частотой заполнения $\omega(t) = \omega_0 + At$ (где A – параметр, характеризующий скорость изменения частоты модулированного колебания) попадает на вход линии задержки, обладающей дисперсией $\tau(\omega) = \tau(\omega_0) + (\omega - \omega_0)A^{-1}$. На выходе устройства формируется сжатый радиочастотный импульс с длительностью $\sim 2\pi(A\tau_n)^{-1}$, где τ_n – длительность исходного линейно-частотно модулированного (ЛЧМ) сигнала. Метод спинового эха легко позволяет воспроизвести линию задержки с подобным законом дисперсии. Для этого в качестве второго радиочастотного импульса достаточно подать сигнал с частотой заполнения $\omega(t) = \omega_0 + 2A(t - \tau_{12})$.

Для более наглядного представления процесса сжатия каждый из импульсов, подаваемых на рабочее тело, разбивается на малые отрезки, частоту

заполнения внутри которых можно считать постоянной. Тогда, полагая, что взаимодействуют между собой только те отрезки из первого и второго импульсов, которые имеют одинаковые частоты, на выходе получается узкий δ -образный сигнал эха, поскольку сигналы эха каждой пары формируются в одно и то же время. Отметим, что с помощью явления эха можно осуществить сжатие (точнее, согласованную фильтрацию) сигналов с гораздо более сложной структурой частотного спектра [5].

Если на систему ядерных спинов спинового тела, находящихся под воздействием собственного внутреннего постоянного магнитного поля, воздействовать магнитными полями трех радиоимпульсов (по трехимпульсному методу), то в момент времени $t_0 = T + \tau_3$ (где T – общая длительность трех импульсов) появится сигнал спинового эха. Спектральная функция такого эхо-сигнала может быть записана в виде

$$S_{\text{эхо}}(j\omega) = M_0 \gamma^3 / [4g(\omega) \dot{S}_1(j\omega) \cdot \dot{S}_2(j\omega) \cdot \dot{S}_3(j\omega) e^{-j\omega t_0}],$$

где $\dot{S}_i(j\omega)$ – спектральные функции импульсов; M_0, γ – постоянные спинового тела; $g(\omega)$ – форма линии поглощения спинового тела; $t_0 = T + \tau_3$ – момент появления сигнала спинового эха. В этом

случае сигнал на выходе спинового тела можно записать в виде

$$v(t) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{2\pi} M_0 \gamma^{3/4} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) S_{\text{эхо}}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \right\}. \quad (1)$$

Учитывая, что спиновое тело обладает определенной полосой ларморовских частот (полосой частот ядерного резонанса) $\omega_1 - \omega_2$, введем ограничение на спектральную функцию первого поступающего на спиновое тело радиоимпульса. Она должна быть постоянной в полосе ларморовских частот, т. е.

$$S_1(j\omega) = \Lambda_0 \text{ при } \omega_1 < \omega_2 < \omega_3. \quad (2)$$

В качестве второго импульса будем использовать сигнал, спектр которого необходимо измерить. Его спектральную плотность запишем как

$$S_2(j\omega) = \int_0^{t_d} f(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau. \quad (3)$$

Очевидно, что полоса частот спектра исследуемого сигнала также не должна превышать полосы частот ЯРМ. Чтобы обеспечить управление такими параметрами анализатора, как разрешающая способность и полоса анализируемых частот, выберем в качестве третьего подаваемого радиоимпульса сигнал с ЛЧМ длительностью $\tau_{ч.м}$, девиацией частоты $2\Delta f_d$. Спектр такого сигнала представим в виде

$$S_3(j\omega) = (\pi/2\beta)^{1/2} \exp\{-j[(\omega - \omega_0)^2/2\beta - \pi/4]\}, \quad (4)$$

где $\beta = 2\pi \frac{2\Delta f_d}{\tau_{ч.м}}$ – скорость изменения частоты в импульсе. Подставим полученные функции спектров радиоимпульсов (2)–(4) в выражение для сигнала на выходе спинового тела (2) и, упростив, получим:

$$v(t) = B \operatorname{Re} \left\{ e^{j\theta(t)} \int_0^{\tau_d} f(\tau) e^{-j\omega(\beta t + \omega\tau)} d\tau \right\}. \quad (5)$$

Интеграл в полученном выражении (5) есть не что иное, как прямое преобразование Фурье на частоте $\omega(t) = \beta t + \omega_0$. Таким образом, сигнал на выходе спинового тела, управляемом двумя вспомогательными импульсами (первым и третьим),

описывается преобразованием Фурье от входного сигнала, что позволяет определить его как спектр входного сигнала. Наличие фазового множителя $e^{j\theta(t)}$ показывает, что, подав выходной сигнал спинового тела на фазовый детектор, можно получить также фазовый спектр анализируемого сигнала. Длительность анализируемых сигналов ограничивается неравенством $\tau_n \ll (\tau_{ч.м}/2f_d)^{1/2}$, а разрешающая способность анализатора определяется как

$$\Delta\omega_0 = 2(nm)^{1/2} / \tau_{ч.м} = (2\beta)^{1/2}, \quad (6)$$

где $m = 2\Delta f_d \tau_{ч.м}$.

Из выражения (6) видно, что, изменяя параметры второго вспомогательного импульса, такие как длительность $\tau_{ч.м}$ и величина девиации частоты, можно управлять параметрами анализатора спектра. Связь между осью времени и осью частот, определяющая частотный масштаб изображения спектра, описывается выражением

$$\Delta f_c = k\Delta t,$$

где масштабный коэффициент $k = \beta/2\pi$ кГц/мкс.

Таким образом, процесс анализа спектра в ЯМР-анализаторе сводится к тому, что спектр анализируемых сигналов записывается в виде углов поворота ядерной намагниченности рабочего материала в пределах его спектра. За счет одновременного возбуждения всех ядерных спинов входным сигналом, а затем последовательного считывания накопленной информации управляющим импульсом удается получить однозначное соответствие между временем и частотой.

Экспериментальная часть

В качестве примера приведем результаты экспериментальных исследований анализатора спектра, блок-схема которого изображена на рис. 4.

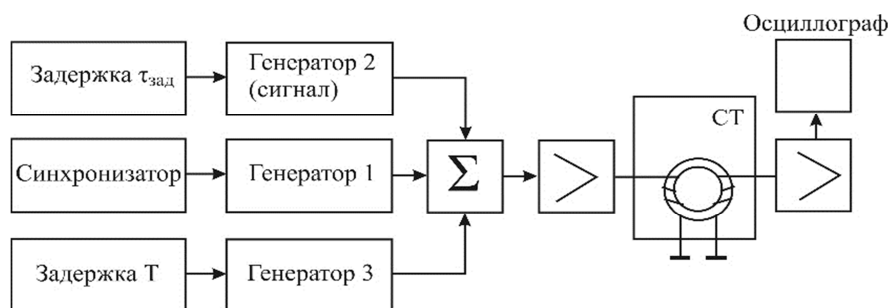


Рис. 4. Блок-схема ЯМР-анализатора спектра: T – трехимпульсный сигнал; СТ – спиновое тело

Fig. 4. Block diagram of a NMR spectrum analyzer: T – three-pulse signal; CT – spin body

Генератор 1 вырабатывает первый вспомога- тельный сигнал амплитудой 30 В и длительностью 0,2 мкс, т. к. в качестве спинового тела использо- вался никелевый феррит NiF_2O_4 , обогащенный изотопом Fe^{57} , тороидальной формы, на который наматывались витки катушки выходного каскада. Полоса ЯРМ равнялась 2 МГц, центральная частота – 72 МГц. Генератор 2 вырабатывает сигнал, спектр которого необходимо измерить (короткий радиоимпульс), генератор 3 вырабатывает второй вспомогательный импульс с ЛЧМ. Результаты экс- периментальной проверки ЯМР-анализатора спек- тра приведены в таблице.

Генератор 2 вырабатывает сигнал, спектр которого необходимо измерить (короткий радиоимпульс), генератор 3 вырабатывает второй вспомогательный импульс с ЛЧМ. Результаты экс- периментальной проверки ЯМР-анализатора спек- тра приведены в таблице.

Результаты экспериментальной проверки ЯМР-анализатора спектра

Results of experimental verification of the NMR spectrum analyzer

Длительность импульса, τ_n , мкс	Ширина спектра, Δf , мкс	Экспериментальная $\Delta f = k\Delta t$, МГц	Теоретическая $\Delta f = 2/\tau_n$, МГц	ЛЧМ-сигнал	
				$T_{ч,мс}$, мкс	$2\Delta f_d$, МГц
1	61	1,97	2,0	64	2
2,6	24	0,76	0,77	64	2
4	14	0,43	0,5	64	2
5	10	0,3	0,4	64	2

Из анализа таблицы следует, что погрешность измерения спектра является минимальной при выполнении условия $\tau_n \ll (\tau_{ч,мс} / 2\Delta f_d)^{1/2}$.

Заключение

Показано, что процесс анализа спектра в анали- заторе на основе ядерного магнитного резонанса сводится к тому, что спектр анализируемых сигна- лов записывается в виде углов поворота ядерной намагниченности рабочего материала в пределах его спектра. За счет одновременного возбуждения всех ядерных спинов входным сигналом, а затем последовательного считывания накопленной ин-

формации управляющим импульсом удается полу- чить однозначное соответствие между временем и частотой.

В отличие от традиционных анализаторов спектра ЯМР-анализаторы определяют спектр каждого по- ступающего импульса, что позволяет оценить изме- нения спектра от импульса к импульсу и в ряде слу- чаев упростить оценку тонкой структуры спектров.

Рассмотренные особенности эхо-эффекта поз- воляют сделать вывод о перспективности и боль- ших возможностях применения ядерного магнит- ного резонанса при передаче, приеме и обработке аналоговой и дискретной информации.

Список источников

1. Гуляев Ю. В., Бальшева О. Л., Григорьевский В. И., Дмитриев В. Ф., Мансфельд Г. Д. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования. М.: Радиотехника, 2012. 571 с.
2. Федотов Я. А. Функциональная электроника. М.: Высш. шк., 2012. 455 с.
3. Нестеров М. М., Плешаков И. В., Фофанов Я. А. Информационно-физические свойства нестационарных откликов в системах обработки импульсных сигналов // Науч. приборостроение. 2006. № 16 (2). С. 3–21.

4. Пухлий В. А., Ковалев Н. И. К задаче спинового эха в теории ядерного магнитного резонанса // Евразийский Союз Ученых. 2015. № 7-6 (16). С. 32–38.
5. Третьяков И. А., Данилов В. В. Теоретические основы реализации устройств телекоммуникаций на принципах функциональной электроники // Вестн. Акад. граждан. защиты. 2021. № 2 (26). С. 51–58.
6. Никитов В. А., Никитов С. А. Исследование и раз- работка устройств на магнитостатических спиновых волнах // Зарубеж. радиоэлектроника. 2000. № 12. С. 41–52.

References

1. Guljaev Ju. V., Balysheva O. L., Grigor'evskij V. I., Dmitriev V. F., Mansfel'd G. D. *Akustoelektronnye ustrojstva obrabotki i generacii signalov. Principy raboty, rascheta i proektirovanija* [Acoustic electronic devices for signal processing and generation. Principles of work, analyses and design]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 571 p.
2. Fedotov Ja. A. *Funkcional'naja jelektronika* [Functional electronics]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2012. 455 p.
3. Nesterov M. M., Pleshakov I. V., Fofanov Ja. A. Informacionno-fizicheskie svojstva nestacionarnyh otklikov v sistemah obrabotki impul'snyh signalov [Information-physical properties of non-stationary responses in pulse signal processing systems]. *Nauchnoe priborostroenie*, 2006, no. 16 (2), pp. 3-21.

4. Puhlij V. A., Kovalev N. I. K zadache spinovogo zha v teorii jadernogo magnitnogo rezonansa [To problem of spin echo in theory of nuclear magnetic resonance]. *Evrazijskij Sojuz Uchenyh*, 2015, no. 7-6 (16), pp. 32-38.
5. Tret'jakov I. A., Danilov V. V. Teoreticheskie osnovy realizacii ustrojstv telekommunikacij na principah funkcional'noj jelektroniki [Theoretical foundations of implementing telecommunication devices on principles of functional electronics]. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashhity*, 2021, no. 2 (26), pp. 51-58.
6. Nikitov V. A., Nikitov S. A. Issledovanie i razrabotka ustrojstv na magnitostaticeskix spinovyh volnah [Research and development of devices based on magnetostatic spin waves]. *Zarubezhnaja radioelektronika*, 2000, no. 12, pp. 41-52.

Статья поступила в редакцию 11.10.2021; одобрена после рецензирования 21.12.2021; принята к публикации 13.01.2022
The article is submitted 11.10.2021; approved after reviewing 21.12.2021; accepted for publication 13.01.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Александрович Третьяков – кандидат технических наук; доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий; Донецкий национальный университет; Донецк, ул. Университетская, 24; i.tretiakov@mail.ru

Igor A. Tretiakov – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies; Donetsk National University; Donetsk, Universitetskaya street, 24; i.tretiakov@mail.ru

Владимир Васильевич Данилов – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий; Донецкий национальный университет; Донецк, ул. Университетская, 24; ut5iv@mail.ru

Vladimir V. Danilov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies; Donetsk National University; Donetsk, Universitetskaya street, 24; ut5iv@mail.ru

