

УДК 621.382

Беспилотный летательный аппарат для радиометрического дистанционного зондирования агроландшафтов*

И.А. Сидоров, А.Г. Гудков, В.Д. Шашурин,
С.В. Чижиков, Р.В. Агандеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Unmanned aerial vehicle for radiometric remote sensing of the agricultural landscapes

I.A. Sidorov, A.G. Gudkov, V.D. Shashurin,
S.V. Chizhikov, R.V. Agandeev

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены различные аспекты применения беспилотных летательных аппаратов в качестве носителя пассивного радиолокатора микроволнового диапазона на основе СВЧ-радиометра, предназначенного для сбора, предварительной обработки и регистрации на карту памяти информации о подстилающей поверхности почвы одновременно в двух диапазонах частот и на двух поляризациях. Накопленная в ходе полетов над сельскохозяйственными угодьями информация и навигационные данные позволяют в ходе дальнейшей обработки информации строить геопривязанные карты портретов влажности почвогрунтов и карты температуры поверхностного и подповерхностного слоев почвы. Учитывая востребованность дистанционного мониторинга влажности и температуры почвы для ускоренного внедрения технологий точного земледелия в практику растениеводства, становится актуальным дальнейшее развитие предложенного метода. Применение беспилотного летательного аппарата в качестве носителя СВЧ-радиометра выдвигает ряд специфических требований к техническим характеристикам носителя. Эти требования рассмотрены на основе экспериментальных результатов и многолетнего опыта использования различных летательных аппаратов и наземных носителей СВЧ-радиометров, благодаря чему сформулированы необходимые требования к носителям и СВЧ-радиометру. По результатам проведенного анализа оптимизирован выбор квадрокоптера, на котором размещен СВЧ-радиометр, и успешно проведены их совместные летные и полевые испытания в различных регионах России.

EDN: GQSHOW, <https://elibrary/gqshow>

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, квадрокоптер, СВЧ-радиометр, дистанционное зондирование агроландшафтов, точное земледелие, влажность почвы

The paper considers various aspects of using an unmanned aerial vehicle as a carrier of the passive microwave radar based on a microwave radiometer, which is designed to collect, pre-process and register information about the underlying soil surface on a memory card simultaneously in two frequency ranges and in two polarizations. Information accumulated

* Исследование выполнено при поддержке гранта российского научного фонда № 22-19-00063 <https://rscf.ru/project/22-19-00063>.

during a flight over the agricultural lands and the navigation data are making it possible to construct georeferenced maps of the soil moisture portraits, surface and subsurface soil layers temperature maps in the information further processing. Further development of the proposed method becomes relevant, given the demand for remote monitoring of the soil moisture and temperature for accelerated introduction of the precision land management technologies in crop production. Introducing an unmanned aerial vehicle as the microwave radiometer carrier proposes a number of specific requirements for technical characteristics of the carrier. The paper considers these requirements based on the experimental results and many years of experience in using various aerial vehicles and ground-based carriers of the microwave radiometers. This experience makes it possible to formulate the required requirements for the carriers and the microwave radiometer. The research analysis results in optimizing a quadcopter, where a microwave radiometer could be installed. Its combined flight and field testing was carried out successfully in various regions of Russia.

EDN: GQSHOW, <https://elibrary/gqshow>

Keywords: unmanned aerial vehicle, quadcopter, microwave radiometer, remote sensing of the agricultural landscapes, precision land use, soil moisture

Дистанционное определение влажности почвы, температуры поверхности и солености океанов успешно осуществляется с бортов космических аппаратов, что позволяет решать глобальные задачи метеорологии, климатологии и геологии [1–4]. Однако карты влажности почвы, получаемые в результате обработки данных космических радиометров, имеют низкую разрешающую способность (около 40 км), что затрудняет их использование в системе точного земледелия.

Для удовлетворения метрологических потребностей определения влажности и температуры поверхности почвы в системе точного земледелия также применяют радиометрическое зондирование [5], причем с использованием авиационных пилотируемых или беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [6–9]. Там, где затруднено применение авиационных носителей, задействуют наземные подвижные платформы — сельскохозяйственные машины, квадроциклы, тележки или транспортировку на руках [10].

Суть радиометрического метода состоит в том, что влажность почвы определяют косвенным путем с помощью сверхчувствительного приемника — микроволнового радиометра, интенсивности собственного радиотеплового излучения поверхности почвы вместе с отраженным от той же поверхности реликтовым излучением небесной сферы.

По данным измерений радиояркостной температуры почвы на двух поляризациях электромагнитной волны можно вычислить коэффициенты отражения ее от поверхности почвы. Коэффициенты отражения для вертикально и

горизонтально поляризованных волн зависят от диэлектрической проницаемости почвы и описываются известными формулами Френеля. Решая соответствующие уравнения Френеля, можно определить диэлектрическую проницаемость почвы, которая в основном зависит от ее влажности [11].

При ширине главного луча антенны радиометра 52° разрешающая способность будет примерно равна высоте полета носителя. Для пилотируемых средств сельскохозяйственной авиации, например самолета АН-2, с радиометром высота полета над землей обычно составляет 100...1000 м, для БПЛА — 10...100 м.

Таким образом, при использовании авиационных носителей разрешающая способность будет находиться в пределах 10...100 м, чего вполне достаточно для большей части сельскохозяйственных приложений. Если же потребуется более высокое разрешение, то можно задействовать наземные носители. В этом случае разрешающая способность будет достигать 1,5 м. Практические аспекты применения радиометрии на различных носителях приведены в монографии [12].

Анализ результатов расчета показывает, что наибольшей эффективностью при получении карт влажности почв больших территорий обладают радиометрические системы, установленные на БПЛА вертолетного типа — квадро-, гексакоптеры и др. Правильный выбор дрона под конкретную радиометрическую систему — залог успеха любой миссии.

При выборе коптера в качестве носителя необходимо учитывать ряд аспектов. К радиометрической системе в целом и непосредствен-

но к радиометру также предъявляются специфические требования. Радиометрическую систему следует разрабатывать специально для решения поставленных задач совместно с квадрокоптером. Помимо радиометрического приемника радиометрическая система должна содержать систему автономного питания на базе литий-ионного аккумулятора, обеспечивающего несколько часов непрерывной работы, спутниковую и автономные навигационные системы, систему регистрации данных на протяжении всего времени полета, инфракрасный датчик и оптический фоторегистратор.

Цель работы — рассмотреть специфические требования к техническим характеристикам БПЛА, применяемого в качестве носителя СВЧ-радиометра.

Основные технические параметры СВЧ-радиометра приведены в таблице, а схема визирования поверхности с квадрокоптера — на рис. 1. Радиометрическую систему устанавливают под брюхом БПЛА так, чтобы посадочные полозья коптера не влияли на диаграмму направленности антенны, ось главного лепестка которой направлена вниз под углом 30° к вертикали и отклонена в направлении полета.

Впервые удачный эксперимент по использованию радиометра на борту БПЛА был прове-

ден специалистами ИРЭ РАН и МГТУ в 2004 г. на территории США совместно со специалистами Алабамского университета сельского хозяйства и механики [13]. Анализ результатов летного эксперимента показал, что и радиометр, и беспилотный вертолет (рис. 2) имеют недостатки при объединении в единую систему.

В ходе испытаний выявлено, что использованный в качестве полетного контроллера промышленный компьютер создает помехи радиометру, так как тактовая частота процессора оказалась в приемной полосе радиометра. Также была обоснована необходимость ужесточения требований по вибро- и ударопрочности аппаратуры.

Эти требования были учтены при разработке двухчастотного радиометра (см. таблицу), размещенного на квадрокоптере (рис. 3). Для проверки электромагнитной совместимости проведены специальные исследования, результаты которых подтвердили, что полетный контроллер на основе 32-разрядного микроконтроллера с тактовой частотой 80 МГц не создает помех радиометру.

Однако было выявлено, что не все двигатели постоянного тока можно применять в качестве тяговых на квадрокоптере. Худшими по параметрам электромагнитной совместимости стали

Основные технические параметры СВЧ-радиометра

Параметр	Значение	
	для L-диапазона	для S-диапазона
Центральная частота, МГц	1420	2700
Ширина полосы приема, МГц	50	
Количество каналов для приема сигнала вертикальной и горизонтальной поляризации	2	
Способ обзора	Трассовый	
Ширина обзора, разрешаемый элемент, H-высота полета	1,0xH	
Чувствительность, К	1,0	
Тип регистратора	SD-Card	
Время записи, ч, не менее	4	
Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны, град	± 25	± 20
Коэффициент рассеяния антенны, %	27	23
Напряжение питания, В	12	
Потребляемая мощность, Вт	6	
Габаритные размеры, мм	360×360×40	
Масса, кг	2,8	

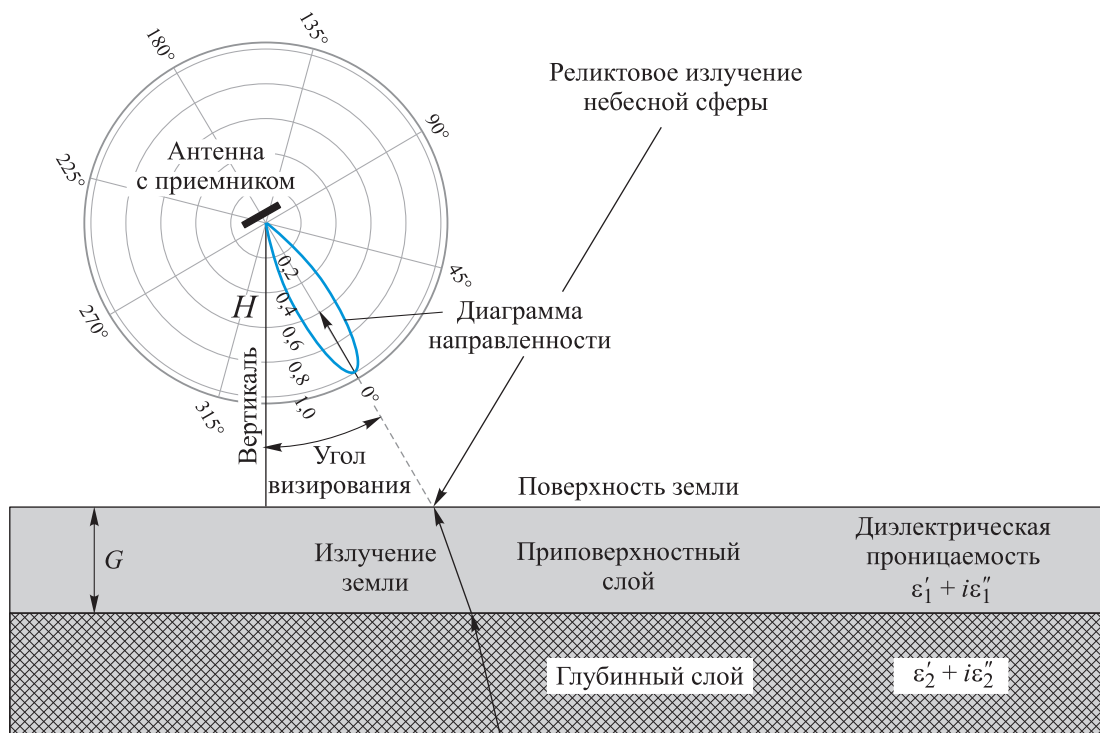


Рис. 1. Схема визирования с квадрокоптера:
H — высота полета; *G* — толщина слоя

коллекторные электромоторы со щетками. Искрение в щетках коллектора электродвигателя вызывает излучение электромагнитных волн, создающих помехи СВЧ-радиометру.

Результаты экспериментов и дискуссия. Натурные эксперименты проводили с мая по ноябрь 2022 г. в разных климатических зонах [14, 15] на подзолистых, торфяных, песчаных почвах и различных черноземах.

Целями натурных экспериментов были:

- испытания нового двухполяризованного радиометра;
- проверка новых алгоритмов обработки сигналов и построения портретов влажности почвогрунтов;

- исследование электромагнитной совместимости радиометра и носителя;
- накопление реальных данных для разработки алгоритмов работы в условиях помех;
- выбор набора параметров для создания базы данных почв и влажностных данных с целью совершенствования алгоритмов пересчета яркость–влажность с применением в дальнейшем технологий искусственного интеллекта;
- демонстрация возможностей аппаратуры и программного обеспечения для внедрения в практику и создание рекламной продукции.

В Шатурском районе Московской области испытания проводили на полях НПО «Биотехкомпозит», подготовленных для выращивания Мискантуса. В этом районе много площадей с

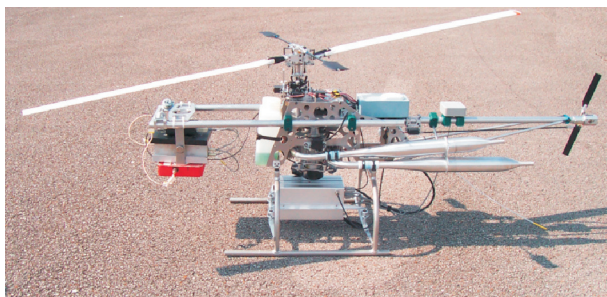


Рис. 2. Внешний вид беспилотного вертолета с радиометром



Рис. 3. Внешний вид квадрокоптера с радиометром

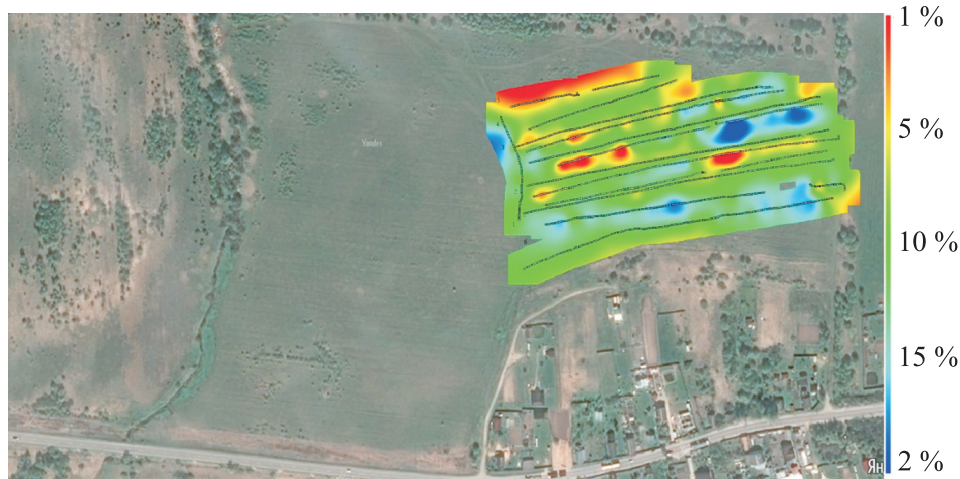


Рис. 4. Цифровая карта влажности почвы на поле перед посадкой Мискантуса

бедной песчано-торфяной почвой, на которой можно получать высокую урожайность далеко не для всех культур. Мискантус — многолетнее травянистое растение высотой до двух метров, способное давать высокую урожайность — до 30 т биомассы с гектара даже на бедных почвах на протяжении более 30 лет.

Биомассу Мискантуса перерабатывают в целлюлозу, из которой изготавливают биораз-

лагаемую одноразовую посуду или топливные брикеты. При выращивании Мискантуса необходимо обеспечить оптимальные условия по влагосодержанию и температуре почвы для высадки семенного материала. Портреты влажности и температуры поверхности почвы определяют с помощью двухполяризационной радиометрической системы, оснащенной системой сбора данных, приемником спутниковой микронавигации, инфракрасным датчиком температуры и фоторегистратором оптического диапазона.

Полученная в ходе испытаний цифровая карта влажности почвы на поле для посадки Мискантуса приведена на рис. 4.

Сопоставление результатов контактных измерений и радиометрических данных позволило построить радиационно-влажностные регрессии (зависимости влажности почвы в процентах по массе от яркостной температуры в Кельвинах) по вертикальной и горизонтальной поляризациям. Соответствующие графики приведены на рис. 5, а и б.

Коэффициент корреляции между данными по тридцати точкам контактных измерений и дистанционных радиометрических измерений влажности составил около 75 %.

Аналогичные эксперименты и испытания проводили в Смоленской, Воронежской, Тверской областях, а также в Краснодарском крае и республике Крым [10, 16, 17]. Результаты экспериментов в основном подтвердили правильность выбранных технических решений и обоснованность выбора квадрокоптера в качестве носителя радиометрической системы.

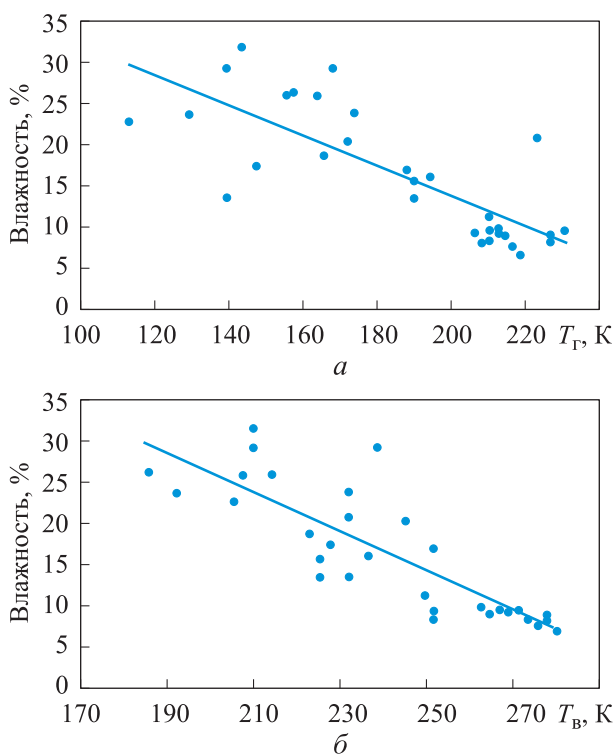


Рис. 5. Радиационно-влажностные регрессии для горизонтальной (а) и вертикальной (б) поляризаций

Выводы

1. В результате обобщения многолетнего опыта применения микроволновых радиометров на борту БПЛА и результатов летных экспериментов прошлого года удалось обобщить требования к БПЛА и используемым на них радиометрическим системам.

2. Для обеспечения требуемых характеристик радиометра, предназначенного для размещения на квадрокоптере, исследованы различные схемы радиометров. Выбрана схема с двухпорной модуляцией и дополнительным твердотельным низкотемпературным генератором шума, что является дальнейшим развитием метода двухпорной модуляции в теоретическом и практическом аспектах.

3. Выполнены экспериментальные проверки электромагнитной совместимости радиометра и БПЛА или наземного носителя.

4. Проведены летные и полевые эксперименты в различных регионах Российской Федерации и климатических зонах на разных типах почв.

5. Получены цифровые карты влагосодержания и температуры поверхности больших участков сельскохозяйственных угодий и влажно-температурные регрессии на двух поляризациях. Корреляция данных радиометрической влажности и данных наземных измерений контактными методами составила 75 %.

6. Обоснован выбор квадрокоптера для работы в качестве носителя радиометрической системы.

Литература

- [1] Cheng M., Zhong L., Ma Y. et al. A study on the assessment of multi-source satellite soil moisture products and reanalysis data for the Tibetan Plateau. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 10, art. 1196, doi: <https://doi.org/10.3390/rs11101196>
- [2] Dorigo W., Wagner W., Albergel C. et al. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding. State-of-the art and future directions. *Remote Sens. Environ.*, 2017, vol. 203, pp. 185–215, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
- [3] Babaeian E., Sadeghi M., Jones S.B. et al. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Rev. Geophys.*, 2019, vol. 57, pp. 530–616, doi: <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>
- [4] Dorigo W., Himmelbauer I., Aberer D. et al. The International Soil Moisture Network: Serving Earth system science for over a decade. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2021, vol. 25, no. 11, pp. 1–83, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>
- [5] Сидоров И.А., Гудков Г.А., Новичихин Е.П. и др. Радиометрический метод измерения температуры и влажности почвы. *Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век*, 2024, т. 16, № 1, с. 50–60, doi: <https://doi.org/10.18127/j22250980-202401-04>
- [6] Tsouros D.C., Bibi S., Sarigiannidis P.G. A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 2019, vol. 10, no. 11, art. 349, doi: <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- [7] Maes W.H., Steppe K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends Plant Sci.*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 152–164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
- [8] Shafi U., Mumtaz R., Garcia-Nieto J. et al. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 17, art. 3796, doi: <https://doi.org/10.3390/s19173796>
- [9] Inoue Y. Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming — a review. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2020, vol. 66, no. 6, pp. 798–810, doi: <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>
- [10] Сидоров И.А., Гудков А.Г., Обливанцов В.В. и др. Радиометрическое дистанционное определение портретов влажности почвы на винограднике в Крыму. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2022, т. 27, № 5, с. 65–70.
- [11] Sidorov I.A., Gudkov A.G., Agasieva S.V. et al. A portable microwave radiometer for proximal measurement of soil permittivity. *Comput. Electron Agric.*, 2022, vol. 198, art. 107076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107076>

- [12] Верба В.С., Гуляев Ю.В., Шутко А.М. и др. *СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике*. София, Академ. изд-во им. проф. Марина Дринова, 2013. 296 с.
- [13] Верба В.С., ред. *Информационно-измерительные и управляющие радиоэлектронные системы и комплексы*. Москва, Радиотехника, 2020. 489 с.
- [14] Сидоров И.А., Гудков А.Г., Новичихин Е.П. и др. Результаты натурных экспериментов по дистанционному определению портретов влажности почвы (часть 1). *Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век*, 2022, т. 14, № 4, с. 45–60, doi: <https://doi.org/10.18127/j22250980-202204-05>
- [15] Сидоров И.А., Гудков А.Г., Новичихин Е.П. и др. Результаты натурных экспериментов по дистанционному определению портретов влажности почвы (часть 2). *Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век*, 2023, т. 15, № 1, с. 41–53.
- [16] Хохлов Н.Ф., Болотов А.Г., Сидоров И.А., и др. Эвристический и прикладной потенциал совмещения микроволнового влажностно-температурного зондирования почвы и фотосъемки в фациально-дифференцированных агрогеосистемах. *Журнал радиоэлектроники*, 2022, № 11, doi: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.18>
- [17] Gudkov A.G., Sister V.G., Ivannikova E.M. et al. On the possibility of detecting oil films on a water surface by methods of microwave radiometry. *Chem. Petrol Eng.*, 2019, vol. 55, no. 1–2, pp. 57–62, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00580-2>

References

- [1] Cheng M., Zhong L., Ma Y. et al. A study on the assessment of multi-source satellite soil moisture products and reanalysis data for the Tibetan Plateau. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 10, art. 1196, doi: <https://doi.org/10.3390/rs11101196>
- [2] Dorigo W., Wagner W., Albergel C. et al. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding. State-of-the art and future directions. *Remote Sens. Environ.*, 2017, vol. 203, pp. 185–215, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
- [3] Babaeian E., Sadeghi M., Jones S.B. et al. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Rev. Geophys.*, 2019, vol. 57, pp. 530–616, doi: <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>
- [4] Dorigo W., Himmelbauer I., Aberer D. et al. The International Soil Moisture Network: Serving Earth system science for over a decade. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2021, vol. 25, no. 11, pp. 1–83, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>
- [5] Sidorov I.A., Gudkov G.A., Novichikhin E.P. et al. Radiometric method of soil temperature and moisture measurement. *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye — XXI vek* [Nanotechnology: the Development, Application — XXI Century], 2024, vol. 16, no. 1, pp. 50–60, doi: <https://doi.org/10.18127/j22250980-202401-04> (in Russ.).
- [6] Tsouros D.C., Bibi S., Sarigiannidis P.G. A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 2019, vol. 10, no. 11, art. 349, doi: <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- [7] Maes W.H., Steppe K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends Plant Sci.*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 152–164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
- [8] Shafi U., Mumtaz R., Garcia-Nieto J. et al. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 17, art. 3796, doi: <https://doi.org/10.3390/s19173796>
- [9] Inoue Y. Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming — a review. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 2020, vol. 66, no. 6, pp. 798–810, doi: <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>
- [10] Sidorov I.A., Gudkov A.G., Oblivantsov V.V. et al. Radiometric remote determination of soil moisture portraits on the vineyard in the Crimea. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2022, vol. 27, no. 5, pp. 65–70. (In Russ.).

- [11] Sidorov I.A., Gudkov A.G., Agasieva S.V. et al. A portable microwave radiometer for proximal measurement of soil permittivity. *Comput. Electron Agric.*, 2022, vol. 198, art. 107076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107076>
- [12] Verba V.S., Gulyaev Yu.V., Shutko A.M. et al. *SVCh-radiometriya zemnoy i vodnoy pov-erkhnostey: ot teorii k praktike* [Microwave radiometry of land and water surfaces. From theory to practice]. Sofiya, Akadem. izd-vo im. prof. Marina Drinova Publ., 2013. 296 p. (In Russ.).
- [13] Verba V.S., ed. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie radioelektronnye sistemy i komplekсы* [Information-measuring and controlling radioelectronic systems and complexes]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2020. 489 p. (In Russ.).
- [14] Sidorov I.A., Gudkov A.G., Novichikhin E.P. et al. The field experiments results on remote determination of soil moisture portraits (part 1). *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye — XXI vek* [Nanotechnology: the Development, Application — XXI Century], 2022, vol. 14, no. 4, pp. 45–60, doi: <https://doi.org/10.18127/j22250980-202204-05> (in Russ.).
- [15] Sidorov I.A., Gudkov A.G., Novichikhin E.P. et al. The field experiments results on remote determination of soil moisture portraits (part 2). *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye — XXI vek* [Nanotechnology: the Development, Application — XXI Century], 2023, vol. 15, no. 1, pp. 41–53. (In Russ.).
- [16] Khokhlov N.F., Bolotov A.G., Sidorov I.A., et al. Heuristic and applied potential of combining microwave humidity-temperature sensing of soil and photographing in facially differentiated agricultural systems. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2022, no. 11, doi: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.18> (in Russ.).
- [17] Gudkov A.G., Sister V.G., Ivannikova E.M. et al. On the possibility of detecting oil films on a water surface by methods of microwave radiometry. *Chem. Petrol Eng.*, 2019, vol. 55, no. 1–2, pp. 57–62, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00580-2>

Статья поступила в редакцию 24.08.2024

Информация об авторах

СИДОРОВ Игорь Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии радиоприборостроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: igorasidorov@yandex.ru).

ГУДКОВ Александр Григорьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии радиоприборостроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: profgudkov@gmail.com).

ШАШУРИН Василий Дмитриевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии радиоприборостроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: schashurin@bmstu.ru).

Information about the authors

SIDOROV Igor Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Instrument Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: igorasidorov@yandex.ru).

GUDKOV Aleksandr Grigorievich — Doctor of Science, Professor, Department of Radio Instrument Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: profgudkov@gmail.com).

SHASHURIN Vasily Dmitrievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Radio Instrument Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: schashurin@bmstu.ru).

ЧИЖИКОВ Сергей Владимирович — аспирант, младший научный сотрудник кафедры «Технологии радиоприборостроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: chigikov95@mail.ru).

CHIZHIKOV Sergey Vladimirovich — Postgraduate, Junior Researcher, Department of Radio Instrument Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: chigikov95@mail.ru).

АГАНДЕЕВ Роман Вячеславович — инженер. НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: rom20001511@gmail.com).

AGANDEEV Roman Vyacheslavovich — Engineer. RL SRI Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: rom20001511@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сидоров И.А., Гудков А.Г., Шашурин В.Д., Чижиков С.В., Агандеев Р.В. Беспилотный летательный аппарат для радиометрического дистанционного зондирования агроландшафтов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 12, с. 96–104.

Please cite this article in English as:

Sidorov I.A., Gudkov A.G., Shashurin V.D., Chizhikov S.V., Agandeev R.V. Unmanned aerial vehicle for radiometric remote sensing of the agricultural landscapes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 12, pp. 96–104.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию А. П. Карпенко
«Анализ и синтез популяционных алгоритмов
глобальной оптимизации». Том 1 и 2**

Монография посвящена методам анализа и синтеза популяционных алгоритмов глобальной оптимизации и издается в двух томах.

В первом томе систематизированы сущности популяционных алгоритмов и их характеристики, а также эволюционные операции, операторы и процедуры. Представлены методы параметрической оптимизации и параметрического синтеза популяционных алгоритмов. Рассмотрены типовые структуры этих алгоритмов, а также методы их структурного синтеза путем гибридизации.

Второй том является своеобразной базой данных для материала первого тома. В нем приведены схемы большого числа известных популяционных алгоритмов, а также их паттерны — лаконичные формализованные описания.

Монография ориентирована на специалистов, использующих в своей работе методы, алгоритмы и программы оптимизации. В то же время она может быть полезна аспирантам и студентам высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника» и смежным направлениям.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>