



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-76-82>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.967

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

М.С. СВИРИД

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 3 февраля 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Целью настоящей работы является разработка комплекса для исследований и измерения параметров и характеристик радиотехнических средств (РТС). Комплекс предназначен для формирования сигналов сверхширокополосного диапазона частот от 2 до 298 ГГц в измерительных системах, где требуется генерация сложных радиотехнических сигналов: антенные измерения, исследование характеристик радаров и электродинамических параметров материалов. Поставленная задача достигается тем, что в комплексе формируются квадратурные сигналы результатов суммирования полезного сигнала с шумами, мешающими отражениями и помехами. Производится генерация когерентных сигналов в аналоговом виде по четырем каналам, а сменные модули инфрадинного переносчика частоты и антенн формируют сигналы, излучаемые в пространство. Сменные блоки обеспечивают каскадное последовательное смешивание основного сигнала с частотой гетеродина. Подбор сменных модулей с заданной частотой гетеродина позволяет обеспечить излучение сигнала в СВЧ и КВЧ диапазонах частот.

Ключевые слова: комплекс для измерения радиотехнических средств, приемно-передающие устройства, радиосигнал, модулированный сигнал, антенны.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Свирид М.С. Комплекс для исследований и измерения параметров и характеристик радиотехнических средств. Доклады БГУИР. 2022; 20(3): 76-82.

COMPLEX FOR RESEARCH AND MEASUREMENT OF PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF RADIO TECHNICAL FACILITIES

MAXIM S. SVIRID

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 3 February 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The purpose of this work is to develop a complex for research and measurement of parameters and characteristics of radio technical facilities (RTF). The complex is designed to generate ultra-wideband signals from 2 to 298 GHz in measuring systems that require the generation of complex radio signals: antenna measurements, research of radar characteristics and electrodynamic parameters of materials. The task is achieved by the fact that the quadrature signals of the results of the summation of the useful signal with noises that interfere with reflections and interference, are formed in the complex. Coherent signals are generated in analog form over four channels, and replaceable modules of the infrared frequency carrier and antennas form signals that are radiated into space. Replaceable blocks provide cascaded sequential mixing of the main signal with the local oscillator frequency. The selection of replaceable modules with a given local oscillator frequency makes it possible to provide signal radiation in the microwave and EHF frequency ranges.

Keywords: complex for measuring radio technical facilities, receiving-transmitting devices, radio signal, modulated signal, antennas.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Svirid M.S. Complex for Research and Measurement of Parameters and Characteristics of Radio Technical Facilities. Doklady BGUIR. 2022; 20(3): 76-82.

Введение

Темой настоящей работы является разработка измерительного комплекса для исследования параметров и характеристик РТС, работающих в сверхширокополосном частотном диапазоне (СВЧ и КВЧ).

Основные требования, предъявляемые к комплексу:

- измерение системных параметров и характеристик РТС в широком частотном диапазоне (от 2 до 298 ГГц);
- обеспечение пространственной ориентации приемной и передающей антенн РТС по азимуту и углу места с заданной точностью;
- измерение мощности передатчика РТС и чувствительности приемника РТС;
- измерение диаграмм направленности приемных и передающих антенн, их комплексных коэффициентов передачи и отражения;
- определение эквивалентной дальности действия РТС.

Разработанный комплекс позволяет проводить измерения диаграммы направленности антенн через минимально возможные углы разрешения в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Существует также функциональная возможность комплекса – проверка статистических гипотез для выполнения задач пеленгации и распознавания сигнальных портретов РЛС.

Совершенствование методов измерения характеристик и параметров РТС вызывает необходимость ставить в соответствие реальной сигнально-помеховой обстановке классы аналитических измерительных сигналов [1–3], так как в реальной обстановке на приемную антенну РТС вместе с полезным сигналом поступают мешающие преднамеренные и непреднамеренные помехи, отражения и шумы от внешних и внутренних источников.

