

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 537.868.4:621.396.964

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).100-107

ГРНТИ 47.49.31

Специальность ВАК 1.3.4; 2.2.15

Научная статья

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОТРАЖЕННЫЙ СИГНАЛ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Вяткин А. М., Гусаков В. М., Цыкунов В. Н.

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (Санкт-Петербург Россия)

Аннотация Представлены результаты моделирования процесса отражения ЛЧМ сигнала от многослойного покрытия на основе кольцевых резонаторов с возможностью переключения резонансной частоты поглощения. Разработанная модель позволяет получить сигнал на выходе коррелятора радиолокационной станции без учета среды распространения. Моделирование показывает появление пассивной модуляции при отражении ЛЧМ сигнала от покрытия, что проявляется в появлении дополнительных пиков на выходе коррелятора.

Ключевые слова: покрытие, кольцевой резонатор, ЛЧМ сигнал, управляемые параметры, коррелятор

Для цитирования: Вяткин А. М., Гусаков В. М., Цыкунов В. Н. Влияние перестройки резонансной частоты радиолокационного покрытия на отраженный сигнал с линейной частотной модуляцией // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 100-107. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).100-107

Research Article

EFFECT OF TUNING THE RESONANT FREQUENCY OF RADAR COATING ON A REFLECTED SIGNAL WITH LINEAR FREQUENCY MODULATION

Vyatkin A. M., Gusakov V. M., Tsykunov V. N.

A. F. Mozhaysky's Military-Space Academy (Saint Petersburg, Russia)

Abstract The results of modeling the process of reflection of a chirp signal from a multilayer coating based on ring resonators with the possibility of switching the resonant absorption frequency are presented. The developed model makes it possible to obtain a signal at the output of the correlator of a radar station without considering the propagation medium. The model investigation shows the appearance of passive modulation when the chirp signal is reflected from the coating, which manifests itself in the appearance of additional peaks at the output of the correlator.

Keywords: coating, ring resonator, chirp signal, controlled parameters, correlator

For citation: Vyatkin A. M., Gusakov V. M., Tsykunov V. N. Effect of tuning the resonant frequency of radar coating on a reflected signal with linear frequency modulation // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 100-107. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).100-107

Введение

Одним из перспективных направлений развития радиолокационных покрытий является создание структур, способных изменять свою резонансную частоту поглощения. Интерес к данному направлению обусловлен наличием взаимосвязи между

уровнем поглощения, частотным диапазоном и толщиной покрытия [1], которая указывает на то, что невозможно создать тонкое покрытие, эффективно поглощающее в широком частотном диапазоне. Возможность изменения рабочей частоты покрытия позволяет не только подстроить полосу поглощения под конкретный сигнал, позволяя немного обойти указанное ограничение, но и уменьшать коэффициент отражения во время работы своих радиотехнических систем с целью повышения скрытности антенн или уменьшения их взаимного влияния, корректировать характеристики направленности антенн [2], а также даёт возможность пассивной модуляции отражённых сигналов.

Для управления коэффициентом отражения в покрытие включается частотно-селективная структура [3-7], представляющая собой распределённые колебательные контуры (кольцевые резонаторы, щели, рамки, грибовидные элементы и т.д.), резонансная частота которых зависит от подключаемых к ним нагрузок, например, варикапа. Использование варикапов удобно для плавной перестройки резонансной частоты, но при этом возникают сложности с их подключением и управлением, так ёмкость варикапа зависит не только от приложенного напряжения смещения, а также от мощности сигнала, его частоты и температуры окружающей среды.

Модель радиолокационного покрытия с изменяемой резонансной частотой поглощения

В работе предлагается управлять резонансной частотой с помощью СВЧ-переключателей, которые коммутируют частотно-селективную структуру на металлическую подложку. Использование СВЧ-переключателей позволит уменьшить потребляемую мощность, а также повысит температурную стабильность параметров покрытия, но управление резонансной частотой при этом будет дискретным.

Для моделирования в качестве частотно-селективной структуры (ЧСС) выбран кольцевой резонатор с прорезью (рисунок 1). Предлагаемое управляемое покрытие представляет собой многослойную структуру (рисунок 2).

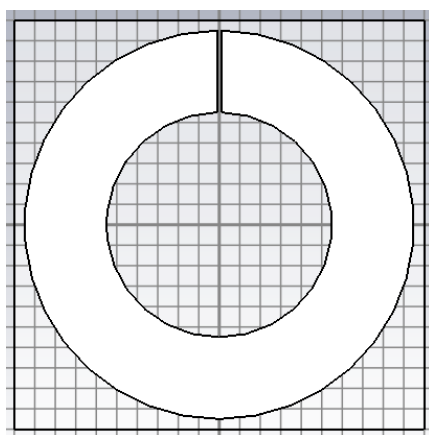


Рисунок 1. Внешний вид модели кольцевого резонатора с прорезью на печатной плате

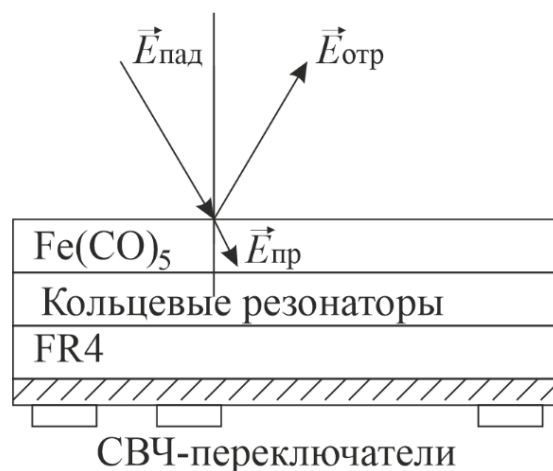


Рисунок 2. Структура управляемого покрытия на основе кольцевых резонаторов с СВЧ-переключателями

Нижние слои структуры представляют собой двухстороннюю печатную плату из текстолита FR-4 толщиной 2 мм. Нижний металлизированный слой используется в качестве экрана, а также на нём расположены управляющие элементы: СВЧ-переключатели, микроконтроллер для их переключения и система питания. На верхнем слое платы вытравлены кольцевые резонаторы с вырезом, по обоим краям которого размещаются переходные отверстия к СВЧ-переключателям. Таким образом, возможно отключать резонатор от экрана, подключать один край кольца или сразу оба. Сверху резонаторов размещается поглощающий слой. Кроме дополнительного ослабления использование верхнего поглощающего слоя позволяет уменьшить период следования элементов ЧСС (период дифракционной решётки) для получения в рабочей полосе частот эффекта разложения отраженной волны в пространственном спектре. Размеры ЧСС в этом случае выбираются с учётом укорочения длины волны в верхнем слое:

$$\lambda_{\text{экс}} = \frac{\lambda}{\text{Re}(n)}$$

Согласно теории дифракции, углы распространения отражённых мод можно определить из следующего выражения [8]:

$$\sin \theta_n = \sin \varphi + \frac{n\lambda_{\text{экс}}}{l}$$

где n – номер пространственной гармоники;

φ – угол падения;

θ_n – угол отражения пространственной гармоники.

Если угол отражения находится за пределами $-90^\circ \dots +90^\circ$, то данная пространственная гармоника не распространяется. Энергия отражённой моды определяется структурой дифракционной решётки и углом падения. Для обеспечения появления дополнительных пространственных мод необходимо, чтобы период ЧСС был соизмерим с длиной падающей волны.

При моделировании в качестве материала верхнего слоя использовалось карбонильное железо толщиной 2 мм с параметрами $\varepsilon = 18,72$, $\text{tg } \varepsilon = 0,233$ и $\mu = 4,88$, $\text{tg } \mu = 0,387$. Параметры резонатора и его период подбирались эмпирическим путём из расчёта рабочей полосы покрытия в диапазоне 1-3 ГГц для удобства практической реализации макета и измерения его параметров, резонатор имеет внешний диаметр 18 мм, внутренний – 8 мм и вырез 0,6 мм.

На рисунке 3 представлены результаты электродинамического моделирования структуры с размерами 20×20 см. Верхний график показывает зависимость ЭПР от частоты металлической пластины с такими же размерами, остальные – ЭПР покрытия при разных вариантах коммутирования резонатора на экран. Как видно из рисунка 3, покрытие имеет посредственные характеристики поглощения, но при этом наблюдается возможность управления резонансной частотой поглощения. Подключение

резонатора к экрану приводит к уменьшению резонансной частоты, что связано с увеличением ёмкости резонатора.

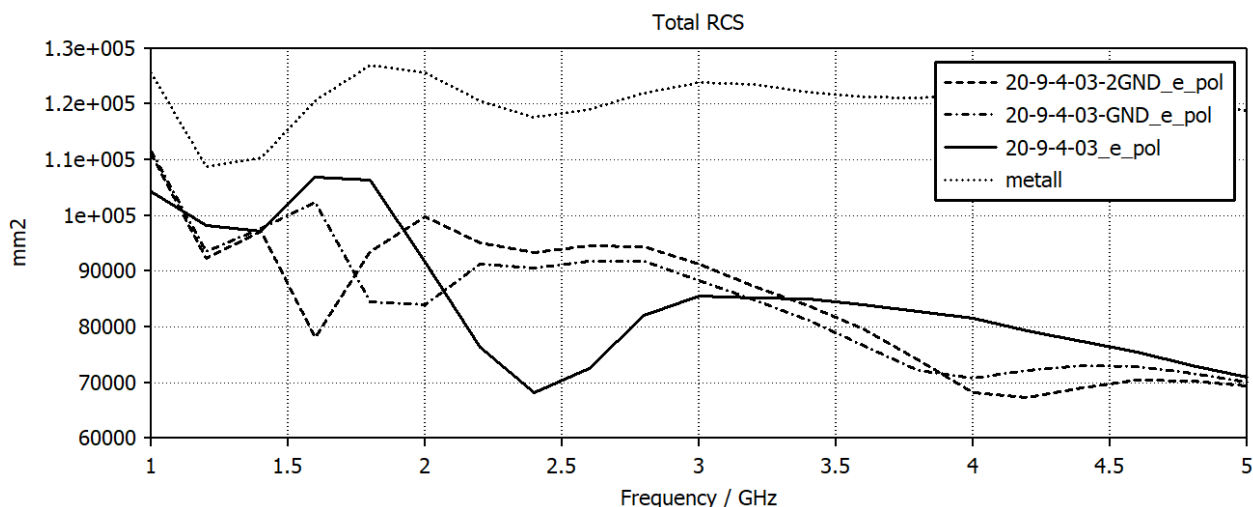


Рисунок 3. Зависимость ЭПР покрытия с размерами 24x24м см от частоты при различных вариантах коммутирования ЧСС на экран (2 точки, одна и без подключения к экрану)

Обзор возможностей элементной базы показывает, что бюджетные СВЧ переключатели имеют скорость переключения до 50 МГц (Renesas UPG2214). Таким образом, при использовании сигналов ЛЧМ с длительностью 1 мкс и более возможно произвести множество переключений резонансной частоты покрытия.

Моделирование процесса отражения сигнала ЛЧМ от радиолокационного покрытия с изменяемой резонансной частотой поглощения

Произведём оценку влияния перестроения резонансной частоты на структуру сигнала ЛЧМ. Отметим, что при этом нас интересует не влияние на сам сигнал как таковое, а влияние на результат его первичной обработки.

При использовании сигнала ЛЧМ время распространения зондирующего импульса до цели и обратно рассчитывается через разность частот гетеродина и отражённого сигнала. Во время приёма сигнала, отражённого от неподвижной цели, разность частот сигнала и генератора будет постоянной во времени и зависимой только от времени задержки между излучённым и принятым сигналами. В результате на выходе смесителя мы получим корреляционный пик на частоте, равной разности частот опорного генератора и принятого сигнала.

Математически сигнал ЛЧМ описывается выражением [9]

$$S(t) = S_0 \cos \left\{ \phi_0 + 2\pi \left(f_0 + \frac{b}{2} t^2 \right) \right\}$$

где S_0 – амплитуда сигнала;

ϕ_0 – начальная фаза.

Коэффициент b , являющийся тангенсом угла наклона частоты, определяется соотношением:

$$b = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T_s}$$

где $f_{\max}$ и $f_{\min}$ – максимальная и минимальная частоты сигнала ЛЧМ;

T_s – период сигнала.

На основе указанных соотношений была построена имитационная модель сигнала на выходе коррелятора РЛС при локации объекта в виде экрана [10, 11] с предлагаемой моделью покрытия.

Для моделирования было принято:

- длительность зондирующего импульса – 1 мкс;
- диапазон частот ЛЧМ – 2-2,5 (рисунки 4, 5) и 2,5-3 (рисунок 6) ГГц.

В качестве параметров покрытия были взяты результаты численного моделирования для двух вариантов включения – без коммутации на экран и коммутации обоих точек.

Для упрощения задачи энергетический расчёт радиолинии опускается, а в качестве лоцируемого объекта используется только рассматриваемая структура.

Изначально в программе формируется массив, состоящий из $2n$ элементов (число элементов кратно степени 2 для упрощения процедуры расчёта быстрого преобразования Фурье) с таким расчётом, чтобы дискретность удовлетворяла теореме Котельникова. Каждому элементу массива присваивается время задержки относительно начала измерения, при этом первый элемент имеет время, равное времени t_z . В массив данных записываются значения неискажённого отраженного сигнала ЛЧМ в сформированные временные отчёты и значения комплексного коэффициента отражения от покрытия, который изменяется по выбранному закону. После формирования исходных данных на каждый отчёт времени рассчитывается искаженный ЛЧМ сигнал.

На следующем этапе происходит поэлементное умножение массива значений опорного и искажённого сигналов, после чего рассчитывается быстрое преобразование Фурье от полученного смешанного сигнала.

В результате расчётов (рисунок 4) получается две кривые сигнала на выходе коррелятора РЛС: результат корреляции опорного сигнала с отражённым от покрытия (светлая линия) и опорного сигнала с зеркальным отраженным от экрана такого же размера (тёмная линия). Как видно из рисунков, корреляционный пик отражённого сигнала уменьшился немного в сравнении с использованием просто поглощающих покрытий, но при этом появились боковые лепестки, уровень которых также большой. Уменьшение частоты переключения покрытия приводит к уменьшению расстояния между пиками (рисунок 5).

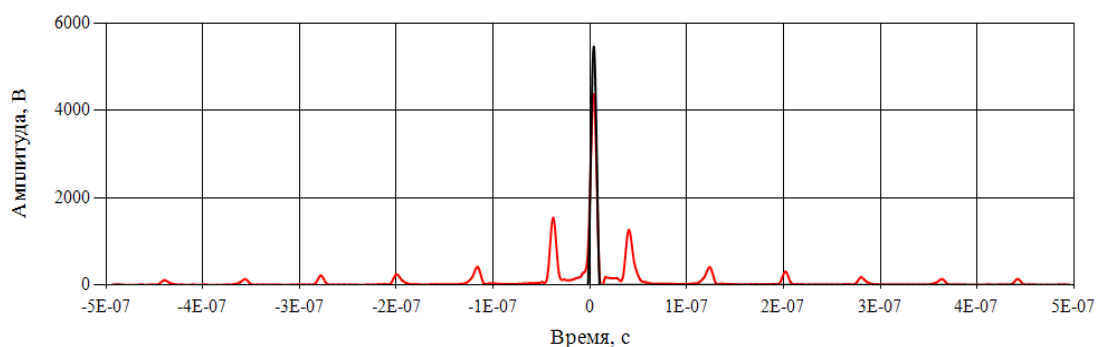


Рисунок 4. Сигнал на выходе коррелятора РЛС от покрытия (тёмная линия) с частотой переключения 20 МГц и зеркальном отражении от экрана (светлая линия)

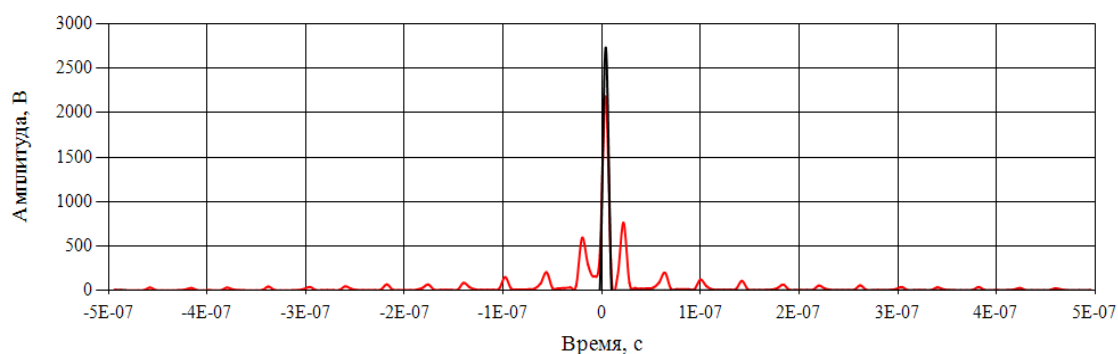


Рисунок 5. Сигнал на выходе коррелятора РЛС от покрытия (тёмная линия) с частотой переключения 10 МГц и зеркальном отражении от экрана (светлая линия)

При изменении частоты зондирующего сигнала эффект уменьшается по мере выхода спектра сигнала из рабочего частотного диапазона покрытия (рисунок 6).

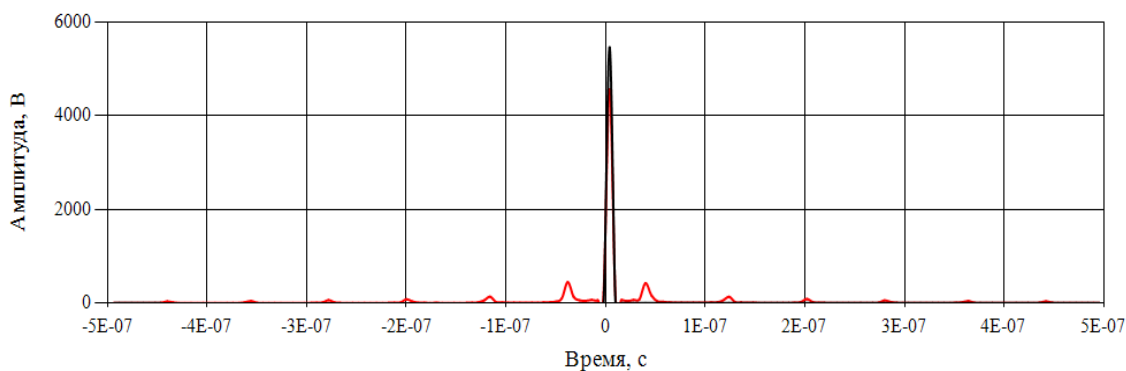


Рисунок 6. Сигнал на выходе коррелятора РЛС от покрытия (тёмная линия) с частотой переключения 20 МГц и зеркальном отражении от экрана (светлая линия)

Заключение

Результаты моделирования показывают, что в случае изменения резонансной частоты поглощения радиолокационного покрытия в процессе отражения от неё зондирующего сигнала ЛЧМ происходит его пассивная модуляция, которая при спектральной обработке в РЛС приводит к появлению дополнительных пиков на выходе коррелятора.

Список литературы

1. Федюнин П. А., Степаненко И. Т. Частотный диапазон радиопоглощающих покрытий и оценка их передельных свойств // Вестник Томского государственного университета. 2002. 7(1). 102.
2. Бойко С. Н., Кухаренко А. С., Яскин Ю. С. Применение экрана на основе метаматериала для отсеки многолучёвости антенн спутниковых систем навигации // Антенны. 2015. 7(218). 63-69.
3. Казанцев Ю. Н., Крафтмахер Г. А., Мальцев В. П. Управляемые полосно-пропускающие частотно-селективные поверхности // Радиотехника и электроника. 2014. 59(9). 908-916. DOI: 10.7868/S0033849414060096
4. Кухаренко А. С., Елизаров А. А. Анализ физических особенностей метаматериалов и частотно-селективных СВЧ-устройств на их основе // Т-Com: Телекоммуникации и транспорт. 2015. 9(5). 36-41.
5. Вербицкий А. В., Петров Э. Я. Патент № 2486541 С2 Российская Федерация, МПК G01S 7/495. Поглощающее покрытие: № 2011132532/08: заявлено 02.08.2011: опубликовано 27.06.2013.
6. Обуховец В. А. Дифракционные покрытия для изменения радиолокационного портрета объекта // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 28-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо 2018): материалы конференции. Севастополь, 9-15 сентября 2018 г. / Москва; Севастополь, Севастопольский государственный университет, 2018. 3. 685-689.
7. Кухаренко А. С., Елизаров А. А. Частотно-селективная поверхность на основе метаматериала с электронной перестройкой полосы запираения // Проблемы СВЧ электроники. 2015. 2. 45-48.
8. Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. К. Резонансное рассеяние волн. Том 1: Дифракционные решётки. Киев, Наукова думка, 1986. Киев, 1986. 231 с.
9. Зернов Н. В., Юрков Ю. А., Джунь В. И. Теория радиотехнических цепей и сигналов. Ленинград, Энергия Ленингр. отд-ние, 1990. 816 с.
10. Алешкин А. П., Иванов А. А., Гусаков В. М., Семенов А. А. Результаты моделирования работы РЛС при отражении сигнала от покрытия с управляемыми параметрами // Вестник метролога. 2020. 2. 21-23.
11. Гусаков В. М., Балакирев С. Н. Программный комплекс моделирования работы коррелятора радиолокационной станции при отражении сигнала с линейной частотной модуляцией от поверхности с изменяемыми во времени параметрами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681223 Российская Федерация. № 2021680641: заявлено 08.12.2021: опубликовано 20.12.2021.

References

1. Fedyunin P. A., Stepanenko I. T. Chastotnyy diapazon radiopogloshchayushchikh pokrytiy i otsenka ikh peredel'nykh svoystv [Frequency range of radio-absorbing coatings and assessment of their conversion properties] // Tomsk State University Journal. 2002. 7(1). 102.
2. Boiko, S. N., Kukharenko, A. S., and Yaskin, Yu. S. Primeneniye ekrana na osnove metamateriala dlya otsechki mnogoluchovosti antenn sputnikovyykh sistem navigatsii [Application of a screen based on metamaterial for multipath cutoff of antennas of satellite navigation systems] // Journal Antennas. 2015. 7(218). 63-69.
3. Kazantsev Yu. N., Kraftmakher G. A., Maltsev V. P. Upravlyayemyye polosno-propuskayushchiye chastotno-selektivnyye poverkhnosti [Controlled band-pass frequency-

selective surfaces] // Journal of Communications Technology and Electronics. 2014. 59(9). 908-916. DOI: 10.7868/S0033849414060096

4. Kukharenko A. S., Elizarov A. A. Analiz fizicheskikh osobennostey metamaterialov i chastotno-selektivnykh SVCH-ustroystv na ikh osnove [Analysis of the physical features of metamaterials and frequency-selective microwave devices based on them] // T-Comm. 2015. 9(5). 36-41.

5. Verbitsky A. V., Petrov E. Ya. Pogloshchayushcheye pokrytiye [Absorbent coating]. Patent RF. 2486541. 2013.

6. Obukhovets V. A. Difraktsionnyye pokrytiya dlya izmeneniya radiolokatsionnogo portreta ob"yekta [Diffractive coatings for changing the radar portrait of an object]. The 28th International Crimean Conference "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies" (KryMiKo'2018): Conference Proceedings. Sevastopol, September 09-15, 2018. Sevastopol, Sevastopol State University, 2018. 3. 685-689.

7. Kukharenko, A. S., Elizarov, A. A. Chastotno-selektivnaya poverkhnost' na osnove metamateriala s elektronnoy perestroykoy polosy zapiraniya [Frequency-selective surface based on a metamaterial with electronic tuning of the cut-off band] // Problems of Microwave Electronics. 2015. 2. 45-48.

8. Shestopalov V. P., Kirilenko A. A., Masalov S. A., Sirenko Yu. Rezonansnoye rasseyaniye voln. Tom 1: Difraktsionnyye reshotki [Resonance scattering of waves. Volume 1: Diffraction gratings]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1986. 231 p.

9. Zernov N.V., Yurkov Yu. A., Dzhun V. I. Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey i signalov [Theory of radio circuits and signals]. Leningrad, Energiya Leningr. dept. Publ., 1990. 816 p.

10. Aleshkin A. P., Ivanov A. A., Gusakov V. M., Semenov A. A. Rezul'taty modelirovaniya raboty RLS pri otrazhenii signala ot pokrytiya s upravlyayemyimi parametrami [Simulation results of radar operation when a signal is reflected from a coating with controlled parameters] // Vestnik Metrologa. 2020. 2. 21-23.

11. Gusakov V. M., Balakirev S. N. Programmnyy kompleks modelirovaniya raboty korrelyatora radiolokatsionnoy stantsii pri otrazhenii signala s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey ot poverkhnosti s izmenyayemyimi vo vremeni parametrami [A software package for modeling the operation of a correlator of a radar station when a signal with linear frequency modulation is reflected from a surface with time-varying parameters]. Certificate of state registration of the computer program no. 2021681223, Russian Federation. 2021680641. 2021.

Информация об авторах

Вяткин Александр Михайлович – адъюнкт, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0009-0000-2363-6296, vka@mil.ru

Гусаков Виктор Михайлович – кандидат технических наук, докторант, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0009-0003-3679-3209, vka@mil.ru

Цыкунов Владислав Николаевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0009-0009-2238-351X, vka@mil.ru