

## Архитектура и модель беспроводной сенсорной сети сельскохозяйственного назначения

*А.Я. Номерчук<sup>1</sup>, В.Е. Самчинский<sup>2</sup>, В.В. Соловьев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

<sup>2</sup>*ООО «Агрометеолаб», Таганрог*

**Аннотация:** В работе описан состав беспроводной сенсорной сети сельскохозяйственного назначения, включая сенсорный узел, узел-актуатор и узел-координатор. На основе стандарта IEEE 802.15.4 предложена гибридная архитектура сети с синхронизацией узлов через механизм тайм-слотов. Предложена модель беспроводной сенсорной сети, включающая формирующие функции узлов, что позволяет отказаться от матрицы энергетических характеристик и описать элементы сети в упрощенном виде.

**Ключевые слова:** беспроводная сенсорная сеть, сенсорный узел, узел-координатор, структура сети, архитектура беспроводного узла, параметры беспроводной сети, модель сети.

### 1. Введение

За последние десять лет беспроводные сенсорные сети развиваются большими темпами. Они применяются при решении задач мониторинга параметров окружающей среды, контроля перемещения рабочих на производстве, обеспечения безопасности людей, мониторинга перемещения городского транспорта и прочих.

Обычно элементарной единицей беспроводной сенсорной сети является беспроводное автономное устройство с аккумулятором, которое измеряет один или несколько параметров и передает результаты измерений на облачный сервис. В качестве чувствительных элементов в узле сети могут применяться сенсоры температуры, влажности, давления, присутствия, освещенности, механического напряжения, веса и т.п.

Одной из перспективных сфер применения беспроводных сенсорных сетей (БСС) является животноводство и сельское хозяйство [1, 2]. В животноводстве БСС позволяют контролировать выпас скота, вплоть до построения траекторий движения отдельных животных или измерять параметры температуры, давления и пульса для отслеживания здоровья в поголовье. В сельском хозяйстве БСС позволяют контролировать параметры

температуры, влажности и давления воздуха, что обеспечивает оптимальные микроклиматические параметры и, как следствие, приводит к повышенным урожаям сельскохозяйственных культур [3]. Отдельной сферой применения БСС в сельском хозяйстве может стать автоматизация полива посевов по показаниям беспроводных датчиков влажности почвы [4], что не нашло еще широкого распространения в частных хозяйствах из-за высокой стоимости измерительных узлов и низкой автономности, что влечет за собой частую замену элементов питания. При этом, увеличение численности населения приводит к необходимости совершенствования и оптимизации методов выращивания сельскохозяйственных культур. Таким образом, исследования в сфере БСС, ориентированные на сельское хозяйство, являются актуальными и востребованными.

Задачам описания и оптимизации БСС посвящены многочисленные публикации. Например, в работе [5] решается задача кластеризации в БСС с применением нечеткой логики, ориентированная на повышение энергетической эффективности сети. В статье [6] описана структура БСС и рассмотрены вопросы передачи данных между узлами с применением натуральных экспериментов. Статья [7] посвящена разработке сети беспроводных датчиков, предназначенных для мониторинга угарного газа на промышленных предприятиях и для бытовых целей. Предложена структура и алгоритм опроса узлов для снижения энергопотребления сети. В статье [8] предложена модель и алгоритм управления передачей информации в БСС. Модель основана на теории гиперграфов с учетом кластеризации сегментов сети. Представлен алгоритм для выбора узла, координирующего информационные потоки между кластерами и учитывающего пороговые значения затрачиваемой энергии. В работах [9, 10] уделено внимание задачи снижения энергопотребления в сетях с беспроводными датчиками.

---

По результатам обзора публикаций можно сделать выводы, касающиеся темы исследования:

- при разработке БСС необходимо определить ее архитектуру, ориентированную на сферу применения;

- большинство моделей БСС строятся на основе графовых методов.

Целью работы является разработка модели БСС для применения в системах автоматического полива.

## 2. Состав БСС

Рассмотрим основные составляющие БСС.

Сенсор – устройство, воспринимающее внешнее воздействие, измеряющее его характеристики и преобразующее в измерительный сигнал. В системах автоматического полива целесообразно использовать сенсоры влажности и температуры почвы и воздуха для оперативного измерения параметров.

Актуатор или исполнительный механизм – устройство, реагирующее на поступивший сигнал и изменяющее состояние управляемого объекта. В актуаторах энергия преобразуется из одного вида в другой, например, напряжение частоту вращения. В системах автоматического полива актуаторы представляют собой поворотные клапаны с приводами, которые по сигналам от сенсоров перераспределяют потоки воды между посевами.

Сенсорный узел – устройство, оснащенное одним или несколькими сенсорами параметров окружающей среды и почвы и устройством для передачи информации по сети, включая беспроводные каналы связи.

Узел-координатор – устройство, осуществляющее сбор информации с сенсорных узлов, выдачу информации на узлы-актуаторы и поддерживающее структуру сети за счет маршрутизации пакетов данных.

Сенсорная сеть – совокупность взаимосвязанных сенсорных узлов, узлов-актуаторов и узла координатора, предназначенная для сбора и

---

передачи информации об окружающей среде и формировании реакции на полученную информацию (см. рис. 1).

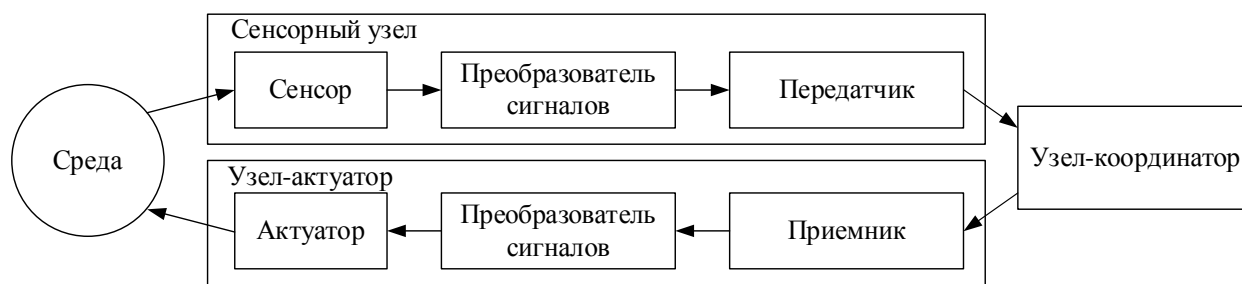


Рис. 1 – Процесс сбора и обработки информации в БСС

В соответствии с постановкой задачи область покрытия сенсорной сети будет относительно небольшой. Если в БСС могут использоваться различные маршруты передачи информации к узлу-координатору, например, при переменной доступности узлов, то можно говорить о самоорганизующейся сенсорной сети. БСС является основой интеллектуальной системы контроля и управления.

В составе беспроводного сенсорного узла БСС можно выделить следующие подсистемы:

- коммуникационная, обеспечивает связь с другими узлами БСС;
- вычислительная, обеспечивает обработку информации;
- сенсорная, обеспечивающая измерение параметров среды;
- электропитания, обеспечивающая питанием все остальные подсистемы узла.

### 3. Архитектура БСС

В БСС сельскохозяйственного назначения можно отметить низкие скорости передачи данных и относительно маленькие масштабы развертывания сети. Таким образом, архитектура БСС сельскохозяйственного назначения определяется спецификацией IEEE 802.15.4 [11], описывающей передачу данных в беспроводных низкоскоростных сенсорных сетях и их конфигурации. Стандартом

определены скорости передачи данных между узлами сети от 20 до 250 кбит/с и расстояниями до 100 метров.

Согласно данной спецификации, различают устройства двух типов: FFD и RFD. FFD (Full-Function Device) является устройством, которое может являться узлом-координатором, сенсорным узлом или узлом-актуатором. В противовес ему, RFD (Reduced-Function Device) представляет собой устройство, которое реализует только одну из функций элементов сети. Очевидно, что узлы FFD, могут организовывать связь между любыми узлами сети, а узлы RFD, могут взаимодействовать только с FFD-узлами. В соответствии с спецификацией IEEE 802.15.4 беспроводная сенсорная сеть должна содержать хотя бы одно FFD-устройство. В спецификации указано, что БСС может быть построена на основе топологии «звезда» или одноранговой топологии. В одном и в другом случае в сети существует узел PAN, который отвечает за маршрутизацию пакетов между узлами сети.

В соответствии с рассмотренными особенностями спецификации IEEE 802.15.4 для реализации БСС сельскохозяйственного назначения целесообразно использовать гибридную топологию сети. Это обусловлено относительно небольшой дальностью передачи данных узлами, что требует увеличения области покрытия сети за счет организации промежуточных транспортных каналов к узлу-координатору. Кроме того, это позволит объединить несколько БСС в одну сеть. С позиции сельскохозяйственного применения несколько БСС могут быть развернуты, например, в группе теплиц и объединиться в гибридной топологии для сбора данных в единый центр управления, как представлено на рис 2.

Учитывая относительно небольшое количество узлов в БСС проще реализовать безмаячковую технологию передачи данных и обеспечить синхронизацию сети через механизм тайм-слотов. Это позволит лучше

---

использовать возможности по переводу узлов в спящий режим и, как следствие, повысить энергетические характеристики сети.

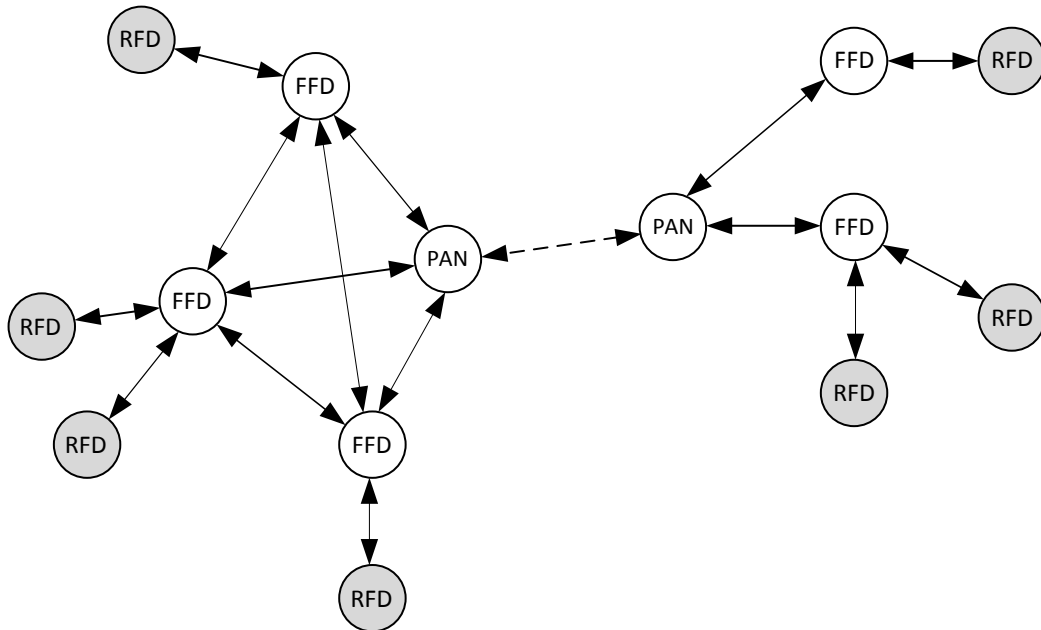


Рис. 2. – Архитектура БСС сельскохозяйственного назначения

#### 4. Модель БСС

При описании модели БСС будем использовать теоретико-множественное представление.

Запишем модель БСС в виде кортежа:

$$W = \langle N_s, N_r, N_c, C_s, K, D \rangle.$$

Обозначения элементов кортежа расписаны ниже.

Пусть сенсорные узлы БСС описываются множеством:

$$N_s = \{n_1, n_2, \dots, n_{ms}\},$$

где  $ms$  – количество сенсорных узлов.

Узлы-актуаторы описываются множеством:

$$N_r = \{n_1, n_2, \dots, n_{mr}\},$$

где  $mr$  – количество узлов-актуаторов.

Узлы-координаторы описываются множеством:

$$N_c = \{n_1, n_2, \dots, n_{mc}\},$$

где  $mc$  – количество узлов-координаторов.

Тогда множество всех узлов в БСС определяется:

$$N = N_s \cup N_r \cup N_c.$$

Общее количество узлов в сети:

$$m = ms + mr + mc.$$

Обозначим множество всевозможных допустимых информационных связей в сети через  $C_s: C_s \subseteq N_s \times N_r \times N_c$ , которые определяют последовательность возможных конфигураций БСС с привязкой ко времени:

$$K = (\langle c_1, t_1 \rangle, \langle c_2, t_2 \rangle, \dots, \langle c_e, t_e \rangle),$$

где  $c_i \in C_s$  – текущая конфигурация;  $t_i$  – период использования текущей конфигурации.

Пространственное размещение узлов БСС определяется матрицей:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

где  $d_{ij}$  – дистанция между узлами.

Очевидно, что матрица  $D$  является симметричной относительно главной диагонали.

Каждый узел сети можно определить массивом характеристик:

$$n_i = [e_{i0}, \bar{p}_i, f_i, p_{ni}, p_{di}],$$

где  $e_i$  – начальная энергия узла;  $\bar{p}_i$  – средняя потребляемая мощность в единицу времени;  $f_i$  – формирующая функция  $F$ , которая определяет

профиль энергопотребления узла в зависимости от его настроек  $\rho$ , конфигурации сети  $K_j$  и дистанций до соседних узлов  $D_{ij}$  ( $f_i = F(\rho, K_j, D_{ij})$ );  $p_{ni}$  – вероятность помехи в канале связи при передаче данных;  $p_{di}$  – вероятность выхода узла из строя.

Отличительной особенностью предложенной модели БСС является использование формирующей функции узла, что исключает матрицу энергетических характеристик, зависящую от возможных конфигураций сети, и позволяет описать каждый узел в упрощенном виде.

### Заключение

Внедрение цифровых технологий в сельскохозяйственную сферу уже доказало свою эффективность при разработке «Умных» теплиц, планировании движения посевной техники, контроле перемещения зерноуборочных машин, автоматизации полива и внесения удобрений и т.п.

В данной работе обоснована архитектура БСС, основываясь на спецификации IEEE 802.15.4, что позволяет разрабатывать сети небольшого радиуса действия, ориентированные на сельскохозяйственное применение для решения задач автоматического полива с обратной связью по влажности почвы. Авторами предложена модель БСС с применением формирующей функции узла, позволяющей исключить матрицу энергетических характеристик и существенно упрощающую разработку сети. При этом, представленная модель допускает простую программную реализацию узлов при проведении компьютерных экспериментов.

*Работа выполнена при поддержке ФСИ в рамках проекта № 710ГССС15-Л/80854 «Интеллектуальная автономная метеостанция сельскохозяйственного назначения».*



## Литература

1. Тарханова О.Ю. Применение беспроводных сенсорных сетей в прецизионном сельском хозяйстве // Проблемы информатики. 2017. №4 (37). URL: [cyberleninka.ru/article/n/primenenie-besprovodnyh-sensornyh-setey-v-pretsizionnom-selskom-hozyaystve](http://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-besprovodnyh-sensornyh-setey-v-pretsizionnom-selskom-hozyaystve) (дата обращения: 17.11.2022).
  2. Dwarakanath A.R., Siuli B.S. Agro-sense: Precision agriculture using sensor-based wireless mesh networks // Innovations in NGN: Future Network and Services, 2008. 6 p.
  3. Brun-Laguna K., Diedrichs A., Dujovne D., Taffernaberry C., Leone R., et al.. Using SmartMesh IP in Smart Agriculture and Smart Building applications. Computer Communications, 2018. Vol. 121. pp.83-90.
  4. Tiglao N.M., Alipio M., Balanay J.V., Saldivar E., Tiston J.L. A low-cost wireless mesh-based smart irrigation system // Measurement, 2020. Vol. 161. 10 p.
  5. Аль-Наггар Я.М. Кластеризация в беспроводных сенсорных сетях // Научное рецензируемое издание научный электронный журнал Информационные технологии и телекоммуникации, 2015. Вып. 1(9). с. 4-18.
  6. Тараканов Е.В. Экспериментальные исследования протокола передачи данных с приоритетами в беспроводной сенсорной сети в системе TOSSIM // Известия Томского политехнического университета. 2012. т. 321. № 5. с. 223-227.
  7. Фон Ку Тхань Разработка и исследование беспроводной сенсорной сети для мониторинга угарного газа // МНИЖ. 2016. №6-2 (48). URL: [cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-issledovanie-besprovodnoy-sensornoy-seti-dlya-monitoringa-ugarnogo-gaza](http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-issledovanie-besprovodnoy-sensornoy-seti-dlya-monitoringa-ugarnogo-gaza) (дата обращения: 19.05.2023).
  8. Галкин П.В. Модель и алгоритм управления информационными потоками в беспроводной сенсорной сети // Наукові праці ДонНТУ Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка", 2015. №1 (20). с. 17-32.
-

9. Ясир М.Д.Я. К вопросу снижения энергопотребления беспроводных сенсорных узлов // Инженерный вестник Дона, 2023, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526.

10. Ясир М.Д.Я., Польщиков К.А. Оценивание энергопотребления узлов беспроводной сети датчиков // Инженерный вестник Дона, 2023, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8688.

11. Спецификация IEEE 802.15.4. URL: standards.ieee.org/ieee/802.15.4/5788/ (дата обращения: 23.05.2023).

### References

1. Tarhanova O. Ju. Problemy informatiki. 2017. №4 (37). URL: cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-besprovodnyh-sensornyh-setey-v-pretzionnom-selskom-hozyaystve (date accessed: 17.11.2022).

2. Dwarakanath A.R., Siuli B.S. Innovations in NGN: Future Network and Services, 2008. 6 p.

3. Brun-Laguna K., Diedrichs A., Dujovne D., Taffernaberry C., Leone R., et al.. Using SmartMesh IP in Smart Agriculture and Smart Building applications. Computer Communications, 2018. Vol. 121. pp.83-90.

4. Tiglao N.M., Alipio M., Balanay J.V., Saldivar E., Tiston J.L. Measurement, 2020. Vol. 161. 10 p.

5. Al'-Naggar Ja. M. Nauchnoe recenziruемое izdanie nauchnyj jelektronnyj zhurnal Informacionnye tehnologii i telekommunikacii, 2015. Vyp. 1(9). pp. 4-18.

6. Tarakanov E.V. Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2012. t. 321. № 5. pp. 223-227.

7. Fon Ku MNIZh. 2016. №6-2 (48). URL: cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-issledovanie-besprovodnoy-sensornoy-seti-dlya-monitoringa-ugarnogo-gaza (data obrashhenija: 19.05.2023).

8. Galkin P.V. Naukovi praci DonNTU Serija "Informatika, kibernetika ta obchisljuval'na tehnika", 2015. №1 (20). pp. 17-32.



9. Jasir M.D.Ja. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №7. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526).
10. Jasir M.D.Ja., Pol'shhikov K.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8688](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8688).
11. Specifikacija [Specification] IEEE 802.15.4. URL: [standards.ieee.org/ieee/802.15.4/5788/](http://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/5788/) (data obrashhenija: 23.05.2023).