Исходя из вышеизложенного сформируем основные задачи для разработки комплекса:

- 1) разработать и создать подсистему генерации высокочастотных сигналов, перекрывающих диапазон от 2 до 298 ГГц;
- 2) разработать подсистему формирования модулированных радиосигналов с импульсной (ИМ), кодофазоманипулированной (КФМН), линейной и нелинейной частотной (ЛЧМ и НЛЧМ), шумоподобной (ШМ) модуляцией;
- 3) разработать способ формирования зондирующих радиосигналов, имитирующих реальную обстановку работы РТС (с учетом внешних преднамеренных и непреднамеренных помех и шумов, отраженных сигналов и т.д.);
- 4) разработать подсистему пространственного управляемого разнесения приемной и передающей антенн РТС, имитирующую заданное угловое положение источника радиоизлучения (ИРИ) с возможностью определения диаграммы направленности (ДН) в вертикальной и горизонтальной плоскостях с высоким разрешением;

- 5) разработать программное обеспечение для функционирования подсистем формирования радиосигналов с учетом возможности программного накопления и обработки статистической выборки;
- 6) обеспечить возможность автокалибровки диссипативных сигнальных трактов.

Структура и реализация измерительного комплекса

В «Научно-производственно-образовательном инновационном центре СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения» научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники разработан и изготовлен комплекс, в состав которого входит устройство формирования сложных радиотехнических сигналов в СВЧ-диапазоне.

Ниже приведено описание комплекса для исследований и измерения системных параметров и характеристик РТС, а также представлены новые оригинальные способы и технические решения, позволяющие решить поставленные задачи. Оригинальность разработанных способов и технических решений подтверждается патентом [4].

Комплекс состоит из четырех основных системных блоков. Первый из них – блок генерации модулированного сигнала с различными законами модуляции. Второй блок представляет собой приемную систему, состоящую из четырех антенн и устройства автокалибровки. Третьим блоком является трехкоординатная механическая платформа, обеспечивающая пространственную ориентацию антенн. Автоматизированное рабочее место (АРМ) управляющего комплексом оператора – четвертый системный блок.

Основой системного блока генерации является опорный задающий автогенератор с высокой стабильностью частоты, сменные модули конвертеров частоты и сменные антенные модули. Формирование четырех каналов аналоговых радиосигналов начинается с цифровых синтезаторов частоты, сигналы с которых после цифро-аналогового преобразования (ЦАП) проходят трехкратный инфрадинный перенос частоты вверх и подаются на антенны. Второй и третий преобразователи выполнены в виде сменных модулей, что позволяет обеспечить возможность формирования радиосигналов в диапазоне частот от 2 до 298 ГГц.

На рисунке 1 показана структурная схема системного блока генерации модулированных сигналов в указанном диапазоне. Она состоит из неподвижного и подвижного блоков передатчика и содержит цифровой формирователь квадратурных составляющих, использующий интегральную микросхему с программируемой логикой (ПЛИС); четыре цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП), формирующих сигнал на частоте 125 МГц; первый гетеродин (ЧГ1) и четыре модулятора, обеспечивающих генерацию сигнала по четырем каналам на частоте ЧГ1; второй гетеродин (ЧГ2) и четыре смесителя в виде сменного модуля преобразователя частоты, обеспечивающие генерацию сигнала на частоте ЧГ2 по четырем каналам; переключаемый управляемый третий гетеродин (ЧГ3), с делителем мощности и четыре смесителя, обеспечивающие выбор частоты и генерацию сигнала на заданной частоте по четырем каналам; четыре антенны, обеспечивающие излучение сигнала в пространство. ЧГ3, сумматор мощности, четыре смесителя и четыре антенны выполнены в виде сменного модуля для обеспечения генерации сигнала в разных поддиапазонах.

Формирование сложных радиотехнических сигналов обеспечивается программным обеспечением для ПЛИС.

В программном обеспечении реализованы следующие режимы работы.

1. Непрерывный сигнал. ПЛИС обеспечивает формирование квадратурных составляющих непрерывного гармонического сигнала. Параметры генерируемого сигнала: мощность, частота, отношение сигнал-шум.

