



Оригинальная статья  
Original paper

<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-5-5-12>

УДК 621.396

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ РАДИОВЫСОТОМЕРА ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.В. ГУСИНСКИЙ, М.С. СВИРИД, Д.А. КОНДРАШОВ, А.А. КОПШАЙ, Д.Г. БУЛАВКО,  
Д.А. ЛИСОВ

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

*Поступила в редакцию 12 октября 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** Целью статьи является проведение математического моделирования основных характеристик и параметров микрополосковой антенны, диэлектрическая подложка которой создана из отечественного образца керамики, и обоснование применения микрополосковой антенны в качестве приемо-передающей антенны в радиовысотомере. Показано, что микрополосковая антенна имеет хорошие электрические параметры в частотном диапазоне 31,5–33,5 ГГц в случае размещения ее на подложке из керамического материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 9,6$  и толщиной 0,2 мм. В том числе ширина диаграммы направленности антенны по уровню  $-3$  дБ составляет 12,5 град в горизонтальной плоскости и 26,7 град в вертикальной плоскости. При этом коэффициент усиления антенны равен 17 дБ, а уровень первого бокового лепестка составляет  $-20$  дБ относительно главного лепестка антенны. Также в статье предложено практическое применение антенной решетки синфазных микрополосковых антенн в качестве приемо-передающей антенны радиовысотомера, устанавливаемого на летательные аппараты. Дальность действия высотомера достигает 300 м.

**Ключевые слова:** микрополосковая антенна, радиовысотомер, линейно-частотно модулированный сигнал, диэлектрическая проницаемость, антенная решетка.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** 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.

## SIMULATION OF MICROSTRIP RADIO ALTIMETER ANTENNA FOR AIRCRAFT

ALEKSANDR V. GUSINSKI, MAKSIM S. SVIRID, DENIS A. KONDRASHOV,  
ALEKSEI A. KOPSHAI, DMITRY G. BULAVKO, DMITRY A. LISOV

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

*Submitted 12 October 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** The purpose of the article is to carry out mathematical modeling of the main characteristics and parameters of a microstrip antenna, the dielectric substrate of which is created from a domestic ceramic sample and to substantiate the use of a microstrip antenna as a transmitting and receiving antenna in a radio altimeter. It is shown that a microstrip antenna on a ceramic material substrate with a relative permittivity  $\epsilon = 9.6$  and a thickness of 0.2 mm has good electrical parameters in the frequency range of 31.5–33.5 GHz. Including the width of the antenna radiation pattern at the level of  $-3$  dB is 12.5 degrees in the horizontal plane and 26.7 degrees in the vertical plane. In this case, the antenna gain is 17 dB and the level of the first side lobe is  $-20$  dB relative to the main antenna lobe. Also the practical application of microstrip array antennas in phase as a transmitting and receiving antenna for a radio altimeter installed on aircraft is described in the article. The range of the altimeter reaches 300 m.

**Keywords:** microstrip antenna, radio altimeter, linear-frequency modulated signal, dielectric constant, antenna array.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflicts of interest.

**For citation.** Gusinski A.V., Svirid M.S., Kondrashov D.A., Kopshai A.A., Bulavko D.G., Lisov D.A. Simulation of microstrip radio altimeter antenna for aircraft. Doklady BGUIR. 2021; 19(5): 5-12.

### Введение

Радиовысотомеры (РВ) в настоящее время являются обязательным элементом комплекса радиотехнического оборудования летательного аппарата (ЛА). Основное требование к антеннам радиовысотомеров – формирование амплитудной диаграммы направленности (ДН) с максимумом излучения в направлении земной поверхности. Необходимая для работы радиовысотомера ДН может быть сформирована, например, вибраторными и (или) рупорными антеннами [1].

Вибраторные антенны обычно располагают над проводящей поверхностью, играющей роль экрана. Вибраторные антенны являются выступающими, что ограничивает их применение на современных и перспективных ЛА.

Достоинством рупорных антенн является простота их конструкции и относительно широкий частотный диапазон. Такая антенна представляет собой волновод с плавно расширяющимися размерами поперечного сечения. Выбором размера раскрыва рупора возможно обеспечить требуемую ширину ДН.

