

УДК 631.171

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-341-9-115-118>

Тип статьи: Оригинальное исследование

Type of article: Original research

**Асадов Х.Г.*,
Махмудова В.Х.
Тарвердиева У.Х.**

НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства,
г. Баку, Азербайджанская Республика
asadzade@rambler.ru

Ключевые слова: прецизионное сельское хозяйство, сенсоры, подземные сети, измерения, радиосигналы, энергопотери.

Для цитирования: Асадов Х.Г.*, Махмудова В.Х., Тарвердиева У.Х. Исследование энергоэффективности беспроводных подземных сетей сенсоров, используемых в прецизионном сельском хозяйстве. *Аграрная наука*. 2020; 341 (9): 115–118.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-341-9-115-118>

Конфликт интересов отсутствует

**Hikmet H. Asadov,
Valida Kh. Mahmudova
Ulviya H. Tarverdiyeva**

Research Institute of Aerospace Informatics of
National Aerospace Agency, Baku city, Republic
of Azerbaijan

Key words: precision agriculture, sensor, underground network, measurements, radio signal, energetic losses.

For citation: Asadov H.H., Mahmudova V.Kh., Tarverdiyeva U.H. Research of energetic efficiency of wireless underground sensors network utilized in precision agriculture. *Agrarian Science*. 2020; 341 (9): 115–118. (In Russ.)

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-341-9-115-118>

There is no conflict of interests

Исследование энергоэффективности беспроводных подземных сетей сенсоров, используемых в прецизионном сельском хозяйстве

РЕЗЮМЕ

Рассмотрен вопрос энергоэффективности беспроводных подземных сетей сенсоров, используемых в прецизионном сельском хозяйстве. Одним из актуальных вопросов построения подземных сетей сенсоров в нуждах технологий прецизионного сельского хозяйства является потери радиосигнала сенсора, установленного под землей, в толще почвы. Определено, что потери радиосигнала увеличиваются с ростом процентного содержания влаги в почве, однако экспоненциально уменьшается с увеличением глубины расположения сенсора под землей. Указанный факт позволяет сформировать оптимизационную задачу нахождения оптимального распределения влагосодержания почвы по глубине. Решение указанной задачи позволило вычислить оптимальную зависимость влагосодержания почвы по глубине почвы, при которой усредненная величина по всему интервалу возможных глубин исследование почвы энергопотерь достигает минимума.

Research of energetic efficiency of wireless underground sensors network utilized in precision agriculture

ABSTRACT

The question on energetic effectiveness of wireless underground network of sensors used in precision agriculture is considered. One of actual questions of construction of underground sensors networks required by technologies of precision agriculture is losses of radio signal of sensor installed underground under layer of soil. It is determined that losses of radio signal increase by growth of percentage of soil humidity but decrease exponentially by increase of depth of installation of sensor. Such a fact make it possible to formulate the optimization task on determination of optimum distribution of moisture content of soil on depth. Solution of this task allowed to determine an optimum dependency of of soil water content on soil depth upon which the averaged on interval of all possible soil depths value of energetic losses reached the minimum.

Поступила: 23 июля
После доработки: 9 сентября
Принята к публикации: 10 сентября

Received: 23 July
Revised: 9 september
Accepted: 10 september

Введение

Как отмечается в работе [1], прецизионное сельское хозяйство ставит целью вырастить высококачественную сельхозпродукцию при обеспечении надлежащего менеджмента стоимости выращенного продукта. Одним из основных средств достижения этой цели являются беспроводные сети сенсоров (измерительных преобразователей), позволяющих контролировать температуру, влажность, а также содержание минералов в почве. Одним из основных вопросов нормального обеспечения функционирования беспроводных сетей являются энергоснабжение сенсоров, входящих в эти сети, т. к. весь запас используемой в сети энергии ограничивается емкостью применяемой для этой цели батареи.

