

APPLICATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS IN PRECISION AGRICULTURE

O. Y. Tarhanova

Novosibirsk State University,
630090, Novosibirsk, Russia

The paper gives an overview of the agricultural application of wireless sensor networks. It is one of the promising tools that allows to increase productivity per unit of resources expended and to ensure the reduction of unit cost of production. Nowadays, prices for seeds, fertilizers, equipment, plant protection products and other means of production in agriculture are rising. This leads to the need to improve the efficiency of their use.

The paper notes that wireless sensor networks (WSN) are currently developing intensively as an important segment of wireless networks and as the global Internet in general. This circumstance makes it possible to position technologies of WSN and the networks themselves as one of the system-forming components of the concept of „Internet-things“ and other technologies of digitalization of the agrarian sector, the constructive implementation of which in turn is a prerequisite for a „second green revolution“ — transition to „precision agriculture“. The agricultural domain is studied with respect to the application of WSNs in improving the traditional methods of farming. The ubiquitous nature of work and self-organizing small-sized nodes make it possible to use WSN as a potential tool for achieving the goal of automation in agriculture. More attention is paid to one of the most important agricultural areas — „precision agriculture“. Precision agriculture can be considered as an integrated high-tech crop management system that takes into account the variability of the plant habitat in the field. This system provides advanced means of recording and collecting data for monitoring the technological process and evaluating performance, automation and intellectualization of decision-making. On the example of „precision agriculture“ together with the WSN, the paper provides a list of other more commonly used basic tools (global positioning and geographic information systems, spatial information collection and satellite monitoring, remote sensing, data analysis, etc.).

It is emphasized that the miniaturization of electronic systems and development of wireless technologies contribute to the active implementation of the WSN. Modern technology can reduce the cost of miniature sensors with low power consumption and the possibility of extracting energy from the environment, while maintaining the required functionality. The WSN is characterized as a multi-node system where each node is an inexpensive device equipped with one or more sensors, a processor, a memory, a power supply and a transceiver. These nodes are able to perform preprogrammed algorithms, exchange data with other nodes and interact with the master node. The architecture of the sensor network depends on many factors, such as fault tolerance, working environment, scalability, production costs, hardware limitations, transmission facilities and power consumption. The paper deals with options for ground and underground wireless sensor networks, their opportunities for the development of various types of agriculture. In addition, there are discussed the sensor architectures and various sensors used in the applications. There are sensors that are used to record and control parameters such as temperature, humidity, soil moisture, soil acidity, barometric pressure and illumination, and other characteristics. The analysis of various variants of the classification of WSN architectures that are possible for agricultural application is given: a) relative to the movement of network devices and nodes (stationary, mobile and hybrid architectures); b) by the type of used sensory nodes and associated

devices (homogeneous and heterogeneous architectures); c) by the type of hierarchy (single-level and multi-level architecture).

The paper gives a brief overview of wireless technologies and standards that can be applied in agriculture (ZigBee — with network and application protocols based on IEEE 802.15.4 standards for wireless networks using low-power devices, WiMAX — a wireless standard related to Interoperational implementations of the IEEE 802.16 family of standards and others).

The paper also analyzes the main characteristics of the WSN, which enabled them to become a potential instrument of automation in the field of agriculture: the intellectual ability to make decisions; configuration of dynamic topology; fault tolerance; contextual awareness; scalability; tolerance to communication failures in harsh environmental conditions, heterogeneity of nodes, autonomous operation.

The final section of paper examines the existing examples of the application of wireless sensor networks in the world for various agricultural needs.

Key words: wireless sensor network, precision agriculture, sensor nodes, architecture, monitoring, agricultural applications.

References

1. Chen, N., Zhang, X., Wang, C. Integrated open geospatial web service enabled cyber-physical information infrastructure for precision agriculture monitoring // *Comput. Electron. Agric.* 2015. N 111, P. 78–91.
2. Misra, S., Krishna, P. V., Saritha, V., Agarwal, H., Shu, L., Obaidat, M. S. Efficient medium access control for cyber-physical systems with heterogeneous networks // *IEEE Syst. J.* 2015. N 9 (1), P. 22–30.
3. Gonzalez-de-Soto, M., Emmi, L., Benavides, C., Garcia, I., Gonzalez-de-Santos, P. Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture // *Biosystems Engineering*, 2016. V. 143, P. 79–94.
4. Maurya, S., Jain, V. 2016. Fuzzy based energy efficient sensor network protocol for precision agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. V. 130, P. 20–37.
5. Ngo, V., Woungang, I., Anpalagan, A., 2014. A schedule-based medium access control protocol for mobile wireless sensor networks // *Wirel. Commun. Mobile Comput.* 2016. N 14 (6). P. 629–643.
6. Foughali, K., Fathalah, K., Ali, F. Monitoring system using web of things in precision agriculture // *Procedia Computer Science*. 2017. V. 110. P. 402–409.
7. Misra, S., Kar, P., Roy, A., Obaidat, M. S., 2014. Existence of dumb nodes in stationary wireless sensor network // *J. Syst. Softw.* 2014. N 91. P. 135–146.
8. Qu, Y., Zhu, Y., Han, W., Wang, J., Ma, M. Crop leaf area index observations with a wireless sensor network and its potential for validating remote sensing products // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Rem. Sens.* 2014. N 7 (2). P. 431–444.
9. Shakhov, V. Experiment Design for Parameter Estimation in Sensing Models // *Springer LNCS*. 2013. V. 8072. P. 151–158.
10. Riquelme, J. A. L., Soto, F., Suardíaz, J., Sánchez, P., Iborra, A., Vera, J. A. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain // *Comput. Electron. Agric.* 2009. N 68 (1). P. 25–35.
11. Garcia-Sanchez, A. J., Garcia-Sanchez, F., Garcia-Haro, J. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops // *Comput. Electron. Agric.* 2011. N 75 (2). P. 288–303.
12. Camilli, A., Cugnasca, C. E., Saraiva, A. M., Hirakawa, A. R., Corrêa, P. L. From wireless sensors to field mapping: anatomy of an application for precision agriculture // *Comput. Electron. Agric.* 2007. N 58 (1). P. 25–36.

13. Behzadan, A., Anpalagan, A., Woungang, I., Ma, B., Chao, H. C. An energy efficient utility-based distributed data routing scheme for heterogeneous sensor networks // *Wirel. Commun. Mobile Comput.* 2014. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1002/wcm.2474>.
14. Dhurandher, S. K., Sharma, D. K., Woungang, I., Saini, A. Efficient routing based on past information to predict the future location for message passing in infrastructure-less opportunistic networks. *J. Supercomput.* 2014. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-014-1243-5>.
15. Postel, S. L. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead // *Ecol. Appl.* 1999. N 10. P. 941–948.
16. Bouwer, H. Integrated water management: emerging issues and challenges // *Agric. Water Manage.* 2000. N 45 (3). P. 217–228.
17. Saleth, R., Dinar, A. Institutional changes in global water sector: trends, patterns, and implications // *Water Policy.* 2000. N 2 (3). P. 175–199.
18. Jury, W. A., Vaux Jr., H. J. The emerging global water crisis: managing scarcity and conflict between water users // *Adv. Agron.* 2007. N 95. P. 1–76.
19. Falloon, P., Betts, R. Climate impacts on european agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation — the importance of an integrated approach // *Sci. Total Environ.* 2010. N 408 (23). P. 5667–5687.
20. Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., Foley, J. A. Closing yield gaps through nutrient and water management // *Nature.* 2012. N 490. P. 254–257.
21. J'son&PartnersConsulting, 2017. Communication technologies for the Internet of things in agriculture and the role of telecom operators. [El. Res.]: <https://clock.ru/CBqQd>.
22. Suprem, A., Mahalik, N., Kim, K. A review on application of technology systems, standard and interfaces for agriculture and food sector // *Comput. Stand. Interfaces.* 2013. N 35 (4). P. 355–364.
23. Wang, N., Zhang, N., Wang, M. Wireless sensors in agriculture and food industry — recent development and future perspective // *Comput. Electron. Agric.* 2006. N 50 (1). P. 1–14.
24. Hart, J. K., Martinez, K. Environmental sensor networks: a revolution in the earth system science // *Earth Sci. Rev.* 2006. N 78 (3–4). P. 177–191.
25. Burrell, J., Brooke, T., Beckwith, R. Vineyard computing: sensor networks in agricultural production // *IEEE Pervasive Comput.* 2004. N 3 (1). P. 38–45.
26. Diallo, O., Rodrigues, J. J. P. C., Sene, M., Mauri, J. L. Distributed database management techniques for wireless sensor networks // *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2015. N 26 (2). P. 604–620.
27. Srbinovska, M., Gavrovski, C., Dimcev, V., Krkoleva, A., Borozan, V. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks // *J. Clean. Prod.* 2015. N 88. P. 297–307.
28. Zhao, L., He, L., Jin, X., Yu, W. Design of wireless sensor network middleware for agricultural applications // *Proc. IFIP Adv. Inform. Commun. Technol.* 2013. N 393. P. 270–279.
29. Karim, L., Anpalagan, A., Nasser, N., Almhana, J. Sensor-based M2M agriculture monitoring systems for developing countries: state and challenges // *Netw. Protoc. Algor.* 2013. N 5 (3). P. 68–86.
30. Zhang, H., Shu, L., Rodrigues, J. J., Chieh Chao, H. Solving network isolation problem in duty-cycled wireless sensor networks // *Proceeding of the International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys).* 2013. P. 543–544.
31. Krishna, P. V., Saritha, V., Vedha, G., Bhiwal, A., Chawla, A. S., 2012. Quality-of-service-enabled ant colony-based multipath routing for mobile ad hoc networks // *IET Commun.* 2012. N 6 (1). P. 76–83.
32. Shakhov, V., Migov, D., Rodionov, A. Operation strategy for energy harvesting wireless sensor networks // *Proceedings of the ACM 9th Int. Conf. on Ubiquitous Information Management and Communication, New York, USA.* 2015.

33. Shakhov V. V., Yurgenson A. N., Sokolova O. D. Modeling the impact of the Black Hole attack on wireless networks // *Software products and systems*. 2017. N 1. P. 34–39.
34. Mirabella, O., Brischetto, M. A hybrid wired/wireless networking infrastructure for greenhouse management // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2011. N 60 (2). P. 398–407.
35. Gennaro, S., Matese, A., Gioli, B., Toscano, P., Zaldei, A., Palliotti, A., Genesisio, L. Multisensor approach to assess vineyard thermal dynamics combining high-resolution unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing and wireless sensor network (WSN) proximal sensing // *Scientia Horticulturae*. 2017. V. 221. P. 83–87.
36. Brewster, C., Roussaki, I., Kalatzis, N., Doolin, K., Ellis, K. IoT in Agriculture: Designing a Europe-Wide Large-Scale Pilot. 2017.
37. *IEEE Communications Magazine*. V. 55. N 9. P. 26–33.
38. Mat, I., Kassim, M., Harun, A., Yusoff, I., 2016. IoT in Precision Agriculture applications using Wireless Moisture Sensor Network // *Proceedings of IEEE Conference on Open Systems*. 2016. P. 24–29.
39. Shakhov V. V., Strel'nikov V. E., Nguyen V. D. To the question of the effectiveness of wireless sensor networks // *Problems of Informatics*. 2014. N 2 (23). P. 28–38.
40. Migov D. A. Reliability indicator for wireless self-organizing networks // *Bulletin of SibGUTI*. 2014. N 3 (27). P. 3–12.
41. Ojha, T., Bera, S., Misra, S., Raghuwanshi, N. S. Dynamic duty scheduling for green sensor-cloud applications // *Proceedings of IEEE CloudCom, Singapore*. 2014.
42. Misra, S., Krishna, P. V., Kalaiselvan, K., Saritha, V., Obaidat, M. S. Learning automata-based QoS framework for cloud IaaS // *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.* 2014. N 11 (1). P. 15–24.
43. Cho, Y., Cho, K., Shin, C., Park, J., Lee, E. S. An agricultural expert cloud for a smart farm // *Proceedings of Future Information Technology, Application, and Service. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer. V. 164. P. 657–662.
44. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. The internet of things: a survey // *Comput. Netw.* 2010. N 54 (15). P. 2787–2805.
45. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., Palaniswami, M. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions // *Future Gener. Comput. Syst.* 2013. N 29 (7). P. 1645–1660.
46. Moghaddam, M., Entekhabi, D., Goykhman, Y., Li, K., Liu, M., Mahajan, A., Nayyar, A., Shuman, D., Teneketzis, D. A wireless soil moisture smart sensor web using physics-based optimal control: concept and initial demonstrations // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Rem. Sens.* 2010. N 3 (4). P. 522–535.
47. Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., Makin, I. W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications // *Agric. Water Manage.* 2000. N 46 (2). P. 137–155.
48. Morais, R., Fernandes, M. A., Matos, S. G., Seródio, C., Ferreira, P. J. S. G., Reis, M. J. C. S. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture // *Comput. Electron. Agric.* 2008. N 62 (2). P. 94–106.
49. Ye, J., Chen, B., Liu, Q., Fang, Y. A precision agriculture management system based on Internet of Things and WebGIS // *Proceedings of International Conference on Geoinformatics*. 2013. P. 1–5.
50. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. A survey on sensor networks // *IEEE Commun. Mag.* 2002. N 40 (8). P. 102–114.
51. Shakhov, V. On Efficiency Improvement of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks // *Processing of IEEE 39th International Conference on Telecommunications and Signal, Vienna, Austria*, 2016. P. 56–59.
52. Akyildiz, I. F., Kasimoglu, I. H. Wireless sensor and actor networks: research challenges // *Ad Hoc Netw.* 2004. N 2 (4). P. 351–367.

53. Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D. Wireless sensor network survey // *Comput. Netw.* 2008. N 52 (12). P. 2292–2330.
54. Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., Barreiro, P., Robla, I. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends // *Sensors*. 2009. N 9 (6). P. 4728–4750.
55. Cambra, C., Díaz, J. R., Lloret, J. Deployment and performance study of an Ad Hoc network protocol for intelligent video sensing in precision agriculture // *Proceedings of Ad-Hoc Networks and Wireless. LNCS*. 2015. V. 8629. Springer, Berlin Heidelberg. P. 165–175.
56. Barcelo-Ordinas, J. M., Chanet, J. P., Hou, K. M., García-Vidal, J. A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture // *Stafford, J. (Ed.), Precision Agriculture'13. Wageningen Academic Publishers*. 2013. P. 801–808.
57. Baseca, C. C., Díaz, J. R., Lloret, J. Communication Ad Hoc protocol for intelligent video sensing using AR drones // *IEEE Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)*. 2013. P. 449–453.
58. Díaz, S. E., Pérez, J. C., Mateos, A. C., Marinescu, M. C., Guerra, B. B. A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks // *Comput. Electron. Agric.* 2011. N 76 (2). P. 252–265.
59. López, J. A., Garcia-Sanchez, A. J., Soto, F., Iborra, A., Garcia-Sanchez, F., Garcia-Haro, J. Design and validation of a wireless sensor network architecture for precision horticulture applications // *Precision Agric.* 2011. N 12 (2). P. 280–295.
60. Park, D. H., Kang, B. J., Cho, K. R., Shin, C. S., Cho, S. E., Park, J. W., Yang, W. M. A study on greenhouse automatic control system based on wireless sensor network // *Wirel. Pers. Commun.* 2011. N 56 (1). P. 117–130.
61. Matese, A., Gennaro, S. F. D., Zaldei, A., Genesio, L., Vaccari, F. P. A wireless sensor network for precision viticulture: the NAV system // *Comput. Electron. Agric.* 2009. N 69 (1). P. 51–58.
62. Lichtenberg, E., Majsztzik, J., Saavoss, M. Power demand for sensor controlled irrigation // *Water Resour. Res.* 2015. N 51. [Electron. Res]: <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR015807>.
63. Reche, A., Sendra, S., Díaz, J. R., Lloret, J. A smart M2M deployment to control the agriculture irrigation // *Proceedings of Ad-hoc Networks and Wireless, LNCS*. 2015. N 8629. P. 139–151.
64. Greenwood, D. J., Zhang, K., Hilton, H. W., Thompson, A. J. Opportunities for improving irrigation efficiency with quantitative models, soil water sensors and wireless technology // *J. Agric. Sci.* 2010. N 148. P. 1–16.
65. Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., Ángel Porta-Gándara, M. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2014. N 63 (1). P. 166–176.
66. Hwang, J., Shin, C., Yoe, H. A wireless sensor network-based ubiquitous paprika growth management system // *Sensors*. 2010. N 10. P. 11566–11589.
67. Corke, P., Wark, T., Jurdak, R., Hu, W., Valencia, P., Moore, D. Environmental wireless sensor networks // *Proc. IEEE*. 2010. N 98 (11). P. 1903–1917.
68. Voulodimos, A. S., Patrikakis, C. Z., Sideridis, A. B., Ntafis, V. A., Xylouri, E. M. A complete farm management system based on animal identification using RFID technology // *Comput. Electron. Agric.* 2010. N 70 (2). P. 380–388.
69. Malaver, A., Motta, N., Corke, P., Gonzalez, F. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases // *Sensors*. 2015. N 15 (2). P. 4072–4096.
70. Yang, H., Qin, Y., Feng, G., Ci, H. Online monitoring of geological CO₂ storage and leakage based on wireless sensor networks // *IEEE Sens. J.* 2013. N 13 (2). P. 556–562.
71. Mao, X., Miao, X., He, Y., Li, X. Y., Liu, Y. CitySee: Urban CO₂ monitoring with sensors // *Proceedings of IEEE INFOCOM, Orlando, FL, USA*. 2012. P. 1611–1619.

72. Dong, X., Vuran, M. C., Irmak, S. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems // *Ad Hoc Netw.* 2013. N 11 (7). P. 1975–1987.
73. Shanwad, U. K., Patil, V. C., Gowda, H. H. Proceeding precision farming: dreams and realities for Indian agriculture // *Proceedings of Map India Conference.* 2004.
74. Mondal, P., Basu, M. Adoption of precision agriculture technologies in India and in some developing countries: scope, present status and strategies // *Prog. Nat. Sci.* 2009. N 19 (6). P. 659–666.
75. Mondal, P., Tewari, V. K., Rao, P. N. Scope of precision agriculture in India // *Proceedings of International Conference on Emerging Technologies in Agricultural and Food Engineering, Kharagpur, WB, India, 2004.* P. 103.
76. Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., Ángel Porta-Gándara, M. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2014. N 63 (1). P. 166–176.
77. Akyildiz, I. F., Stuntebeck, E. P. Wireless underground sensor networks: research challenges // *Ad Hoc Netw.* 2006. N. 4 (6). P. 669–686.
78. Vuran, M. C., Akyildiz, I. F. Cross-layer packet size optimization for wireless terrestrial, underwater, and underground sensor networks // *Proceedings of IEEE INFOCOM, Phoenix, AZ, USA, 2008.* P. 780–788.
79. Silva, A. R., Vuran, M. C. Communication with aboveground devices in wireless underground sensor networks: an empirical study // *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Cape Town, South Africa, 2010.* P. 1–6.
80. Yu, X., Wu, P., Han, W., Zhang, Z. A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture // *Comput. Stand. Interfaces.* 2013. N 35 (1). P. 59–64.
81. Akyildiz, I. F., Kasimoglu, I. H. Wireless sensor and actor networks: research challenges // *Ad Hoc Netw.* 2004. N 2 (4). P. 351–367.
82. Kulkarni, R. V., Förster, A., Venayagamoorthy, G. K. Computational intelligence in wireless sensor networks: a survey // *Commun. Surv. Tutorials.* 2011. N 13 (1). P. 68–96.
83. Shakhov, V. Performance Evaluation of MAC Protocols in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks // *Springer LNCS.* 2016. V. 9787. P. 344–352.
84. Wu, D., Cai, Y., Zhou, L., Wang, J. A cooperative communication scheme based on coalition formation game in clustered wireless sensor networks // *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2012. N 11 (3). P. 1190–1200.
85. Shakhov, V. A Graph-based Method for Performance Analysis of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks Reliability // *Springer Lecture Notes in Electrical Engineering,* 2016. V. 391. P. 127–132.
86. Shakhov V. V., Migov D. A., Sokolova O. D. Wireless sensory networks equipped with means for obtaining energy from the environment // *Problems of Informatics.* 2014. N 4. P. 69–79.
87. Chu, X., Sethu, H. Cooperative topology control with adaptation for improved lifetime in wireless ad-hoc networks // *Proceedings of IEEE INFOCOM, Orlando, FL, USA, 2012.* P. 262–270.
88. Li, M., Li, Z., Vasilakos, A. V. A survey on topology control in wireless sensor networks: taxonomy, comparative study, and open issues // *Proc. IEEE.* 2013. N 101 (12). P. 2538–2557.
89. Shakhov, V. On a New Type of Attack in Wireless Sensor Networks: Depletion of Battery // *Proceedings of IEEE 11th International Forum on Strategic Technology, Novosibirsk, Russia, 2016.* P. 491–494.
90. Vijay, G., Bdira, E. B. A., Ibnkahla, M. Cognition in wireless sensor networks: a perspective // *IEEE Sens. J.* 2011. N 11 (3). P. 582–592.

91. Shakhov V. V., Yurgenson A. N., Sokolova O. D. Effective method for generating random geometric graphs for modeling wireless networks // *Applied Discrete Mathematics*. 2016. N 4 (34). P. 99–109.
92. Misra, S., Jain, A. Policy controlled self-configuration in unattended wireless sensor networks // *J. Netw. Comput. Appl.* 2011. N 34 (5). P. 1530–1544.
93. Nicopolitidis, P., Papadimitriou, G. I., Pomportsis, A. S., Sarigiannidis, P. G., Obaidat, M. S. Adaptive wireless networks using learning automata. *IEEE Wirel. Commun.* 2011. N 18 (2). P. 75–81.
94. Shakhov, V. Protecting Wireless Sensor Networks from Energy Exhausting Attacks // Springer LNCS, 2013. V. 7971. P. 184–193.
95. Shakhov, V., Choo, H., Bang, Y. Discord model for detecting unexpected demands in mobile networks // *Future Generation Comp. Syst.*, 2004. V. 20 (2). P. 181–188.
96. Shakhov, V., Choo, H. An Efficient Method for Proportional Differentiated Admission Control Implementation // *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013. V. 2011, Article ID 738386.
97. Shakhov, V., Migov, D. Reliability of Ad Hoc Networks with Imperfect Nodes // Springer LNCS, 2014. V. 8715, P. 49–58.
98. Adamala, S., Raghuwanshi, N. S., Mishra, A. Development of surface irrigation systems design and evaluation software (SIDES) // *Comput. Electron. Agric.* 2014. N 100. P. 100–109.
99. Westarp, S. V., Chieng, S., Schreier, H. A comparison between low-cost drip irrigation, conventional drip irrigation, and hand watering in Nepal // *Agric. Water Manage.* 2004. N 64. P. 143–160.
100. Kim, Y. D., Yang, Y. M., Kang, W. S., Kim, D. K. On the design of beacon based wireless sensor network for agricultural emergency monitoring systems // *Comput. Stand. Interfaces.* 2014. N 36 (2). P. 288–299.
101. Bhave, A. G., Mishra, A., Raghuwanshi, N. S. A combined bottom-up and topdown approach for assessment of climate change adaptation options // *J. Hydrol.* 2013. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.039>.
102. Bhargava, K., Kashyap, A., Gonsalves, T. A. Wireless sensor network based advisory system for apple scab prevention // *Proceedings of National Conference on Communications, Kanpur, India*, 2014. P. 1–6.
103. Gonçalves, L. B. L., Costa, F. G., Neves, L. A., Ueyama, J., Zafalon, G. F. D., Montez, C., Pinto, A. S. R. Influence of mobility models in precision spray aided by wireless sensor networks // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. N 574 (1).
104. Kwong, K. H., Wu, T. T., Goh, H. G., Sasloglou, K., Stephen, B., Glover, I., Shen, C., Du, W., Michie, C., Andonovic, I. Practical considerations for wireless sensor networks in cattle monitoring applications // *Comput. Electron. Agric.* 2012. N 81. P. 33–44.
105. Zia, H., Harris, N. R., Merrett, G. V., Rivers, M., Coles, N. The impact of agricultural activities on water quality: a case for collaborative catchment-scale management using integrated wireless sensor networks // *Comput. Electron. Agric.* 2013. N 96. P. 126–138.
106. Malaver, A., Motta, N., Corke, P., Gonzalez, F. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse // *Sensors*. 2015. N 15 (2). P. 4072–4096.
107. Misra, S., Singh, S. Localized policy-based target tracking using wireless sensor networks // *ACM Trans. Sens. Netw.* 2012. N 8 (3). P. 27.
108. Fukatsu, T., Kiura, T., Hirafuji, M. A web-based sensor network system with distributed data processing approach via web application // *Comput. Stand. Interfaces.* 2011. N 33 (6). P. 565–573.
109. Coates, R. W., Delwiche, M. J., Broad, A., Holler, M. Wireless sensor network with irrigation valve control // *Comput. Electron. Agric.* 2013. N 96. P. 13–22.

110. Koch, R., Pionteck, T., Albrecht, C., Maehle, E. An adaptive system-on-chip for network applications // Proceedings of International Parallel and Distributed Processing Symposium, Rhodes Island. 2006.
111. Karim, F., Mellan, A., Stramm, B., Nguyen, A., Abdelrahman, T., Aydonat, U. The hyperprocessor: a template system-on-chip architecture for embedded multimedia applications // Proceedings of Workshop on Application Specific Processors, 2003. P. 66–73.
112. ZigBee Specifications, ZigBee Alliance Std. [El. Res.]: <http://www.zigbee.org/>.
113. Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W., Chessa, S., Gotta, A., Hu, Y. F. Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards // Comput. Commun. 2007. N 30 (7). P. 1655–1695.
114. Guo, W., Healy, W. M., Zhou, M. Impacts of 2.4-GHz ISM band interference on IEEE 802.15.4 wireless sensor network reliability in buildings // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2012. N 61. P. 2533–2544.
115. IEEE Standard for Information technology, 2006. Telecommunications and Information Exchange Between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Institute of Electrical and Electronics Engineers Std.
116. IEEE Standard for Information technology, 2005. Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications — Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements, Std.
117. IEEE Standard for Information technology, 2012. Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area networks—Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Institute of Electrical and Electronics Engineers Std.
118. Bluetooth Technology Special Interest Group. [Electron. Res.]: <https://www.bluetooth.org/>.
119. General Packet Radio Service. [Electron. Res.]: <http://www.3gpp.org/>.
120. D. J. Goodman and R. A. Myers. 3G cellular standards and patents // Proceedings of International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005, P. 415–420.
121. Parkvall, S., Dahlman, E., Furuskar, A., Jading, Y., Olsson, M., Wanstedt, S., Zangi, K. ‘LTE-Advanced — Evolving LTE towards IMT-Advanced // Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Calgary, BC, 2008, P. 1–5.
122. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 3: Advanced Air Interface, Std., May 2011.
123. Sperling, O. Water Relations in Date Palm Trees — A Combined Approach using Water, Plant, and Atmospheric Data Water Relations in Date Palm Trees — A Combined Approach using Water, Plant, and Atmospheric Data. Ben-Gurion University of the Negev, Beersheva, Israel. 2013.
124. Cohen, Y., Glasner, B.B. Date palm genetic resources and utilization // Al- Khayri, M., Jain, J., Mohan, S., Johnson, V. D. (Eds.). Date Palm Genetic Resources and Utilization. 2015. P. 265–298. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9707-8>.
125. Sperling, O., Shapira, O., Cohen, S., Tripler, E., Schwartz, A., Lazarovitch, N., Estimating sap flux densities in date palm trees using the heat dissipation method and weighing lysimeters // Tree Physiol. 2012. N 32. P. 1171–1178. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tps070>.
126. Tripler, E., Shani, U., Ben-Gal, A., Mualem, Y. Apparent steady state conditions in high resolution weighing-drainage lysimeters containing date palms grown under different salinities // Agric. Water Manage. 2012. N 107. P. 66–73. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.010>.

127. Yuan Rao, Zhao-hui Jiang, Naftali Lazarovitch. Investigating signal propagation and strength distribution characteristics of wireless sensor networks in date palm orchards // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. N 124. P. 107–120.

128. Moghaddam, M., Entekhabi, D., Goykhman, Y., Li, K., Liu, M., Mahajan, A., Nayyar, A., Shuman, D., Teneketzis, D. A wireless soil moisture smart sensor web using physics-based optimal control: concept and initial demonstrations // IEEE J.Sel. Top. Appl. Earth Observ. Rem. Sens. 2010. N 3 (4). P. 522–535.

129. Lovejoy, W. S. A survey of algorithmic methods for partially observed markov decision processes // Ann. Oper. Res. 1991. N 28 (1). P. 47–65.

130. Saha, R., Raghuwanshi, N.S., Upadhyaya, S.K., Wallender, W.W., Slaughter, D. C. Water sensors with cellular system eliminate tail water drainage in alfalfa irrigation // Calif. Agric. 2011. N 65 (4). P. 202–207.

131. Aqua Management, Inc. [El. Res.]: <http://aquamanagement.com/vertical-solutions/ami-turfirrigation-controllers/>.

132. TamoghnaOjha, SudipMisra, Narendra Singh Raghuwanshi. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges // Computers and Electronics in Agriculture. 2015. N 118. P. 66–84.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ В ПРЕЦИЗИОННОМ СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

О. Ю. Тарханова

Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия

УДК 004.72

С учетом современных тенденций развития цифровой экономики и интернета вещей анализируются прикладные аспекты использования беспроводных сенсорных сетей (БСС) в системах контроля и наблюдения различных параметров окружающей среды. Особый интерес представляет применение БСС в прецизионном сельском хозяйстве, обозначены используемые технологии и инструментарий в рамках концепции „точного земледелия“. В статье анализируется мировой опыт применения БСС в сельском хозяйстве и направления потенциальных приложений БСС в аграрной отрасли. Рассмотрены используемые типы архитектур сенсорных узлов и топологий беспроводных сенсорных сетей, технологии и стандарты беспроводной связи.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, прецизионное (точное) сельское хозяйство, сенсорные узлы, архитектура, мониторинг, сельскохозяйственные приложения.

Введение. Вопрос обеспечения продовольствием населения становится все более актуальным. Для дальнейшего роста продуктивности сельского хозяйства, обеспечения стабильного урожая и повышения конкурентоспособности в локальном и мировом масштабе разрабатываются новые технологии и решения [1–14]. В условиях изменения климата и нехватки воды [15–20] поиск и применение современных технологий и подходов к повышению эффективности землепользования и земледелия в аграрной отрасли становятся критичными.

В своем аналитическом обзоре эксперты J'son & Partners Consulting утверждают, что сельское хозяйство стоит на пороге „Второй зеленой революции“ [21]. В частности, в результате реализации концепции „точного земледелия“ возможно кардинальное увеличение урожайности („может последовать всплеск урожайности такого масштаба, какого человечество не видело даже во времена появления тракторов, изобретения гербицидов и генетически измененных семян“).

По их оценке, в России суммарный экономический эффект от перехода сельских хозяйств отрасли на бизнес-модели, базирующиеся на „интернете вещей“ (IoT) и цифровизации, может составить более 4,8 трлн руб. в годовом выражении, или 5,6 % прироста ВВП, а возможный прирост объема потребления информационных технологий в России может составить 22 %, причем за счет цифровизации только одной отрасли — сельского хозяйства.

С учетом мировых тенденций в начале 2017 г. в России (в соответствии с Указом Президента Российской Федерации „О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства“ от 21 июля 2016 года № 350) предложен план мероприятий („дорожная карта“) „Внедрение технологий системы

интернета вещей в агропромышленном комплексе“, который предусматривает развитие инфокоммуникационной инфраструктуры (инфраструктур передачи данных и цифровых услуг) и требований по использованию технологий интернета вещей в качестве одного из направлений государственного стимулирования агропроизводителей.

Обозначенная выше концепция „точного земледелия“ [21] базируется на платформе „интернета вещей“ [43, 44], и предполагает интегрированную высокотехнологичную систему сельскохозяйственного менеджмента, включающую в себя технологии и инструментарий:

- беспроводных сенсорных сетей [23], [26–39];
- глобальных [25] и облачных вычислений [40–42];
- глобального позиционирования (GPS) и геоинформационных систем,
- систем сбора пространственной информации и пространственного контроля выполнения операций (GPS-приборы спутниковой навигации, сенсорные датчики, RFID системы и др.);
- IoT-сетей для передачи данных на большие расстояния LPWAN/NB-IoT (на базе развивающихся/конкурирующих протоколов LoRa, Стриж, Sigfox и др.);
- спутниковый мониторинг [45] и дистанционное зондирование [46–48];
- анализа данных (Data Science) и больших данных (Big Data);
- оценки урожайности (Yield Monitor Technologies) и переменного нормирования (Variable Rate Technology).

Важным компонентом IoT являются беспроводные сенсорные сети (БСС). Их применению в сельскохозяйственной отрасли посвящен данный обзор.

1. Возможности использования БСС в сельском хозяйстве. Потребность в автоматизации и интеллектуальном принятии решений становится все более важной при разработке и внедрении современных агротехнологий [22–24]. Среди всех технологий в основном представляет интерес использование БСС для совершенствования традиционных методов земледелия [23], [28], [49–53]. Прогресс в области микро электромеханических систем (МЭМС) позволил создавать небольшие и дешевые сенсоры.

Вездесущий характер работы сенсорных сетей вместе с самоорганизующимися узлами малого размера позволяет использовать БСС как потенциальный инструмент автоматизации в сельском хозяйстве. В связи с этим, точное сельское хозяйство [1], [54–60], автоматизированный график полива [45], [61–64], оптимизация роста растений [65], мониторинг сельскохозяйственных угодий [66], [67], мониторинг парниковых газов [68–70], управление сельскохозяйственными производственными процессами [57], [71] и безопасность культур [11] — это лишь несколько возможных приложений. Однако БСС имеют некоторые ограничения [49], [52], такие как низкая мощность батареи, ограниченная вычислительная способность и небольшая память сенсорных узлов. Эти ограничения вызывают проблемы при разработке приложений БСС в сельском хозяйстве.

Большинство приложений на основе БСС, разработанных для нужд сельского хозяйства, может применяться в других областях жизнедеятельности, и наоборот. Например, БСС для мониторинга состояния окружающей среды с получением информации о питательных веществах почвы применяется для прогнозирования здоровья урожая и качества продукции в течение времени. График полива прогнозируется с помощью БСС путем мониторинга влажности почвы и погодных условий. Производительность существующего приложения на основе БСС может быть улучшена добавлением дополнительных сенсорных узлов к существующей архитектуре, что позволяет контролировать большее число

параметров. Проблемы, которые могут возникнуть в таких приложениях — определение оптимальной стратегии размещения, интервала измерения, энергосберегающих MAC протоколов и протоколов маршрутизации.

Основанные на БСС решения для сельского хозяйства должны быть очень дешевыми, чтобы быть доступными широкому кругу конечных пользователей. С ростом населения спрос на продовольственное зерно также растет. Например, из недавних отчетов видно, что рост производства продовольственного зерна в Индии меньше, чем рост населения [72]. Кроме того, Индия является одним из крупнейших экспортеров продовольственных зерновых культур, и поэтому исследователи сообщают о необходимости увеличить производство за счет внедрения передовых технологий [72], [73]. Следовательно, для достижения такой цели во многих сельскохозяйственных приложениях рассматриваются доступные и современные технологии [74]. Нынешнее состояние развития Индии включает в себя такие технологии, как БСС, пакетная радиосвязь общего пользования (GPRS), Глобальная система определения местоположения (GPS), дистанционное зондирование и Географическая информационная система (ГИС).

В сельскохозяйственных приложениях наиболее широко используются два варианта БСС — наземные БСС и подземные БСС.

1.1. *Наземные БСС.* В наземных БСС узлы размещаются над поверхностью земли. Интеллектуальные, малогабаритные и при этом недорогие сенсоры позволяют узлу собирать достаточно точные данные об окружающей среде. На основе обнаруженной информации эти узлы затем объединяются для выполнения требований приложения. Например, рассмотрим прикладную систему, в которой БСС размещена по всему полю для автоматизации системы полива. Сенсоры определяют содержание влаги в почве и, далее, совместно определяют время и продолжительность графика полива на этом поле. Затем, используя ту же сеть, решение передается к сенсорному узлу, прикрепленному к водяному насосу. В [75] предложили подобную автоматизированную систему полива с использованием БСС и GPRS-модуля.

На рис. 1 изображена типичная БСС, размещенная на поле для сельскохозяйственного применения. Поле состоит из сенсорных узлов, оснащенных специальными бортовыми сенсорами. Узлы в сенсорной сети на поле обмениваются информацией между собой с использованием радиочастотных каналов (RF) промышленных, научных и медицинских (ISM) радиодиапазонов (таких как 902–928 МГц и 2,4–2,5 ГГц). Как правило, узел-шлюз также размещается вместе с сенсорными узлами, чтобы обеспечить соединение между сенсорной сетью и внешним миром. Таким образом, узел-шлюз пользуется как RF, так и глобальной системой мобильной связи (GSM) или GPRS. Удаленный пользователь может контролировать состояние поля и управлять полевыми сенсорами и устройствами привода. Например, пользователь может включать/выключать насос/клапан, когда уровень воды, подаваемый в поле, достигает некоторого предопределенного порогового значения. Пользователи с помощью мобильного телефона могут также дистанционно контролировать сенсоры на поле. Мобильный пользователь подключается через GPRS или даже через службу коротких сообщений (SMS). Также может быть разработана функция периодического обновления информации от сенсоров и системное управление „по требованию“ для обоих типов пользователей.

1.2. *Подземные БСС.* Другим вариантом БСС являются беспроводные подземные сенсорные сети [76], [77]. В этом случае беспроводные сенсоры устанавливаются внутри почвы. В этой установке более высокие частоты затухают, а сравнительно низкие частоты

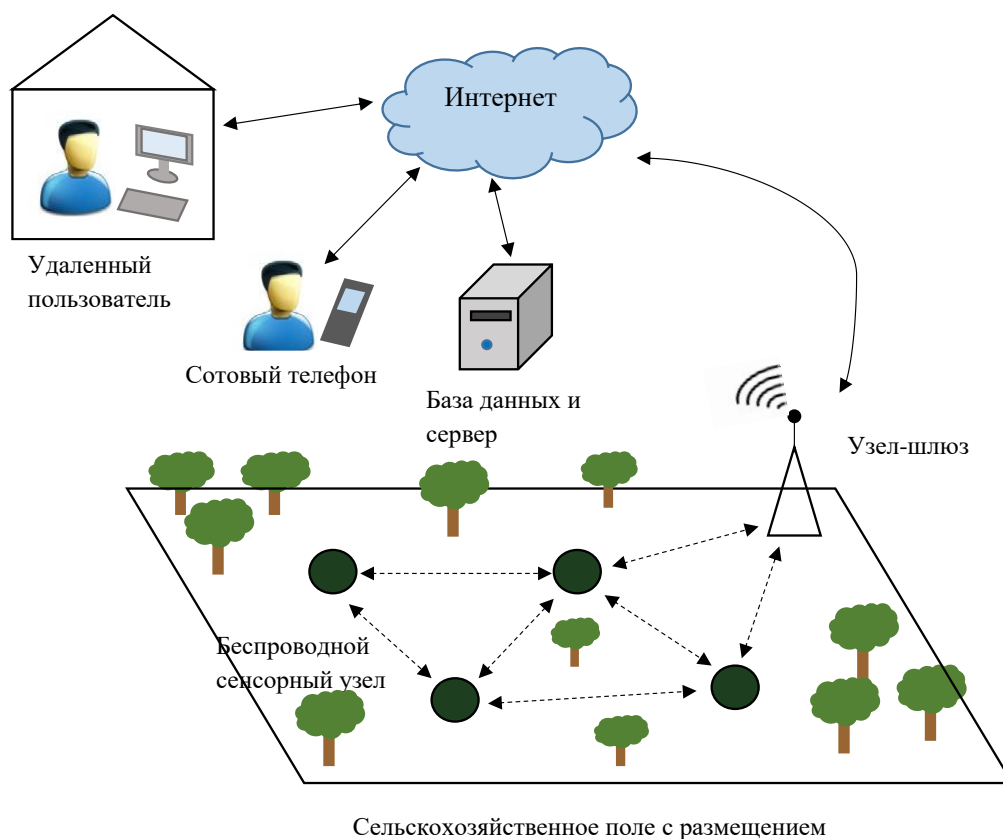


Рис. 1. Типичная БСС для сельскохозяйственных приложений

способны проникать через почву [78], [79]. Таким образом, радиус связи ограничен, и сеть требует большего количества узлов для покрытия площади. Применение проводных сенсоров увеличивает охват сети, требуя относительно меньшего количества сенсоров. Однако в этом случае сенсоры и провода могут быть уязвимы.

Типичное сельскохозяйственное применение подземных сенсорных сетей показано на рис. 2. В отличие от приложений на основе наземных БСС, показанных на рис. 1, на этом рисунке сенсорные узлы зарыты внутри почвы. Один узел-шлюз также размещен для передачи информации, собранной подземными сенсорными узлами, на базовую станцию, находящуюся над землей. После этого информация может передаваться через Интернет для хранения в удаленных базах данных и может использоваться для уведомления пользователя с помощью сотового телефона. Однако из-за сравнительно более короткого расстояния связи требуется размещение большего количества узлов в подземных сенсорных сетях.

2. Архитектура сенсорных узлов.

2.1. *Встроенные многочиповые сенсорные узлы.* Как правило, сенсорный узел состоит из специализированной сенсорной матрицы с приемопередающим блоком для связи (рис. 3, а). В качестве „мозга“ узла используется процессор или блок микроконтроллера. По желанию, сенсорная плата может включать в себя блоки памяти для хранения данных. В зависимости от требований приложения архитектура сенсорных узлов может изменяться в соответствии с требованиями. Например, мощность обработки и размер встроенной

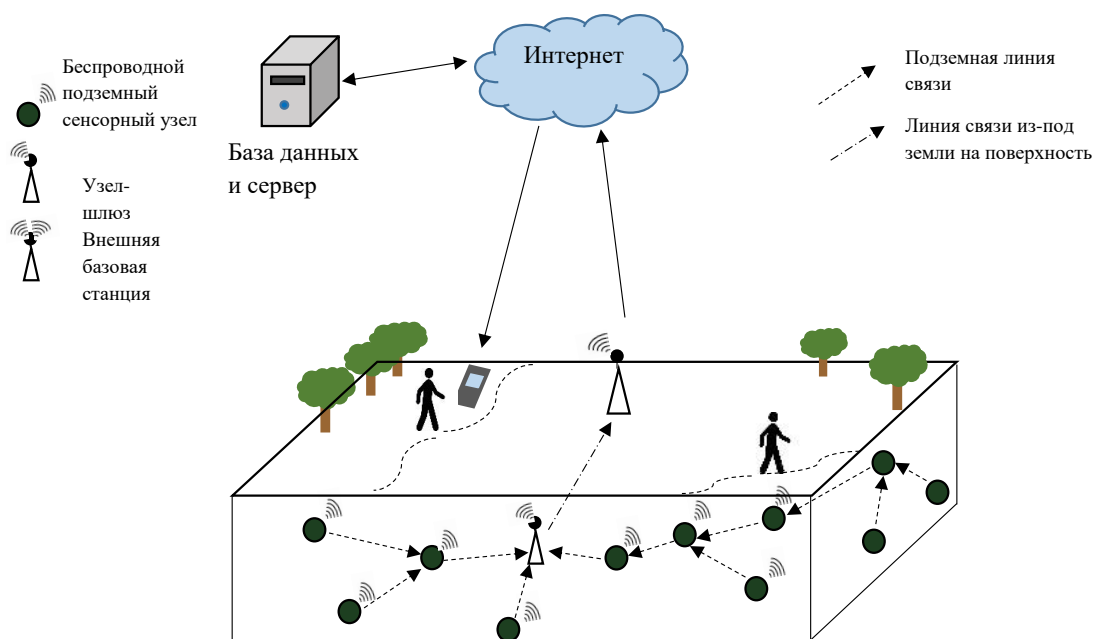


Рис. 2. Типичная подземная БСС для сельскохозяйственных приложений

памяти могут быть увеличены для удовлетворения требований более интенсивной или интеллектуальной обработки.

Еще одной важной технологией является схема из нескольких кристаллов, помещенных в единый корпус (англ. System in a package, SiP), которая определяется как комбинация нескольких микросхем, включая пассивные компоненты (например, резисторы и конденсаторы), взятые вместе, чтобы обеспечить дополнительное подключение внешних компонентов. SiP снижает стоимость продукта, оптимизируя его размеры и производительность. Таким образом, технология SiP имеет возможность применения в сельскохозяйственных сценариях. Сельскохозяйственные системы на основе SiP могут применяться в различных приложениях путем присоединения различных датчиков к основному пакету.

В зависимости от требований сельскохозяйственного приложения, рассматриваются следующие факторы выбора компонентов сенсорного узла:

— Процессор: вычислительная мощность сенсорного узла зависит только от выбора блока обработки. Микроконтроллер предоставляет несколько преимуществ, таких как низкая стоимость, гибкость в общении с другими узлами, простота программирования и низкое энергопотребление по сравнению с традиционными процессорами. В основном, эти микроконтроллеры работают на 3,5–5 В. Однако энергопотребление является одним из наиболее важных факторов в сенсорных узлах. Учитывая этот факт, микроконтроллеры предпочтительнее, чем процессоры общего назначения.

— Приемопередатчик: передача и прием являются двумя основными причинами потребления энергии в сенсорных узлах. В сельскохозяйственных приложениях сетевой планировщик выбирает размещение для обеспечения оптимального энергопотребления сенсорных узлов.

— Память: сенсорные узлы имеют два типа встроенной памяти: память, связанная с процессором, и память, связанная с внешней памятью. В зависимости от требований

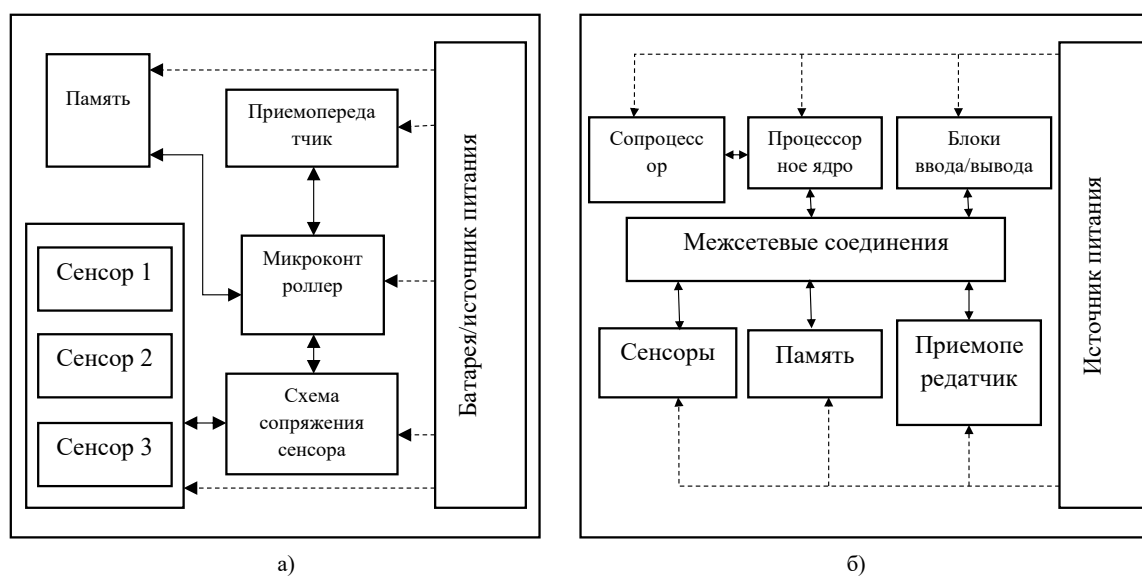


Рис. 3. Компоненты системы: встроенный многочиповый сенсорный узел и сенсорный узел на основе системы на кристалле; а: архитектура типичного встроенного многочипового сенсорного узла; б: архитектура типичного сенсорного узла на основе системы на кристалле

приложения, сенсорным узлам необходимо хранить старые данные для интеллектуального принятия решений. Флэш-память используется для дополнительного хранения.

2.2. Однокристалльная система сенсорных узлов. Архитектура однокристалльной системы (система на кристалле, СнК) применяется в конкретных проектах, нацеленных на минимизацию требований к мощности и стоимости проектирования. СнК обеспечивает интеграцию нескольких программируемых процессорных ядер, сопроцессоров, аппаратных ускорителей, блоков памяти, блоков ввода/вывода и пользовательских блоков. На рис. 3, б, показаны компоненты типичного сенсорного узла на основе СнК. Предполагаемые приложения для СнК в основном предназначены для проектирования сетей на чипах (англ. NoCs) [109], систем для мультимедийных и потоковых приложений [110], требующих интенсивной вычислительной мощности.

В настоящее время в сельскохозяйственных приложениях использование СнК встречается очень редко. По сравнению с кремниевыми матрицами в SiP, СнК основан на одиночной матрице, и, следовательно, СнК имеют меньший размер, но более высокую стоимость. Тем не менее в будущем СнК имеет большой потенциал для применения в сельском хозяйстве и фермерском хозяйстве. Во-первых, использование сенсорных узлов на основе СнК, а не современных встроенных многочиповых сенсорных узлов, увеличит вычислительную мощность и уменьшит потребление энергии. Кроме того, размер узлов будет меньше, и тем самым увеличится мобильность всей системы.

3. Технологии и стандарты беспроводной связи. Перечислим наиболее известные технологии и стандарты беспроводной связи, которые могут найти применение в сельском хозяйстве.

— ZigBee [111–113]: технология определяет протоколы сетевого и прикладного уровня, основанные на стандартах IEEE 802.15.4 [114], а также физического уровня и уровня MAC, необходимые для проектирования беспроводной персональной сети (WPAN) с использо-

ванием устройств с низким энергопотреблением. Будучи энергоэффективной, недорогой и надежной, технология ZigBee является предпочтительной для приложений на основе БСС в сельскохозяйственных доменах. ZigBee также поддерживает передачу данных на короткие расстояния (10–20 м) по многоуровневым, децентрализованным, динамическим и сетчатым сетям. Устройства с поддержкой ZigBee имеют экстенсивный рабочий цикл и, таким образом, подходят для сельскохозяйственных приложений, таких как управление поливом, управление пестицидами и удобрениями, управление качеством воды, где требуется периодическое обновление информации. Однако приложения ZigBee обеспечивают низкую скорость передачи данных только 20–40 кбит/с и 250 кбит/с на частотах 868/915 МГц и 2,4 ГГц полосы ISM соответственно. Как правило, для этого стандарта требуется оборудование с низкой спецификацией (например, микропроцессор с памятью 50–60 кб) и методы шифрования данных.

— Wi-Fi: Wi-Fi — это стандарт беспроводной локальной сети (WLAN) для обмена информацией или подключения к Интернету по беспроводной сети на основе семейства стандартов IEEE 802.11 (IEEE 802.11, 802.11a/b/g/n) [115], [116]. В настоящее время это наиболее широко используемая беспроводная технология, использующаяся в устройствах от смартфонов и планшетов до настольных компьютеров и ноутбуков. Wi-Fi обеспечивает достойный диапазон связи в пределах 20 м (в помещении) до 100 м (на открытом воздухе) со скоростью передачи данных в размере 2–54 Мбит/с при частоте 2,4 ГГц полосы ISM. В сельскохозяйственных приложениях Wi-Fi расширяет использование неоднородных архитектур, подключающих несколько типов устройств к динамической сети.

— Bluetooth: Bluetooth [116], [117], основанный на стандарте IEEE 802.15.1, представляет собой недорогую беспроводную технологию с низким энергопотреблением, используемую для связи между портативными устройствами и рабочими столами в коротком диапазоне (8–10 м). Стандарт Bluetooth определяет связь с персональной сетью (PAN) с частотой 2,4 ГГц диапазона ISM. Скорость передачи данных, достигаемая в разных версиях Bluetooth, составляет от 1 до 24 Мбит/с. Преимущества этой технологии — ее повсеместный характер, и поэтому она подходит для использования в многоуровневых сельскохозяйственных приложениях.

— GPRS / 3G / 4G: GPRS (пакетная радиосвязь общего пользования) [118] — услуга пакетной передачи данных для сотовых телефонов на базе GSM. В системах 2G достигается скорость передачи данных 50–100 кбит/с. Однако в GPRS пропускная способность и задержка меняются, и они зависят от количества других пользователей, использующих один и тот же ресурс. Хотя самое большое преимущество, которое предлагает GPRS, заключается в снятии ограничения диапазона беспроводных устройств. Любые два устройства могут взаимодействовать, если они оба находятся в зоне обслуживания GSM. Однако он лучше подходит для приложений периодического мониторинга, чем для приложений типа отслеживания в режиме реального времени. Расширенная версия GPRS — это Enhanced Data rate для Global Evolution (EDGE), которая обеспечивает повышенную скорость передачи данных без изменений аппаратного и программного обеспечения в основных сетях GSM. 3G [119] и 4G [120] являются третьим и четвертым поколениями технологий мобильной связи. Соответствующая скорость передачи данных составляет 200 кбит/с и от 100 Мбит/с до 1 Гбит/с в 3G и 4G соответственно.

— WiMAX: WiMAX является акронимом для Worldwide Interoperability for Microwave Access, стандарта беспроводной связи, относящегося к межоперационным реализациям семейства стандартов IEEE 802.16 [121]. WiMAX нацелен на достижение скорости пере-

дачи данных 0,4–1 Гбит/с на стационарных станциях, а максимальная дальность передачи с использованием этой технологии составляет 50 км. Мобильный WiMAX (стандарт IEEE 802.16e) обеспечивает скорость передачи данных порядка 50–100 Мбит/с. Поддержка большого диапазона и высокоскоростные коммуникационные функции делают WiMAX наиболее подходящей технологией для сельскохозяйственных приложений, включающих в себя мониторинг объектов, мониторинг системы сельского хозяйства, мониторинг границ посевных площадей и диагностику в реальном времени.

4. Причины использования БСС в сельском хозяйстве. Ниже выделены основные черты БСС, которые позволили им стать потенциальным инструментом автоматизации в области сельского хозяйства.

— Интеллектуальная способность принимать решения. БСС обычно содержит множественные транзитные участки (multi-hop) [49], [50], [80]. При развертывании сети в большой области это свойство повышает энергоэффективность всей сети, и, следовательно, увеличивается срок службы сети. Используя это свойство, несколько сенсорных узлов могут взаимодействовать между собой и совместно принимать окончательное решение [81–84].

— Конфигурация динамической топологии. Для экономии заряда аккумулятора сенсорный узел удерживает себя в режиме ожидания (т. н. спящий режим) большую часть времени. Используя методы управления топологией [85–87], сенсорные узлы могут совместно принимать эти решения. Чтобы максимизировать время жизни сети, топология сети настроена так, что в активном состоянии остается минимальное количество узлов.

— Отказоустойчивость. Одной из распространенных проблем, которую надо принимать во внимание при развертывании БСС, является то, что сенсорные узлы подвержены неисправностям [88]. В таких обстоятельствах непродуманное размещение узлов может привести к потере связности, и это, в свою очередь, влияет на общую производительность сети. Однако сенсорные узлы могут „самоорганизовываться“ путем динамической настройки сетевой топологии [33].

— Контекстная осведомленность. Основываясь на полученной информации о физических и экологических параметрах, сенсорные узлы получают знания об окружающей обстановке. Решения, принимаемые сенсорными узлами после этого, являются контекстно-зависимыми [89].

— Масштабируемость. Как правило, протоколы БСС предназначены для реализации в любой сети независимо от ее размера и количества узлов. Это свойство, несомненно, расширяет возможности использования БСС для многочисленных приложений.

— Неоднородность узлов. Часто предполагается, что БСС состоит из однородных сенсорных устройств [2], [85], [90]. Однако во многих реалистичных сценариях устройства являются неоднородными в отношении обработки и вычислительной мощности, памяти, чувствительности, приема-передачи и возможности перемещения.

— Толерантность к сбоям связи в суровых условиях окружающей среды. Благодаря широкому спектру применений в открытой сельскохозяйственной среде, БСС страдают от воздействия суровых условий окружающей среды [7]. Стек протокола БСС включает в себя методы, позволяющие противостоять последствиям сбоев связи в сети, возникающих из-за воздействия окружающей среды.

— Автономный режим работы. Важной особенностью БСС является их автономный режим работы [91] и адаптивность [92]. В сельскохозяйственных приложениях эта функция, безусловно, играет важную роль и обеспечивает простой и расширенный режим работы.

— Информационная безопасность. Вопросам обеспечения безопасности БСС, как и других беспроводных сетей, уделяется повышенное внимание в последнюю декаду. Для противодействия атакам используют механизмы обнаружения статистических аномалий в наблюдаемых параметрах БСС [93], [94]. Также целесообразно реализовать эффективные механизмы контроля доступа пользователей [95] и совершенствовать стратегии размещения стоков [96], указанные меры могут значительно повысить отказоустойчивость системы.

5. Потенциальные приложения. Далее представлены возможные сельскохозяйственные приложения, которые могут быть реализованы с использованием БСС.

— Система управления поливом: современное сельское хозяйство требует усовершенствованной системы управления поливом для оптимизации использования воды в сельском хозяйстве [63], [97]. Еще одной причиной необходимости передовой системы является тревожное снижение уровня грунтовых вод. В этой ситуации методы микрополива полезны с точки зрения затрат и эффективности использования воды [98]. Тем не менее, эффективность микрополива может быть дополнительно улучшена с помощью информации об окружающей среде и почве. В этом случае БСС применяются в качестве координирующей технологии [45], [61], [64].

— Мониторинг систем земледелия. В настоящее время в сельском хозяйстве используются различные усовершенствованные системы и устройства. Улучшенная система управления этими устройствами облегчает общую работу и позволяет обеспечить автоматизацию в сельском хозяйстве [99]. Также такие системы удаленного мониторинга помогают усовершенствовать управление в крупных сельскохозяйственных областях. Кроме того, при вводе дополнительной информации, такой как спутниковые изображения и прогноз погоды, производительность системы может быть улучшена.

— Борьба с вредителями и болезнями: контролируемое использование пестицидов и удобрений помогает повысить качество урожая, а также минимизирует себестоимость. Однако для контроля за использованием пестицидов необходимо контролировать вероятность и появление вредителей в культурах. Чтобы предсказать это, также требуется информация об окружающем климате [60], [100], такая как температура, влажность и скорость ветра. БСС может самостоятельно отслеживать и прогнозировать эти события в интересующей области [101].

— Контролируемое использование удобрений: рост растений и качество сельскохозяйственных культур напрямую зависят от использования удобрений. Однако оптимальная поставка удобрений в нужные места в полях является сложной задачей. Использование удобрений для сельского хозяйства может контролироваться путем мониторинга изменения в почвенных питательных веществах, таких как азот, фосфор, калий и рН. Следовательно, также может быть достигнут баланс питания почвы, и, следовательно, качество сельскохозяйственных культур также сохраняется. В [102] была изучена эффективность мобильных узлов для повышения производительности сельского хозяйства в интеллектуальной системе с прецизионными спреями.

— Мониторинг движения крупного рогатого скота: стадо скота, пасущего поле, можно контролировать с использованием технологии БСС или радиочастотного идентификатора (RFID) [67], [103]. Таким образом, мониторинг любого крупного рогатого скота в реальном времени, также может быть осуществлен. Далее эта технология может быть реализована, чтобы контролировать, перемещается ли какой-либо крупный рогатый скот вблизи полей растительности или нет.

— Мониторинг качества грунтовых вод: увеличение использования удобрений и пестицидов приводит к снижению качества грунтовых вод. Размещение сенсорных узлов, наделенных беспроводной связью, помогает контролировать качество воды [39], [104].

— Мониторинг парниковых газов: парниковые газы и сельское хозяйство тесно связаны друг с другом. Парниковые газы отвечают за повышение климатической температуры и, следовательно, оказывают непосредственное влияние на сельское хозяйство. С другой стороны, выбросы парниковых газов происходят из различных сельскохозяйственных источников. В [105] представлена разработка системы на солнечных батареях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и БСС для мониторинга парниковых газов — CH_4 и CO_2 .

— Отслеживание активов: беспроводная технология, позволяющая дистанционно следить [106] за фермерским оборудованием. Фермер может отслеживать положение сельскохозяйственных машин и систем полива из своего дома.

— Дистанционное управление и диагностика: с появлением Интернета вещей стали возможны дистанционное управление и диагностика сельскохозяйственного оборудования, такого как насосы, огни, обогреватели, клапаны в машинах [107], [108].

6. Проектирование БСС для сельскохозяйственных приложений. Основываясь на перемещении сетевых устройств и узлов, можно классифицировать существующие архитектуры БСС для сельского хозяйства:

— Стационарная архитектура: в стационарной архитектуре сенсорные узлы размещаются в фиксированном положении, и в течение срока применения приложения они не меняют свое положение. Как правило, такие приложения, как система управления поливом, мониторинг качества грунтовых вод и контроль над использованием удобрений, требуют стационарных архитектур. В таких приложениях с наземными БСС сенсорные узлы, собирающие данные, обычно помещаются над полем. Однако в подземных БСС сенсорные узлы, собирающие данные, размещены под землей. Кроме того, как показано на рис. 2, узлы-сборщики могут быть помещены под землю для сбора всех данных с подземных сенсоров и связи с внешними наземными БСС.

— Мобильная архитектура: мобильные архитектуры включают в себя устройства, которые со временем меняют свое положение. Примером приложений, основанных на такой архитектуре, является автономная сеть тракторов и фермеров, использующих мобильные телефоны, служащие для сельскохозяйственных операций.

— Гибридная архитектура. В гибридной архитектуре присутствуют как стационарные, так и мобильные узлы. Например, этот тип архитектуры применим к сельскохозяйственным приложениям, состоящим из стационарных полевых датчиков, мобильных фермерских установок, пользователей, использующих мобильные телефоны, и перемещения скота.

В зависимости от типа сенсорных узлов и связанных с ними устройств, существующая архитектура, используемая в сельском хозяйстве, классифицируется следующим образом:

— Однородная архитектура. Как следует из названия, однородная архитектура включает в себя сенсоры, оснащенные устройствами с одинаковым потенциалом. Этот тип структуры обычно используется в приложениях, основанных на незапланированных размещениях. В таких обстоятельствах сеть размещается главным образом для мониторинга требуемых параметров сельского хозяйства на месте. Однако этот тип архитектуры не имеет большого разнообразия в плане аппаратного обеспечения связи. Следовательно, схемы и протоколы связи разработаны с учетом этого ограничения. Одним из примеров применения такого типа архитектуры является применение сбора сельскохозяйственных данных

в отношении использования пестицидов и изменения количества питательных веществ в почве.

— Неоднородная архитектура: в этом типе архитектуры присутствуют различные типы сенсорных узлов и устройств. Эти устройства различаются в вычислительной мощности, памяти, чувствительности приемопередатчиков. Например, в любом приложении управления поливом сенсорные узлы передают свою собранную информацию на главный или приемный узел, который снова передает информацию удаленному пользователю. В этом случае узел базовой станции способен осуществлять связь в нескольких режимах — RF и GSM. Другим возможным приложением может быть мониторинг систем ведения сельского хозяйства и отслеживание сельскохозяйственных активов. Модель приложения, показанная на рис. 1, изображает неоднородную архитектуру. На рис. 1 полевой сенсор и узлы-шлюзы имеют разные конфигурации.

Архитектуры классифицируются по различным категориям на основе иерархии.

— Одноуровневая архитектура: этот тип архитектуры наиболее распространен среди сельскохозяйственных приложений, в частности, небольших приложений. В этом типе архитектуры устройства на поле и сенсорные узлы непосредственно передают свои данные на базовую станцию, расположенную рядом с областью приложения. Этот тип архитектуры также называется единой кластерной архитектурой.

— Многоуровневая архитектура. В многоуровневой архитектуре в общей иерархии приложений есть несколько уровней. Сенсорные узлы на поле находятся на более низком уровне иерархии и образуют основные кластеры. Впоследствии следующие уровни иерархии включают в себя несколько кластеров для доступа к узлам-шлюзам. Как правило, многоуровневые архитектуры состоят из неоднородных узлов.

На рис. 4 показана многоуровневая архитектура с тремя уровнями узлов-шлюзов. Базовый блок сети формируется кластером, состоящим из сенсорных узлов и головы кластера, называемым узлом-шлюзом 3-го уровня на рисунке. Эти узлы-шлюзы снова образуют кластер с узлами-шлюзами 2-го уровня в качестве головы кластера, и, следовательно, иерархия выполняется итеративно до тех пор, пока не будет достигнута удаленная базовая станция.

7. Мировой опыт применения БСС в сельском хозяйстве.

7.1. *Финиковые пальмовые сады.* Поскольку финиковые пальмы являются важной коммерческой культурой, широко культивируемой в полузасушливых и засушливых регионах [122], в последние несколько лет были предприняты огромные усилия для исследования взаимосвязей между водой для полива, ростом деревьев, размерами плодов и их качеством [123–125]. БСС стали подходящим инструментом для эффективного сбора и доставки данных в пальмовых садах. В [126] проведено исследование характеристик распространения и распределения сигнала в БСС в финиковых пальмовых садах. Измерения уровня принятого сигнала (RSSI) проводились с антеннами, работающими с диапазоном 2,4 ГГц и расположенными на расстоянии 0,05 м от стволов. Сравнительный анализ показал, что логарифмическая модель является наиболее точной и удобной среди всех моделей ослабления сигнала для прогнозирования характеристик распространения беспроводного сигнала низкой мощности в садах финиковых пальм. Дальнейшие измерения проводились для исследования распределения мощности принятого сигнала вокруг отдельных стволов и между садами разных возрастов. Для эксперимента были взяты два пальмовых сада, в одном находились десятилетние, в другом пятнадцатилетние деревья. Надежный диапазон связи показал возрастающую тенденцию с увеличением возраста садов. Более того,

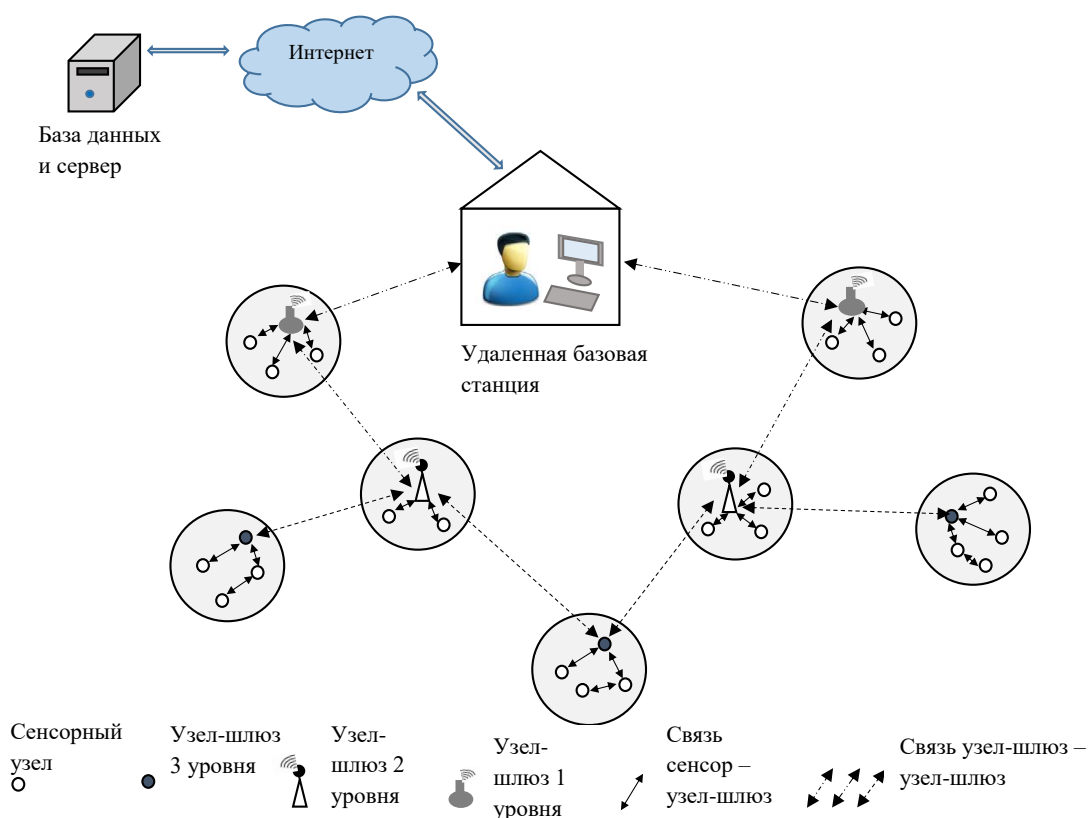


Рис. 4. Приложение, основанное на многоуровневой архитектуре

стволы отрицательно влияли на распространение сигнала, а сила помех зависела от отношения положения между стволами, антеннами Tx и Rx. Наконец, были даны конкретные и подробные рекомендации для размещения БСС в садах финиковых пальм.

7.2. *Управление поливом.* В [75] описаны разработка и размещение автоматизированной системы полива, состоящей из распределенной БСС, узла-шлюза и удаленного сервера. Проект был посвящен внедрению системы БСС, способной сократить использование воды. В данном исследовании БСС состоит из сенсоров, измеряющих влажность почвы и температуры, погруженных в землю для измерения показателей на разных глубинах. У узла-шлюза есть встроенные средства, поддерживающие связь ZigBee [112–114] и GPRS. Он также может принимать интеллектуальные решения, такие как автоматическая активация полива, зависящая от значений влажности почвы и температуры, превышающих определенное предопределенное пороговое значение. Удаленный сервер используется для хранения всей информации и отображения информации в графическом интерфейсе (GUI). Преимуществом этого приложения является его способность анализа данных в режиме реального времени. Компоненты системы определяются следующим образом:

— Беспроводные сенсорные блоки (англ. WSU): каждый WSU, размещенный на поле, имеет четыре разных типа компонентов: специальные датчики, процессор, радиоприемник и аккумулятор. Для экономии энергии микроконтроллер часто остается в спящем режиме. Панель солнечных батарей подключается к каждому из WSU для подзарядки своих батарей.

— Беспроводной информационный блок (англ. WIU): WIU действует как главный узел и собирает информацию из WSU с использованием технологии ZigBee. Вся полученная информация о влажности и температуре почвы сравнивается с предопределенными пороговыми значениями, и, далее, насосы активируются в течение рассчитанного периода. Полученные данные и данные, связанные с поливом, сохраняются в прикрепленной твердотельной памяти и передаются на удаленный сервер через GPRS с использованием протокола передачи гипертекста (HTTP). Насосы управляются двумя электронными реле. По команде WIU может быть изменен график полива с удаленного сервера, а также WIU оснащен кнопкой для ручного полива. Рассматриваются четыре различных ирригационных действия (ИА) — ручной полив, предопределенный полив, автоматический полив по результатам данных о почвенной влажности, по меньшей мере, одного сенсора, понижающегося ниже порога, и автоматический полив по результатам данных о температуре почвы, по меньшей мере, одного сенсора, превышающего порог.

— Удаленный веб-сервер: на сервере отображается определенный графический интерфейс, который визуализирует данные из каждого WSU, общего потребления воды и типа ИА. Веб-приложение также позволяет пользователю прямо программировать запланированные схемы полива и изменять пороговые значения в зависимости от типа и сезона посева.

Еще один пример применения БСС — веб-сайт Smart Sensor: система Smart Sensor Web (SSW), предложенная [127], вводит новую технологию для интеллектуальной сенсорной веб-системы, измеряющую поверхностный профиль влажности на глубине в полевых сенсорах. Ботанический сад Маттей Мичиганского университета в Анн-Арборе, Мичиган, был выбран в качестве района размещения сенсоров на поле. Сенсоры были размещены для моделирования пространственно-временных изменений влажности почвы, для обеспечения спутникового наблюдения за влажностью почвы. Чтобы свести к минимуму общую стоимость и экономию энергии, авторы планируют выборочно отображать данные сенсоров.

Sensor Web, руководствуется интеллектом системы управления для выбора оптимальной стратегии выбора сенсоров. Задача поиска оптимальной стратегии и оценки параметра моделируется с использованием частично наблюдаемого Марковского процесса принятия решений [128]. Несколько узлов привода размещаются с несколькими сенсорами, расположенными на разных глубинах. После получения показаний от приводов центральный координатор оценивает пространственное изменение влажности почвы. Затем координатор строит график будущих измерений. Таким образом, координационный узел использует пространственно-временную корреляцию влажности почвы и оптимально оценивает ее с уменьшенным числом измерений.

В [129] представлена автоматическая система отборочного полива, предназначенная для устранения дренажа хвостовой воды при выращивании люцерны. Работа выполнена на илоно-суглинистой почве Йоло в кампусе UC Davis, Калифорния, США, где люцерна считается культурой, потребляющей большое количество воды. Раньше для этого урожая использовался метод наводнения. Однако сток воды снижает эффективность этого метода. Для решения этой проблемы авторы разработали беспроводную сенсорную систему, которая предоставляет информацию о поливе от дальнего конца поля. Реализация системы осуществляется путем применения модели продвижения воды к полевому размещению пары сенсоров с сотовой связью. Фермер-ирригатор получает SMS-уведомление о времени остановки поливочной системы.

В работе [130] описана система управления поливом дерна, которая создана для предоставления эффективных решений управления водными ресурсами по доступной цене. Это облачная система управления, в которой рассматриваются различные параметры поля, такие как Evapotranspiration (ET), погодные условия, поток воды и утечка. Доступ к управлению приложениями возможен с любого компьютера, планшета или смартфона.

7.3. Мониторинг виноградников. Рассмотрим применение широкомасштабных и мобильных вычислительных технологий в мониторинге виноградников для повышения качества продукции и снижения себестоимости продукции и влияния заболеваний, связанных с культурой. В качестве примера возьмем исследование [57], посвященное мониторингу производства виноградников. Размещение БСС помогает оценить изменчивость параметров сельского хозяйства на всей территории. Первоначально на первом этапе авторы делят предметный ландшафт на несколько разных зон (зоны А, В, С) на основе географических, метеорологических и почвенных карт. На этапе планирования сети наиболее подходящая архитектура выбирается на основе требований приложения. Размер области объекта составлял 600 м × 450 м, а разные сенсоры были помещены в разные зоны. Например, авторы предположили, что в зоне С будут размещены сенсоры, измеряющие температуру, влажность, влажность почвы, освещенность и уровень рН. В зонах А и В, соответственно, были установлены сенсоры, измеряющие температуру, влажность и температуру окружающей среды, а также сенсоры освещенности. Предполагается, что сенсорные узлы имеют диапазон передачи 75–100 м. Узлы в разных зонах образуют между собой виртуальную древовидную структуру, и воспринимаемая информация достигает узла-шлюза по пути с несколькими переходами.

Рассматриваются четыре типа узлов — сенсор, привод, избыточные узлы и узел-шлюз. Сенсоры могут только собирать данные, а информация направляется на узел-шлюз. Узлы привода снабжены приводными системами полива. Приводы также могут реагировать на заданные команды о планировании полива. Избыточные узлы помогают в маршрутизации информации и имитируют функциональность неисправных узлов. Узел-шлюз действует как мост между сетью и базовой станцией. На протокол маршрутизации возложен выбор лучшего соседнего узла. Схема маршрутизации также может учитывать необходимость рационального использования энергии, и в таком случае диагонально расположенные узлы не выбираются для следующего перехода.

7.4. Точное земледелие. Точное земледелие нацелено на повышение производительности и снижение затрат. Беспроводные динамические и сенсорные сети используются в точном сельском хозяйстве для сбора полевых данных, которые затем можно проанализировать, чтобы найти наилучшие условия для ведения сельского хозяйства.

В исследовании [54] авторы предложили использовать видеонаблюдение для контроля использования удобрений в сельскохозяйственной области. Задачей работы было сохранение энергоэффективности и сокращение использования удобрений в производстве. В данной работе дроны расширенной реальности (англ. AR) используются для видеосъемки на поле. Основываясь на полученном видео, система идентифицирует и геопозирует сорняки, присутствующие в поле. Наконец, система распылителя удобрений приводится в действие на основе обработанной локализованной информации о сорняках в полях.

На рис. 5 представлен обзор системы, показывающий взаимодействие между беспилотными летательными аппаратами AR, центральной системой и распылителями удобрений. Здесь наблюдаемая площадь поля составляла 17 м на 15 м. Беспилотные летательные аппараты образуют динамическую сеть между собой и центральной системой. В этой работе

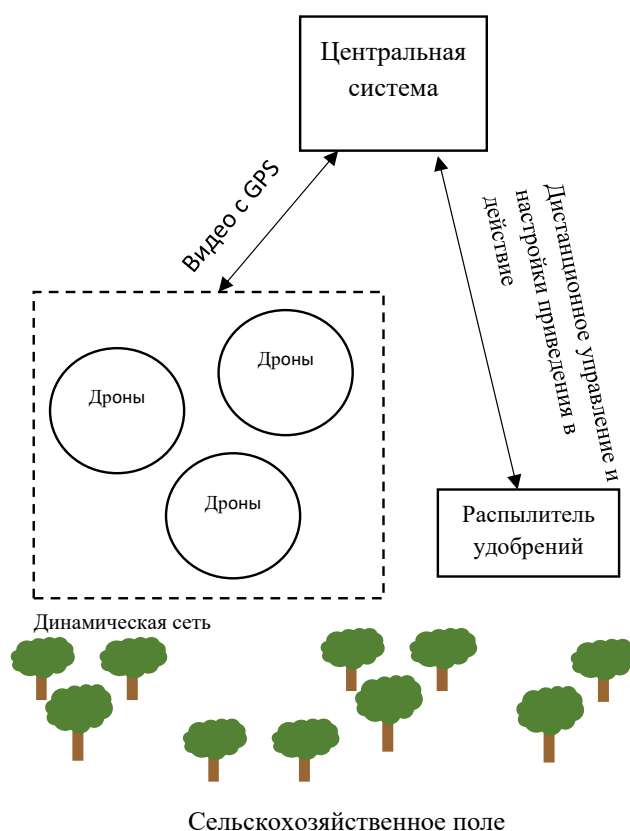


Рис. 5. Обзор системы видеосъемки на основе системы точного земледелия

применяется протокол маршрутизации с фиксированной связью для передачи информации от полевых беспилотников в центральную систему в режиме реального времени. Кроме того, дроны и другие устройства оснащены встроенным GPS-навигатором, который позволяет обновлять карту полета и вычислять расстояние между устройствами.

Видеокадры, полученные от летающих беспилотных летательных аппаратов, обрабатываются и привязываются по географическим каналам в центральной системе. Основанная на OpenCV2 платформа используется для распознавания сорняков в полевых условиях. Места сорняков в поле передаются на опрыскиватели удобрений, которые точно опрыскивают сорняки удобрениями. Таким образом, использование этой технологии увеличивает общую эффективность производства при сокращении использования удобрений [131].

Список литературы

1. Chen, N., Zhang, X., Wang, C. Integrated open geospatial web service enabled cyber-physical information infrastructure for precision agriculture monitoring // *Comput. Electron. Agric.* 2015. N 111, P. 78–91.
2. Misra, S., Krishna, P. V., Saritha, V., Agarwal, H., Shu, L., Obaidat, M.S. Efficient medium access control for cyber-physical systems with heterogeneous networks // *IEEE Syst. J.* 2015. N 9 (1), P. 22–30.
3. Gonzalez-de-Soto, M., Emmi, L., Benavides, C., Garcia, I., Gonzalez-de-Santos, P. Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture // *Biosystems Engineering*, 2016. V. 143, P. 79–94.

4. Maurya, S., Jain, V. 2016. Fuzzy based energy efficient sensor network protocol for precision agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. V. 130, P. 20–37.
5. Ngo, V., Woungang, I., Anpalagan, A., 2014. A schedule-based medium access control protocol for mobile wireless sensor networks // *Wirel. Commun. Mobile Comput.* 2016. N 14 (6). P. 629–643.
6. Foughali, K., Fathalah, K., Ali, F. Monitoring system using web of things in precision agriculture // *Procedia Computer Science*. 2017. V. 110. P. 402–409.
7. Misra, S., Kar, P., Roy, A., Obaidat, M. S., 2014. Existence of dumb nodes in stationary wireless sensor network // *J. Syst. Softw.* 2014. N 91. P. 135–146.
8. Qu, Y., Zhu, Y., Han, W., Wang, J., Ma, M. Crop leaf area index observations with a wireless sensor network and its potential for validating remote sensing products // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Rem. Sens.* 2014. N 7 (2). P. 431–444.
9. Shakhov, V. Experiment Design for Parameter Estimation in Sensing Models // *Springer LNCS*. 2013. V. 8072. P. 151–158.
10. Riquelme, J. A. L., Soto, F., Suardíaz, J., Sánchez, P., Iborra, A., Vera, J. A. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain // *Comput. Electron. Agric.* 2009. N 68 (1). P. 25–35.
11. Garcia-Sanchez, A. J., Garcia-Sanchez, F., Garcia-Haro, J. Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops // *Comput. Electron. Agric.* 2011. N 75 (2). P. 288–303.
12. Camilli, A., Cugnasca, C. E., Saraiva, A. M., Hirakawa, A. R., Corrêa, P. L. From wireless sensors to field mapping: anatomy of an application for precision agriculture // *Comput. Electron. Agric.* 2007. N 58 (1). P. 25–36.
13. Behzadan, A., Anpalagan, A., Woungang, I., Ma, B., Chao, H. C. An energy efficient utility-based distributed data routing scheme for heterogeneous sensor networks // *Wirel. Commun. Mobile Comput.* 2014. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1002/wcm.2474>.
14. Dhurandher, S. K., Sharma, D. K., Woungang, I., Saini, A. Efficient routing based on past information to predict the future location for message passing in infrastructure-less opportunistic networks. *J. Supercomput.* 2014. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-014-1243-5>.
15. Postel, S. L. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead // *Ecol. Appl.* 1999. N 10. P. 941–948.
16. Bouwer, H. Integrated water management: emerging issues and challenges // *Agric. Water Manage.* 2000. N 45 (3). P. 217–228.
17. Saleth, R., Dinar, A. Institutional changes in global water sector: trends, patterns, and implications // *Water Policy*. 2000. N 2 (3). P. 175–199.
18. Jury, W. A., Vaux Jr., H. J. The emerging global water crisis: managing scarcity and conflict between water users // *Adv. Agron.* 2007. N 95. P. 1–76.
19. Falloon, P., Betts, R. Climate impacts on european agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation — the importance of an integrated approach // *Sci. Total Environ.* 2010. N 408 (23). P. 5667–5687.
20. Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., Foley, J. A. Closing yield gaps through nutrient and water management // *Nature*. 2012. N 490. P. 254–257.
21. J'son&PartnersConsulting, 2017. Communication technologies for the Internet of things in agriculture and the role of telecom operators. [El. Res.]: <https://clck.ru/CBqQd>.
22. Suprem, A., Mahalik, N., Kim, K. A review on application of technology systems, standard sand interfaces for agriculture and food sector // *Comput. Stand. Interfaces.* 2013. N 35 (4). P. 355–364.
23. Wang, N., Zhang, N., Wang, M. Wireless sensors in agriculture and food industry — recent development and future perspective // *Comput. Electron. Agric.* 2006. N 50 (1). P. 1–14.
24. Hart, J. K., Martinez, K. Environmental sensor networks: a revolution in the earth system science // *Earth Sci. Rev.* 2006. N 78 (3–4). P. 177–191.

25. Burrell, J., Brooke, T., Beckwith, R. Vineyard computing: sensor networks in agricultural production // *IEEE Pervasive Comput.* 2004. N 3 (1). P. 38–45.
26. Diallo, O., Rodrigues, J.J.P.C., Sene, M., Mauri, J.L. Distributed database management techniques for wireless sensor networks // *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2015. N 26 (2). P. 604–620.
27. Srbinovska, M., Gavrovski, C., Dimcev, V., Krkoleva, A., Borozan, V. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks // *J. Clean. Prod.* 2015. N 88. P. 297–307.
28. Zhao, L., He, L., Jin, X., Yu, W. Design of wireless sensor network middleware for agricultural applications // *Proc. IFIP Adv. Inform. Commun. Technol.* 2013. N 393. P. 270–279.
29. Karim, L., Anpalagan, A., Nasser, N., Almhana, J. Sensor-based M2M agriculture monitoring systems for developing countries: state and challenges // *Netw. Protoc. Algor.* 2013. N 5 (3). P. 68–86.
30. Zhang, H., Shu, L., Rodrigues, J. J., Chieh Chao, H. Solving network isolation problem in duty-cycled wireless sensor networks // *Proceeding of the International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys)*. 2013. P. 543–544.
31. Krishna, P.V., Saritha, V., Vedha, G., Bhiwal, A., Chawla, A. S., 2012. Quality-of-service-enabled ant colony-based multipath routing for mobile ad hoc networks // *IET Commun.* 2012. N 6 (1). P. 76–83.
32. Shakhov, V., Migov, D., Rodionov, A. Operation strategy for energy harvesting wireless sensor networks // *Proceedings of the ACM 9th Int. Conf. on Ubiquitous Information Management and Communication, New York, USA.* 2015.
33. Шахов В. В., Юргенсон А. Н., Соколова О. Д. Моделирование воздействия атаки Black Hole на беспроводные сети // *Программные продукты и системы.* 2017. № 1. С. 34–39.
34. Mirabella, O., Brischetto, M. A hybrid wired/wireless networking infrastructure for greenhouse management // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2011. N 60 (2). P. 398–407.
35. Gennaro, S., Matese, A., Gioli, B., Toscano, P., Zaldei, A., Palliotti, A., Genesio, L. Multisensor approach to assess vineyard thermal dynamics combining high-resolution unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing and wireless sensor network (WSN) proximal sensing // *Scientia Horticulturae.* 2017. V. 221. P. 83–87.
36. Brewster, C., Roussaki, I., Kalatzis, N., Doolin, K., Ellis, K. IoT in Agriculture: Designing a Europe-Wide Large-Scale Pilot. 2017.
37. *IEEE Communications Magazine.* V. 55. N 9. P. 26–33.
38. Mat, I., Kassim, M., Harun, A., Yusoff, I., 2016. IoT in Precision Agriculture applications using Wireless Moisture Sensor Network // *Proceedings of IEEE Conference on Open Systems.* 2016. P. 24–29.
39. Шахов В. В., Стрельников В. Е., Нгуен В. Д. К вопросу об эффективности беспроводных сенсорных сетей // *Проблемы информатики.* 2014. № 2 (23). С. 28–38.
40. Мигов Д. А. Показатель надежности для беспроводных самоорганизующихся сетей // *Вестник СибГУТИ.* 2014. № 3 (27). С. 3–12.
41. Ojha, T., Bera, S., Misra, S., Raghuwanshi, N.S. Dynamic duty scheduling for green sensor-cloud applications // *Proceedings of IEEE CloudCom, Singapore.* 2014.
42. Misra, S., Krishna, P.V., Kalaiselvan, K., Saritha, V., Obaidat, M. S. Learning automata-based QoS framework for cloud IaaS // *IEEE Trans. Netw. Serv. Manage.* 2014. N 11 (1). P. 15–24.
43. Cho, Y., Cho, K., Shin, C., Park, J., Lee, E. S. An agricultural expert cloud for a smart farm // *Proceedings of Future Information Technology, Application, and Service. Lecture Notes in Electrical Engineering.* Springer. V. 164. P. 657–662.
44. Atzori, L., Iera, A., Morabito, G. The internet of things: a survey // *Comput. Netw.* 2010. N 54 (15). P. 2787–2805.

45. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., Palaniswami, M. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions // *Future Gener. Comput. Syst.* 2013. N 29 (7). P. 1645–1660.
46. Moghaddam, M., Entekhabi, D., Goykhman, Y., Li, K., Liu, M., Mahajan, A., Nayyar, A., Shuman, D., Teneketzis, D. A wireless soil moisture smart sensor web using physics-based optimal control: concept and initial demonstrations // *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Rem. Sens.* 2010. N 3 (4). P. 522–535.
47. Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., Makin, I. W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications // *Agric. Water Manage.* 2000. N 46 (2). P. 137–155.
48. Morais, R., Fernandes, M. A., Matos, S. G., Seródio, C., Ferreira, P. J. S. G., Reis, M. J. C. S. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture // *Comput. Electron. Agric.* 2008. N 62 (2). P.94–106.
49. Ye, J., Chen, B., Liu, Q., Fang, Y. A precision agriculture management system based on Internet of Things and WebGIS // *Proceedings of International Conference on Geoinformatics.* 2013. P. 1–5.
50. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E. A survey on sensor networks // *IEEE Commun. Mag.* 2002. N 40 (8). P. 102–114.
51. Shakhov, V. On Efficiency Improvement of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks // *Processing of IEEE 39th International Conference on Telecommunications and Signal, Vienna, Austria, 2016.* P. 56–59.
52. Akyildiz, I. F., Kasimoglu, I. H. Wireless sensor and actor networks: research challenges // *Ad Hoc Netw.* 2004. N 2 (4). P. 351–367.
53. Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D. Wireless sensor network survey // *Comput. Netw.* 2008. N 52 (12). P. 2292–2330.
54. Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., Barreiro, P., Robla, I. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends // *Sensors.* 2009. N 9 (6). P. 4728–4750.
55. Cambra, C., Díaz, J. R., Lloret, J. Deployment and performance study of an Ad Hoc network protocol for intelligent video sensing in precision agriculture // *Proceedings of Ad-Hoc Networks and Wireless. LNCS.* 2015. V. 8629. Springer, Berlin Heidelberg. P. 165–175.
56. Barcelo-Ordinas, J. M., Chanet, J. P., Hou, K. M., García-Vidal, J. A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture // *Stafford, J. (Ed.), Precision Agriculture'13.* Wageningen Academic Publishers. 2013. P. 801–808.
57. Baseca, C. C., Díaz, J. R., Lloret, J. Communication Ad Hoc protocol for intelligent video sensing using AR drones // *IEEE Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN).* 2013. P. 449–453.
58. Díaz, S. E., Pérez, J. C., Mateos, A. C., Marinescu, M. C., Guerra, B. B. A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks // *Comput. Electron. Agric.* 2011. N 76 (2). P. 252–265.
59. López, J. A., Garcia-Sanchez, A. J., Soto, F., Iborra, A., Garcia-Sanchez, F., Garcia-Haro, J. Design and validation of a wireless sensor network architecture for precision horticulture applications // *Precision Agric.* 2011. N 12 (2). P. 280–295.
60. Park, D. H., Kang, B. J., Cho, K. R., Shin, C. S., Cho, S. E., Park, J. W., Yang, W. M. A study on greenhouse automatic control system based on wireless sensor network // *Wirel. Pers. Commun.* 2011. N 56 (1). P. 117–130.
61. Matese, A., Gennaro, S. F. D., Zaldei, A., Genesio, L., Vaccari, F. P. A wireless sensor network for precision viticulture: the NAV system // *Comput. Electron. Agric.* 2009. N 69 (1). P. 51–58.
62. Lichtenberg, E., Majsztrik, J., Saavoss, M. Power demand for sensor controlled irrigation // *Water Resour. Res.* 2015. N 51. [Electron. Res].: <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR015807>.
63. Reche, A., Sendra, S., Díaz, J. R., Lloret, J. A smart M2M deployment to control the agriculture irrigation // *Proceedings of Ad-hoc Networks and Wireless, LNCS.* 2015. N 8629. P. 139–151.

64. Greenwood, D.J., Zhang, K., Hilton, H.W., Thompson, A.J. Opportunities for improving irrigation efficiency with quantitative models, soil water sensors and wireless technology // *J. Agric. Sci.* 2010. N 148. P. 1–16.
65. Gutiérrez, J., Villa-Medina, J.F., Nieto-Garibay, A., Ángel Porta-Gándara, M. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2014. N 63 (1). P. 166–176.
66. Hwang, J., Shin, C., Yoe, H. A wireless sensor network-based ubiquitous paprika growth management system // *Sensors*. 2010. N 10. P. 11566–11589.
67. Corke, P., Wark, T., Jurdak, R., Hu, W., Valencia, P., Moore, D. Environmental wireless sensor networks // *Proc. IEEE*. 2010. N 98 (11). P. 1903–1917.
68. Voulodimos, A. S., Patrikakis, C. Z., Sideridis, A. B., Ntafis, V. A., Xylouri, E. M. A complete farm management system based on animal identification using RFID technology // *Comput. Electron. Agric.* 2010. N 70 (2). P. 380–388.
69. Malaver, A., Motta, N., Corke, P., Gonzalez, F. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases // *Sensors*. 2015. N 15 (2). P. 4072–4096.
70. Yang, H., Qin, Y., Feng, G., Ci, H. Online monitoring of geological CO₂ storage and leakage based on wireless sensor networks // *IEEE Sens. J.* 2013. N 13 (2). P. 556–562.
71. Mao, X., Miao, X., He, Y., Li, X. Y., Liu, Y. CitySee: Urban CO₂ monitoring with sensors // *Proceedings of IEEE INFOCOM, Orlando, FL, USA*. 2012. P. 1611–1619.
72. Dong, X., Vuran, M. C., Irmak, S. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems // *Ad Hoc Netw.* 2013. N 11 (7). P. 1975–1987.
73. Shanwad, U. K., Patil, V. C., Gowda, H. H. Proceeding precision farming: dreams and realities for Indian agriculture // *Proceedings of Map India Conference*. 2004.
74. Mondal, P., Basu, M. Adoption of precision agriculture technologies in India and in some developing countries: scope, present status and strategies // *Prog. Nat. Sci.* 2009. N 19 (6). P. 659–666.
75. Mondal, P., Tewari, V. K., Rao, P. N. Scope of precision agriculture in India // *Proceedings of International Conference on Emerging Technologies in Agricultural and Food Engineering, Kharagpur, WB, India*, 2004. P. 103.
76. Gutiérrez, J., Villa-Medina, J.F., Nieto-Garibay, A., Ángel Porta-Gándara, M. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2014. N 63 (1). P. 166–176.
77. Akyildiz, I. F., Stuntebeck, E. P. Wireless underground sensor networks: research challenges // *Ad Hoc Netw.* 2006. N. 4 (6). P. 669–686.
78. Vuran, M. C., Akyildiz, I. F. Cross-layer packet size optimization for wireless terrestrial, underwater, and underground sensor networks // *Proceedings of IEEE INFOCOM, Phoenix, AZ, USA*, 2008. P. 780–788.
79. Silva, A. R., Vuran, M. C. Communication with aboveground devices in wireless underground sensor networks: an empirical study // *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Cape Town, South Africa*, 2010. P. 1–6.
80. Yu, X., Wu, P., Han, W., Zhang, Z. A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture // *Comput. Stand. Interfaces*. 2013. N 35 (1). P. 59–64.
81. Akyildiz, I. F., Kasimoglu, I. H. Wireless sensor and actor networks: research challenges // *Ad Hoc Netw.* 2004. N 2 (4). P. 351–367.
82. Kulkarni, R. V., Förster, A., Venayagamoorthy, G. K. Computational intelligence in wireless sensor networks: a survey // *Commun. Surv. Tutorials*. 2011. N 13 (1). P. 68–96.

83. Shakhov, V. Performance Evaluation of MAC Protocols in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks // Springer LNCS. 2016. V. 9787. P. 344–352.
84. Wu, D., Cai, Y., Zhou, L., Wang, J. A cooperative communication scheme based on coalition formation game in clustered wireless sensor networks // IEEE Trans. Wirel. Commun. 2012. N 11 (3). P. 1190–1200.
85. Shakhov, V. A Graph-based Method for Performance Analysis of Energy Harvesting Wireless Sensor Networks Reliability // Springer Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016. V. 391. P. 127–132.
86. Шахов В. В., Мигов Д. А., Соколова О. Д. Беспроводные сенсорные сети, оснащенные средствами получения энергии из окружающей среды // Проблемы информатики, 2014. № 4. С. 69–79.
87. Chu, X., Sethu, H. Cooperative topology control with adaptation for improved lifetime in wireless ad-hoc networks // Proceedings of IEEE INFOCOM, Orlando, FL, USA, 2012. P. 262–270.
88. Li, M., Li, Z., Vasilakos, A.V. A survey on topology control in wireless sensor networks: taxonomy, comparative study, and open issues // Proc. IEEE. 2013. N 101 (12). P. 2538–2557.
89. Shakhov, V. On a New Type of Attack in Wireless Sensor Networks: Depletion of Battery // Proceedings of IEEE 11th International Forum on Strategic Technology, Novosibirsk, Russia, 2016. P. 491–494.
90. Vijay, G., Bdira, E. B. A., Ibnkahla, M. Cognition in wireless sensor networks: a perspective // IEEE Sens. J. 2011. N 11 (3). P. 582–592.
91. Шахов В. В., Юргенсон А. Н., Соколова О. Д. Эффективный метод генерации случайных геометрических графов для моделирования беспроводных сетей // Прикладная дискретная математика. 2016. № 4 (34). С. 99–109.
92. Misra, S., Jain, A. Policy controlled self-configuration in unattended wireless sensor networks // J. Netw. Comput. Appl. 2011. N 34 (5). P. 1530–1544.
93. Nicosopolitidis, P., Papadimitriou, G. I., Pomportsis, A. S., Sarigiannidis, P. G., Obaidat, M. S. Adaptive wireless networks using learning automata. IEEE Wirel. Commun. 2011. N 18 (2). P. 75–81.
94. Shakhov, V. Protecting Wireless Sensor Networks from Energy Exhausting Attacks // Springer LNCS, 2013. V. 7971. P. 184–193.
95. Shakhov, V., Choo, H., Bang, Y. Discord model for detecting unexpected demands in mobile networks // Future Generation Comp. Syst., 2004. V. 20 (2). P. 181–188.
96. Shakhov, V., Choo, H. An Efficient Method for Proportional Differentiated Admission Control Implementation // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013. V. 2011, Article ID 738386.
97. Shakhov, V., Migov, D. Reliability of Ad Hoc Networks with Imperfect Nodes // Springer LNCS, 2014. V. 8715, P. 49–58.
98. Adamala, S., Raghuvanshi, N. S., Mishra, A. Development of surface irrigation systems design and evaluation software (SIDES) // Comput. Electron. Agric. 2014. N 100. P. 100–109.
99. Westarp, S. V., Chieng, S., Schreier, H. A comparison between low-cost drip irrigation, conventional drip irrigation, and hand watering in Nepal // Agric. Water Manage. 2004. N 64. P. 143–160.
100. Kim, Y. D., Yang, Y. M., Kang, W. S., Kim, D. K. On the design of beacon based wireless sensor network for agricultural emergency monitoring systems // Comput. Stand. Interfaces. 2014. N 36 (2). P. 288–299.
101. Bhave, A. G., Mishra, A., Raghuvanshi, N. S. A combined bottom-up and topdown approach for assessment of climate change adaptation options // J. Hydrol. 2013. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.039>.

102. Bhargava, K., Kashyap, A., Gonsalves, T. A. Wireless sensor network based advisory system for apple scab prevention // Proceedings of National Conference on Communications, Kanpur, India, 2014. P. 1–6.
103. Gonçalves, L. B. L., Costa, F. G., Neves, L. A., Ueyama, J., Zafalon, G. F. D., Montez, C., Pinto, A. S. R. Influence of mobility models in precision spray aided by wireless sensor networks // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. N 574 (1).
104. Kwong, K. H., Wu, T. T., Goh, H. G., Sasloglou, K., Stephen, B., Glover, I., Shen, C., Du, W., Michie, C., Andonovic, I. Practical considerations for wireless sensor networks in cattle monitoring applications // Comput. Electron. Agric. 2012. N 81. P. 33–44.
105. Zia, H., Harris, N. R., Merrett, G. V., Rivers, M., Coles, N. The impact of agricultural activities on water quality: a case for collaborative catchment-scale management using integrated wireless sensor networks // Comput. Electron. Agric. 2013. N 96. P. 126–138.
106. Malaver, A., Motta, N., Corke, P., Gonzalez, F. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse // Sensors. 2015. N 15 (2). P. 4072–4096.
107. Misra, S., Singh, S. Localized policy-based target tracking using wireless sensor networks // ACM Trans. Sens. Netw. 2012. N 8 (3). P. 27.
108. Fukatsu, T., Kiura, T., Hirafuji, M. A web-based sensor network system with distributed data processing approach via web application // Comput. Stand Interfaces. 2011. N 33 (6). P. 565–573.
109. Coates, R. W., Delwiche, M. J., Broad, A., Holler, M. Wireless sensor network with irrigation valve control // Comput. Electron. Agric. 2013. N 96. P. 13–22.
110. Koch, R., Pionteck, T., Albrecht, C., Maehle, E. An adaptive system-on-chip for network applications // Proceedings of International Parallel and Distributed Processing Symposium, Rhodes Island. 2006.
111. Karim, F., Mellan, A., Stramm, B., Nguyen, A., Abdelrahman, T., Aydonat, U. The hyperprocessor: a template system-on-chip architecture for embedded multimedia applications // Proceedings of Workshop on Application Specific Processors, 2003. P. 66–73.
112. ZigBee Specifications, ZigBee Alliance Std. [El. Res.]: <http://www.zigbee.org/>.
113. Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W., Chessa, S., Gotta, A., Hu, Y. F. Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards // Comput. Commun. 2007. N 30 (7). P. 1655–1695.
114. Guo, W., Healy, W. M., Zhou, M. Impacts of 2.4-GHz ISM band interference on IEEE 802.15.4 wireless sensor network reliability in buildings // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2012. N 61. P. 2533–2544.
115. IEEE Standard for Information technology, 2006. Telecommunications and Information Exchange Between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Institute of Electrical and Electronics Engineers Std.
116. IEEE Standard for Information technology, 2005. Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications — Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements, Std.
117. IEEE Standard for Information technology, 2012. Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area networks—Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Institute of Electrical and Electronics Engineers Std.
118. Bluetooth Technology Special Interest Group. [Electron. Res.]: <https://www.bluetooth.org/>.
119. General Packet Radio Service. [Electron. Res.]: <http://www.3gpp.org/>.

120. D. J. Goodman and R. A. Myers. 3G cellular standards and patents // Proceedings of International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, 2005, P. 415–420.
121. Parkvall, S., Dahlman, E., Furuskar, A., Jading, Y., Olsson, M., Wanstedt, S., Zangi, K. ‘LTE-Advanced — Evolving LTE towards IMT-Advanced // Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Calgary, BC, 2008, P. 1–5.
122. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 3: Advanced Air Interface, Std., May 2011.
123. Sperling, O. Water Relations in Date Palm Trees — A Combined Approach using Water, Plant, and Atmospheric Data. Ben-Gurion University of the Negev, Beersheva, Israel. 2013.
124. Cohen, Y., Glasner, B.B. Date palm genetic resources and utilization // Al- Khayri, M., Jain, J., Mohan, S., Johnson, V. D. (Eds.). Date Palm Genetic Resources and Utilization. 2015. P. 265–298. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9707-8>.
125. Sperling, O., Shapira, O., Cohen, S., Tripler, E., Schwartz, A., Lazarovitch, N., Estimating sap flux densities in date palm trees using the heat dissipation method and weighing lysimeters // Tree Physiol. 2012. N 32. P. 1171–1178. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tps070>.
126. Tripler, E., Shani, U., Ben-Gal, A., Mualem, Y. Apparent steady state conditions in high resolution weighing-drainage lysimeters containing date palms grown under different salinities // Agric. Water Manage. 2012. N 107. P. 66–73. [Electron. Res.]: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.010>.
127. Yuan Rao, Zhao-hui Jiang, Naftali Lazarovitch. Investigating signal propagation and strength distribution characteristics of wireless sensor networks in date palm orchards // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. N 124. P. 107–120.
128. Moghaddam, M., Entekhabi, D., Goykhman, Y., Li, K., Liu, M., Mahajan, A., Nayyar, A., Shuman, D., Teneketzi, D. A wireless soil moisture smart sensor web using physics-based optimal control: concept and initial demonstrations // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Rem. Sens. 2010. N 3 (4). P. 522–535.
129. Lovejoy, W. S. A survey of algorithmic methods for partially observed markov decision processes // Ann. Oper. Res. 1991. N 28 (1). P. 47–65.
130. Saha, R., Raghuwanshi, N.S., Upadhyaya, S.K., Wallender, W.W., Slaughter, D. C. Water sensors with cellular system eliminate tail water drainage in alfalfa irrigation // Calif. Agric. 2011. N 65 (4). P. 202–207.
131. Aqua Management, Inc. [El. Res.]: <http://aquamanagement.com/vertical-solutions/ami-turfirrigation-controllers/>.
132. Tamoghna Ojha, Sudip Misra, Narendra Singh Raghuwanshi. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges // Computers and Electronics in Agriculture. 2015. N 118. P. 66–84.



В 2013 году О.Ю. Тарханова поступила на механико-математический факультет Новосибирского государственного университета и окончила его в 2017 году (бакалавриат). Специализировалась на кафедре дискретной математики и ин-

форматики. В 2017 году поступила в магистратуру ММФ НГУ.

In 2013 Tarhanova O. Yu. entered the Mechanics and Mathematics Department of Novosibirsk State University and finished it in 2017 (bachelor's degree). She specialized in the Department of Discrete Mathematics and Informatics. In 2017 she entered the magistracy of the MMF NSU.

Дата поступления — 05.11.2017