Однако когда к антенной системе предъявляются жесткие требования по минимизации ее габаритов и массы (беспилотные ЛА, космические аппараты и др.), в качестве излучателей необходимо использовать микрополосковые элементы. В случае изготовления таких антенн по технологии печатных плат (печатные излучающие элементы), возможно не только значительно снизить массогабаритные параметры, но и уменьшить стоимость и повысить надежность антенных систем. Такие антенны характеризуются достаточной механической прочностью, а значит, могут размещаться на внешних поверхностях ЛА, то есть являются невыступающими.

Несомненным достоинством микрополосковых антенн (печатных антенн, или патч-антенн (от англ. Patch-antenna) также является простота интеграции с другими СВЧ-устройствами.

В настоящее время актуальной является задача по созданию композитных керамических материалов, использование которых позволит уменьшить массогабаритные характеристики существующих устройств СВЧ ориентировочно в 1,5–2 раза. Отмечается, что использование новых образцов микроволновой керамики позволит создавать в том числе и диэлектрические подложки для печатных антенн.

Аналогичные разработки ведутся и в нашей стране. Их актуальность связана с тем, что на сегодняшний день более двух третей керамических подложек для создания устройств СВЧ являются предметом импорта. Уже созданы отдельные отечественные образцы керамик на основе оксида алюминия.

Необходимо отметить, что активное развитие и совершенствование различных систем космических аппаратов требует дальнейшей миниатюризации существующих патч-антенн. Следовательно, задача создания отечественных керамических подложек для микрополосковых антенн приобретает дополнительную актуальность.

Одним из распространенных способов миниатюризации печатных антенн является использование материалов с высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . В этом случае действует следующее оценочное правило: увеличение в  $k$  раз диэлектрической проницаемости приводит к уменьшению габаритов излучателя в  $\sqrt{k}$  раз.

В настоящее время известны различные виды керамик с  $\epsilon > 9$  и относительно малыми значениями тангенса угла диэлектрических потерь менее  $10^{-3}$ .

Таким образом, целями работы являются: определение посредством математического моделирования основных характеристик и параметров микрополосковой антенны, диэлектрическая подложка которой создана из отечественного образца керамики; на основе полученных результатов моделирования определение возможности использования образцов отечественных СВЧ керамик для создания печатных антенн; рассмотрение применения микрополосковой антенны в качестве прямо-передающей антенны в радиовысотомере.

## Моделирование

Исходными данными для моделирования явились:

- частотный диапазон работы высотомера – 31,5÷33,5 ГГц;
- поляризация излучения (приема) – линейная;
- толщина подложки отечественного композитного материала – 0,2 мм;
- относительная диэлектрическая проницаемость отечественного керамического материала подложки –  $\epsilon = 9,6$ ;
- входное сопротивление коаксиального кабеля, связанного с антенной, – 50 Ом.

Также исходным параметром при проектировании антенн является направленность, которая определяет необходимую форму и пространственную ширину луча (в двух главных плоскостях). В этой связи необходимо отметить следующее:

- ДН РВ не должна быть слишком широкой, так как при этом снижается точность измерения высоты из-за «растягивания» отраженного сигнала и увеличивается уровень отражений от местных предметов и выступающих элементов конструкции ЛА;
- ДН РВ не должна быть узкой из-за опасности «потери» высоты при эволюциях полета [2];
- ширина главного лепестка ДН антенны РВ в направлении полета должна несколько быть больше, чем в поперечном направлении;
- единичный печатный излучатель является слабонаправленным излучателем – следовательно, для создания необходимой ДН РВ потребуется создание антенной решетки синфазных микрополосковых антенн.

Вышеперечисленные требования привели к необходимости создания массива  $4 \times 8$  печатных излучателей с линейным питанием от общего проводника (рис. 1). Размещение излучателей в антенной решетке эквидистантное.

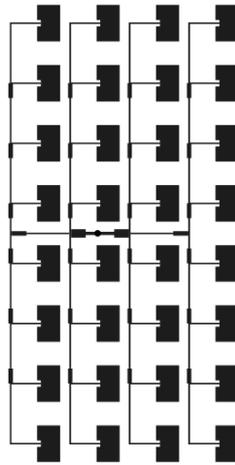


Рис. 1. Массив печатных излучателей для моделирования  
Fig. 1. Array of printed emitters for modeling

В результате проведенного моделирования получены оценки электрических параметров микрополосковой антенны (рис. 2–5).

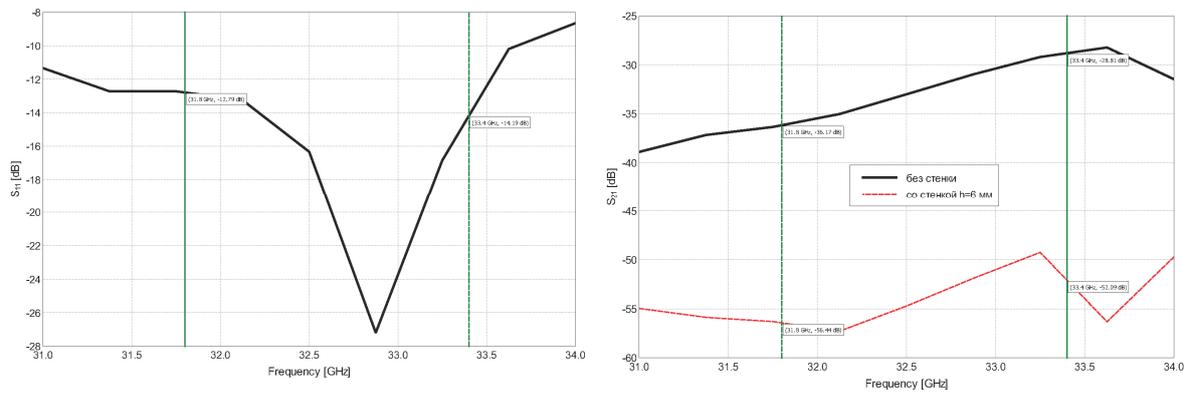


Рис. 2. S-параметры в рабочем диапазоне частот  
Fig. 2. S-parameters in working frequency range

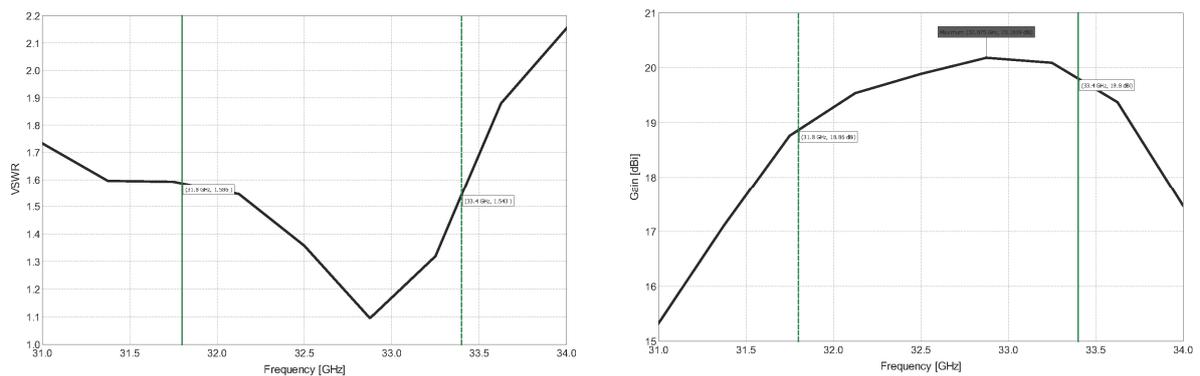
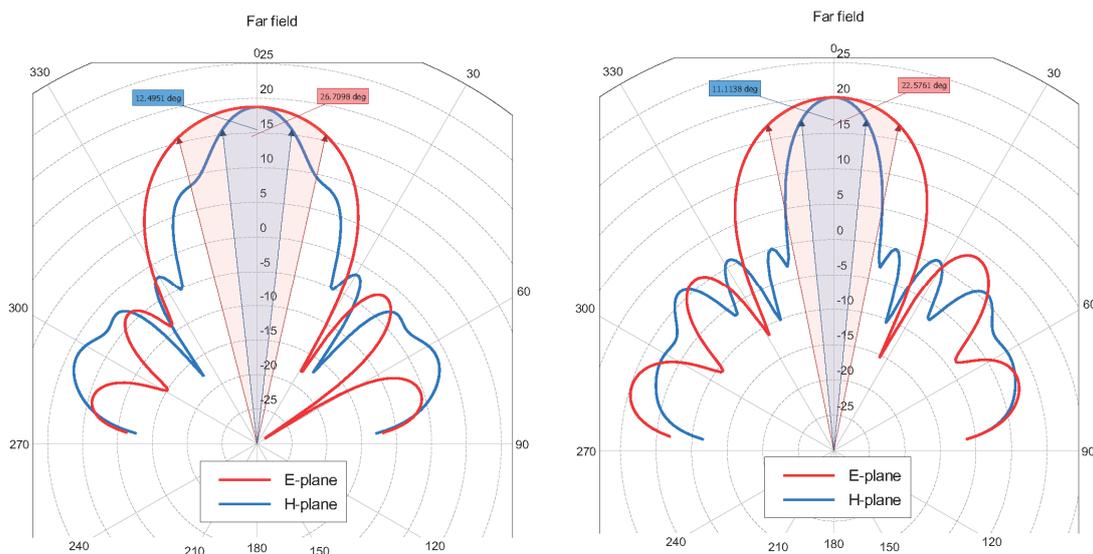
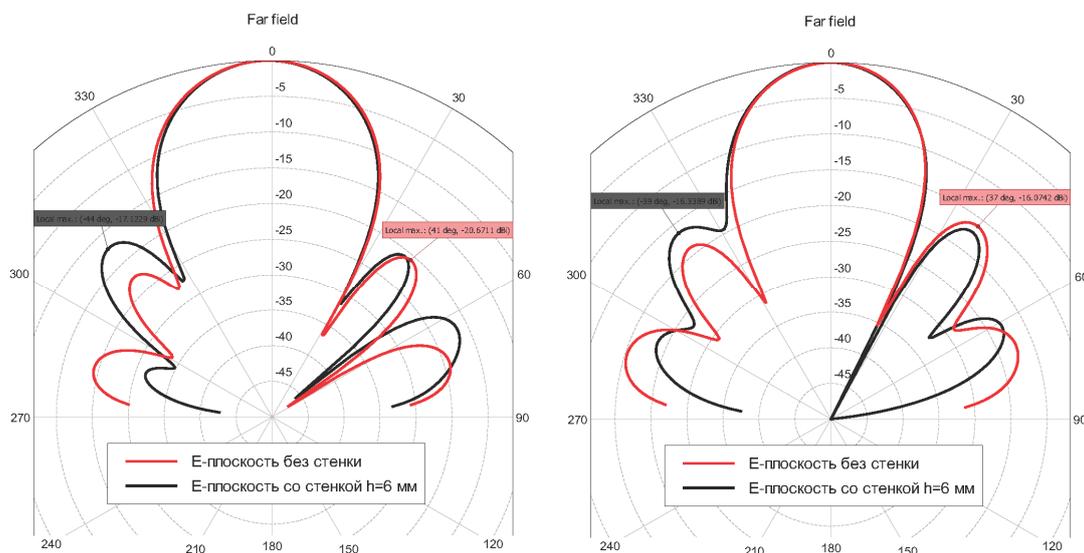


Рис. 3. КСВН и коэффициент усиления антенны в рабочем диапазоне частот  
Fig. 3. VSWR and gain factor of antenna in working frequency range



**Рис. 4.** Диаграмма направленности антенны на частоте 31,5 и 33,5 ГГц  
**Fig. 4.** Pattern diagram in frequency 31.5 and 33.5 GHz



**Рис. 5.** Уровень боковых лепестков на ДН антенны на частоте 31,5 и 33,5 ГГц  
**Fig. 5.** Side lobe level in frequency 31.5 and 33.5 GHz

### Практическое применение

Радиовысотометр предназначен для измерения высоты движения ЛА относительно земной поверхности. Основной областью применения РВ является измерение высоты полета ЛА в реальном масштабе времени.

Радиовысотометр построен по классической схеме РВ малых высот с линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом [3]. Его отличительными особенностями являются принцип управления зондирующим сигналом и принцип слежения за истинной высотой.

Сущность отличительных принципов состоит в том, что в РВ прямой и отраженный сигналы передаются на приемное устройство. Измерение расстояния осуществляется путем расчета разности по частоте между прямыми и отраженными от цели колебаниями в один и тот же момент времени.

Поскольку периодические законы изменения частоты и фазы сигнала взаимосвязаны, частотно-модулированные колебания могут быть представлены рядом Фурье – суммой гармонических составляющих с кратными частотами [4–6]:

$$u(t) = \sum_k U_k \cos\left(\frac{2\pi}{T}kt + \varphi_0\right). \quad (1)$$

Ширина спектра продолжительного ЛЧМ колебания характеризуется величиной девиации частоты, т. е. разностью между максимальной и минимальной мгновенными частотами:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}, \quad (2)$$

при этом скорость нарастания (убывания) частоты определяется формулой

$$\gamma = \frac{2 \cdot \Delta f}{T} \quad (3)$$

Отраженный от цели сигнал на входе смесителя имеет сниженную амплитуду и запаздывает во времени на величину

$$t_d = \frac{2 \cdot r}{c}, \quad (4)$$

где  $r$  – расстояние до цели,  $c$  – скорость света.

Частота биений при этом остается постоянной, за исключением малых интервалов времени, на границах которых разность скоростей изменения частоты колебаний прямого и отраженного сигнала меняет знак. Скорость изменения частоты  $\gamma$  связана с девиацией частоты и периодом  $T$  (или частотой модуляции  $F$ ). Основное значение частоты биений будет равно

$$F_b = \gamma \cdot t_d = \frac{4\Delta f \cdot F \cdot r}{c}. \quad (5)$$

Таким образом, частота биений  $F_b$  может служить мерой дальности до цели.

Радиовысотомер работает в режиме поиска, а при регистрации сигнала, отраженного от земли, переходит в режим сопровождения.

Принцип действия РВ заключается в получении и поддержании постоянным значения разностной частоты (частоты биений) между излучаемым линейно модулированным сигналом и сигналом, отраженным от земли.

Радиовысотомер состоит из: модуля цифровой обработки (МЦО); преобразователя аналого-цифрового (АЦП); генератора пилообразного напряжения (ГПН); генератора управляемого напряжением (ГУН); умножителя частоты (УмЧ); полосового фильтра (ПФ); ответвителя направленного (НО); СВЧ предварительного усилителя мощности (ПУМ); СВЧ усилителя мощности (УМ); защитного устройства (ЗУ); малошумящего усилителя (МШУ); смесителя (СМ); СВЧ детектора (ДСВЧ); фильтра нижних частот (ФНЧ); усилителя промежуточной частоты (УПЧ) и модуля питания (МП) (рис. 6).

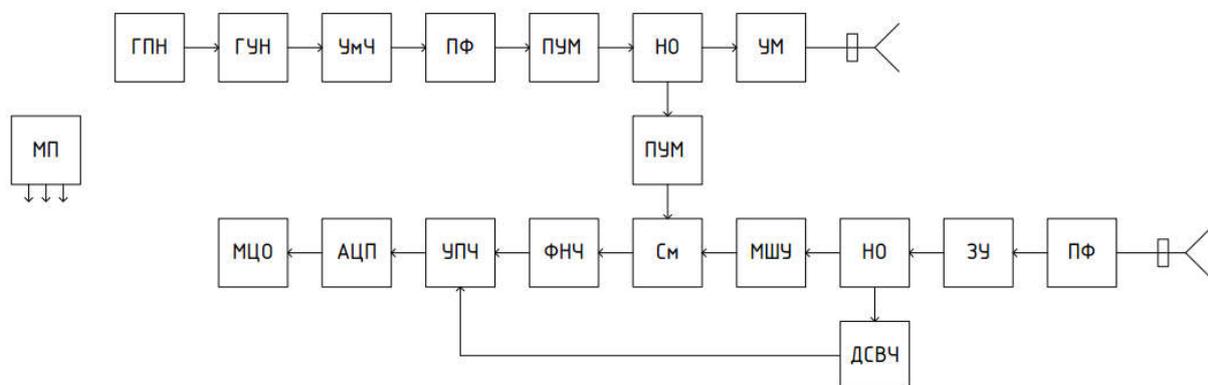


Рис. 6. Структурная схема РВ  
Fig. 6. Block-diagram of radio altimeter

- Основные технические характеристики РВ:
- диапазон рабочих частот – от 32 до 34 ГГц;
  - время обновления измерений – не более 0,5 мс;
  - диапазон измерения высоты – от 0,3 до 300 м;
  - среднеквадратическая ошибка измерения высоты – не более  $\pm 6\%$  от значения измеряемой высоты;
  - тип антенн – микрополосковая;
  - максимальная перегрузка – 40 г;
  - рабочий диапазон температур – от минус 40 °С до плюс 45 °С;
  - сила потребляемого тока – не более 1,5 А;
  - напряжение питания – 12 В;
  - интерфейс управления – RS-485.

### Заключение

В работе рассмотрены и проанализированы результаты моделирования микрополосковой антенны на керамической подложке с высокой диэлектрической проницаемостью. Путем математического моделирования и последующего изготовления показана возможность использования отечественных подложек для производства антенн. Практическое применение предложенной антенной системы в радиовысотомере для летательных аппаратов позволило улучшить технические характеристики высотомера в части увеличения устойчивого измерения расстояния и уменьшения массо-габаритных параметров радиовысотомера.

### Список литературы

1. Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ*. Москва: Высшая школа; 1988.
2. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А. *Антенно-фидерные устройства*. Москва: Радио и связь; 1989.
3. Сосновский А.А., Хаймович И.А. *Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Справочник*. Москва: Транспорт; 1987.
4. Белов Л.А. *Радиопередающие устройства с линейно частотной модуляцией*. Москва: Московский энергетический институт; 1981.
5. Хармут Х.Ф. *Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи*. Москва: Радио и связь; 1985.
6. Сергиенко А.Б. *Цифровая обработка сигналов*. Санкт-Петербург: Питер; 2005.

### References

1. Sazonov D.M. [*Antennas and microwave devices*]. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. (in Russ.)
2. Kocherzhevsky G.N., Erokhin G.A. [*Antenna-feeder devices*]. Moscow: Radio i svyaz'; 1989. (in Russ.)
3. Sosnovsky A.A., Khaimovich I.A. [*Aircraft radio-electronic equipment*]. Reference book. Moscow: Transport; 1987. (in Russ.)
4. Belov L.A. [*Radio transmitting devices with linear frequency modulation*]. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 1981. (in Russ.)
5. Harmut H.F. [*Non-sinusoidal waves in radar and radio communication*]. Moscow: Radio i svyaz'; 1985. (in Russ.)
6. Sergienko A.B. [*Digital signal processing*]. St. Petersburg: Piter; 2005. (in Russ.)

### Вклад авторов

Гусинский А.В. осуществил научное руководство и постановку задачи.  
Свирид М.С. провел моделирование СВЧ-тракта радиовысотомера.  
Кондрашов Д.А. разработал структурную схему радиовысотомера.  
Копшай А.А. выполнил моделирование микрополосковой антенны.  
Булавко Д.Г. разработал 3D-модель антенной системы на керамической подложке.  
Лисов Д.А. разработал конструкцию радиовысотомера.

### Authors' contribution

Gusinski A.V. carried out scientific guidance and formulation of the problem.  
Svirid M.S. conducted modeling of the microwave path of the radio altimeter.  
Kondrashov D.A. developed a block diagram of a radio altimeter.  
Kopshai A.A. performed the simulation of a microstrip antenna.  
Bulavko D.G. developed a 3D model of an antenna system on a ceramic substrate.  
Lisov D.A. developed the design of the radio altimeter.

### Сведения об авторах

Гусинский А.В., к.т.н., начальник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Кондрашов Д.А., заместитель начальника Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Копшай А.А., научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Булавко Д.Г., младший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лисов Д.А., младший научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Gusinski A.V., PhD, Head of the Center 1.9 R&S Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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

Kondrashov D.A., Deputy Head of the Center 1.9 R&S Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kopshai A.A., Researcher at the Center 1.9 R&S Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bulavko D.G., Junior Researcher at the Center 1.9 R&S Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lisov D.A., Junior Researcher at the Center 1.9 R&S Department of the 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. +375-29-639-84-42;  
e-mail: avggus@mail.ru  
Гусинский Александр Владимирович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-29-639-84-42;  
e-mail: avggus@mail.ru  
Gusinski Aleksander Vladimirovich