В технической литературе, посвященной энергоэффективности беспроводных сетей, в качестве базового используется следующее определение энергоэффективности η :

$$\eta = \frac{W \cdot \log_2(1 + \nu)}{P}, \quad (1)$$

где W — полоса частот коммуникации; P — мощность сигнала; ν — отношение сигнал шум [2].

Что касается энергопотребления в беспроводных сетях, то здесь в основном используются следующие модели.

1) Модель, предложенная в работе [3], согласно которой при приеме и передача сигналов сенсор потребляет электроэнергию, определяемую как

$$E = \ell(e_r + e_t + e_{fs}d^2), \quad (2)$$

где ℓ — размер пакета данных; e_r — энергия принимаемого сигнала; e_t — энергия передаваемого сигнала; e_{fs} — энергия, посылаемая в свободное пространство; d — расстояние.

2) Модель, предложенная в работе [4], согласно которой потребляемая энергия при посылке сообщения объемом l бит определяется как

$$\psi(l, d) = \alpha_1 l + \alpha_2 \cdot ld^2, \quad (3)$$

где α_1 — электроэнергия, потребляемая узлами электроники, необходимая для передачи информации объемом l бит; α_2 — электроэнергия, затрачиваемая для передачи информации объемом l бит при передаче по радио посылку сообщения. Вместе с тем, как отмечается [5], в прецизионном сельском хозяйстве используются не только надземные, но и подземные измерительные преобразователи. Например, для успешного ведения сельского хозяйства весьма важно иметь оперативную информацию о влажности и температуре почвы, а также о наличии минеральных солей в почве. Вся эта информация в ос-

новном формируется с помощью сенсоров, устанавливаемых внутри почвы на требуемой глубине [6]. Очевидно, что радиосигналы, посылаемые такими сенсорами, установленными в абсолютно беспроводных подземных сетях и снабженными памятью, процессором радиоузлом, антенной и источником питания, ослабляются при прохождении через влажный слой почвы. Далее в настоящей статье рассматривается и решается вопрос об оптимизации энергопотерь в абсолютно беспроводных подземных измерительных сетях.

Предлагаемый метод оптимизации энергопотерь в подземных беспроводных сетях

Следует отметить, что абсолютно беспроводным подземным измерительным сетям в последние десятилетия посвящено достаточное количество работ (например, [7–10]). Такие сети весьма скрытны и могут быть применены не только в прецизионном сельском хозяйстве, но и в геофизических целях [11]. Функциональная схема одного узла подземной измерительной сети показана на рисунке 1.

Согласно [6], в качестве датчика влаги был использован сенсор DS 18B20 (Dallas Company), в качестве процессора — микроконтроллер MSP430 (TI Company).

Размещение всей сети в исследуемой зоне показано на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, измерительные узлы полностью автономны и могут быть расположены как на

Рис. 1. Функциональная схема одного узла подземной измерительной сети

Fig. 1. Decomposition of linen after 90 days of exposure, 2017.

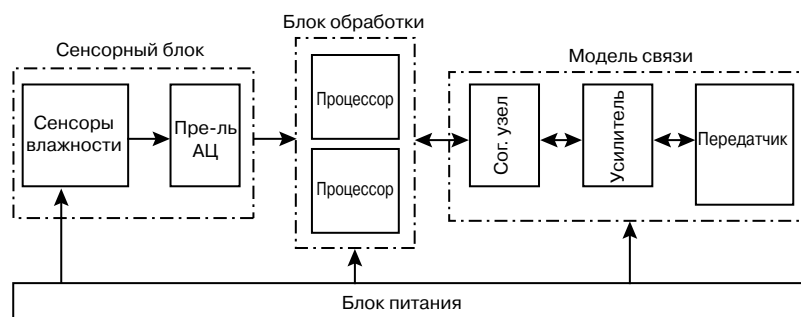


Рис. 2. Конфигурация размещения подземной сети измерения влаги в толще почвы

Fig. 2. Configuration of the placement of an underground network for measuring moisture in the soil

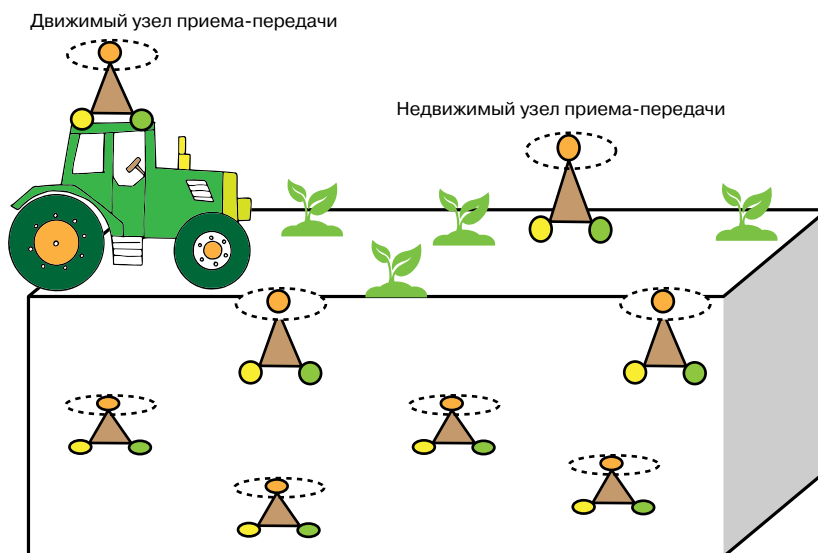
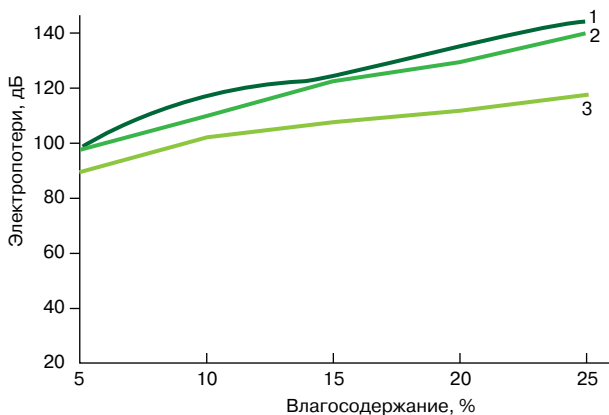


Рис. 3. Экспериментально полученные кривые зависимости энергопотерь в почве от процентного содержания влаги и частоты радио сигнала [6]. Цифрами обозначены: 1 — 915 МГц; 2 — 868 МГц; 3 — 433 МГц

Fig. 3. Experimentally obtained curves of the dependence of energy losses in the soil on the percentage of moisture and the frequency of the radio signal [6]. The numbers indicate: 1 — 915 MHz; 2 — 868 MHz; 3 — 433 MHz



одинаковой, так и на различной глубине. При этом центральный узел приема-передачи, поддерживающий связь с автономными измерителями на радиочастоте, может быть подвижным или неподвижным.

Одна из основных проблем в рассматриваемом подклассе беспроводных распределенных измерительных сетей в плане энергопотерь — затухание радиосигнала по глубине залегания сенсора. При этом степень затухания сигнала оказывается зависимой от таких факторов, как толщина слоя почвы над сенсором, влажность почвы и частота радиосигнала. Результаты экспериментальных исследований зависимости энергетических потерь от процентного содержания влаги показаны на рисунке 3 [6]. Как видно из графиков, показанных на рис. 3, при увеличении процентного содержания влаги в почве энергопотери в пути увеличиваются почти по линейному закону во всех примененных радиочастотах. Результаты экспериментальных исследований зависимости энергопотерь от глубины размещения сенсоров приведены на рисунке 4 [6]. Как видно из графиков, приведенных на рисунке 4, с увеличением толщины почвенного слоя энергопотери растут.

С учетом вышеизложенного, ниже рассмотрим вопрос об оптимизации размещения узлов измерения в полностью беспроводной подземной сети измерений.

Постановка задачи оптимизации сети

Как видно из графиков, представленных на рисунке 3, зависимость энергопотерь от процентного содержания влаги может быть аппроксимирована по формуле

$$P_1(W) = A_1 + k_1(f) \cdot W, \quad (4)$$

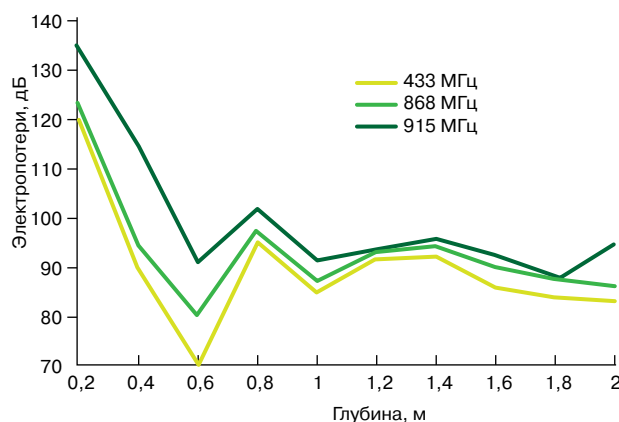
где $A_1 = P(W)$ при $W = 5\%$; $k_1(f)$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты f ; $P(W)$ — энергопотери, в качестве функции от W — процентного содержания влаги в почве.

Из графиков, представленных на рисунке 4, видно, что зависимость энергопотерь от глубины установки сенсора может быть аппроксимирована экспонентой в виде

$$P_2(d) = A_2 \exp \left[-\frac{d}{k_2(f)} \right], \quad (5)$$

Рис. 4. Экспериментально полученные кривые зависимости энергопотерь в почве от глубины почвенного слоя [6]. Цифрами обозначены: 1 — 915 МГц; 2 — 868 МГц; 3 — 433 МГц

Fig. 4. Experimentally obtained curves of the dependence of energy losses in the soil on the depth of the soil layer [6]: 1 — 915 MHz; 2 — 868 MHz; 3 — 433 MHz



где $A_2 = P_2(d)$, при $d = 0$; $k_2(f)$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты f ;

Учитывая хорошо известный факт о том, что с увеличением глубины влажность почвы растет, можно ввести на рассмотрение функцию связи.

$$d = d(W). \quad (6)$$

Так как функции $P_1(W)$ и $P_2(d(W))$ в зависимости от W изменяются парафазно (т. е. если один растет, то другой уменьшается и наоборот), то для формирования критерия оптимизации можно применить метод многокритериальной оптимизации, используя аппарат геометрического усреднения [12].

Следовательно, можно сформировать произведение Z определяемое как

$$Z = [A_1 + k_1(f) \cdot W]^{\alpha_1} \cdot \left[A_2 \cdot \exp \left(-\frac{d(W)}{k_2(f)} \right) \right]^{\alpha_2}, \quad (7)$$

где α_1, α_2 — весовые коэффициенты; $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

Далее применим метод двойного усреднения, изложенный в [12], в несколько другой постановке.

Примем в (7) $\alpha_1 = \alpha_2$. Следовательно, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,5$. Рассмотрим квадратичный показатель

$$Y = Z^2, \quad (8)$$

и составим следующий функционал оптимизации

$$Y_{\text{инт}} = \int_0^{W_{\text{max}}} [A_1 + k_1(f) \cdot W] \cdot \left[A_2 \cdot \exp \left(-\frac{d(W)}{k_2(f)} \right) \right] dW. \quad (9)$$

Таким образом, ставится задача вычисления оптимальной функции связи $d(W)$, при которой критерий (9) достиг бы минимума.

Для решения оптимизационной задачи (9) несколько сузим класс функции, где возможен отбор оптимальной функции $d(W)_{\text{опт}}$. Для этого на искомую функцию наложим следующее ограничение

$$\int_0^{W_{\text{max}}} d(W) dW = C; \quad C = \text{const.} \quad (10)$$

Возможные графики функции, удовлетворяющие условию (10) приведены на рисунке 5.

Решение задачи оптимизации подземных беспроводных сетей.

С учетом выражений (9) и (10) можно сформировать целевой функционал безусловной вариационной оптимизации $Y_0(d(W))$ в виде.

$$Y_0(d(W)) = \int_0^{W_{max}} [A_1 + k_1(f) \cdot W] \cdot \left[A_2 \cdot \exp\left(\frac{-d(W)}{k_2(f)}\right) dW \right] + \lambda \left[\int_0^{W_{max}} d(W) dW - C \right], \quad (11)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Согласно [13], решение оптимизационной задачи (11) должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ [A_1 + k_1(f)W] \cdot \left[A_2 \cdot \exp\left(\frac{-d(W)}{k_2(f)}\right) + \lambda [d(f) - C] \right] \right\}}{d(d(W))} = 0. \quad (12)$$

Из (12) получаем:

$$\frac{-[A_1 + k_1(f) \cdot W] \cdot A_2 \cdot \exp\left(\frac{-d(W)}{k_2(f)}\right)}{k_2(f)} + \lambda = 0. \quad (13)$$

Из (13) окончательно находим

$$d(W) = k_2(f) \cdot \ln \left[\frac{[A_1 + k_2(f) \cdot W] \cdot A_2}{\lambda \cdot k_2(f)} \right]. \quad (14)$$

Для нахождения значения постоянной λ достаточно вставить (14) в выражение (10), осуществить интегрирование и вычислить λ .

Осуществив проверку знака второй производной интегранта в (11) по $d(W)$ можно убедиться, что этот знак плюс, т. е. $Y(d(W))$ при решении (14) достигает минимума.

Следовательно, можно заключить, что усредненная величина по интервалу $(0 \div W_{max})$ потерь радиосигнала сенсоров при условии (14) достигает минимальной величины.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Kashif Naseer Qureshi, Muhammad Umair Bashir, Jaime Lloret and Antonio Leon / Optimized Cluster — Based Dynamic Energy — Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks in Agriculture Precision. *Journal of sensors*. Volume 2020, Article ID 9040395, 19 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/9040395>
2. Zesong Fei, Bin Li, Shaoshi Yang, Chengwen Xing, Hongbin Chen, Lajos Hanzo / A Survey of Multi — Objective Optimization in Wireless Sensor Networks: Metrics, Algorithms and Open Problems. ACCEPTED TO APPEAR ON IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, SEPT 2016
arXiv: 1609.04069v1 [cs.NI] 13 Sep 2016
3. J. Shen, A. Wang, C. Wang, P. C. K. Hung and C. F. Lai, "An efficient centroid — based routing protocol for energy management in WSN — assisted IoT," *IEEE Access*. 2017;(5):18469-18479.
4. Yousef Hamouda, Mohammed Msallam. Variable sampling interval for energy — efficient heterogeneous precision agriculture using Wireless Sensor Networks. *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*. 2020;(32):88-98.
5. Mr. Kunal Goel, Dr. Amit Kumar Bindal. Wireless Sensor Network in Precision Agriculture: A Survey Report. 5th IEEE International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC — 2018), 20-22 Dec, 2018. Solan, India
6. Xiaoping Yu, Pute Wu, Wenting Han and Zenglin Zhang. Overview of wireless underground sensor networks for agriculture.

ОБ АВТОРЕ:

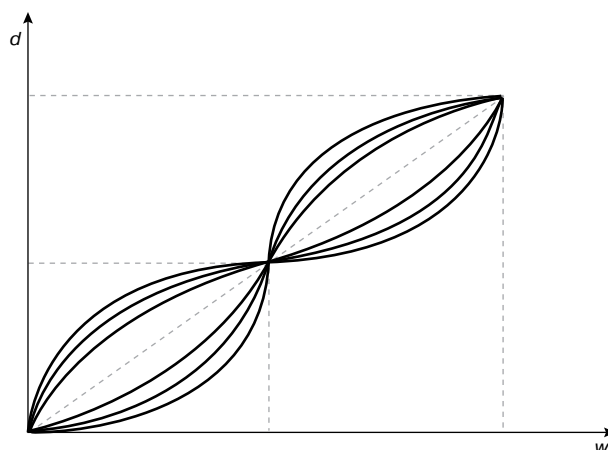
Асадов Хикмет Гамидович, д.т.н., профессор, нач. отд. НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства

Махмудова Валида Ханкиши, к.т.н., ученый секретарь НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, г. Баку. Азербайджанская Республика
asadzade@rambler.ru

Тарвердиева Ульвия Хикмет гызы, инженер, Научно-производственный центр "ОЗОН", г. Баку. Азербайджанская Республика

Рис. 5. Возможные варианты функции $d(W)$ удовлетворяющие условию (10)

Fig. 5. Possible variants of the function $d(W)$ satisfying condition (10)



Заключение

Таким образом, для обеспечения автономности, скрытности и надежности беспроводных сетей возможен переход на подземные беспроводные сети. Одним из актуальных вопросов построения таких сетей в нуждах прецизионного сельского хозяйства являются потери радиосигнала установленного под землей сенсора в толще почвы. Потери радиосигнала увеличиваются с ростом процентного содержания влаги в почве, а также экспоненциально уменьшаются с увеличением глубины расположения сенсора под землей. Это обстоятельство обуславливает постановку оптимизационной задачи нахождения оптимального распределения влагосодержания почвы по глубины. Решение указанной задачи позволило вычислить оптимальную зависимость влагосодержания почвы от глубины, при которой усредненная величина по всему интервалу возможных глубин исследование почвы энергопотерь достигает минимума.

African Journal of Biotechnology. 2012;11(17):3942-3948.

7. Li. L., Mehmet C., Akyildiz I.F. Characteristics of Underground Channel for Wireless Underground Sensor Networks. *The Sixth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop*. 2007;(6):12-15.

8. Akyildiz I.F., Vuran M.C., Sun Z. Channel modeling for Wireless Underground Communication in Soil. *Phys. Commun.* 2009:167-183

9. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayirci E. Wireless Sensor Networks: A Survey. *Computer Networks*. 2002;38(4):393-422.

10. Akyildiz I.F., Stuntebeck E.P. Wireless underground sensor networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks*. 2006;(4):669-686.

11. Sun Z., Akyildiz I.F. Channel modeling of Wireless Networks in Tunnels in Proc. IEEE Globecom New Orleans, USA. 2008.

12. Джавадов Н.Г., Асадов Х.Г., Казимлы Р.В. Метод двойного усреднения для минимизации неопределенности результатов измерения парниковых газов в наземных распределенных сетях атмосферных измерений. *Метрология*. 2020;(2):19-31. [Dzhavadov N.G., Asadov H.G., Kazimly R.V. A double averaging method for minimizing the uncertainty in the measurement results of greenhouse gases in ground-based distributed atmospheric measurement networks. *Metrology*. 2020;(2):19-31.]

13. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. Наука, 1974. 432 с. [Elsgol'ts L.E. Differential equations and calculus of variations. M. Nauka, 1974. 432 p.]

ABOUT THE AUTHOR:

Hikmet H. Asadov, doctor of technical sciences, professor, head of department of Research Institute of Aerospace Informatics of National Aerospace Agency

Valida Kh. Mahmudova, candidate of technical sciences, scientific secretary of Research Institute of Aerospace Informatics of National Aerospace Agency, Baku city, Republic of Azerbaijan

Tarverdiyeva Ulviya Hikmat gizi, engineer, Scientific-industrial center "OZONE", Baku, Azerbaijan Republic.