2. Импульсный сигнал. ПЛИС обеспечивает формирование квадратурных составляющих импульсного сигнала. Характеристики выходного сигнала следующие: тип импульсного сигнала (немодулированный, модулированный); параметры генерируемого импульсного сигнала (мощность или амплитуда); задержка относительно синхроимпульса; период следования импульсов; длительность импульса; закон модуляции (ЛЧМ с окном, ЛЧМ без окна, КФМ и др.).

3. Сложный параметрический радиосигнал. ПЛИС обеспечивает формирование квадратурных составляющих сложных параметрических сигналов – эхосигналов, представляющих собой импульсные сигналы с шумом и мешающими отражениями. Эти сигналы предназначены для имитации радиообстановки при работе радиолокационных средств. Характеристики выходных сигналов следующие: параметры генерируемых эхосигналов (задержка относительно строба «Прием/Передача»; амплитуда; фаза; частота Доплера; ширина спектра шума; амплитуда флуктуации; изменение задержки сигнала относительно строба «Прием/Передача»); параметры случайного шума (закон распределения амплитуды – Релея, равномерный, Максвелла, детерминированное значение, и др.; закон распределения фазы – равновероятный; среднеквадратичное отклонение шума).

4. Произвольный сигнал. Предусмотрена возможность формирования сигнала пользователем. При этом происходит считывание из памяти заранее подготовленного сценария изменения параметров сигнала соответствующих изменению положения цели во времени. Имеется возможность временной корректировки действительной и мнимой составляющей частей комплексного сигнала.

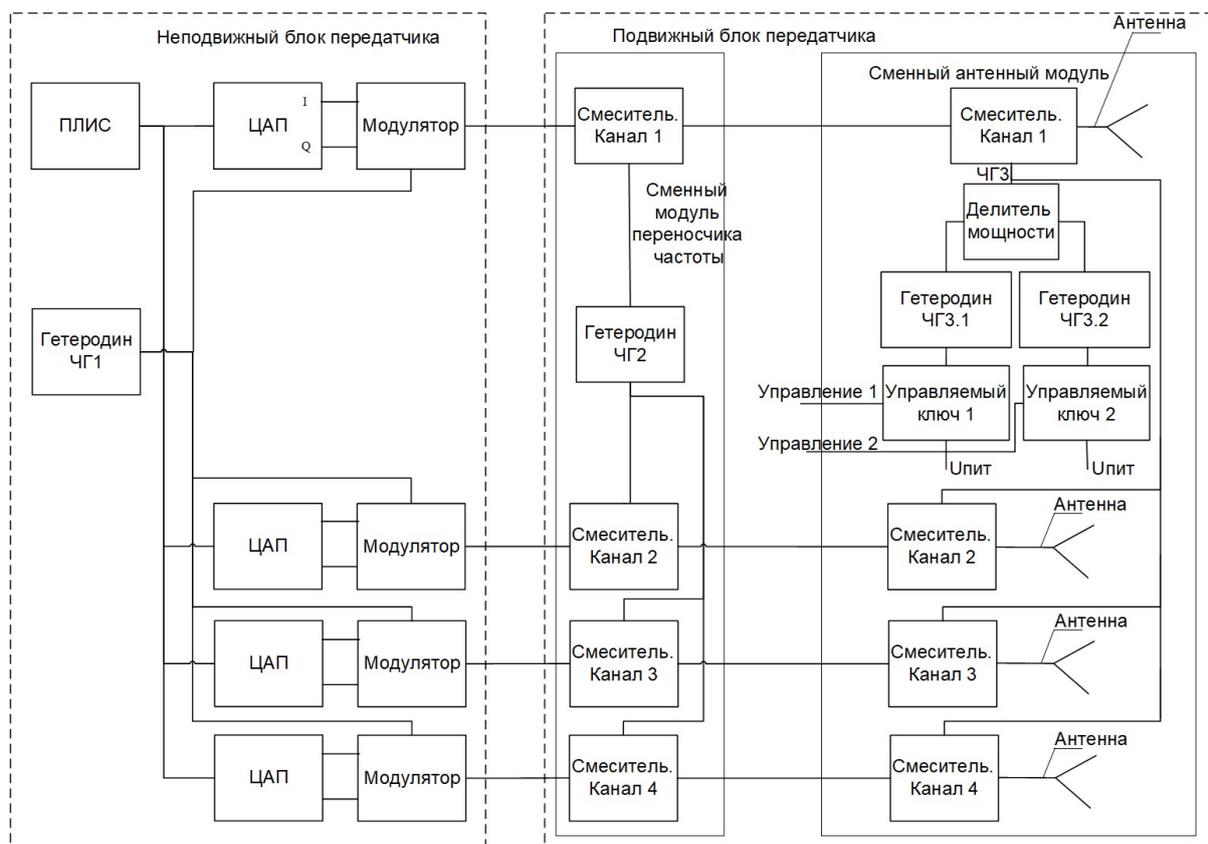


Рис. 1. Системный блок генерации модулированных сигналов

Fig. 1. System block for generating modulated signals

Взаимосвязь дальности до цели с задержкой сигнала τ , используемой в комплексе для имитации дальности, устанавливается соотношением:

$$R_t = \tau \cdot c / 2, \quad (1)$$

где R_t – дальность до цели, м; τ – задержка отраженного сигнала относительно зондирующего, с; c – скорость света в вакууме 299 792 458 м/с.

При работе ПЛИС используется величина τ' , соответствующая «однозначно видимой дальности» в соответствии с формулой:

$$R_t = \tau \cdot c / 2 = (n \cdot T_n + \tau') \cdot c / 2, \quad (2)$$

где T_n – период повторения импульсов, с; n – целое число; τ' – задержка сигнала в пределах одного периода повторения импульсов, с.

Комплекс позволяет имитировать ситуации взаимного перемещения носителя радара относительно движущегося объекта. При этом предварительно рассчитывается частота Доплера. Ее максимальное и минимальное значение определяется из выражения:

$$\begin{aligned} F_{max} &= 2 \cdot (V_r + V_t) \cdot f / c = 2 \cdot (M_r + M_t) \cdot f \cdot a / c; \\ F_{min} &= 2 \cdot (V_r - V_t) \cdot f / c = 2 \cdot (M_r - M_t) \cdot f \cdot a / c, \end{aligned} \quad (3)$$

где F_{max} – максимальное значение частоты Доплера, Гц; F_{min} – минимальное значение частоты Доплера, Гц; V_r, V_t – скорость носителя радара и объекта соответственно, м/с; M_r, M_t – скорость носителя радара и объекта соответственно в Махах; f – рабочая частота радара, Гц; c – скорость света 299 792 458 м/с; a – скорость звука ≈ 340 м/с.

Требуемое при моделировании соотношение сигнал/шум зависит от задаваемой амплитуды отраженного сигнала от цели как:

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \approx 20 \lg \left(\frac{N_s}{N_n} \right), \quad (4)$$

где P_s, P_n – мощность отраженного сигнала от цели и шума соответственно, мВт; N_s, N_n – код амплитуды отраженного сигнала от цели и шума соответственно.

В памяти ПЛИС сохранены таблицы напряжений для различных законов модуляции сигнала. Получая команду сформировать сигналы с заданной модуляцией, амплитудой, периодом повторения, ПЛИС цифровым образом создает соответствующие квадратурные составляющие. ЦАП (частота выходного сигнала промежуточной частоты 125 МГц) и модуляторы обеспечивают формирование сигналов в аналоговом виде с частотой ЧГ1, а сменные модули (преобразователь частоты и антенный модуль) обеспечивают генерацию сигналов в диапазоне частот 2–298 ГГц.

Каждому диапазону частот соответствует своя пара сменных модулей: антенного и переносчика частоты. Частота ЧГ3, подаваемая на смесители, устанавливается путем подачи напряжения питания на гетеродин ЧГ3.1 или гетеродин ЧГ3.2. Дополнительно в ПЛИС путем суммирования напряжений квадратурных составляющих сигналов возможно комбинирование основного сигнала с шумами, мешающими отражениями и помехами. Таким образом, обеспечивается формирование когерентных модулированных сигналов по четырем каналам.

Частотный план формирования выходного сигнала определяется из выражений:

$$F_{OUT} = 125 \text{ МГц} + \text{ЧГ2} - \text{ЧГ1} + \text{ЧГ3}, \quad (5)$$

где ЧГ1 – частота первого гетеродина; ЧГ2 – частота второго гетеродина; ЧГ3 – частота третьего гетеродина ЧГ3.1 или ЧГ3.2.

На рис. 2 приведена общая структурная схема комплекса, на которой приняты следующие обозначения:

системный блок генерации модулированного сигнала с различными законами модуляции 15;
1 – антенна; 2 – двухкоординатная платформа; 3 – сменный блок приемо-передатчика; 4 – блок сменных антенн; 5 – блок управления платформой; 6 – блок промежуточной частоты передатчика.

Второй блок представляет собой приемную систему 16:

7 – антенна; 8 – блок сменных антенн; 9 – устройства автокалибровки; 10 – трехкоординатная платформа; 11 – блок промежуточной частоты приемника; 12 – блок управления платформой; 13 – блок управления подсистемами приемника и передатчика; 14 – АРМ управляющего комплексом оператора.

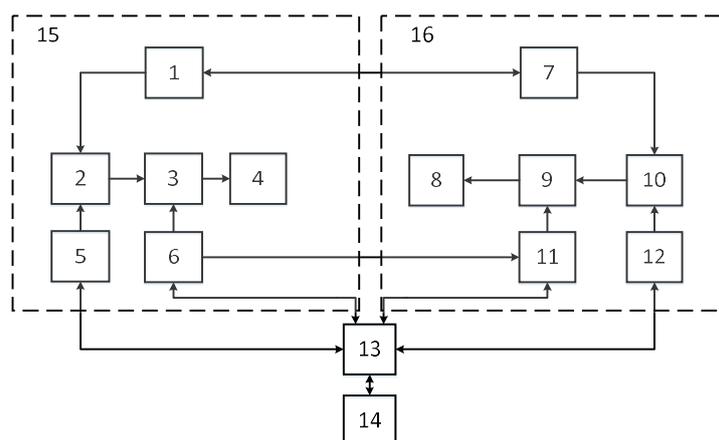
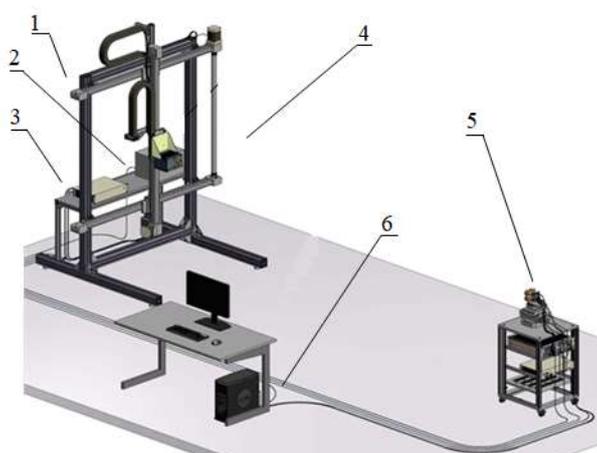


Рис. 2. Структурная схема комплекса
Fig. 2. Block diagram of the complex

Реализованный измерительный комплекс представлен на рис. 3.



1 – двукоординатная платформа; 2 – системный блок передатчика; 3 – блок управления платформой; 4 – подсистема передатчика; 5 – системный блок приёмника; 6 – АРМ оператора

Рис. 3. Состав и взаимное расположение блоков комплекса
Fig. 3. The composition and relative position of the complex blocks

Заклучение

Создан комплекс для исследований и измерения системных параметров и характеристик РТС, относящийся к области радиотехники. Он может быть использован для пространственных измерений радиотехнических характеристик приемо-передающих устройств. Измерительный комплекс разработан и изготовлен в «Научно-производственно-образовательном инновационном центре СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения» научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Он позволяет измерять системные параметры и характеристики РТС в широком частотном диапазоне (от 2 до 298 ГГц); обеспечивать пространственную ориентацию приемной и передающей антенн РТС; иметь возможность пространственной фиксации антенн по азимуту и углу места с заданной точностью; измерять мощность передатчика РТС и чувствительность приемника РТС; определять эквивалентную дальность действия РТС.

