

УДК 621.391

DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-227-238

Модель доставки сообщений в процессе управления выпасом животных на основе применения сети интернета вещей и беспилотного летательного аппарата

¹ Карви Дж.К.Дж., ² Польщиков К.А., ² Маматов М.Е., ² Голдобин Д.А.

¹ Университет Мустансирия, Ирак, 10001, г. Багдад, ул. Аль-Кадисия

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

jalalalqaisy1@gmail.com, polshchikov@bsuedu.ru, 1333190@bsuedu.ru, denis.goldobin@printgrad.ru

Аннотация. В статье предлагается в процессе выпаса животных передавать данные о местоположении контролируемых особей на панель оператора-пастуха с применением беспроводной сети интернета вещей. В случаях опасного приближения животного к границе пастбища оператор имеет возможность воспользоваться беспилотным летательным аппаратом, чтобы с его помощью направить это животное в область безопасного местоположения. Исследование посвящено разработке математической модели доставки сообщений, отправляемых геопозиционными трекерами по сети для контроля местоположения выпасаемых животных. Проведены вычислительные эксперименты, иллюстрирующие возможность применения предлагаемой модели для обоснования значений периода отправки сообщений трекерами, при которых обеспечивается своевременное использование беспилотного аппарата с учетом классов местоположения животных.

Ключевые слова: управление выпасом животных, геопозиционирование, трекер, беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, интернет вещей, протокол LoRaWAN

Для цитирования: Карви Дж.К.Дж., Польщиков К.А., Маматов М.Е., Голдобин Д.А. 2025. Модель доставки сообщений в процессе управления выпасом животных на основе применения сети интернета вещей и беспилотного летательного аппарата. *Экономика. Информатика*, 52(1): 227–238. DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-227-238

Message Delivery Model for Animal Grazing Control Using the Internet of Things and Unmanned Aerial Vehicle

¹ Jalal Q.J. Karwi, ² Konstantin A. Polshchykov, ² Mikhail E. Mamatov,

² Denis A. Goldobin

¹ Mustansiriyah University, AL-Qadisiya St, Baghdad, 10001, Iraq

² Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod 308015, Russia

jalalalqaisy1@gmail.com, polshchikov@bsuedu.ru, 1333190@bsuedu.ru, denis.goldobin@printgrad.ru

Abstract. The study is devoted to the development of a mathematical model for delivering messages sent by geopositioning trackers over the network to monitor the location of grazing animals. The authors propose to transmit data on the location of monitored individual animals to the operator-shepherd panel using a wireless Internet of Things network during the grazing process. In cases where an animal dangerously approaches the pasture boundary, the operator can use an unmanned aerial vehicle to direct the animal to a safe location. The scientific novelty of the model lies in considering the influence of the parameters of the pasture, the monitored herd, the multicopter, and the wireless devices used on the values of time intervals between the moments of delivering data sent by trackers placed on the animals to the operator panel. The proposed model is based on the original classification of the location of monitored objects. Depending on the distance to the pasture boundary, four classes

© Карви Дж.К.Дж., Польщиков К.А., Маматов М.Е., Голдобин Д.А., 2025



of animal location are distinguished. Computational experiments were carried out illustrating the possibility of using the proposed model to justify the values of the period of sending messages by trackers, which ensures the timely use of the unmanned vehicle, taking into account the classes of animal location.

Keywords: animal grazing control, geo-positioning, tracker, unmanned aerial vehicle, multicopter, internet of things, LoRaWAN protocol

For citation: Karwi J.Q.J., Polshchykov K.A., Mamatov M.E., Goldobin D.A. 2025. Message Delivery Model for Animal Grazing Control Using the Internet of Things and Unmanned Aerial Vehicle. *Economics. Information technologies*, 52(1): 227–238 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2025-52-1-227-238

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно применяются в различных сферах, прежде всего, для решения задач наблюдения за контролируемыми объектами [Mahdi et al., 2021; Jameel et al., 2022]. Наибольшее распространение получили мультироторные БПЛА, в частности, квадрокоптеры и гексакоптеры, имеющие по 4 или 6 несущих винтов [Hamandi et al., 2021; Peksa, Mamchur, 2024]. Такие беспилотные летательные аппараты именуются мультикоптерами [Lee, Kim, Chu, 2021; Subramaniam, Salim, 2024]. На их базе могут функционировать беспроводные самоорганизующиеся сети, предназначенные для обеспечения связи в специфических условиях [Константинов, Польщиков, Лазарев, 2015; Польщиков, 2015; Константинов и др., 2016; Джамил, Лихошерстов, Польщиков, 2022]. В последние годы БПЛА применяются в сфере «умного животноводства», в том числе для выпаса скота [Кузьмина, Кузьмин, 2021; El-Fiqi, Kasmarik, Abbass, 2021; Yaxley et al., 2023]. Как показывает опыт и результаты многочисленных испытаний, выпасаемые животные реагируют на звук, издаваемый летящим мультикоптером, и перемещаются в нужном для пастуха направлении, например, в безопасные зоны, места кормления, доения и т. д. [Priyadharshini, Balamurugan, 2022]. При этом постоянное наблюдение за стадом обеспечивается за счет передачи фотографий и трансляции видеопотоков, снимаемых камерами БПЛА [Montalván et al., 2024], а также формирования с их помощью актуальных карт контролируемой местности [Башилов, Королев, 2023]. Реализация такого подхода требует, чтобы в процессе наблюдения за животными мультикоптеры находились в полете в течение длительного времени [Yaxley, Joiner, Abbass, 2021], что является существенным недостатком.

Другой подход к автоматизированному управлению выпасом стада животных, по нашему мнению, является более предпочтительным. Он заключается в том, что на каждой особи размещается трекер, представляющий собой приемо-передающее устройство беспроводной связи. Это устройство способно определять свое текущее местоположение с помощью глобальной системы геопозиционирования (Global Positioning System, GPS), т. е. выполнять функции GPS-приемника. Для передачи данных о координатах местоположения трекеров разворачивается беспроводная сеть, функционирующая по принципу интернета вещей (Internet of Things, IoT) [Afrianto, Wahjuni, Djatna, 2020; Балакшин, Польщиков, 2024]. Трекеры в качестве сетевых устройств отправляют эти данные в виде сообщений на сетевой шлюз. Затем эта информация поступает на сетевой сервер и выводится на интерактивный экран панели управления оператора-пастуха, который в случае необходимости принимает решение об отправке мультикоптера в конкретное место для обеспечения безопасности выпасаемого животного. Наиболее универсальным решением для реализации данного подхода является использование IoT-трекеров и шлюзов, которые функционируют в соответствии с протоколом LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [Yaser, Polshchykov, Polshchikov, 2023; Alipio, Chaguile, Bures, 2024], что дает возможность обеспечить работу беспроводной сети в местах, где отсутствует GSM-связь [Ясир, Польщиков, Федоров, 2023; Alipio, Bures, 2024].

Решаемая научная задача

В настоящее время разработчиками предлагаются в основном 8-канальные и 16-канальные LoRa-шлюзы, имеющие ограниченную производительность. В условиях подключения в сеть нескольких сотен трекеров, интенсивно передающих сообщения, нагрузка радиоканалов шлюзов может достигать существенных значений, при которых появляются неприемлемо высокие задержки доставки данных. Это, в свою очередь, может привести к несвоевременному реагированию оператора на возникающие на пастбище ситуации. Чтобы исключить подобные негативные явления, требуется рационально управлять периодом отправки сообщений из трекеров на сетевой шлюз. С одной стороны, необходимо стремиться к минимизации указанного периода, чтобы обеспечить оперативность управления выпасом животных. С другой стороны, чрезмерное уменьшение этой величины является недопустимым, т. к. приводит к сетевой перегрузке и к росту задержек доставки данных, отправляемых трекерами.

Данная работа посвящена решению научно-технической задачи, состоящей в разработке математической модели доставки сообщений при управлении выпасом стада на основе применения IoT-сети и БПЛА, позволяющей обосновать значения периода отправки данных о текущем местоположении контролируемых животных. Проведен анализ литературы по теме исследования, который показал, что получены результаты по поддержке безопасного расстояния между мультикоптером и выпасаемыми животными [Yaxley, Joiner, Abbass, 2021]; обоснован ряд параметров беспилотной системы, предназначенной для мониторинга выпасаемых животных, в частности, вычислены рекомендуемые значения мощности ретрансляционной аппаратуры на борту летательного аппарата, высоты, скорости, длительности его полета, а также дальности связи с транспондером животного [Шигимага, Файзуллин, Осокина, 2023]; разработан алгоритм управления БПЛА для отслеживания движущейся границы следа животных, который позволяет дронам избегать столкновений [Li et al., 2022]. В то же время вопросам выбора периода отправки трекерами сообщений с данными о местоположении контролируемых животных в научных публикациях уделено недостаточно внимания. В этой связи задача, решаемая в настоящей статье, представляется актуальной.

Разработка модели

Допустим, пастбище имеет форму круга радиуса R . Фрагмент пастбища представлен на рис. 1. В зависимости от удаленности до границы пастбища различаются четыре класса местоположения животного. Местоположение 0 класса имеют животные, находящиеся на безопасной части пастбища. Менее безопасным является местоположение 1 класса. Животные, относящиеся к этому классу местоположения, требуют особого наблюдения. При попадании животного в область пастбища, соответствующую 1 классу местоположения, оператору необходимо приготовиться к тому, что, возможно, через некоторое время потребуются использование мультикоптера для того, чтобы направить эту особь в безопасную часть пастбища. Более опасным является местоположение 2 класса. Если животное оказывается в области местоположения этого класса, то требуется немедленная отправка мультикоптера для того, чтобы направить особь в безопасный участок пастбища. Остальная территория перед границей пастбища и за ней относится к местоположению 3 класса. Она представляет собой самую опасную область. Если обнаружено, что животное переместилось в эту область, также требуется немедленное использование мультикоптера, но эта мера уже не будет гарантировать обеспечение безопасности особи. В связи с вышеуказанным, необходимо стремиться к тому, чтобы не пропустить попадание животного в область местоположения 2 класса, чтобы своевременно отправить мультикоптер для обеспечения его безопасности.

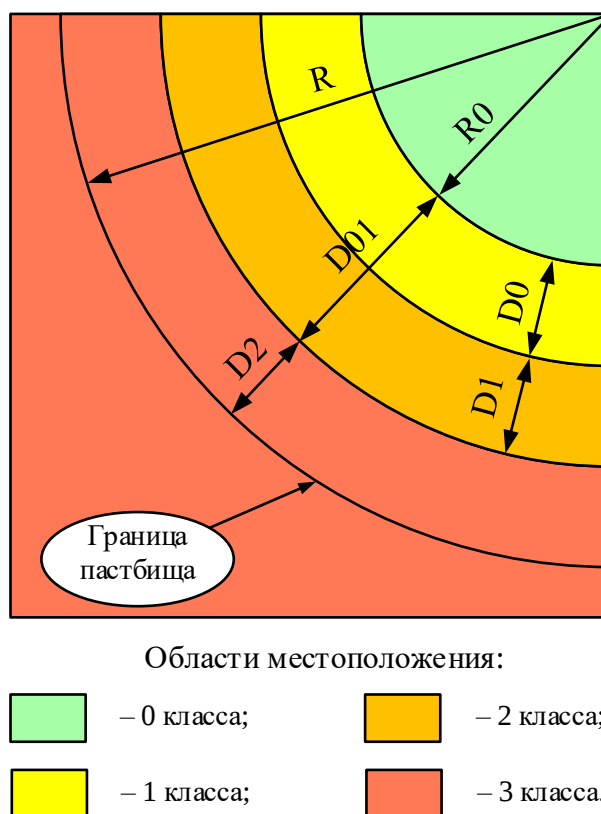


Рис. 1. Фрагмент пастбища
Fig. 1. Fragment of the pasture

Известны следующие величины: N – число выпасаемых животных; AR – площадь, необходимая для выпаса одного животного; VCM – максимальная скорость длительного перемещения животного по пастбищу; VU – средняя скорость полета мультикоптера. Кроме того, известно, что к категории особого наблюдения может быть отнесено не более N_1 выпасаемых животных. Животные, входящие в это число, могут иметь местоположение классов 1, 2 и 3. Остальные животные относятся к категории обычного наблюдения. Они имеют местоположение 0 класса и находятся на безопасной части пастбища, площадь которой должна в N раз превышать площадь AR . С учетом этого радиус безопасной части пастбища вычисляется по формуле:

$$R_0 = \sqrt{\frac{N \cdot AR}{\pi}}. \quad (1)$$

Рассмотрим ситуацию, когда животное оказалось на границе местоположения 2 класса. В таком случае мультикоптер успеет своевременно долететь до условной точки пересечения этим животным границы пастбища, если расстояние от границы местоположения 2 класса до границы пастбища будет составлять не менее

$$D_2 = \frac{2 \cdot R \cdot VCM}{VU}. \quad (2)$$

Вычислив D_2 , можно оценить расстояние от границы местоположения 0 класса до границы местоположения 2 класса с помощью выражения:

$$D_{01} = R - R_0 - D_2. \quad (3)$$

Оказавшись на границе местоположения 0 класса и направляясь по кратчайшему пути к границе пастбища со скоростью VCM , животное преодолеет расстояние D_{01} в течение времени

$$T01 = \frac{D01}{VCM}. \quad (4)$$

Чтобы не пропустить перемещение животного из области местоположения 0 класса в область местоположения 2 класса и своевременно отправить мультикоптер для обеспечения безопасности выпасаемой особи, необходимо выполнение условия:

$$DEL0 < T01, \quad (5)$$

где $DEL0$ – интервал времени между моментами доставки на панель оператора данных, отправляемых трекером, который находится в области местоположения 0 класса.

Величину $DEL0$ можно оценить с помощью выражения:

$$DEL0 = PR0 + WQ, \quad (6)$$

где $PR0$ – период отправки сообщений трекерами, находящимися в области местоположения 0 класса; WQ – время ожидания передачи сообщения из трекера на сетевой шлюз, обусловленное временным отсутствием свободных каналов.

Значение величины WQ можно оценить по формуле для вычисления длительности нахождения запроса в очереди многоканальной системы массового обслуживания:

$$WQ = \frac{\frac{(\lambda \cdot \tau)^n}{n!} \cdot \sum_{u=n}^{n+m} \left(\frac{\lambda \cdot \tau}{n} \right)^{u-n}}{\left(\frac{(\lambda \cdot \tau)^n}{n!} \cdot \sum_{u=1}^m \left(\frac{\lambda \cdot \tau}{n} \right)^u + \sum_{x=0}^n \left(\frac{\lambda \cdot \tau}{x!} \right)^x \right) \cdot \left(\frac{n}{\tau} - \lambda \right)}, \quad (7)$$

где λ – суммарная интенсивность передачи сообщений трекерами на сетевой шлюз; τ – среднее время приема одного сообщения; n – число каналов в сетевом шлюзе; m – максимальное число сообщений, которые могут находиться в ожидании отправки (освобождения каналов).

Суммарную интенсивность передачи сообщений трекерами на сетевой шлюз можно оценить с помощью выражения:

$$\lambda = \frac{N1}{PR1} + \frac{N - N1}{PR0}, \quad (8)$$

где $PR1$ – период отправки сообщений трекерами, находящимися в областях местоположения 1, 2 или 3 классов.

Кроме того, чтобы обеспечить особое наблюдение за животными, находящимися за пределами области местоположения 0 класса, необходимо выполнение условия:

$$DEL1 \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $DEL1$ – интервал времени между моментами доставки на панель оператора данных, отправляемых трекером, находящимся в области местоположения 1, 2 или 3 классов.

Оценить величину $DEL1$ можно с помощью выражения:

$$DEL1 = PR1 + WQ. \quad (10)$$

Далее необходимо обосновать значения периодов $PR0$ и $PR1$, при которых будут выполняться условия (5) и (9). Такое обоснование можно сделать, проведя вычислительные эксперименты с использованием представленных выше выражений.

Результаты вычислительных экспериментов

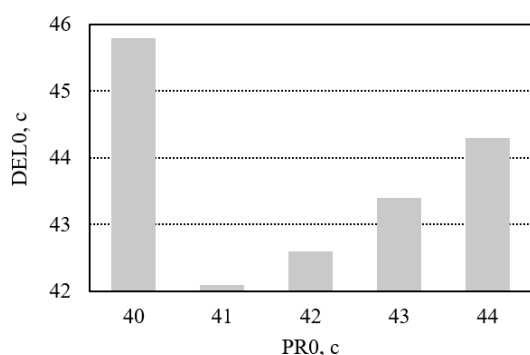
В табл. 1 содержатся исходные данные, при которых в ходе проведения вычислительных экспериментов получены следующие значения: $T01 = 41,9$ с и $D2 = 128,8$ м.

Для указанных исходных данных проведены вычислительные эксперименты, результаты которых показаны в виде диаграмм на рис. 2–7.

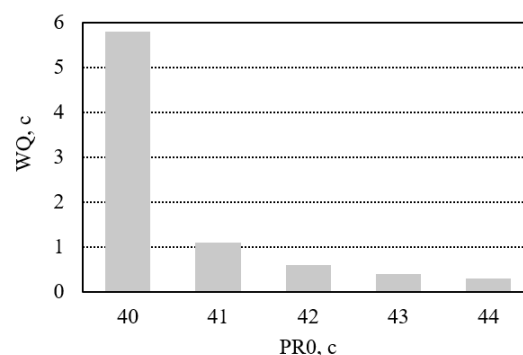
Таблица 1
Table 1

Исходные данные
Initial data

№ п/п	Величины	Значения	Единицы измерения
1	N	1000	-
2	$N1$	20	-
3	AR	100	m^2
4	R	412	m
5	VCM	2,5	m/c
6	VU	16	m/c
7	n	16	-
8	m	1000	-
9	τ	0,6	c



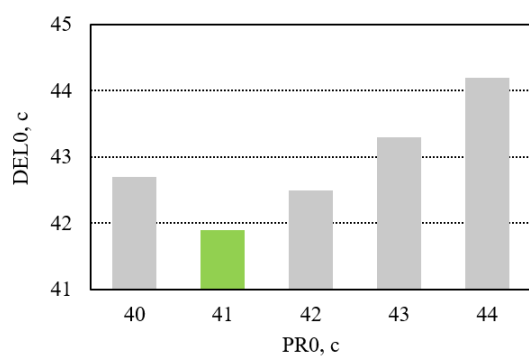
а)



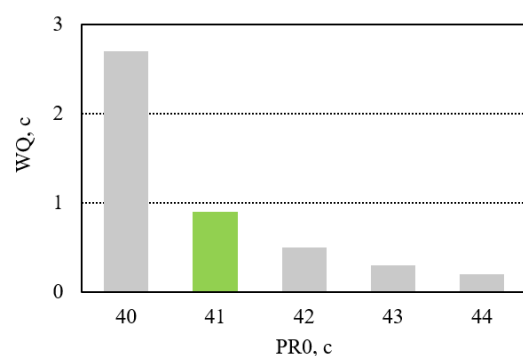
б)

Рис. 2. Диаграммы зависимости величины $DEL0$ (а) и величины WQ (б) от значений $PR0$ при $PR1 = 10$ с

Fig. 2. Diagrams of the dependence of the value $DEL0$ (а) and the value WQ (б) on the values $PR0$ at $PR1 = 10$ s



а)



б)

Рис. 3. Диаграммы зависимости величины $DEL0$ (а) и величины WQ (б) от значений $PR0$ при $PR1 = 11$ с

Fig. 3. Diagrams of the dependence of the value $DEL0$ (а) and the value WQ (б) on the values $PR0$ at $PR1 = 11$ s

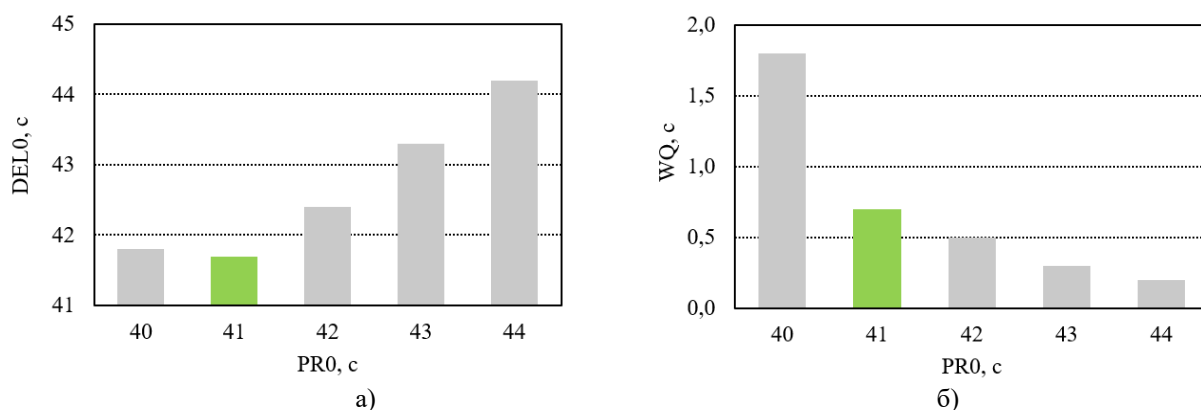


Рис. 4. Диаграммы зависимости величины $DEL0$ (а) и величины WQ (б) от значений $PR0$ при $PR1 = 12$ с

Fig. 4. Diagrams of the dependence of the value $DEL0$ (a) and the value WQ (б) on the values $PR0$ at $PR1 = 12$ s

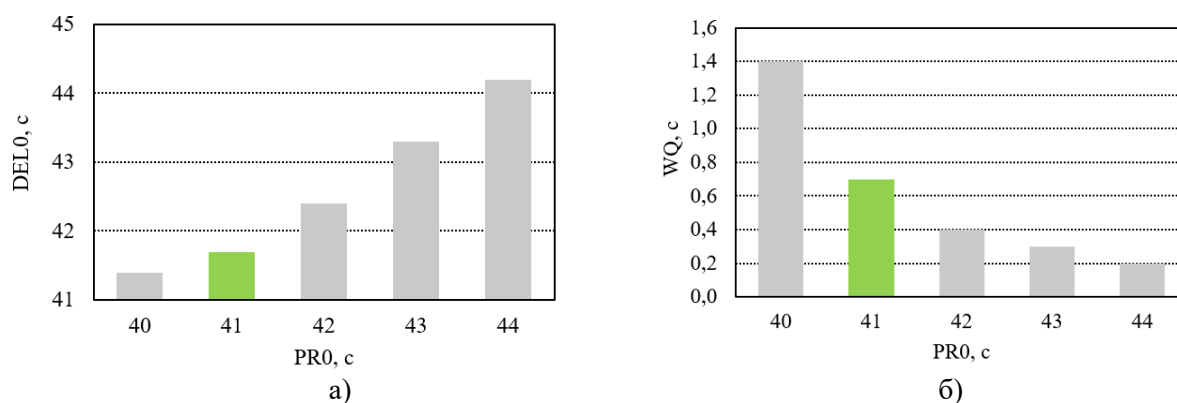


Рис. 5. Диаграммы зависимости величины $DEL0$ (а) и величины WQ (б) от значений $PR0$ при $PR1 = 13$ с

Fig. 5. Diagrams of the dependence of the value $DEL0$ (a) and the value WQ (б) on the values $PR0$ at $PR1 = 13$ s

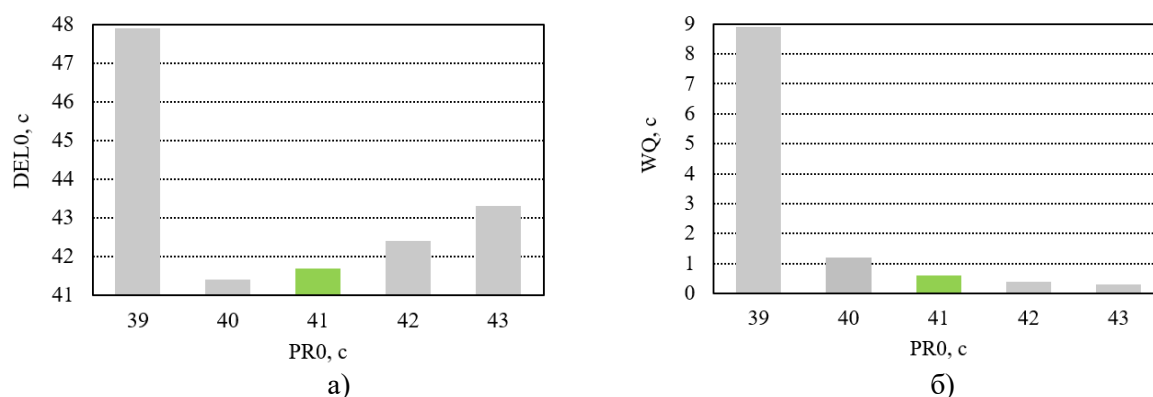


Рис. 6. Диаграммы зависимости величины $DEL0$ (а) и величины WQ (б) от значений $PR0$ при $PR1 = 14$ с

Fig. 6. Diagrams of the dependence of the value $DEL0$ (a) and the value WQ (б) on the values $PR0$ at $PR1 = 14$ s

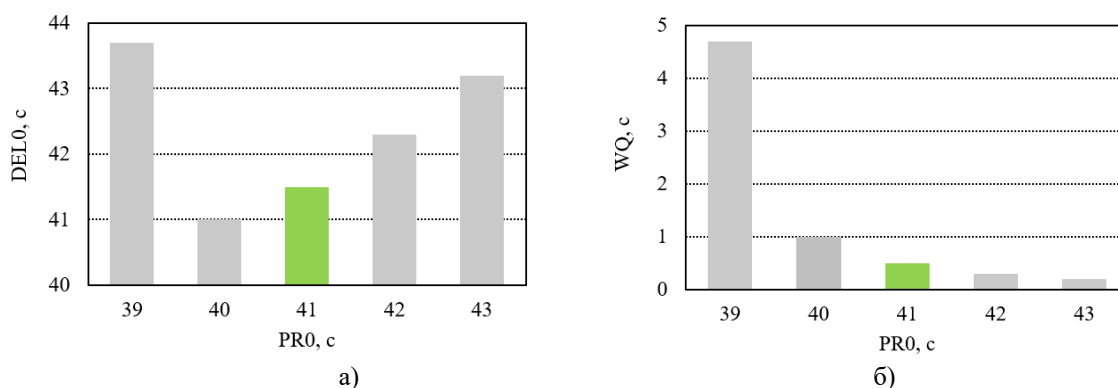


Рис. 7. Диаграммы зависимости величины $DEL0$ (а) и величины WQ (б) от значений $PR0$ при $PR1 = 15$ с

Fig. 7. Diagrams of the dependence of the value $DEL0$ (a) and the value WQ (b) on the values $PR0$ at $PR1 = 15$ s

Анализ данных диаграмм показывает, что условие (5) выполняется при $PR0 = 41$ с и $PR1 > 10$ с. Для обоснования выбираемого значения $PR1$ построена диаграмма, показанная на рис. 8. Из этой диаграммы видно, что условие (9) выполняется при $PR1 = 11$ с.

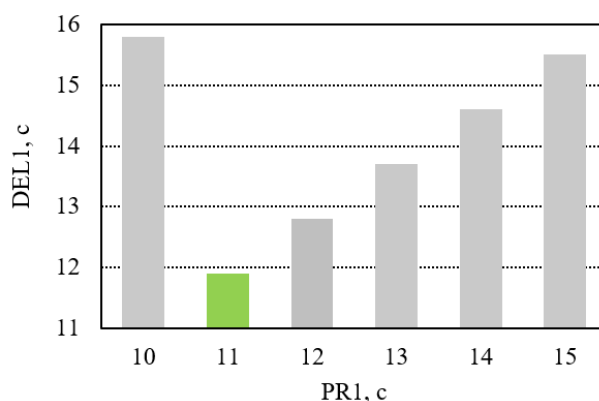


Рис. 8. Диаграммы зависимости величины $DEL1$ от значений $PR1$ при $PR0 = 41$ с

Fig. 8. Diagrams of the dependence of the value $DEL1$ on the values $PR1$ at $PR0 = 41$ s

Допустим, животное оказалось на границе местоположения 1 класса. Тогда, чтобы не пропустить перемещение животного в область местоположения 2 класса и своевременно отправить мультикоптер для обеспечения его безопасности, необходимо при интервале $DEL1$ между моментами доставки сообщений иметь расстояние от границы местоположения 1 класса до границы местоположения 2 класса не менее

$$D1 = VCM \cdot DEL1. \quad (11)$$

Наконец, расстояние от границы местоположения 0 класса до границы местоположения 1 класса можно оценить как разность

$$D0 = D01 - D1. \quad (12)$$

При обоснованных выше значениях $PR0 = 41$ с и $PR1 = 11$ с, используя выражения (6), (10)–(12), получим: $DEL0 = 41,9$ с; $DEL1 = 11,9$ с; $D1 = 29,7$ м; $D0 = 75,1$ м.

Таким образом, использование представленных выше выражений дает возможность для различных классов местоположения контролируемых животных обосновать значения периода отправки сообщений трекерами на панель управления оператора.

Заключение

В статье для управления выпасом животных предложено выполнение следующих процедур:

- 1) с помощью размещенных на животных GPS-трекеров определяется текущее местоположение каждой выпасаемой особи;
- 2) с использованием сети интернета вещей геопозиционные данные передаются на панель управления оператора-пастуха;
- 3) в случаях обнаружения опасного местоположения животных оператором-пастухом используется мультикоптер, с помощью которого выпасаемые особи направляются в безопасную часть пастбища.

Разработана модель доставки сообщений в процессе управления выпасом животных на основе применения сети интернета вещей и беспилотного летательного аппарата (мультикоптера). Научная новизна модели состоит в учете влияния параметров пастбища, контролируемого стада, мультикоптера и применяемых беспроводных устройств на значения временных интервалов между моментами доставки данных, отправляемых размещенными на животных трекерами на панель оператора. Предложенная модель базируется на оригинальной классификации местоположения контролируемых объектов. В зависимости от удаленности до границы пастбища различаются четыре класса местоположения животных. Применение разработанной модели позволяет обосновать такие значения периода отправки сообщений трекерами, при которых обеспечивается своевременное использование мультикоптера для управления местоположением животных.

Дальнейшие исследования в рамках представленной тематики планируется посвятить разработке алгоритма выбора значений периода отправки геопозиционных сообщений, функционирующего на основе предложенной модели.

Список литературы

- Балакшин М.С., Польщиков К.А. 2024. Оценивание характеристик доставки данных в системе промышленного Интернета вещей. *Современные наукоемкие технологии*, 8: 35–40. DOI 10.17513/snt.40109.
- Башилов А.М., Королев В.А. 2023. Аэромобильные устройства в технологиях пастбищного животноводства. *Вестник аграрной науки Дона*, 16(1): 54–65. DOI: 10.55618/20756704_2023_16_1_54-65.
- Джамил К.Дж.К., Лихошерстов Р.В., Польщиков К.А. 2022. Модель передачи видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети. *Экономика. Информатика*, 49(2): 403–415. DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415.
- Константинов И.С., Пилипенко О.В., Польщиков К.А., Иващук О.Д. 2016. К вопросу обеспечения связи в процессе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах строительства. *Строительство и реконструкция*, 1(63): 40–46.
- Константинов И.С., Польщиков К.А., Лазарев С.А. 2015. Имитационная модель передачи информационных потоков в мобильной радиосети специального назначения. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*, 13 (210): 156–163.
- Кузьмина Т.Н., Кузьмин В.Н. 2021. Технические разработки для механизации овцеводства. *Техника и технологии в животноводстве*, 2(42): 53–58. DOI 10.51794/27132064-2021-2-53.
- Польщиков К.А. 2015. Оценка вероятностно-временных характеристик доставки данных в беспроводной самоорганизующейся сети. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика*, 7(204): 183–187.
- Шигимага В.А., Файзуллин Р.А., Осокина А.С. 2023. Обоснование параметров беспилотной системы для автоматизированного мониторинга животных на пастбище. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 24(1): 132–140. DOI 10.30766/2072-9081.2023.24.1.132-140.
- Ясир М.Д.Я., Польщиков К.А., Федоров В.И. 2023. Модель доставки сообщения в сенсорной сети с низким энергопотреблением. *Экономика. Информатика*, 50(2): 439–447. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447.

- Afrianto I., Wahjuni S., Djatna T. 2020. Model of Ubiquitous Precision Livestock System 4.0: A Technological Review. *Proceedings of the 2nd Faculty of Industrial Technology International Congress International Conference*. Bandung: 156-162.
- Alipio M., Chaguile C.C., Bures M. 2024. A review of LoRaWAN performance optimization through cross-layer-based approach for Internet of Things. *Internet of Things*, 28: 101378. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101378.
- Alipio M., Bures M. 2024. Current testing and performance evaluation methodologies of LoRa and LoRaWAN in IoT applications: Classification, issues, and future directives. *Internet of Things*, 25: 101053. DOI: 10.1016/j.iot.2023.101053.
- El-Fiqi H., Kasmarik K., Abbass H.A. 2021. Logical Shepherd Assisting Air Traffic Controllers for Swarm UAV Traffic Control Systems. *Unmanned System Technologies*. DOI: 10.1007/978-3-030-60898-9_1.
- Hamandi M., Usai F., Sablé Q., Staub N., Tognon M., Franchi A. 2021. Design of multirotor aerial vehicles: A taxonomy based on input allocation. *The International Journal of Robotics Research*, 40(8-9): 1015–1044. DOI: 10.1177/02783649211025998.
- Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchykov K.A., Lazarev S.A., Likhoshesterov R.V., Kiselev V.E. 2022. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(6): 84–95.
- Mahdi T.N., Jameel J.Q., Polshchykov K.A., Lazarev S.A., Polshchykov I.K., Kiselev V.E. 2021. Clusters partition algorithm for a self-organizing map for detecting resource-intensive database inquiries in a geo-ecological monitoring system/ *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(4): 1138–1145. DOI 10.21533/pen.v10i1.2584.
- Montalván S., Arcos P., Sarzosa P., Rocha R.A., Yoo S.G., Kim Y. 2024. Technologies and Solutions for Cattle Tracking: A Review of the State of the Art. *Sensors*, 24(19): 6486. DOI 10.3390/s24196486.
- Lee C., Kim S., Chu B. 2021. A Survey: Flight Mechanism and Mechanical Structure of the UAV. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22: 719–743. DOI 10.1007/s12541-021-00489-y.
- Li X., Huang H., Savkin A.V., Zhang J. 2022. Robotic Herding of Farm Animals Using a Network of Barking Aerial Drones. *Drones*, 6(2): 29. DOI: 10.3390/drones6020029.
- Peksa J., Mamchur D. 2024. A Review on the State of the Art in Copter Drones and Flight Control Systems. *Sensors*, 24(11): 3349. DOI: 10.3390/s24113349.
- Priyadharshini S.P., Balamurugan P. 2022. Unmanned Aerial Vehicle in the Smart Farming Systems: Types, Applications. *IEEE Xplore*. DOI: 10.1109/ICSES55317.2022.9914070.
- Subramaniam K., Salim W.S.-I.W. 2024. A Review of Experimental Approaches for Investigating the Aerodynamic Performance of Drones and Multicopters. *Journal of Advanced Research in Experimental Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 14(1): 1–24. DOI 10.37934/arefmht.14.1.124.
- Yaxley K.J., Joiner K.F., Abbass H. 2021. Drone approach parameters leading to lower stress sheep flocking and movement: sky shepherding. *Scientific Reports*, 11: 7803. DOI 10.1038/s41598-021-87453-y.
- Yaxley K.J., Reid A., Kenworthy C., Hossny M., Baxter D.P., Allworth M.B., McGrath S.R., Joiner K.F., Abbass H. 2023. Building a Sky Shepherd for the future of agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 3: 100137.
- Yaser M.J., Polshchykov K.A., Polshchikov I.K. 2023. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 11(4): 168–174. DOI 10.21533/pen.v11i4.3779.

References

- Balakshin M.S., Polshchykov K.A. 2024. Assessing data delivery characteristics in industrial internet of things system. *Modern High Technologies*, 8: 35–40 (in Russian). DOI: 10.17513/snt.40109.
- Bashilov A.M., Korolev V.A. 2023. Airmobile devices in technologies for pasture animal farming. *Don agrarian science bulletin*, 16(1): 54–65 (in Russian). DOI: 10.55618/20756704_2023_16_1_54-65.
- Jameel K.J.Q., Likhoshesterov R.V., Polshchikov K.A. 2022. Model of Video Streams Transmission in a Flying Ad Hoc Network. *Economics. Information technologies*, 49(2): 403–415 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415.
- Konstantinov I., Pilipenko O., Polshchykov K., Ivashchuk O. The issue of communication in the process of prevention and liquidation of emergency situations at construction sites. *Construction and re-construction*, 1(63): 40–46 (in Russian).

- Konstantinov I.S., Polshchikov K.A., Lazarev S.A. 2015. Simulation model of information flows transmission in mobile ad-hoc network for special purpose. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies*, 13 (210): 156–163. (in Russian).
- Kuzmina T.N., Kuzmin V.N. 2021. Technical developments for sheep farming mechanization. *Machinery and technologies in livestock*, 2 (42): 53–58. (in Russian). DOI 10.51794/27132064-2021-2-53.
- Polshchikov K.A. 2015. Probability-time characteristics estimates of data delivery in the wireless ad hoc network. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies*, 7 (204): 183–187. (in Russian).
- Shigimaga V.A., Fayzullin R.A., Osokina A.S. 2023. The substantiation of the parameters of an unmanned system for automated monitoring of animals on pasture. *Agricultural Science Euro-North-East*, 24 (1): 132–140. ((in Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.1.132-140.
- Yaser M.J.Y., Polshchikov K.A., Fedorov V.I. 2023. Message Delivery Model in a LowPower Sensor Network. *Economics. Information technologies*, 50(2): 439–447 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447.
- Afianto I., Wahjuni S., Djatna T. 2020. Model of Ubiquitous Precision Livestock System 4.0: A Technological Review. Proceedings of the 2nd Faculty of Industrial Technology International Congress International Conference. Bandung: 156-162.
- Alipio M., Chaguile C.C., Bures M. 2024. A review of LoRaWAN performance optimization through cross-layer-based approach for Internet of Things. *Internet of Things*, 28: 101378. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101378.
- Alipio M., Bures M. 2024. Current testing and performance evaluation methodologies of LoRa and LoRaWAN in IoT applications: Classification, issues, and future directives. *Internet of Things*, 25: 101053. DOI: 10.1016/j.iot.2023.101053.
- El-Fiqi H., Kasmarik K., Abbass H.A. 2021. Logical Shepherd Assisting Air Traffic Controllers for Swarm UAV Traffic Control Systems. *Unmanned System Technologies*. DOI: 10.1007/978-3-030-60898-9_1.
- Hamandi M., Usai F., Sablé Q., Staub N., Tognon M., Franchi A. 2021. Design of multirotor aerial vehicles: A taxonomy based on input allocation. *The International Journal of Robotics Research*, 40(8-9): 1015–1044. DOI: 10.1177/02783649211025998.
- Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Likhoshesterov R.V., Kiselev V.E. 2022. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10(6): 84–95.
- Mahdi T.N., Jameel J.Q., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Polshchikov I.K., Kiselev V.E. 2021. Clusters partition algorithm for a self-organizing map for detecting resource-intensive database inquiries in a geo-ecological monitoring system/ *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(4): 1138–1145. DOI 10.21533/pen.v10i1.2584.
- Montalván S., Arcos P., Sarzosa P., Rocha R.A., Yoo S.G., Kim Y. 2024. Technologies and Solutions for Cattle Tracking: A Review of the State of the Art. *Sensors*, 24(19): 6486. DOI 10.3390/s24196486.
- Lee C., Kim S., Chu B. 2021. A Survey: Flight Mechanism and Mechanical Structure of the UAV. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22: 719–743. DOI 10.1007/s12541-021-00489-y.
- Li X., Huang H., Savkin A.V., Zhang J. 2022. Robotic Herding of Farm Animals Using a Network of Barking Aerial Drones. *Drones*, 6(2): 29. DOI: 10.3390/drones6020029.
- Peksa J., Mamchur D. 2024. A Review on the State of the Art in Copter Drones and Flight Control Systems. *Sensors*, 24(11): 3349. DOI: 10.3390/s24113349.
- Priyadharshini S.P., Balamurugan P. 2022. Unmanned Aerial Vehicle in the Smart Farming Systems: Types, Applications. IEEE Xplore. DOI: 10.1109/ICSES55317.2022.9914070.
- Subramaniam K., Salim W.S.-I.W. 2024. A Review of Experimental Approaches for Investigating the Aerodynamic Performance of Drones and Multicopters. *Journal of Advanced Research in Experimental Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 14(1): 1–24. DOI 10.37934/arefmht.14.1.124.
- Yaxley K.J., Joiner K.F., Abbass H. 2021. Drone approach parameters leading to lower stress sheep flocking and movement: sky shepherding. *Scientific Reports*, 11: 7803. DOI 10.1038/s41598-021-87453-y.
- Yaxley K.J., Reid A., Kenworthy C., Hossny M., Baxter D.P., Allworth M.B., McGrath S.R., Joiner K.F., Abbass H. 2023. Building a Sky Shepherd for the future of agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 3: 100137.
- Yaser M.J., Polshchikov K.A., Polshchikov I.K. 2023. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 11(4): 168–174. DOI 10.21533/pen.v11i4.3779.



Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 31.01.2025

Поступила после рецензирования 28.02.2025

Принята к публикации 04.03.2025

Received January 31, 2025

Revised February 28, 2025

Accepted March 04, 2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Карви Джалал Каис Джамил, магистр наук, преподаватель Университета Мустансирия, г. Багдад, Ирак

Польшиков Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных и робототехнических систем, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Маматов Михаил Евгеньевич, аспирант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Голдобин Денис Анатольевич, аспирант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karwi Jalal Qais Jameel, MSc, Assistant Lecturer of the Mustansiriyah University, Baghdad, Iraq

Konstantin A. Polshchykov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information and Robotic Systems, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Mikhail E. Mamatov, Postgraduate Student, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Denis A. Goldobin, Postgraduate Student, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia