DOI: 10.17725/rensit.2022.14.359

Моделирование процесса приема собственного

радиотеплового излучения земной поверхности ¹Сидоров И.А., ^{1,2}Новичихин Е.П., ¹Гудков А.Г., ¹Чижиков С.В., ^{1,3}Болотов А.Г., ^{1,3}Хохлов Н.Ф., ⁴Порохов И.О.

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, https://bmstu.ru/ Москва 105005, Российская Федерация

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, http://fire.relarn.ru/ Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

³РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева, https://www.timacad.ru/

Москва 127434, Российская Федерация

⁴ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, http://cnirti.ru/

Москва 107078, Российская Федерация

E-mail: igorasidorov@yandex.ru, epnov@mail.ru, profgudkov@gmail.com, chigikov95@mail.ru, agbolotov@gmail. com, dok-hohlov.ru@mail.ru, ds4@cnirti.ru

Поступила 27.07.2022, рецензирована 03.08.2022, принята 10.08.2022

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

Аннотация: Рассматривается модель приема собственного радиотеплового излучения земной поверхности двухполяризационным СВЧ-радиометром при зондировании влажной почвы с малой высоты с борта беспилотного летательного аппарата. Моделирование проводится с учетом диаграммы направленности приемной антенны с боковыми лепестками. Учитывается высота, скорость носителя и угол наклона оси главного лепестка диаграммы направленности антенны. Приводятся основные параметры СВЧ-радиометра для дистанционного определения портретов увлажненных почв. Земная поверхность моделируется двумерной функцией распределения диэлектрической проницаемости почвы на толщине приповерхностного слоя и более глубокого слоя с другим значением диэлектрической проницаемости. Двумерная функция распределения диэлектрической проницаемости представляет «шахматную доску» с периодическим изменением диэлектрической проницаемости почвы по «клеткам». Учитывается как собственное радиотепловое излучение почвы, так и реликтовое излучение небесной сферы, переотражённое земной поверхностью. Анализируется перспектива использования результатов моделирования для оптимизации параметров радиометра и системы дистанционного зондирования по критерию максимальной чувствительности системы к вариациям влагосодержания почвы.

Ключевые слова: CBЧ-радиометр, дистанционное зондирование, влажность почвы, диаграмма направленности, двух поляризационная антенна, радиояркостная температура, реликтовое излучение, математическое моделирование

УДК 681.7.069.32

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-19-00063 https://rscf.ru/project/22-19-00063.

Для цитирования: Сидоров И.А., Новичихин Е.П., Гудков А.Г., Чижиков С.В., Болотов А.Г., Хохлов Н.Ф., Порохов И.О. Моделирование процесса приема собственного радиотеплового излучения земной поверхности. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2022, 14(4)359-372. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.359.

The Own Radiothermal Radiation of the Earth's Surface Receiving Process Modeling

Igor A. Sidorov, Alexander G. Gudkov, Sergey V. Chizhikov

Bauman Moscow State Technical University, https://bmstu.ru/ Moscow 105005, Russian Federation *E-mail: igorasidorov@yandex.ru, profgudkov@gmail.com, chigikov95@mail.ru*

Evgeny P. Novichikhin

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino Branch, http://fire.relarn.ru/ Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

E-mail: *epnov@mail.ru*

Andrey G. Bolotov, Nikolay F. Khokhlov

Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy, https://www.timacad.ru/ Moscow 127434, Russian Federation *E-mail: agbolotov@gmail.com, dok-boblov.ru@mail.ru*

Igor O. Porokhov

Berg Central Scientific-Research Radioengineering Institute, http://cnirti.ru/ Moscow 107078, Russian Federation *E-mail: ds4@cnirti.ru* Received July 27, 2022, peer-reviewed August 03, 2022, accepted August 10, 2022

Abstract: The receiving model of the own soil radiothermal radiation by a bipolarized microwave radiometer when remote sensing the soil moisture from an unmanned aerial vehicle on low altitude is considered. The simulation is carried out taking into account the receiving antenna pattern with side lobes. The height, speed of the carrier and the main lobe axis angle are taken into account. The main parameters of the microwave radiometer for remote determination of portraits of moistened soils are given. The Earth's surface is modeled by a two-dimensional distribution function of the soil permittivity on the thickness of the near-surface layer and a deeper layer with a different permittivity value. The two-dimensional permittivity distribution function represents as "checkerboard" with a periodic change in the permittivity of the soil by "cells". Both the proper radiothermal radiation of the soil and the relict sky radiation of the simulation results to optimize the parameters of the radiometer and remote sensing system according to the criterion of maximum sensitivity of the system to variations in soil moisture content is analyzed.

Keywords: microwave radiometer, remote sensing, soil moisture, radiation pattern, two-polarization antenna, radio brightness temperature, relict sky radiation

UDC 612.087

Acknowledgments: The study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation No. 22-19-00063 https://rscf.ru/project/22-19-00063.

For citation: Igor A. Sidorov, Evgeny P. Novichikhin, Alexander G. Gudkov, Sergey V. Chizhikov, Andrey G. Bolotov, Nikolay F. Khokhlov, Igor O. Porokhov. The own radiothermal radiation of the Earth's surface receiving process modeling. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(4):359-372e. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.359.

Содержание

- 1. Введение (361)
- 2. Принцип работы (363)
- 3. Модель диаграммы направленности антенны (365)
- 4. Модель поверхностного слоя литосферы земли (366)
- 5. Модель приема радиотеплового излучения поверхности (367)
- 6. Результаты моделирования (369)

Дискуссия (370) Заключение (370) Литература (371)

1. ВВЕДЕНИЕ

Точное земледелие интенсивно развивается в течение последнего десятилетия в ответ на растущий спрос на продовольствие для растущего населения. Технологии точного земледелия обеспечивают эффективное использование и управление имеющимися ресурсами для увеличения производства сельскохозяйственных культур, сокращения потребления пресной воды, сохранения плодородия земель и защиты окружающей среды. В отличие традиционных OT сельскохозяйственных технологий, точное земледелие использует подход с переменной нормой внесения удобрений, воды и средств защиты в практику выращивания растений [1].

Масштабное эффективное внедрение точного земледелия в значительной степени зависит от наличия и стоимости передовых инструментов и технологий, подходящих для сельскохозяйственной отрасли, таких как интеллектуальная техника и робототехника, глобальная система позиционирования (GPS), сенсорные сети И мониторинг, системы сбора и обработки информации и т.д. Одним из ключевых компонентов точного земледелия является аппаратура дистанционного зондирования, отвечающая за измерение и обработку данных о состоянии (почвы и агрофитоценозов). Дистанционный мониторинг В сочетании С данными спутниковой навигации используется для построения географических цифровых карт влажности и температуры поля для управления оптимизации режимов выращивания И сельскохозяйственных культур [2-4].

В области дистанционного зондирования мониторинг влажности почвы вызывает особый интерес из-за глобального изменения климата в основных сельскохозяйственных регионах и чрезвычайно большого объема пресной воды, используемой для орошения. Кэмпбелл и др. [5] сообщили, что более 70% пресной воды в мире используется сельскохозяйственных целях. Уровень влагосодержаниявпочвевосновномопределяет биофизические процессы, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур и состояние плодородия почвы. Таким образом, расширенные и подробные сведения О ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ЯВЛЯЮТСЯ КЛЮЧЕВЫМ входным параметром для системы точного контроля земледелия и расхода ВОДЫ. Дальнейшая обработка геоинформационных влажности данных С помощью Ο усовершенствованного оцифрованного управления сельским хозяйством приводит значительному улучшению экономии пресной воды и увеличению производства сельскохозяйственных культур [4].

За последние десятилетия было разработано несколько технологий определения влажности почвы, основанных на различных физических принципах и применимых для точного земледелия. Эти технологии различаются по целевому назначению, практическому применению, точности, стоимости, весу и т.д. Однако наиболее подходящим решением для определения влажности почвы ΔЛЯ точного земледелия является мобильная, легкая высокоточная измерительная система, обеспечивающая дистанционное измерение температуры и влажности почвы. Спрос на такую систему связан с растущим числом приложений для мониторинга на базе беспилотных летательных аппаратов, интегрированных В инфраструктуру точного земледелия. Мобильное сенсорное оборудование также подходит для интеграции в сельскохозяйственную интеллектуальную технику и робототехнику [2,3,6].

Традиционные методы определения влажности почвы обычно основаны на стационарных датчиках или отборе проб почвы с анализом в лаборатории. В этих методах используются различные физические принципы, такие как лабораторный анализ образца почвенного слоя гамма-излучением; метод скважинного рассеяния нейтронов (нейтронный зонд); различные технологии электромагнитного зондирования и т.д. [7-9] Традиционные методы на самом деле собой представляют точечные методы измерения, которые делают разработку карты сложной влажности почвы чрезвычайно задачей, если количество точек измерения недостаточно. Очевидно, что эти методы не могут быть широко использованы в мобильность приложениях, где важна чувствительного устройства.

Для целей воздушного и спутникового мониторинга были разработаны различные передовые методы, обеспечивающие листанционное измерение влажности почвы. Технологии дистанционного зондирования почвы влажности широко представлены ДВУМЯ методами: активным зондированием, при котором прибор отраженную считывает электромагнитную энергию (радар), и пассивным зондированием, при котором регистрируется энергия, излучаемая землей (радиометрия). Системы дистанционного зондирования, развернутые в системе спутникового наблюдения Земли, предназначены для работы в крупном масштабе или глобального картографирования. Были запущены два проекта по сбору данных о влажности почвы с помощью спутниковых систем мониторинга: (1)Миссия NASA "Активная-пассивная почвы" влажность (SMAP) [10,11] и (2) "Влажность почвы и соленость океана" (SMOS) Европейского космического агентства (ESA) [12,13]. Однако точность измерений, обеспечиваемая системами спутникового мониторинга, не ПОДХОДИТ ДЛЯ точного земледелия. Наилучшая разрешающая способность SMAP составляет 3 км в режиме радара [11], тогда как пространственная разрешающая способность системы SMOS составляет примерно 40 км [13]. Такое пространственное разрешение достаточно для решения глобальных задач метеорологии, но совершенно недостаточно для использования данных в системе точного земледелия.

годы, включают различные В последние радиометрические наземные И радиолокационные системы, а также зондирования методы С использованием электромагнитной индукции. Такие системы для измерения влажности почвы считаются беспилотных лучшими датчиками ДЛЯ мобильных приложений точного земледелия. Наиболее многообещающим методом является микроволновой технология радиометрии. Это пассивный метод микроволнового зондирования С использованием высокочувствительного радиометрического приемника - СВЧ радиометра, определяющего параметры естественного теплового излучения, излучаемого земной поверхностью. СВЧ Принимаемые данные радиометра собой яркостную представляют радио поверхности [14]. температуру земли Дальнейшая обработка данных преобразует их в значение влажности почвы, привязанное географическому определенному местоположению. Технологиямикроволнового радиометра дает возможность разработать прибор для мониторинга влажности почвы минимальными размерами, весом И стоимостью. Одновременное использование нескольких частотных диапазонов приема позволяет получать данные для вычисления влажности почвы на различных глубинах, то

Перспективные

К

С

почвы.

Разработка нового портативного многочастотного двух поляризационного СВЧрадиометра для системы точного земледелия, способного работать на борту беспилотного летательного аппарата – актуальная задача. СВЧрадиометрические влагомеры применяются не только для задач точного земледелия, но и для решения ряда практических задач [15], таких как мониторинг гидрологической обстановки вдоль автомобильных трасс [16] и трубопроводов [17], а так же для поиска мест подземных протечек земляных дамб и мест эрозии покрытия дамб [18], выявления очагов

есть определять портрет профиля влажности

методы, разработанные

моделирование процесса приема собственого **363** радиотеплового излучения земной поверхности

лесных пожаров [19] и обнаружения нефтяных пленок на поверхности воды [20].

При разработке СВЧ-радиометра важным аспектом является оптимизация СВЧ-радиометра выбора параметров И дистанционного зондирования системы В целом, обеспечивающих максимальную чувствительность системы зондирования вариациям влажности и температуры К почвы. Наиболее быстрым И дешевым способом оптимизации выбора параметров СВЧ-радиометрической системы является моделирование.

Целью настоящей является статьи демонстрация результатов моделирования процесса радиометрического приема собственного радиотеплового излучения земной поверхности с учетом диаграммы направленности антенны, модели подстилающей поверхности и модели системы зондирования с учетом высоты и скорости полета носителя, а также угла наклона оси главного лепестка диаграммы направленности антенны.

Известна модель приема собственного радиотеплового излучения тела человека [21,22] многоканальным, многочастотным СВЧ-радиотермографом, используемым для неинвазивного обнаружения тепловых аномалий внутри тела человека или животных [23-27]. Известная модель не может быть применена ДЛЯ расчета радиояркостных температур подстилающей поверхности, так какона не учитывает диаграмму направленности антенны-аппликатора, но может быть принята за основу для моделирования поверхности земли.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Принцип дистанционного измерения влажности почвы известен [15] и применяется на практике совместно с беспилотным летательным аппаратом для построения карт влажности и температуры почвы в интересах системы точного земледелия. Размещение СВЧ-радиометра на беспилотном летательном



Рис. 1. Размещение СВЧ-радиометра на квадрокоптере.

аппарате (квадрокоптере) показано на Рис. 1. СВЧ-радиометр L-диапазона представляет сборку двухполяризационной антенны СВЧ-радиометра приемником. Размер определяется размером антенны, который определяется рабочей длинной волны и требуемой шириной главного лепестка диаграммы направленности антенны. Антенна печатного типа собирается из двух печатных плат размером 360х360 мм. На наружной плате расположены четыре вибратора, на внутренней плате расположены микрополосковые сумматоры И выходные разъемы ДЛЯ сигналов «горизонтальной» и «вертикальной» поляризации. Внешний вид антенны С инфракрасным датчиком температуры показан на Рис. 2. Основные технические параметры СВЧ-радиометра представлены в Таблице 1.



Рис. 2. Внешний вид антенны с ИК датчиком.

Таблица 1

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Основные технические параметры СВЧ-радиометра	
Параметр	Значение
Центральная частота, МГц	1420
Ширина полосы приема, МГц	50
Количество приемных каналов Вертикальная и горизонтальная поляризации	2
Способ обзора	трассовый
Ширина обзора, разрешаемый элемент, Н-высота полета	1.0xH
Чувствительность, К	1.0
Тип регистратора	SD-Card
Время записи, не менее Час	3
Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны, град	±30
Коэффициент рассеяния антенны, %	73
Напряжение питания, В	12
Потребляемая мощность, Вт	5.8
Масса, кг	2.8
Габаритные размеры, мм	360x360x40

СВЧ-радиометр собран по известной [15] схеме радиометра с двухопорной модуляцией, имеет два внутренних эталона температур с различными температурами и СВЧ-переключатель для периодического подключения ко входу приемника сигналов от выходов антенны и эталонов. Выходной сигнал приемника преобразуется в цифровую форму и передается в микроконтроллер, который сохраняет данные на флеш-карту вместе с информацией от инфракрасного датчика, размещенного в корпусе антенны, и навигационных датчиков – приемника спутниковой навигационной системы, также от трехосевого акселерометра. а Блок-схема СВЧ-радиометра с датчиками представлена на Рис. 3. СВЧ-радиометр размещается на беспилотном летательном аппарате так, чтобы ось главного лепестка диаграммы направленности антенны была бы направлена вперед по ходу летательного аппарата под углом 30° к вертикали. Схема зондирования земной поверхности квадрокоптера показана на Рис. 4. С Квадрокоптер ПО заданной программе управления автоматически совершает полет на заданной высоте вдоль параллельных линий над тестовым полем, с записью



Рис. 3. Блок-схема СВЧ-радиометра с датчиками.

данных на карту памяти. После посадки карта с данными переносится в персональный компьютер и данные обрабатываются. В результате обработки данных создаются две геопривязанные карты – карта влагосодержания почвы и карта температур поверхности почвы.

Для построения температур карты используются данные инфракрасного температуры датчика И навигационные данные. Карта влажности вычисляется в два этапа: сначала вычисляются радиояркостные горизонтальной температуры по И вертикальной поляризациям, затем на их основе и с учетом температуры поверхности вычисляется почвы комплексная диэлектрическая проницаемость почвы, которая может пересчитываться во влажность почвы и степень минерализации почвы.



Рис. 4. Схема зондирования земной поверхности с квадрокоптера.

Следует отметить, что точность пересчета яркость-влажность известных алгоритмов зависит от многих факторов, в частности, от типа растительного покрова, количества биомассы, высоты растений и т.д. Алгоритмы пересчета известны [15] и не являются темой данной статьи. В данной статье будет рассмотрена простейшая двухслойная модель почвы без учета экранирующего влияния растительного покрова.

3. МОДЕЛЬ ДИАГРАММЫ Направленности антенны

Антенна _ важнейший элемент радиометрической системы, определяющий пространственное габаритные размеры, разрешение, помехозащищенность и другие направленности параметры. Диаграмма антенны является важнейшей характеристикой антенны. Диаграмма направленности реальной антенны (Рис. 2) радиометрической системы измерялась на специальном коллиматоре И известна. Однако ДЛЯ моделирования целесообразно использовать смоделированную диаграмму направленности, чтобы можно было бы отслеживать влияние параметров диаграммы направленности антенны на параметры радиометрической системы в целом. В качестве модели выбрана простейшая идеализированная антенна с квадратной апертурой размером D см и со средней длинной волны λ см. Амплитуднофазовое распределение поля в раскрыве антенны считается равномерным. Диаграмма направленности по мощности такой антенны описывается функцией:

$$D_n(\alpha,\beta) = \left(\frac{\sin(\pi\frac{D}{\lambda}\alpha)}{\pi\frac{D}{\lambda}\alpha}\right)^2 \times \left(\frac{\sin(\pi\frac{D}{\lambda}\beta)}{\pi\frac{D}{\lambda}\beta}\right)^2, \quad (1)$$

где α и β – угловые координаты в радианах, отсчитанные от нормали к плоскости раскрыва антенны или оси главного лепестка диаграммы направленности. График функции диаграммы направленности в декартовой системе координат для длинны



Рис. 5. Диаграмма направленности антенны по одной из координат.

волны $\lambda = 21$ см и $D = 2\lambda$ по одному из углов показан на Рис. 5. При моделировании антенны учитывалось только излучение из передней полусферы. Излучение из полусферы задней считалось равным нулю. При данных параметрах антенны главного лепестка ширина диаграммы направленности по уровню –3 дб. составляет \pm s, где s = 0.22 радиан. Важным параметром антенны является коэффициент рассеяния у, который определяется как:

$$\gamma = 1 - \frac{\int_{-\pi}^{+s} Dn(\alpha, 0) d\alpha}{\int_{-\pi}^{+\pi} Dn(\alpha, 0) d\alpha}.$$
(2)

Физический смысл его состоит в том, что он показывает, какая доля энергии сигнала принимается по боковым лепесткам, ПО отношениюкполнойэнергииповсейдиаграмме направленности. Для рассмотренного случая коэффициент рассеяния антенны составляет примерно 27%. Из графика на Рис. 5 видно, что в передней полусфере по координате а кроме главного лепестка имеется по два боковых лепестка справа и слева от главного. Уровень первого бокового лепестка составляет около -13 дб. Уровень второго бокового лепестка составляет около -18 дб. Внешний вид диаграммы направленности в виде 3D графика показан на Рис. 6.

Рис. 6. Диаграмма направленности антенны на 3D графике.

4. МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Вфизико-геологическомпланепочва какобъект моделирования представляет собой сложный материал, образованный из твердофазных частичек, отдельных а также пустот, заполненных водными растворами солей или газообразными пузырьками. Благодаря этому они занимают место между твердым веществом и флюидами. Моделирование собственного электромагнитного излучения почвы чрезвычайно сложная задача, ввиду большого разнообразия типов почв, биохимического состава, растительных покровов, рельефа, шероховатости поверхности и гидрологии. В общем виде задача не решена до сих пор. Поэтому на практике используются упрощенные модели [28], учитывающие только часть из перечисленных параметров почвы.

В предлагаемой модели почва рассматривается как однородная двухслойная среда с плоскими поверхностями разделов без растительного покрова и шероховатостей. В качестве параметров почвы используются приповерхностного толщина СЛОЯ G. комплексная диэлектрическая проницаемость приповерхностного слоя $\mathcal{E}'_1 + i \mathcal{E}''_1$, где \mathcal{E}'_1 – действительная часть, а \mathcal{E}_1'' – мнимая часть. Аналогично, задается диэлектрическая проницаемость глубинного слоя $\mathcal{E}'_2 + i\mathcal{E}''_2$, где

 \mathcal{E}_2' – действительная часть, а \mathcal{E}_2'' – мнимая часть (см. Рис. 4).

Пространственное распределение диэлектрической проницаемости почвы по поверхности нецелесообразно считать равномерным, так как в этом случае в результате моделирования не удалось бы определять искажения исходного поля вследствие влияния боковых лепестков диаграммы направленности антенны, а они, точнее возможность их коррекции, представляют особый интерес. Как показано в [29] такая коррекция возможна, если коэффициент рассеяния антенны не превышает 50%.

В качестве модели поверхностного поля выбрана периодическая последовательность квадратов со стороной *P* метров двух типов, расположенных как поля шахматной доски. Такая структура не является моделью реальной почвы, но является удобным инструментом для изучения характерных свойств модели.

Квадраты условно «белого» типа имеют диэлектрические проницаемости модели почвы по слоям, как описано выше $\varepsilon_{1w} = \varepsilon'_1 + i\varepsilon''_1$ и $\varepsilon_{2w} = \varepsilon'_2 + i\varepsilon''_2$. А условно «черные» квадраты имеют добавки к диэлектрическим проницаемостям по слоям так, что комплексная диэлектрическая проницаемость приповерхностного слоя $\varepsilon_{1B} = \varepsilon'_1 + \Delta'_1 + i(\varepsilon''_1 + \Delta''_1)$, соответственно комплексная диэлектрическая проницаемость глубинного слоя $\varepsilon_{2B} = \varepsilon'_2 + \Delta'_2 + i(\varepsilon''_2 + \Delta''_2)$.

Математически описанную двумерную функцию, описывающую местность тип «шахматная доска» удобно задавать при помощи функции в прямоугольной Декартовой системе координат:

 $W(x, y) = |\Theta(\cos(P\pi x)) + \Theta(\cos(P\pi y)) - 1|$, (3) где P – параметр, задающий размер клетки «шахматной доски», а Θ – функция Хевисайда, равная нулю для отрицательных значений аргумента и единице для всех остальных. Внешний вид функции W(x, y) для P = 2представлен на **Рис. 7**.

С использованием функции *W*(*x,y*) легко описать распределение диэлектрической

Рис. 7. Вид функции «шахматная доска».

проницаемости поля в координатах *х₂у* по слоям:

$$W_{\varepsilon^{1}}(x,y) = \varepsilon_{1}' + i\varepsilon_{1}'' + \left(\Delta_{1}' + i\Delta_{1}''\right) \cdot W(x,y), \qquad (4)$$

$$W_{\varepsilon^2}(x,y) = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2'' + (\Delta_2' + i\Delta_2'') \cdot W(x,y).$$
 (5)

Функции $W_{\varepsilon_1}(x,y)$ и $W_{\varepsilon_2}(x,y)$ используются для моделирования собственного излучения почвы и моделирования переотраженного от земли реликтового излучения небесной сферы.

5. МОДЕЛЬ ПРИЕМА РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

При проведении натурных экспериментов СВЧрадиометр устанавливается на беспилотный летательный аппарат (Рис. 1), который по программе осуществляет облет заданной траектории на заданной высоте H и с заданной скоростью V. Схема зондирования показана на Рис. 4. Угол визирования Q_0 отсчитывается от вертикали и обычно выбирается около 30 градусов. В результате зондирования поверхности СВЧ-радиометр при каждом пространственном положении измеряет две антенные температуры по горизонтальной и по вертикальной поляризациям.

В результате моделирования также должны вычисляться две антенные температуры по горизонтальной и по вертикальной поляризациям как функции параметров

моделей диаграммы направленности антенны, параметров модели земной поверхности и параметров модели системы обзора поверхности:

 $T_{AV} = f_V(x_0, y_0, D, \lambda, G, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \Delta_1, \Delta_2, Q_0, H, T_0, T_s), \quad (6)$ $T_{AH} = f_H(x_0, y_0, D, \lambda, G, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \Delta_1, \Delta_2, Q_0, H, T_0, T_S), \quad (7)$ где x₀, y₀ и H – Декартовы координаты квадрокоптера с СВЧ-радиометром, Т₀ – термодинамическая температура поверхности Т – температура почвы, реликтового излучения 2.33 градуса по шкале Кельвина. Предполагается, что скорость полета и ось визирования направлены вдоль оси Х. Моделирование заключается в нахождении аналитических выражений или алгоритмов вычисления функций f_v и f_H и вычисление антенных температур по вертикальной и горизонтальной поляризациям. Антенная любой температура ПО поляризации вычисляется при помощи уравнения антенного сглаживания [29]:

$$T_{A}(\alpha_{0},\beta_{0}) =$$

$$= \iint T_{b}(\alpha,\beta) D_{n}(\alpha-\alpha_{0},\beta-\beta_{0}) d\beta d\alpha,$$
(8)

где а, β, – координаты точки визирования в полярной системе координат, связанной с антенной. В формуле (8) и диаграмма распределение направленности, и поля температур яркостных по поверхности земли Т_ь задаются в полярной системе координат, связанной с антенной. Карта яркостных температур строится в системе Декартовых координат (или географических широта-долгота), связанных с местностью направлениями север-восток). (или Для создания единой модели учитывающей и модель диаграммы направленности и модель земной поверхности и модель зондирования необходимо все модели свести к одной общей системе координат, например к Декартовой системе координат, связанной с землей.

Пересчет полярных координат в Декартовы можно произвести по формулам:

$$\alpha(x) = Q_0 - arctg(x/H), \qquad (9)$$

$$\beta(x, y) = \operatorname{arctg}\left(\frac{y \cdot \cos(Q_0)}{H}\right).$$
(10)

Подставляя (9) и (10) в (1) получаем выражение диаграммы направленности в Декартовых координатах

$$D_n XY(x, y) = D_n(\alpha(x), \beta(x, y)).$$
(11)

Функция $D_n XY(x,y)$ представляет весовой коэффициент для участка с координатами *х,у* площадки местности размером *dxdy*. Вид функции $D_n XY(x,y)$ для визирования с высоты 10 метров из точки с координатами (0,0,10)м под углом 30 градусов к вертикали представлен на **Рис. 8**.

Из формул (6-8) с учетом (11) можно получить

завершения построения Для модели осталось выразить функции распределения яркостных температур вертикальной ПО И горизонтальной поляризациям $T_{\rm by}(x,y)$ $T_{\rm bb}(x,y)$ через функции распределения И диэлектрической проницаемости поля в координатах х,у по слоям из формул (4) и (5).

Описанная выше модель почвы подробно рассмотрена в [30], где называется однослойной однородной моделью. Модель учитывает отражение от поверхностного слоя земли

$$T_{bv}(x, y) = T_{s} \cdot R_{v}(W_{\varepsilon 1}(x, y), H) + T_{0} \cdot (1 - R_{v}(W_{\varepsilon 1}(x, y), H)),$$

$$(14)$$

Рис. 8. Вид весовой функции DnXY(x,y).

$$T_{bh}(x, y) = T_{s} \cdot R_{h}(W_{\varepsilon 1}(x, y), H) + T_{0} \cdot (1 - R_{h}(W_{\varepsilon 1}(x, y), H)),$$

$$(15)$$

где R_v и R_h – коэффициенты отражения Френеля для вертикальной и горизонтальной поляризаций, Q – угол по отношению к вертикали, под которым точка поверхности с координатами (*x*,*y*,0) видна из точки расположения антенны (точка с координатами (0,0,H)):

$$R_v(x, y) =$$

$$= \left| \frac{W_{\varepsilon 1}(x, y) \cdot \cos(Q) - \sqrt{W_{\varepsilon 1}(x, y) - \sin^2(Q)}}{W_{\varepsilon 1}(x, y) \cdot \cos(Q) + \sqrt{W_{\varepsilon 1}(x, y) - \sin^2(Q)}} \right|^2, \quad (16)$$

$$\left| \cos(Q) - \sqrt{W_{\varepsilon 1}(x, y) - \sin^2(Q)} \right|^2$$

$$R_{h}(x,y) = \left| \frac{\cos(Q) - \sqrt{W_{\varepsilon 1}(x,y) - \sin^{2}(Q)}}{\cos(Q) + \sqrt{W_{\varepsilon 1}(x,y) - \sin^{2}(Q)}} \right| . (17)$$

Угол визирования Q точки с координатами (x,y,0) зависит от координат x,y и высоты расположения антенны H и может быть вычислен по формуле (18)

$$Q = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{H}\right). \tag{18}$$

Косинус и квадрат синуса угла *Q* также могут быть выражены через координаты *х,у* и высоту *H*

$$\cos(Q) = \frac{H}{\sqrt{H^2 + x^2 + y^2}},$$
(19)

$$\sin^{2}(Q) = \frac{x^{2} + y^{2}}{\left(H^{2} + x^{2} + y^{2}\right)}.$$
(20)

Частично падающая электромагнитная волна реликтового излучения преломляется, проходит через приповерхностный слой, частично поглощаясь, отражается от раздела приповерхностного и глубинного слоя, снова частично поглощаясь, частично отражается от поверхности почвы и частично снова излучается в открытое пространство. Коэффициент затухания электромагнитной волны в приповерхностном слое, согласно [30]:

$$\delta(G,\lambda) = \exp\left(-4\pi\varepsilon_1^{"}\frac{G}{\lambda\cos(Q_r)}\right), \quad (21)$$
где Q_r – угол преломления, G – толщина слоя.

моделирование процесса приема собственого **369** радиотеплового излучения земной поверхности

Коэффициенты отражения от раздела приповерхностного и глубинного слоя приводятся в [31] и в принятых обозначениях могут быть представлены как:

$$R_{V2}(x, y, Q_r) = = \left| \frac{W_{\varepsilon 2}(x, y) \cdot \cos(Q_r) - \sqrt{W_{\varepsilon 1}(x, y)} F(x, y, Q_r)}{W_{\varepsilon 2}(x, y) \cdot \cos(Q_r) + \sqrt{W_{\varepsilon 1}(x, y)} F(x, y, Q_r)} \right|^2, \quad (22)$$
$$R_{H2}(x, y, Q_r) = \left| \frac{W_{\varepsilon 1}(x, y) \cdot \cos(Q_r) - F(x, y, Q_r)}{W_{\varepsilon 1}(x, y) \cdot \cos(Q_r) + F(x, y, Q_r)} \right|^2, \quad (23)$$

где

$$F(x, y, Q_r) = \sqrt{W_{\varepsilon^2}(x, y) - W_{\varepsilon^1}(x, y) \cdot \sin^2(Q_r)}.$$

Угол преломления Q_r связан с углом падения Q законом Снеллиуса, выраженного известной формулой (24):

$$\frac{\sin(Q_r)}{\sin(Q)} = \frac{\sqrt{W_{\varepsilon 1}(x, y)}}{\sqrt{W_{\varepsilon 2}(x, y)}}.$$
(24)

Приведенные формулы полностью определяют функции (6) и (7) и достаточны, для построения модели приема радиотеплового излучения поверхности почвы.

Далее приводятся результаты расчетов, с использованием приведенной модели.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представленная модель может быть использована для расчета антенных температур на выходе радиометра по вертикальной и горизонтальной поляризациям в зависимости от параметров антенны, зондирования и почвы. В результате проведенных расчетов подынтегральных выражений в формулах (12) и (13) были получены двумерные графики весовых функций, представленные на **Рис. 9**.

Рис. 9. Весовые функции Tv(x,y)·DnXY(x,y) и Th(x,y)·DnXY(x,y).

Рис. 10. Сечение функций Tv(x,y)·DnXY(x,y) и Th(x,y)·DnXY(x,y) плоскостью Y = 0.

Функции рассчитаны для равномерного поля температур 300°К, при визировании с высоты H = 10 м из начала координат под углом 30° в направлении оси Х. Сечения, представленных поверхностей плоскостью Y = 0, в диапазоне от 0 до 10 метров, представлены на Рис. 10. Анализ графиков, представленных на Рис.10, показывает, ЧТО координаты максимумов весовых функций ПО вертикальной И горизонтальной поляризациям не совпадают, а отличаются приблизительно на полметра и не совпадают с координатой точки визирования. Анализ показал, что различия возникли из-за различий свойств коэффициентов Френеля для вертикальной и горизонтальной поляризаций.

Представленная модель позволяет имитировать полет носителя с радиометром и рассчитывать антенные температуры по вертикальной и горизонтальной поляризациям. Пример расчета антенных температур при движении носителя вдоль оси *X* представлен на **Рис. 11**. На графике пунктирной линией показаны границы клетки «шахматной доски».

Рис. 11. График расчетных температур при движении носителя вдоль оси X.

Характерное опережение графиков температур по сравнению с границей клетки, связано с наклоном оси диаграммы направленности по направлению линии полета.

Небольшой колебательный процесс на графиках антенных температур обусловлен наличием боковых лепестков антенны.

7. ДИСКУССИЯ

Представленная модель рассчитывалась использованием специализированной С математической программы и программы, написанной на языке Delphy. Совпадение результатов расчетов подтверждает адекватность построенной модели. Для расчета графика Рис. 11 математической программой на ноутбуке с четырехядерным процессором потребовалось более одного часа времени. Тот же результат получился в Дельфи программе менее, чем за одну секунду.

Полученную модель планируется развивать, совершенствовать и использовать разработки современного алгоритма ДЛЯ амплитудных коррекции искажений, обусловленных наличием боковых лепестков антенны взамен известного алгоритма [29], а также для оптимизации параметров радиометра и системы обзора по критерию максимума чувствительности к вариациям влажности почвы по слоям.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований и моделирования в рамках построенной модели получены следующие новые результаты:

- построена модель формирования яркостной температуры подстилающей поверхности, учитывающая параметры антенны, радиометра, земной поверхности и системы обзора;
- сиспользованиеммодели произведенрасчет антенных температур по вертикальной и горизонтальной поляризациям при имитации полета носителя;
- в результате анализа графиков весовых функций по вертикальной и

горизонтальной поляризациям обнаружено несовпадение координат максимумов этих функций между собой и с координатой точки визирования;

 на графиках расчета антенных температур на фронте и спаде пространственного импульса заметен переходной процесс, обусловленный наличием боковых лепестков диаграммы направленности антенны.

ЛИТЕРАТУРА

- Shafi U, Mumtaz R, Garcia-Nieto J, Hassan SA, Zaidi SAR, Iqbal N. Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*, 2019, 19(17):3796, doi: 10.3390/s19173796.
- 2. Tsouros DC, Bibi S, Sarigiannidis PG. A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 2019, 10(11):349, doi: 10.3390/info10110349.
- Maes WH, Steppe K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science*, 2019, 24(2):152-164, doi: 10.1016/j. tplants.2018.11.007.
- Kashyap B, Kumar R. Sensing methodologies in agriculture for soil moisture and nutrient monitoring. *IEEE Access*, 2021, 9:14095-14121, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052478.
- 5. Campbell BM et al. Agriculture production as a major driver of the earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society*, 2017, 22(4):1-11, doi: 10.5751/ES-09595-220408.
- Inoue Y. Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming – a review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 66(6):798-810, doi: 10.1080/00380768.2020.1738899.
- Kodikara J, Rajeev P, Chan D, Gallage C. Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(3):332-345, doi: 10.1139/ cgj-2012-0113.

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Balaghi S, Ghal-Eh N, Mohammadi A, Vega-Carrillo HR. A neutron scattering soil moisture measurement system with a linear response. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, 142:167-172, doi: 10.1016/j.apradiso.2018.10.002.
- Babaeian E, Sadeghi M, Jones SB, Montzka C, Vereecken H, Tuller M. Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57:530-616, doi: 10.1029/2018RG000618.
- Entekhabi D et al. The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proc. of the IEEE*, 2010, 98(5):704-716, doi: 10.1109/ JPROC.2010.2043918.
- 11. Chan SK et al. Assessment of the SMAP passive soil moisture product. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(8):4994-5007, doi: 10.1109/TGRS.2016.2561938.
- Kerr YH, Waldteufel P, Wigneron J-P, Martinuzzi J-M, Font J, Berger M. Soil moisture retrieval from space: The soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8):1729-1735, doi: 10.1109/36.942551.
- 13. Mecklenburg S et al. ESA's soil moisture and ocean salinity mission: mission performance and operations. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5):1354-1366, doi: 10.1109/TGRS.2012.2187666.
- 14. Ulaby FT, Long DG. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing.* Ann Arbor, The University of Michigan Press, 2014.
- Verba VS, GulyaevYuV, Shutko AM, Krapivin VF (eds.). Microware Radiometry of Land and Water Surfaces: From Theory to Practice. Sofia, Marin Drinov Academic Publishing, 2014.
- 16. Sidorov IA, Soldatenko AP, Gudkov AG, Leushin VY, Novochikhin EP. Results of field experiments on monitoring the hydrological situation along highways with a multifrequency polarimetric system of microwave radiometers. *Mashinostroitel*, 2015, 12:46-55.
- 17. Sidorov IA, Gudkov AG, Sister VG, Ivannikova EM, Leushin VY. Monitoring of the hydrological situation along pipeline routes

by means of microwave radiometry methods. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, 56:929-234, doi: 10.1007/s10556-021-00864-6.

- 18. de Jeu R et al. Safety inspection of levees with L-band radiometry. Proc. 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, USA, Washington, DC, 1-4 March 2010, pp. 96-98, doi: 10.1109/ MICRORAD.2010.5559583.
- 19. Sister VG et al. Detection of forest and peatbog fire centers by means of microwave radiometer sounding. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, 52:123-125, doi: 10.1007/ s10556-016-0160-2.
- 20. Gudkov AG et al. On the possibility of detecting oil films on water surface by microwave radiometry methods. *Chemical* and Petroleum Engineering, 2019, 55:57-62, doi: 10.1007/s10556-019-00580-2.
- 21. Evgeny P. Novichikhin, Igor A. Sidorov, Vitaly Y. Leushin, Svetlana V. Agasieva and Sergey Chizhikov. The local heat source detection inside of the human body by means of microwave radiothermography, *RENSIT: Radioelectronics.* Nanosystems. Information technologies, 2020, 12(2):305-312, doi: 10.17725/ rensit.2020.12.305.
- Evgeny P. Novichikhin, Igor A. Sidorov, Vitaly Yu. Leushin, Svetlana V. Agasieva, Sergey V. Chizhikov. Local heat source detection inside of the human body by means of microwave radiothermography. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2022, 14(1):103-110, doi: 10.17725/ rensit.2022.14.103.
- 23. Sidorov IA, Gudkov AG, Leushin VY, Gorlacheva EN, Novichikhin EP, Agasieva SV. Measurement and 3D Visualization of the Human Internal Heat Field by Means of Microwave Radiometry. *Sensors*, 2021, 21:4005, doi: 10.3390/s21124005.
- 24. Vesnin S, Turnbull AK, Dixon JM, Goryanin I. Modern Microwave Thermometry for Breast Cancer. J. Mol. Imaging Dyn., 2017, 7(10):1109.

- **372** СИДОРОВ И.А., НОВИЧИХИН Е.П., ГУДКОВ А.Г., ЧИЖИКОВ С.В., БОЛОТОВ А.Г., ХОХЛОВ Н.Ф., ПОРОХОВ И.О.
 - 25. Gudkov AG, Leushin VY, Sidorov IA, Vesnin SG, Porokhov IO, Sedankin MK, Agasieva SV, Chizhikov SV, Gorlacheva EN, Lazarenko M. et al. Use of Multichannel Microwave Radiometry for Functional Diagnostics of the Brain. *Biomed. Eng.*, 2019, 53:108-111.
 - 26. Leushin VYu, Gudkov AG, Porokhov IO, Vesnin SG, Sedankin MK, Solov'ev YuV, Agasieva SV, Chizhikov SV. Possibilities of increasing the interference immunity of radiothermograph applicator antennas for brain diagnostics. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 337:113439, doi: 10.1016/j. sna.2022.113439.
 - Vesnin SG, Sedankin MK, Ovchinnikov LM, Gudkov AG, Leushin VY, Sidorov IA, Goryanin II. Portable microwave radiometer for wearable devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 318:112506, doi: 10.1016/j. sna.2020.112506.
 - Maheshwari Neelam, Andreas Colliander, Binayak P. Mohanty, Michael H. Cosh, Sidharth Misra, Thomas J. Jackson. Multiscale Surface Roughness for Improved Soil Moisture Estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(8):5264-5276, doi: 10.1109/TGRS.2019.2961008.
 - 29. Егоров СТ, Плющев ВА, Власов АА. Метод коррекции искажений радиояркостного распределения, обусловленных боковыми лепестками диаграммы направленности антенны. *Радиотехника и электроника*, 1981, 8:1-7.
 - Финкельштейн МИ, Мендельсон ВЛ, Кутев ВА. *Радиолокация слоистых земных покровов.* Москва, Советское радио, 1977, 176 с.
 - 31. Грудинская ГП. *Распространение радиоволн.* Москва, Высшая школа, 1975, 155 с.

Сидоров Игорь Александрович

к.т.н., доцент

Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана 5, ул. 2-я Бауманская, Москва 105005, Россия igorasidorov@yandex.ru

Новичихин Евгений Павлович

к.ф.-м.н., с.н.с. ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН Фрязино 141190, Моск.обл., Россия epnov@mail.ru

Гудков Александр Григорьевич

д.т.н., профессор Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана **Москва 105005, Россия profgudkov@gmail.com**

Чижиков Сергей Владимирович

аспирант

Моск. гос. техн. университет им. Н.Э. Баумана Москва 105005, Россия chigikov95@mail.ru

Болотов Андрей Геннадьевич

д.биол.н., профессор РГАУ МСХА им. К.А.Тимирязева **Москва 127434, Россия** agbolotov@gmail.com

Хохлов Николай Федорович

д.с-х.н., профессор РГАУ МСХА им. К.А.Тимирязева **Москва 127434, Россия dok-hohlov.ru@mail.ru**

Порохов Игорь Олегович к.т.н. ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга Москва 107078, Россия

ds4@cnirti.ru.