Необходимо отметить возможность измерения диаграммы направленности антенн через минимально возможные углы разрешения в вертикальной и горизонтальной плоскостях, что обусловливается новой функциональной возможностью комплекса – проверкой статистических гипотез для выполнения задач пеленгации и распознавания сигнальных портретов РТС.

Список литературы

1. Козлов С.В., Ву Т.Х. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;(11):1-29.
2. Козлов С.В., Ву Т.Х. Потенциальная точность квазиоптимальных радиолокационных измерителей угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой. *Доклады БГУИР*. 2020;18(3):5-13.
3. Булавко Д.Г., Ву Т.Х., Гусинский А.В., Козлов С.В., Копшай А.А., Кондрашов Д.А., Лисов Д.А., Луферов А.Н., Свирид М.С. Результаты экспериментальных исследований адаптивных алгоритмов оценивания угловых координат целей в радиолокационном измерителе со сканирующей многоканальной антенной системой в условиях помех. *Республиканская научно-практическая конференция «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020»*; 28-29 октября, 2020; Минск.
4. Свирид М.С., Гусинский А.В., Луферов А.В., Кондрашов Д.А., Кострикин А.М. *Автоматизированная система пространственных измерений характеристик радиотехнических СВЧ устройств и материалов*. Евразийский патент на изобретение № 038525. Опубл. 09.09.21, Бюл. № 09.
5. Забеньков И.И., Гусинский А.В., Свирид М.С., Исакович Н.Н., Забеньков А.И., Солоневич С.С. *Способ определения времени подачи команды на инициализацию на заданной высоте реактивного снаряда с пикирующей траекторией полета*. Патент Республики Беларусь на изобретение № 23549. Опубл. 30.10.2021.
6. Гусинский А.В., Свирид М.С., Кондрашов Д.А., Копшай А.А., Булавко Д.Г., Лисов Д.А. Моделирование микрополосковой антенны радиовысотомера для летательного аппарата. *Доклады БГУИР*. 2021;19(5):5-12.

References

1. Kozlov S.V., Vu T.Kh. [Algorithms for signal processing in radar angle meters with a scanning multichannel antenna system]. *Zhurnal Radioelektroniki*. 2019;(11):1-29. (In Russ.)
2. Kozlov S.V., Vu T.Kh. [Potential accuracy of quasi-optimal radar meters of angular coordinates with a scanning multichannel antenna system]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;18(3):5-13. (In Russ.)
3. Bulavko D.G., Vu T.Kh., Gusinsky A.V., Kozlov S.V., Kopshay A.A., Kondrashov D.A., Lisov D.A., Lufarov A.N., Svirid M.S. [Results of experimental studies of adaptive algorithms for estimating the angular coordinates of targets in a radar meter with a scanning multichannel antenna system under noise conditions]. *Republican scientific and practical conference "Information radio systems and radio technologies 2020"*; October 28–29, 2020; Minsk. (In Russ.)
4. Svirid M.S., Gusinsky A.V., Lufarov A.V., Kondrashov D.A., Kostrikin A.M. [Automated system for spatial measurement of characteristics of radio engineering microwave devices and materials]. Eurasian patent for invention No. 038525. Publ. 09.09.21, Bull. No. 09.
5. Zabenkov I.I., Gusinsky A.V., Svirid M.S., Isakovich N.N., Zabenkov A.I., Solonovich S.S. [Method for determining the time of issuing a command for initialization at a given altitude of a rocket projectile with a diving flight path]. Patent of the Republic of Belarus for the invention No. 23549. Publ. 30.10.2021. (In Russ.)
6. Gusinsky A.V., Svirid M.S., Kondrashov D.A., Kopshay A.A., Bulavko D.G., Lisov D.A. [Simulation of a microstrip radio altimeter antenna for an aircraft]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;19(5):5-12. (In Russ.)

Сведения об авторах

Свирид М.С., старший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Svirid M.S., Senior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-293-86-62;
e-mail: maxim_sv@tut.by
Свирид Максим Сергеевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-86-62;
e-mail: maxim_sv@tut.by
Svirid Maxim Sergeevich