

УДК 004.42

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.025](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.025)

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СЕНСОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А.В. Денисов

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской
академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: sdenisov93@mail.ru*

Резюме: В данной работе предложено решение актуальной научно-технической задачи сокращения временных ресурсов на проектирование сетей беспроводной передачи данных на основе программных средств расчета расположения гетерогенных сенсорных элементов и мобильных роботизированных устройств, имеющей существенное значение для развития цифровых технологий в области сельского хозяйства. Разработана рекомендательная программная система AgroWiNet для организации беспроводного информационного взаимодействия в сенсорной сети с применением дополнительных радиомодулей, учитывающая при работе заданные требования по скорости передачи данных между узлами сети и обеспечивающая развертывание сети гетерогенных сенсорных элементов и мобильных роботизированных устройств на обслуживаемой территории. Сформулированы рекомендации по применению разработанной программной системы в сельскохозяйственных робототехнических системах, специализирующихся на аграрных задачах открытого грунта. На сегодняшний день сети ретрансляторов проектируются вручную, а иногда устанавливаются без предварительного расчета, что влечет за собой как излишние трудозатраты на проектирование, так и неоптимальные, с точки зрения энергоэффективности, решения. Разработанное программное обеспечение рекомендательной системы позволяет сократить проектирование таких сетей до нескольких часов и предлагает оптимальное расположение меньшего количества ретрансляторов, а также отличается масштабируемостью и энергоэффективностью.

Ключевые слова: сенсорные сети, алгоритмы определения координат, ретрансляторы, роботизированные устройства, картографирование, распределенные системы.

Для цитирования: Денисов А.В. Разработка рекомендательной системы расчета параметров беспроводной сети сенсорных комплексов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(4). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/Denisov_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.025

DEVELOPMENT OF A RECOMMENDER SYSTEM FOR PARAMETER CALCULATION IN WIRELESS NETWORK OF SENSOR DEVICES

A.V. Denisov

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation*

Abstract: This paper proposes a solution for a relevant scientific and engineering problem of time saving in wireless data transfer network design, based on software units for position calculation of heterogeneous sensor units and mobile robotic devices, sufficiently significant for digital technology advance in agriculture. A recommender software engine AgroWiNet is developed, including additional radio units, enabling deployment of heterogeneous sensor devices and mobile robotic devices network in the work area. Suggestions are given on practical use of the developed software system in agricultural robotic systems, specifically in open ground settings. Today modern repeater networks are designed manually, and sometimes installed in ad-hoc manner, without prior calculations, what entails excessive labor costs on design stage, as well leads to solutions with suboptimal energy-efficiency parameters.

The developed recommender system software allows to cut design time of such networks down to a few hours, provides for the most favorable distribution of sparsely installed repeaters few in numbers, as well has superior scalability and energy efficiency.

Keywords: sensor networks, coordinate detection algorithms, repeaters, robotic devices, mapping, distributed systems.

For citation: Denisov A.V. Development of a recommender system for parameter calculation in wireless network of sensor devices. Modeling, optimization and information technology. 2019;7(4).

Available by: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/Denisov_4_19_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.025 (In Russ.).

Введение

Сегодня роботизированные устройства активно внедряются в сельское хозяйство. Сельскохозяйственные угодья занимают десятки гектар, при возделывании таких больших площадей возникают проблемы, касающиеся поддержания связи с сенсорными системами и роботизированными устройствами. Для универсального решения данных проблем можно использовать технологии беспроводной передачи данных и объединить радиомодули в сеть с ячеистой топологией (mesh network), так как данная топология сети позволяет поддерживать связь между модулями беспроводной передачи данных на больших расстояниях, и защищена от обрыва связи при выходе элементов сети из строя. В качестве технологии передачи данных была выбрана LoRa, отличающаяся большим радиусом действия, широкой полосой пропускания, защищенностью протокола передачи данных и дешевой радиомодулей.

В рассмотренных работах [1-27] предлагаются варианты организации сенсорных mesh-сетей при условии наличия достаточного количества элементов (узлов) сети, расположенных на расстоянии, удовлетворяющем требованиям беспроводной передачи данных для выбранной технологии (LoRa). При этом не рассматриваются случаи отсутствия радиосвязи между узлами сети для больших расстояний, не соответствующих возможностям передачи данных для выбранной технологии, т. е. расположенных на слишком большом расстоянии друг от друга, на котором не удастся поддерживать двухстороннюю радиосвязь.

В данной работе описано программное обеспечение проектирования беспроводной сенсорной сети, соединения ее удаленных узлов ретрансляторами, построения mesh-сети из произвольно расположенных радиомодулей LoRa и организации связи, включающей в себя сенсорные системы и роботизированные устройства для применения в сельском хозяйстве. Разработанная программная рекомендательная система AgroWiNet осуществляет расчет координат ретрансляторов, которые необходимо установить дополнительно для обеспечения связи со всеми радиомодулями и передачи данных в беспроводной сенсорной сети.

Материалы и методы

Программное обеспечение рекомендательной системы написано на языке программирования Python с использованием библиотек NumPy, Matplotlib, PyQt. Структура основных классов и функция разработанного программного обеспечения представлена на Рисунке 1 и состоит из:

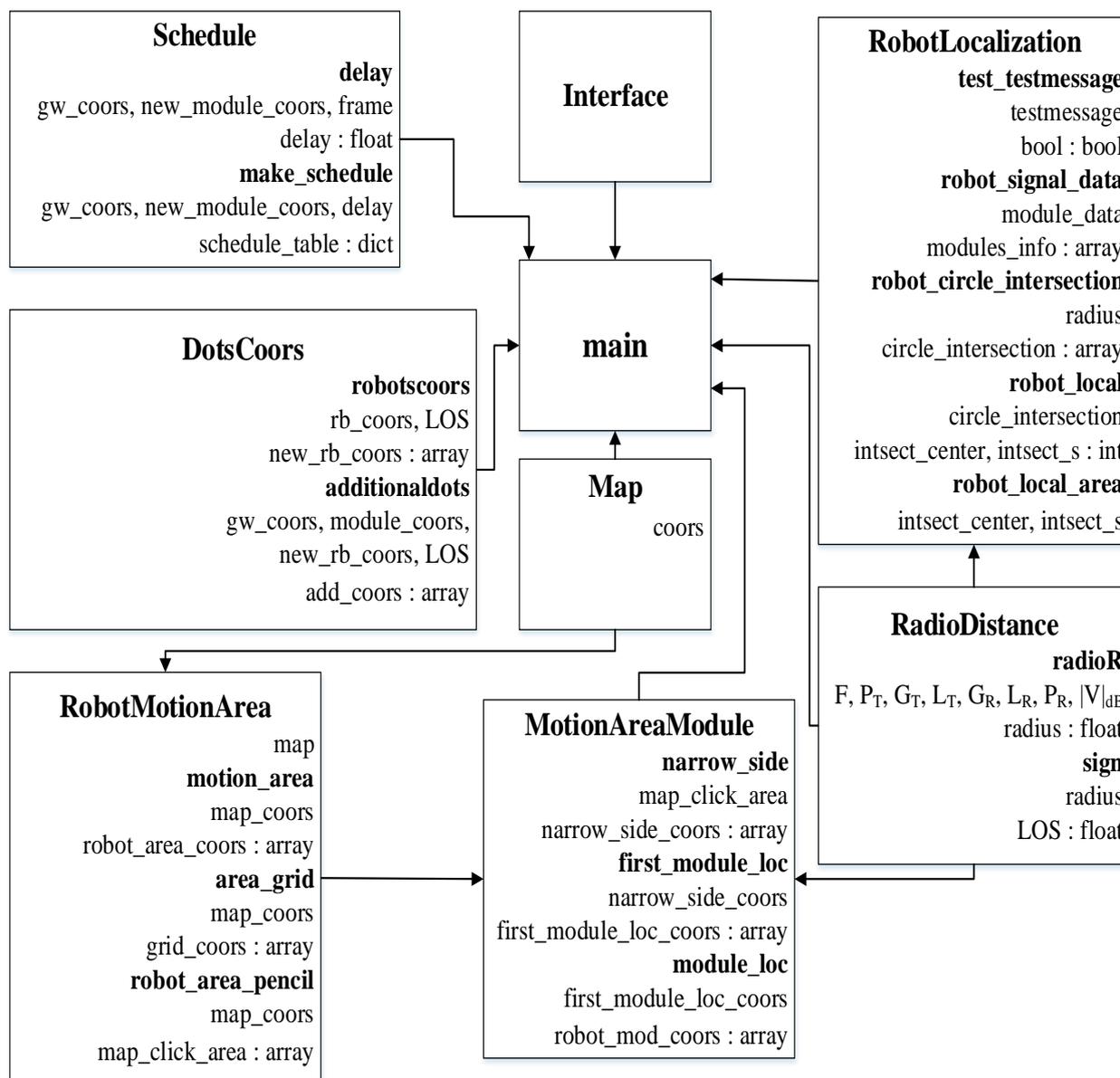


Рисунок 1 – Структура классов комплекса программных средств
Figure 1 – Software suite class structure

- класс main для вызова и управления всеми классами и функциями ПО;
- класс RadioDistance, предназначенный для расчета радиуса распространения радиосигнала. Класс состоит из двух функций: radioR для расчета максимального расстояния между модулями, позволяющего осуществить передачу данных на скорости не ниже заданной, по формуле 1 и функции sign проверки прямой видимости между двумя ближайшими радиомодулями по формуле 2;
- класс DotsCoors, предназначенный для реализации разработанного алгоритма [28] построения дополнительных точек связи. Класс состоит из функции robotscoors, рассчитывающей координаты предпочтительного расположения модулей беспроводной передачи данных на известном пути следования роботизированного устройства, и функции additional_dots, рассчитывающей координаты предпочтительного расположения ретрансляторов для соединения в сеть со шлюзом радиомодулей сенсорных систем и роботизированных устройств;

- класс Schedule, состоящий из функции delay расчета задержек передачи данных и функции make_schedule для составления расписания передачи данных;
- класс Map, предназначенный для отрисовки карты;
- класс Interface для задания начальных значений и вывода результатов работы ПО;
- класс RobotMotionArea предназначен для выделения на карте и считывания координат рабочей зоны РУ;
- класс MotionAreaModule рассчитывает координаты расположения ретрансляторов на рабочей зоне РУ;
- класс RobotLocalization осуществляет локализацию РУ на рабочей территории.

Класс RadioDistance содержит функцию radioR, которая принимает на вход данные о радиомодуле:

F – частота в Гц;

P_T – мощность радио передатчика в дБм;

G_T – усиление антенны передатчика в дБ;

L_T – потери в кабеле к антенне передатчика в дБ;

G_R – усиление антенны приемника в дБ;

L_R – потери в кабеле к антенне приемника в дБ;

P_R – чувствительность радио приемника в дБм;

$|V|_{dB}$ – множитель ослабления, учитывающий дополнительные потери в дБ за счет влияния поверхности Земли, растительности, атмосферы и других факторов.

В функции происходит расчет радиуса распространения радиосигнала (radius)

$$R = \frac{3 \cdot 10^8}{4\pi F} \cdot 10^{\frac{P_T + G_T + L_T + G_R + L_R + |V|_{dB} - P_R}{20}} \quad (1)$$

Результатом работы функции является данные типа «число с плавающей точкой», равное радиусу распространения радиосигнала в метрах. На вход функция sign принимает результат работы функции расчета радиуса распространения радиосигнала (radioR) и высоту двух радиомодулей, между которыми должна быть обеспечена прямая видимость. Тело функции выполняет расчет по формуле 2 значение LOS в метрах и сравнивает это значение с результатом работы функции radioR (radius). Если значение LOS больше или равно, то функция возвращает значение LOS равное radius, если же ситуация обратная, то возвращает рассчитанное значение LOS:

$$LOS = \frac{\sqrt{2 \cdot h1 \cdot R} + \sqrt{2 \cdot h2 \cdot R}}{1000}, \quad (2)$$

где LOS – расстояние прямой видимости,

$h1$ – высота, на которой расположен передатчик,

$h2$ – высота, на которой расположен приемник,

R – радиус земли.

Класс DotScoors принимает на вход координаты расположения шлюза (gw_coors), радиомодулей (module_coors), координаты траектории перемещения роботизированного устройства (rb_coors). Функция robotscoors производит расчет расстояний между известными координатами перемещения роботизированного устройства по формуле 3 и

вычисляет координаты расположения дополнительных модулей для обеспечения связи с роботизированным устройством (`new_rb_coors`):

$$d = \sqrt{|c_{x1} - c_{x2}|^2 + |c_{y1} - c_{y2}|^2}, \quad (3)$$

где d – расстояние между модулями,

c_x – координаты x первой и второй точки перемещения роботизированного устройства,

c_y – координаты y первой и второй точки перемещения роботизированного устройства.

Данные координаты объединяются с массивом координат, принятых на вход функции. Далее происходит расчет расстояний от всех известных радиомодулей до шлюза в функции `additionaldots`, и проводится расчет координат дополнительных модулей по формулам 3 и 4 в порядке возрастания расстояния от шлюза. Функция возвращает рассчитанные координаты дополнительных модулей (`add_coors`).

$$c_x = c_{rx} - \cos \alpha \cdot \left(\frac{d \cdot n}{m} \right). \quad (4)$$

где c_{rx} – координата x известной точки перемещения роботизированного устройства,

α – угол наклона траектории пути от одной точки до последующей,

m – необходимое количество модулей для соединения двух точек с известными координатами,

n – номер точки в $[0..m]$.

Класс `Schedule` принимает на вход массив координат всех радиомодулей (`new_module_coors`) и размер фрейма (`frame`) в миллисекундах. Функция `delay` выполняет расчет количества радиомодулей в цепи от отправителя до шлюза для каждого не дополнительного узла системы. Далее идет расчет задержки (`delay`) передачи данных:

$$D = (C \cdot 2,5F). \quad (5)$$

где C – количество mesh-роутеров в цепочке,

F – размер фрейма, в миллисекундах.

Результатом работы функции является значение задержки передачи данных от радиомодуля до шлюза, типа «число с плавающей точкой». Данный результат поступает на вход функции составления расписания передачи данных `make_schedule`, в которой происходит составление расписания (`schedule_table`) по формуле 6 методом перебора. Функция возвращает расписание передачи данных:

$$\forall b = \overline{1, B}, \forall s_i \in srd_{пр}^b : \frac{M_{g_{j,i}}}{\sum_{\forall s_m \in (srd_{пд}^b \setminus srd_j)} M_{g_{m,i}} + N_0}, \quad (6)$$

где $g_{i,j} (i, j = \overline{1, B}, i \neq j)$ – набор коэффициентов передачи канала между всеми парами радиомодулей,

$M (i = \overline{1, B},)$ – мощность передатчиков сенсоров,

N_0 – средняя мощность внутреннего шума приемника,

q – отношение сигнал/помеха в приемнике,

$rd_{пр}^b$ и $srd_{пд}^b$ – множество сенсоров принимающих и передающих пакеты данных соответственно.

Написан отдельный класс RobotMotionArea для построения сети ретрансляторов, обеспечивающей радиосвязь на всей территории, где работает роботизированное устройство. Класс принимает на вход карту территории. В классе присутствует функция задания рабочей территории motion_area. Данная функция принимает на вход часть прямоугольной карты с координатами «отправных точек», которые представляют из себя края карты, а на выходе дает координаты всей рабочей территории РУ (массив robot_area_coors). Функция позволяет пользователю вручную при помощи специальных инструментов выделить зону перемещения роботизированного устройства. На первом этапе функция motion_area вызывает функцию area_grid, которая разбивает полученный Рисунок карты на сетку координат (широта, долгота) по «отправным точкам», полученным из motion_area. Area_grid возвращает сетку координат (grid_coors), на которую опирается интерфейс программного комплекса и функция robot_area_pencil, которая позволяет пользователю выделить необходимый рабочий участок РУ и при помощи функции pencil_action считать нажатие пользователя на левую кнопку мыши при обозначении территории (map_click_area). Далее полученные координаты нажатия левой кнопки мыши поступают в функцию motion_area, где обрабатываются и формируют массив координат рабочей территории РУ. Далее массив координат из RobotMotionArea поступает в класс MotionAreaModule, где при помощи функции narrow_side определяется самая узкая часть рабочей зоны и возвращаются ее координаты (narrow_side_coors). Эти данные, а также информация о минимально необходимом расстоянии между модулями для поддержания требуемой скорости передачи данных, получаемых из класса RadioDistance, поступают на функцию расчета координат первого ретранслятора first_module_loc. В first_module_loc происходит расчет наилучшего расположения радиомодуля по координатам рабочей территории относительно верхней границы и одной из ближайших боковых границ самого узкого места рабочей территории РУ. Координаты расположения первого модуля передаются в функцию module_loc, где происходит дальнейший расчет координат ретрансляторов. Функция module_loc возвращает массив координат (robot_mod_coors) для рекомендуемого расположения радиомодулей для поддержания связи с РУ на всей территории ее действия.

Для локализации роботизированного устройства подготовлен отдельный класс RobotLocalization. Данный класс состоит из функции проверки тестового сообщения с РУ test_testmessage, которая возвращает подтверждение получения сообщения для расчета локализации. При возвращении значения «True» функцией test_testmessage функция robot_signal_data собирает данные с ретрансляторов module_data (координаты расположения ретранслятора, чувствительность при получении сигнала и отношение сигнал/шум). Эти данные передаются в класс RadioDistance, который возвращает информацию о примерном расстоянии до объекта от каждого ретранслятора, получившего тестовое сообщение. Результат работы класса RadioDistance (массив расстояний до искомого объекта) вместе с координатами ретрансляторов, получивших тестовый сигнал, поступает в функцию расчета пересечения окружностей возможного местоположения искомого объекта robot_circle_intersection. Далее в функция robot_local принимает на вход полигон (набор координат области пересечения окружностей, полученной в предыдущей функции) и возвращает координаты центра пересечения и радиус области вероятного нахождения объекта. Функция robot_local_area отрисовывает найденную область на карте пользователя.

Программное обеспечение рекомендательной системы принимает на вход координаты шлюза, модулей, расположенных на большом расстоянии от шлюза, траектории перемещения робота, а также высоту расположения радиомодулей;

необходимую скорость передачи данных между радиомодулями. Входные данные выводятся на карту, представленную на Рисунке 2.

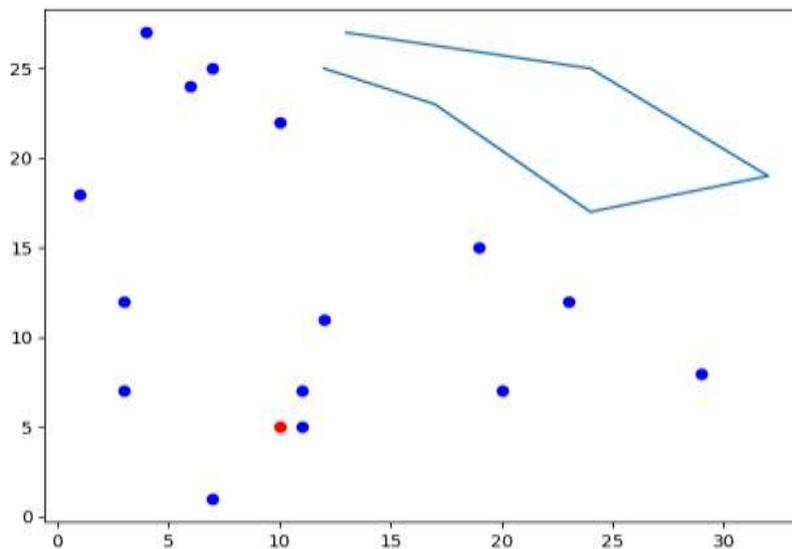


Рисунок 2 – Начальные условия
 Figure 2 – initial conditions

Далее происходит расчет дальности обеспечения радиосвязи для заданной скорости передачи данных и проверка прямой видимости между радиомодулями, находящимися на вычисленном расстоянии и на заданной высоте.

Затем программа рассчитывает координаты радиомодулей для обеспечения связи на всей траектории перемещения роботизированного устройства. Далее происходит расчет координат расположения дополнительных радиомодулей (ретрансляторов) для подключения к общей сети всех модулей по алгоритму [28]. Результат работы программного обеспечения рекомендательной системы представлен на Рисунке 3.

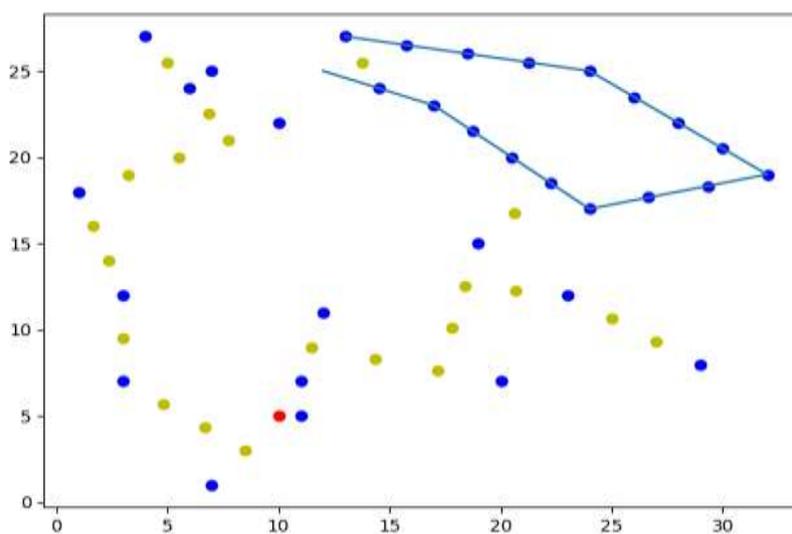


Рисунок 3 – Результат работы разработанного ПО
 Figure 3 – Output of the developed software

Результатом работы программы является массив координат рекомендательного расположения дополнительных модулей. В дальнейшем программное обеспечение планируется модифицировать для взаимодействия с картами «Яндекс» и реализацией возможности указывать координаты входных значений по щелчку левой кнопки

компьютерной мыши на выбранном месте на карте, программное обеспечение будет само брать координаты точек. Данная модификация упростит сбор входных данных, сделает программное обеспечение более удобным с точки зрения пользователя, ускорит подготовку к планированию и развертыванию сети, тем самым удешевит разработку и монтирование сети.

Пользовательский интерфейс разработанной программной рекомендательной системы AgroWiNet состоит из области отображения карты, области ввода координат углов загруженной карты, областей ввода координат расположения шлюза и радиомодулей, кнопок «Загрузить карту», «Выделить область», «Шлюз», «Радиомодуль», «Характеристики радиомодулей». «Рассчитать» и области ввода необходимой скорости передачи данных. Интерфейс представлен на Рисунке 4.

Для работы с программой сначала требуется загрузить карту (участок территории, на котором необходимо произвести расчет координат расположения ретрансляторов). На данном этапе карта представляет из себя загружаемый Рисунок. В дальнейшем планируется подключение на прямую к картам «Яндекс» или «Google» для более точной работы. Загрузка карты происходит путем нажатия на кнопку «Загрузить карту» и дальнейшего выбора файла с картой. В настоящее время реализована поддержка изображений только в формате jpeg. Далее требуется ввести координаты углов карты (допускается любая система координат в том числе широта и долгота), для установления системы координат. Ввод координат углов карты осуществляется в области «Координаты». Для обозначения рабочей области роботизированного устройства следует воспользоваться кнопкой «Выделить область», тогда появится возможность выделить нужный участок действия РУ на загруженной карте. Координаты выделенного участка сохраняются в массиве `robot_area_coors`.

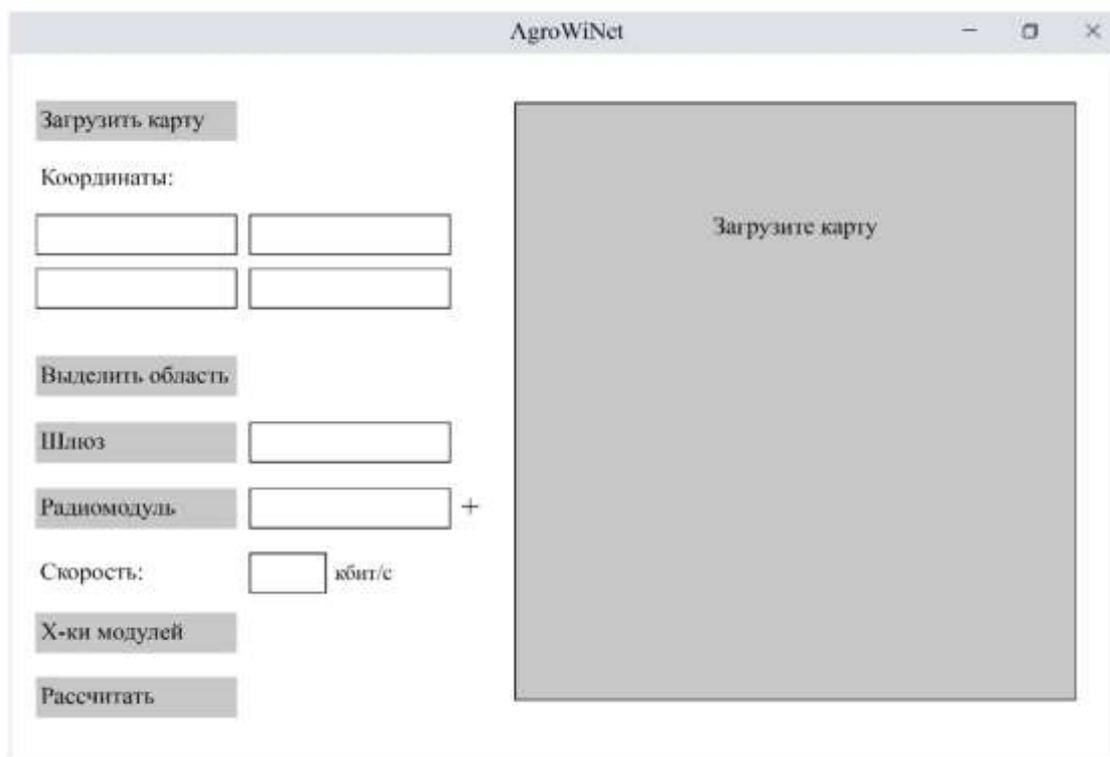


Рисунок 4 – Пользовательский интерфейс
Figure 4 – User interface

В области «Шлюз» могут быть вручную введены координаты шлюза. Также координаты можно установить, используя кнопку «Шлюз», щелкнув левой клавишей мыши на требуемом месте на карте. Следующая область «Радиомодуль» отвечает за ввод координат расположения стационарных радиомодулей, с которыми нужно обеспечить радиосвязь. Ввод координат так же, как и в предыдущей области, осуществляется двумя способами: ввод вручную, выбор необходимого места на карте после нажатия на кнопку «Радиомодуль». Для добавления радиомодулей используется кнопка «+» в этой же области.

Необходимая скорость беспроводной передачи данных вводится в области «Скорость». Для корректного расчета координат расположения ретрансляторов требуется указать характеристики используемых радиомодулей. Данные характеристики можно взять из документации, поставляемой вместе с устройством для беспроводного приема и передачи данных. Для ввода характеристик требуется нажать кнопку «Х-ки модулей», после чего откроется специальное окно для ввода данных.

После ввода всех необходимых координат и данных требуется нажать кнопку «Рассчитать», после чего будет произведен расчет координат расположения ретрансляторов.

Для тестирования работы программного обеспечения, проведем расчет для следующего произвольного случая. В начале рассмотрим случай без учета перемещения РУ. Вводимые значения и характеристики модулей представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Входные значения для тестирования ПО
 Table 1 – Input values for software testing

Координаты карты	Координаты шлюза	Координаты стационарных модулей	Скорость передачи данных	Рабочая территория РУ
59.840903, 30.598447	59.813745, 30.620764	59.817544, 30.609858	40 кбит/с	отсутствует
59.840903, 30.652701		59.818969, 30.638452		
59.810581, 30.598447		59.823250, 30.629021		
59.810581, 30.652701		59.827998, 30.619518		
		59.828105, 30.642335		
		59.835462, 30.623971		

Координаты представлены в формате «широта, долгота». После ввода входных данных интерфейс программы принимает следующий вид, представленный на Рисунке 5.

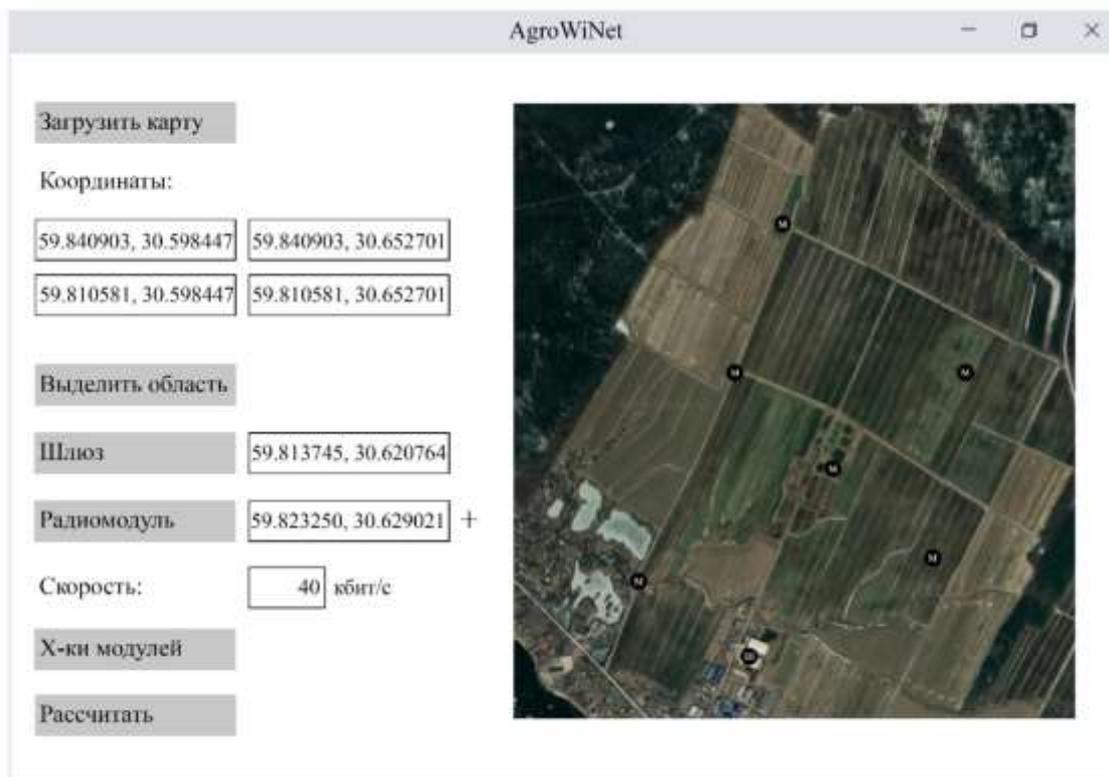


Рисунок 5 – Вид интерфейса ПО после ввода входных данных
 Figure 5 – Software GUI after source data input

На Рисунке 5 на карте буквой «Ш» обозначен шлюз, буквой «М» – стационарный радиомодуль.

После ввода всех данных и нажатия на кнопку «Рассчитать» происходит расчет координат расположения ретрансляторов по алгоритму, описанному выше. Результатом работы программы является список координат расположения ретрансляторов, представленный в Таблице 2, и карта с обозначенными на ней ретрансляторами, представленная на Рисунке 6.

Таблица 2 – Результат работы ПО
 Table 2 – Software output

Координаты ретрансляторов
59.815805, 30.615130
59.815597, 30.627446
59.817447, 30.633223
59.820887, 30.634402
59.825993, 30.624093
59.824907, 30.633605
59.826819, 30.637683
59.830605, 30.621056
59.833374, 30.622838

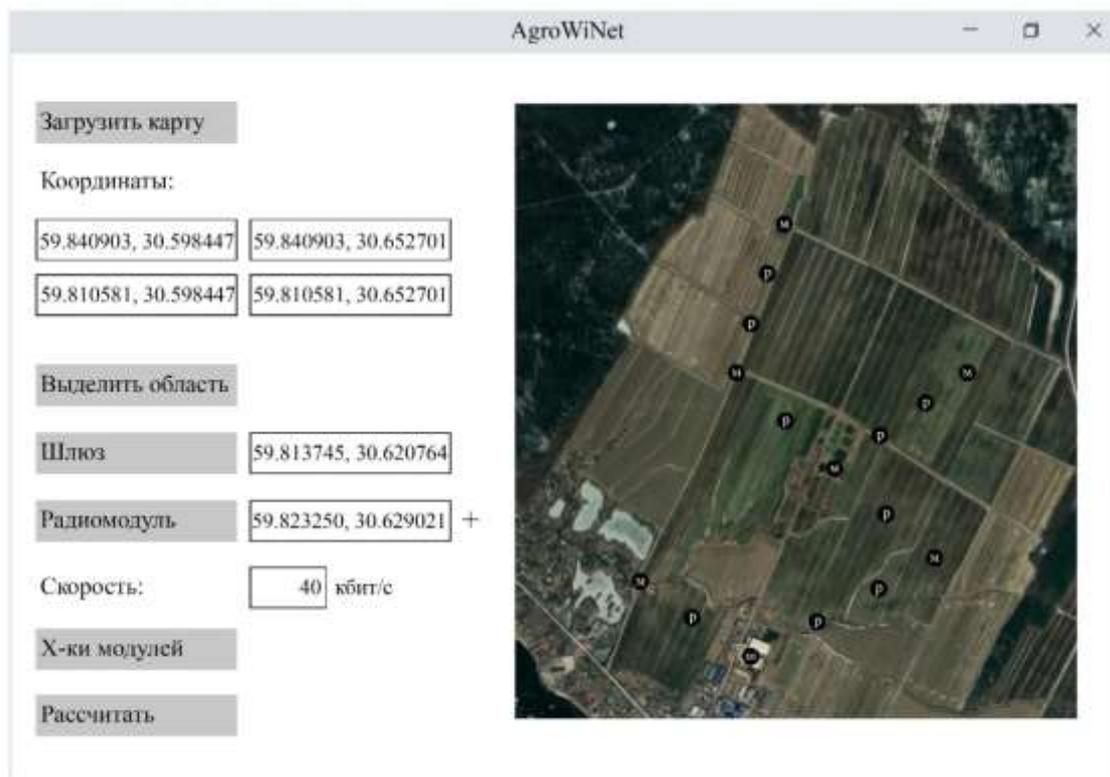


Рисунок 6 – Вид интерфейса ПО с обозначенным расположением ретрансляторов
 Figure 6 – Software GUI with mapped repeaters

На Рисунке 6 ретрансляторы изображены черными кругами с обозначением «Р». Из Рисунка понятно, что была задана скорость передачи данных 40 кбит/с. Используемые модули поддерживают требуемую скорость передачи данных на расстоянии около 500 м. Так как расстояние между стационарными модулями не кратно 500 м, расстояния между ретрансляторами находятся в пределах 300-480 м, что увеличивает скорость беспроводной передачи данных.

Далее рассмотрим пример использования ПО для покрытия радиосвязью рабочей территории, обслуживаемой роботизированным устройством. Для этого выделим необходимый участок на карте, предварительно нажав на кнопку «Выделить область». Установим координаты шлюза (используем те же, что и в предыдущем примере). Требуемую скорость передачи данных зададим равной 55 кбит/с, что соответствует примерно 300 м для выбранных радиомодулей, что и в предыдущем примере. Интерфейс программы выведенным на него результатом работы представлен на Рисунке 7.

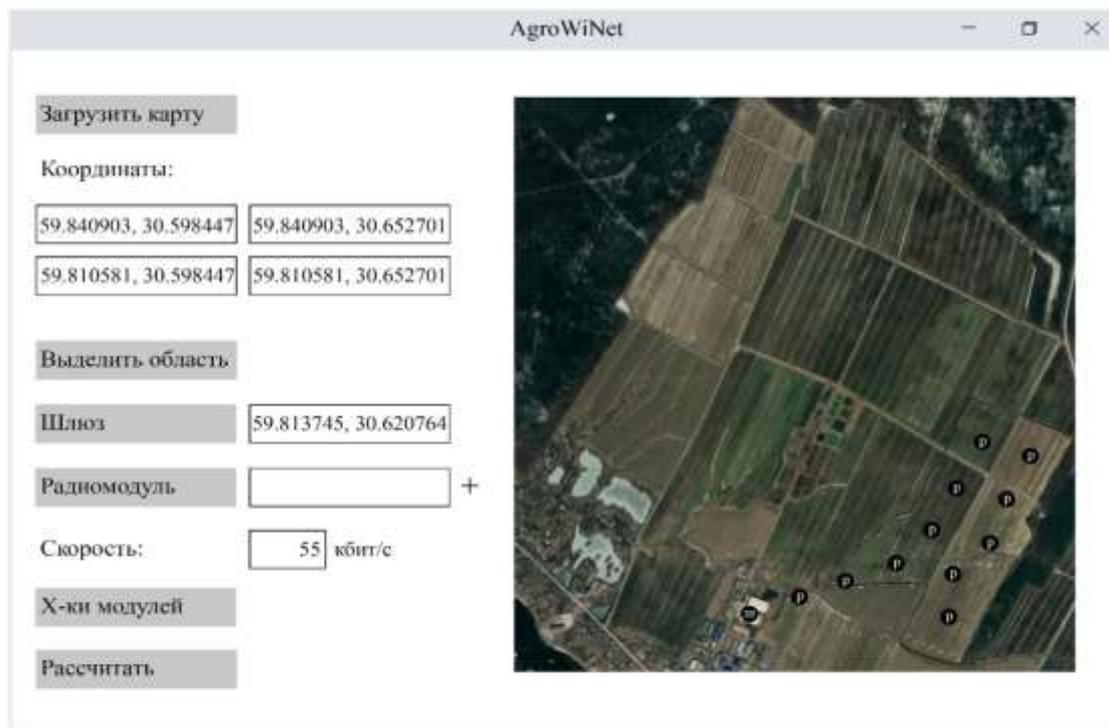


Рисунок 7 – Результат работы ПО для рабочей территории РУ
 Figure 7 – Software output for RD work area

На Рисунке 7 рабочая территория РУ обозначена черным контуром на карте. Результат работы программы, список координат расположения ретрансляторов, представлен в Таблице 3.

Таблица 3 – Результат работы ПО для рабочей территории РУ
 Table 3 – Software output for RD work area

Координаты ретрансляторов
59.814887, 30.625214
59.815776, 30.630120
59.816591, 30.634876
59.816044, 30.640642
59.813664, 30.640507
59.817663, 30.644592
59.820076, 30.645870
59.822764, 30.648742
59.823472, 30.644253
59.820837, 30.641074
59.818635, 30.638807

Как видно из приведенных примеров, разработанное ПО выполняет заявленные задачи. Интерфейс программы прост и легок в использовании. На данный момент значительные сложности в обращении с программой с точки зрения пользователя связаны с вводом координат углов загружаемой карты, но в дальнейшем данная проблема будет решена за счет прямого подключения программы к картам Google, что обеспечит автоматический учет координат.

Обсуждение

На сегодняшний день сети ретрансляторов проектируются вручную, а иногда устанавливаются без предварительного расчета, что влечет за собой как излишние трудозатраты на проектирование, так и неоптимальные с точки зрения энергоэффективности решения. Разработанное программное обеспечение рекомендательной системы позволяет сократить проектирование таких сетей до нескольких часов, предлагает оптимальное расположение меньшего количества ретрансляторов, но не демонстрирует идеальной точности при расчете необходимого уровня радиосигнала, так как математические формулы, применяемые в данном программном обеспечении, позволяют рассчитать только приблизительное расстояние достаточное для поддержания радиосигнала приемлемого качества. Подобные недостатки связаны с тем, что множество факторов, влияющих на радиопередачу данных, не могут быть учтены в формулах.

Заключение

В работе предложено решение актуальной научно-технической задачи: сокращения временных ресурсов на проектирование сетей беспроводной передачи данных на основе программных средств расчета расположения гетерогенных сенсорных элементов и мобильных роботизированных устройств, имеющей существенное значение для развития цифровых технологий в области сельского хозяйства. Разработана рекомендательная программная система AgroWiNet для организации беспроводного информационного взаимодействия в сенсорной сети с применением дополнительных радиомодулей, учитывающая при работе заданные требования по скорости передачи данных между узлами сети и обеспечивающая развертывание сети гетерогенных сенсорных элементов и мобильных роботизированных устройств на обслуживаемой территории. Сформулированы рекомендации по применению разработанной программной системы в сельскохозяйственных робототехнических системах, специализирующихся на аграрных задачах, связанных с обработкой открытого грунта.

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ №18-58-76001 ЭРА_a.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leon E. Flood Early Warning System by Twitter Using LoRa. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. 2018;2(19):1213.
2. Cagatan G.K. B. et al. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator. *2017 IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. IEEE. 2017:1-8.
3. Lavric A., Popa V. A LoRaWAN: Long range wide area networks study. *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*. IEEE. 2017:417-420.
4. Barriquello C. H. et al. Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids. *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. IEEE, 2017:1-4.
5. Addabbo T. et al. An iot framework for the pervasive monitoring of chemical emissions in industrial plants. *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*. IEEE. 2018:269-273.
6. Hart J., Hartová V. Improvement of monitoring of cattle in outdoor enclosure using IQRF technology. 2018.

7. Shuda J.E., Rix A.J., Booyesen M.J. Towards Module-Level Performance and Health Monitoring of Solar PV Plants Using LoRa Wireless Sensor Networks. *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica. IEEE.* 2018:172-177.
8. Davcev D. et al. IoT agriculture system based on LoRaWAN. *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE.* 2018:1-4.
9. Rahim H., Ghazel C., Saidane L.A. An Alternative Data Gathering of the Air Pollutants In the Urban Environment using LoRa and LoRaWAN. *2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE.* 2018:1237-1242.
10. Swastika A.C., Pramudita R., Hakimi R. IoT-based smart grid system design for smart home. *2017 3rd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT). IEEE.* 2017:49-53.
11. Hammi B. et al. IoT technologies for smart cities. *IET Networks.* 2017;7(1):1-13.
12. Morin E. et al. Comparison of the device lifetime in wireless networks for the internet of things. *IEEE Access.* 2017;5:7097-7114.
13. LoRa Alliance, «LoRa Specification V1.0.2,» Tech. Rep., July 2016.
14. Киричек Р.В. и др. Модельные сети для Интернета Вещей и программируемых сетей. *Информационные технологии и телекоммуникации.* 2015;3: 17-26.
15. Футахи А., Парамонов А.И. Беспроводные сенсорные сети с мобильными временными головными узлами. *Электросвязь.* 2016;9:48-54.
16. Корнеева Т.В. Сенсорные сети для систем контроля и управления. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2016;8:28-41.
17. Кучерявый А.Е., Аль-Кадами Н.А. Адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами. *Электросвязь.* 2015;3:22-26.
18. Андриянов Н.А. Построение сенсорных сетей на базе технологии Bluetooth. *Радиоэлектронная техника.* 2016;1:13.
19. Жарков С.Н. Моделирование мобильной беспроводной сенсорной сети с одним узлом-стоком. *Теория и техника радиосвязи.* 2015;1:54.
20. Wixted A.J. et al. Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. *2016 IEEE SENSORS. IEEE.* 2016:1-3.
21. Ojha T., Misra S., Raghuvanshi N.S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2015;118:66-84.
22. Zhang J. et al. Energy-efficient data-gathering rendezvous algorithms with mobile sinks for wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks.* 2017;23(4):248-257.
23. Zhang Y., He S., Chen J. Data gathering optimization by dynamic sensing and routing in rechargeable sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking.* 2015;24(3):1632-1646.
24. Qiu T. et al. ROSE: Robustness strategy for scale-free wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON).* 2017;25(5):2944-2959.
25. Sheng Z. et al. Recent advances in industrial wireless sensor networks toward efficient management in IoT. *IEEE access.* 2015;3:622-637.
26. Fu L. et al. Optimal charging in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2015;65(1):278-291.
27. Pan G. et al. Performance analysis and optimization for SWIPT wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Communications.* 2017;65(5):2291-2302.
28. Denisov A., Iakovlev R., Lebedev I. Mathematical and Algorithmic Model for Local Navigation of Mobile Platform and UAV Using Radio Beacons. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics.* Springer, Cham. 2019:53-62.

REFERENCES

1. Leon E. Flood Early Warning System by Twitter Using LoRa. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*. 2018;2(19):1213.
2. Cagatan G.K. B. et al. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator. *2017 IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. IEEE. 2017:1-8.
3. Lavric A., Popa V. A LoRaWAN: Long range wide area networks study. *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*. IEEE. 2017:417-420.
4. Barriquello C. H. et al. Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids. *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. IEEE, 2017:1-4.
5. Addabbo T. et al. An iot framework for the pervasive monitoring of chemical emissions in industrial plants. *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*. IEEE. 2018:269-273.
6. Hart J., Hartová V. Improvement of monitoring of cattle in outdoor enclosure using IQRF technology. 2018.
7. Shuda J.E., Rix A.J., Booyesen M.J. Towards Module-Level Performance and Health Monitoring of Solar PV Plants Using LoRa Wireless Sensor Networks. *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*. IEEE. 2018:172-177.
8. Davcev D. et al. IoT agriculture system based on LoRaWAN. *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. IEEE. 2018:1-4.
9. Rahim H., Ghazel C., Saidane L.A. An Alternative Data Gathering of the Air Pollutants In the Urban Environment using LoRa and LoRaWAN. *2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*. IEEE. 2018:1237-1242.
10. Swastika A.C., Pramudita R., Hakimi R. IoT-based smart grid system design for smart home. *2017 3rd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*. IEEE. 2017:49-53.
11. Hammi B. et al. IoT technologies for smart cities. *IET Networks*. 2017;7(1):1-13.
12. Morin E. et al. Comparison of the device lifetime in wireless networks for the internet of things. *IEEE Access*. 2017;5:7097-7114.
13. LoRa Alliance, «LoRa Specification V1.0.2,» Tech. Rep., July 2016.
14. Kirichek R.V. et al. Model networks for Internet of Things and SDN. *Information Technology and Telecommunications*. 2015;3:17-26.
15. Futahi A., Paramonov A.I. Wireless sensor networks with temporary mobile head nodes. *Elektrosvyaz*. 2016;9:48-54.
16. Korneeva T.V. Sensor networks systems for monitoring and control. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2016;8:28-41.
17. Koucheryavy A.E., Al-Kadami N. The adaptive clustering algorithm for mobile wireless sensor networks. 2015;3:22-26.
18. Andriyanov N.A. Construction of sensor networks based on Bluetooth technology. *Radioelectronic technology*. 2016;1:13.
19. Zharkov S.N. Mobile wireless sensor network modeling with one sink node. *Theory and technique of radio communication*. 2015;1:54.
20. Wixted A.J. et al. Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. *2016 IEEE SENSORS*. IEEE. 2016:1-3.
21. Ojha T., Misra S., Raghuvanshi N.S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015;118:66-84.

22. Zhang J. et al. Energy-efficient data-gathering rendezvous algorithms with mobile sinks for wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*. 2017;23(4):248-257.
23. Zhang Y., He S., Chen J. Data gathering optimization by dynamic sensing and routing in rechargeable sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2015;24(3):1632-1646.
24. Qiu T. et al. ROSE: Robustness strategy for scale-free wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*. 2017;25(5):2944-2959.
25. Sheng Z. et al. Recent advances in industrial wireless sensor networks toward efficient management in IoT. *IEEE access*. 2015;3:622-637.
26. Fu L. et al. Optimal charging in wireless rechargeable sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2015;65(1):278-291.
27. Pan G. et al. Performance analysis and optimization for SWIPT wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Communications*. 2017;65(5):2291-2302.
28. Denisov A., Iakovlev R., Lebedev I. Mathematical and Algorithmic Model for Local Navigation of Mobile Platform and UAV Using Radio Beacons. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham. 2019:53-62.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Денисов Александр Вадимович, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: [0000-0002-8155-2573](https://orcid.org/0000-0002-8155-2573)

Aleksandr V. Denisov, junior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation.