

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /
POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE
УДК 621.81

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, доцент, канд. техн. наук
E-mail: asa-finance@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ, профессор, докт. техн. наук
E-mail: tatiana49@mail.ru

МАТВЕЕВ АНДРИС ИЛМАРОВИЧ, аспирант
E-mail: anddriis@bk.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

Для получения информации о состоянии сельскохозяйственных объектов автоматического управления перспективно использование централизованного принципа сбора данных, при котором информация от многочисленных датчиков передается по беспроводным каналам связи. Датчики комплектуются приемо-передающими устройствами, для питания которых требуется электрическая энергия. С целью снижения энергопотребления предложено осуществлять ступенчатую передачу данных, при которой каждый элемент телеметрической системы является одновременно и источником информации, и ретранслятором информации от соседних элементов. Показано, что с увеличением количества ступеней «приема-передачи» объем потребляемой энергии экспоненциально снижается. Благодаря алгоритму функционирования координатора и маршрутизатора такая система способна к самоорганизации и самовосстановлению. При выходе из строя каких-либо элементов сети, а также в случае изменения их положения в пространстве система без участия оператора определяет новую траекторию передачи сигналов и предписывает ее каждому элементу по служебному каналу. Для повышения экономии энергии и эффективности связи предложено дополнить алгоритм подключения датчиков их поочередной коммутацией. При этом в каждый момент времени осуществляется подключение к пункту обработки информации только одного датчика по кратчайшей траектории через ограниченное количество работающих элементов сети. С целью достижения экономии энергии остальные элементы находятся «в спящем режиме». Указано, что частота опроса датчиков должна удовлетворять двум альтернативным требованиям: недопустимости потери информации при быстром изменении состояния объекта управления и необходимости непризнания информации достоверной, если она получена до завершения переходных процессов в линии связи. На основании оценки соотношения уровней полезного сигнала в приемной антенне и шумов, а также с учетом искажений при восстановлении и дискретизации информации выведены формулы для определения искомой частоты.

Ключевые слова: телеметрические системы, датчики, радиосвязь, энергопотребление, прием и передача информации, ZigBee-технология, поочередное подключение, элемент сети.

Формат цитирования: Андреев С.А., Воробьев В.А., Матвеев А.И. Снижение энергопотребления телеметрическими системами сельскохозяйственного назначения // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. N1(89). С. 60-65.

REDUCING ENERGY CONSUMPTION OF TELEMETRIC FARM SYSTEMS

SERGEY A. ANDREYEV, PhD (Eng), Associate Professor
E-mail: asa-finance@yandex.ru

VIKTOR A. VOROBYEV, PhD (Eng), Professor
E-mail: tatiana49@mail.ru

ANDRIS I. MATVEYEV, *postgraduate student*

E-mail: anddris@bk.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

To obtain information on the state of automated control facilities, it is expedient to use the centralized principle of data collection, in which information from multiple sensors is transmitted via wireless communication channels. The sensors are equipped with receiving and transmitting devices that require electrical energy for their power supply. In order to reduce energy consumption, it is proposed to carry out a step-by-step data transfer, in which each element of the telemetry system is both a source of information and a relay information from neighboring elements. The paper shows that with an increase in the number of “receive-transmit” steps, the amount of energy consumed exponentially decreases. Due to the functioning algorithm of the coordinator and the router, the considered system is capable of self-organizing and self-recovering. If any elements of the network fail, as well as in the case of a change in the spatial location of these elements, the system, without an operator’s intervention, determines a new signal transmission path and assigns it to each element through the service channel. In order to increase energy saving and communication efficiency, it is proposed to supplement the sensor connection algorithm with their alternate switching. In this case, at each time point, only one sensor is connected to the information processing point along the shortest path through a limited number of working network elements. To ensure energy savings, the remaining elements are “in a sleep mode”. The author note that the sensor’s sampling frequency should comply with two alternative requirements: the prevention of information loss during a rapid change in the state of the control object and the necessity not to recognize any information as reliable if it is received before the transients in the communication line are completed. Basing on the ratio assessment of the useful signal levels in the receiving antenna and noise, as well as taking into account the distortions in the restoration and discretization of information, the authors have derived formulas for determining the desired frequency.

Key words: telemetry systems, sensors, radio communication, power consumption, reception and transmission of information, ZigBee-technology, alternate connection, network element.

For citation: Andreyev S.A., Vorobyev V.A., Matveyev A.I. Reducing energy consumption of telemetric farm systems. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018; 6(88): 60-65. (in Rus.).

Введение. Сложность сбора точной информации о различных параметрах объектов управления часто усугубляется удаленностью контролируемых объектов от управляющего устройства и их высокой рассредоточенностью. К таким технологическим процессам относятся многопараметрическое управление микроклиматом в теплицах, управление орошением открытого грунта в зависимости от ряда параметров почвы и погодных условий, и другие. В этих случаях информация о состоянии объектов управления измеряется многочисленными датчиками и передается на пункт обработки по протяженным линиям связи. Перечисленные технические средства составляют основу телеметрических систем.

Для передачи полученной информации наиболее предпочтительны беспроводные линии связи с использованием радиотехнических средств [1].

Работа телеметрических систем сопровождается потреблением электрической энергии, необходимой для питания параметрических датчиков, преобразователей, устройств первичной обработки, накопления и передачи информации. Электроснабжение этих устройств является серьезной проблемой, так как использование промышленной сети во многих случаях невозможно, а применение химических источников неудобно вследствие необходимости их периодического обслуживания. Для электропитания слаботочных потребителей используют локальные преобразователи различных видов энергии: низкочастотные механические вибрации среды, колебания температуры или атмосферного давления, электромагнитный фон промышленного происхождения и т.д. [2, 3]. Поскольку перечисленные виды энергии характеризуются крайне низкой плотностью, особую актуальность приобретает проблема снижения энергоемкости телеметрических систем.

Решение этой проблемы возможно благодаря новому принципу построения системы связи, заключающемуся в ступенчатой передаче информации на пути ее следования от датчиков к пункту обработки данных. В этой системе каждый датчик оснащен приемо-передающим устройством, с помощью которого осуществляется передача измеренного значения на соседний однотипный элемент, а также прием информативных сигналов от других соседних элементов, усиление этих сигналов и передачу их на последующие элементы системы. В подобной системе каждый однотипный элемент выполняет две функции: получение от «собственного» датчика информации о контролируемом параметре с передачей ее другим элементам и ретранслирование информативных сигналов от других элементов с «чужими» датчиками. Схожий принцип организации связи применен в ZigBee-технологии, предложенный для взаимодействия модулей охранно-пожарной сигнализации и управления инженерными сетями «умного дома» [4, 5]. Предлагаемый нами принцип существенно отличается от известного благодаря сочетанию «ступенчатой» передачи информации между конечными элементами цепи с разделением процесса подключения отдельных элементов телеметрической системы во времени. Эта мера позволила увеличить разрешающую способность передачи информации на типовом оборудовании, не повышая несущую частоту связи, и существенно снизить энергопотребление.

Цель работы – обоснование возможности снижения энергоемкости процесса передачи данных в телеметрических системах сельскохозяйственного назначения за счет использования модернизированной ZigBee-технологии с поочередной коммутацией отдельных элементов сети.

Материал и методы. Материалом исследований послужили сведения из теории распространения электромагнитных волн, а также передовые схемные решения по реализации самонастраивающихся и самосовершенствующихся систем. Применен метод восхождения от абстрактного к конкретному знанию с последующей проверкой отдельных фрагментов теоретических рассуждений эмпирическим путем.

Результаты и обсуждения. Сравним энергетические характеристики традиционного и предлагаемого способов организации связи. На рисунке 1 показаны две возможные траектории прохождения сигнала при организации связи: традиционным способом (траектория А) и с использованием ZigBee-технологии (траектория В).

В соответствии с формулой Фрииса [6], для осуществления передачи данных по эфиру необходим резерв мощности, пропорциональный квадрату расстояния d между передатчиком и приемником, оснащенных сонаправленными антеннами и взаимодействующих с электромагнитными волнами одинаковой поляризации

$$P_{r1} = \frac{P_r (4\pi)^2 \cdot d^2}{G_r G_r \lambda^2}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где P_r – минимально допустимая электрическая мощность сигнала, наводимого в приемной антенне, Вт; G_r и G_r – коэффициенты усиления приемной и передающей антенны соответственно; λ – длина волны, м.

При ступенчатой передаче информации потребляемая мощность будет определяться суммой мощностей, излучаемых передающими антеннами каждого участка цепи

$$P_{r2} = \sum_{i=1}^n \frac{P_r (4\pi)^2 \cdot b_i^2}{G_r G_r \lambda^2}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где i – номер участка цепи; b_i – длина i -го участка, м; n – количество участков.

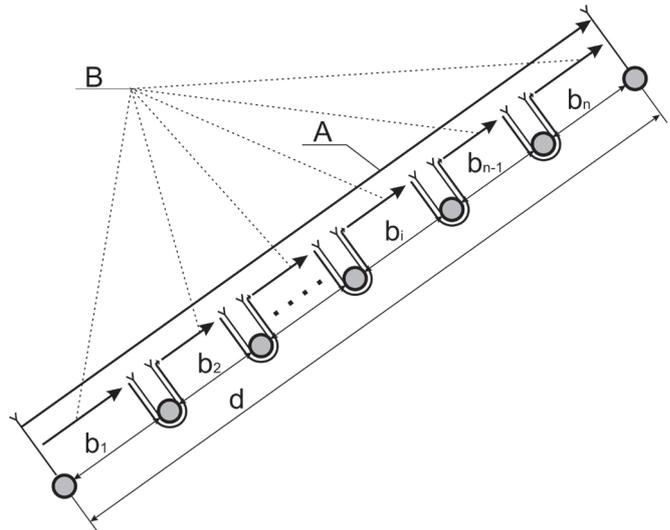


Рис. 1. Траектории прохождения радиосигнала при различных способах организации связи

Fig. 1. Radio signal trajectory in different communication patterns

При одинаковых длинах всех участков общая длина линии связи составит величину $d = bn$, а суммарная мощность определится в соответствии с выражением

$$P_{r3} = \frac{P_r (4\pi)^2 \cdot n \left(\frac{d}{n}\right)^2}{G_r G_r \lambda} = \frac{P_r (4\pi)^2 \cdot \frac{d^2}{n}}{G_r G_r \lambda}, \text{ Вт} \quad (3)$$

Для приемных и передающих антенн с круговой диаграммой направленности $G_r = G_r = 1$. В результате подстановки в выражение (3) значений $P_r = 10^{-5}$ Вт; $d = 1000$ м, $\lambda = 0,1$ м и $n = 1 \dots 18$ получим ряд значений мощностей, которые представим графически в функции n на рисунке 2.

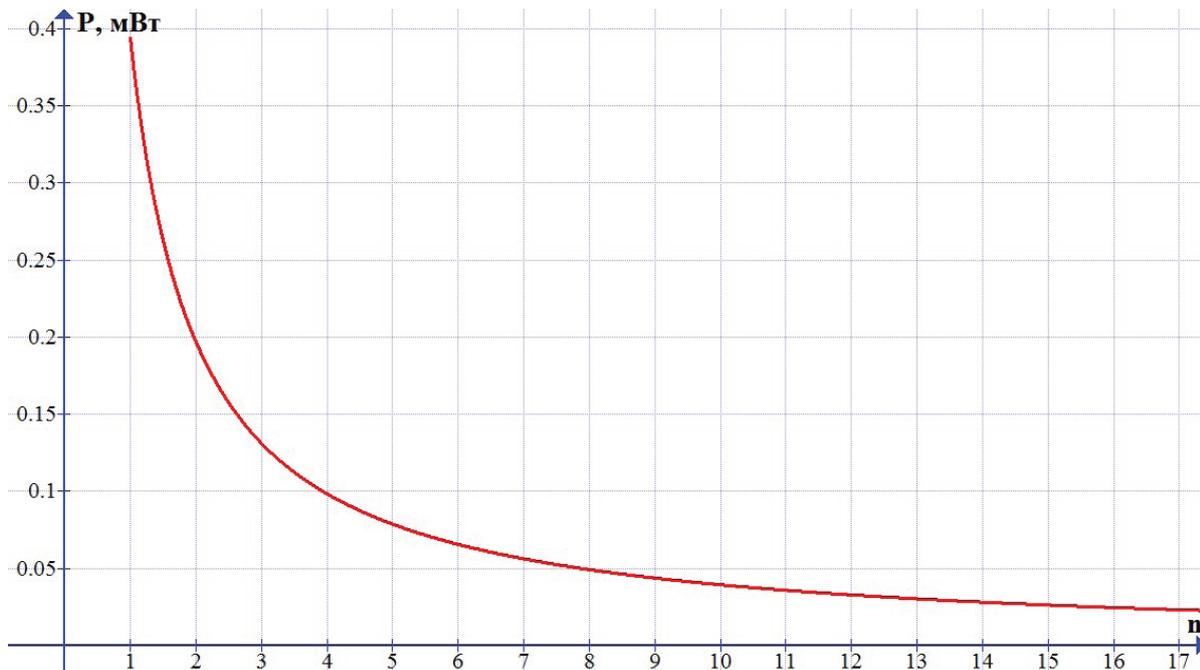


Рис. 2. Зависимость излучаемой мощности антенной передатчика от количества участков связи

Fig. 2. Relationship between the antenna transmitter power and the number of communication sections

Согласно рисунку 2, при увеличении количества участков энергозатраты на связь заметно уменьшаются. С физической точки зрения, эта закономерность не является новой, однако для решения частных производственных задач из-за высоких капитальных затрат метод ступенчатой передачи информации не применялся. К сегодняшнему дню соотношение цен на продукцию микроэлектроники существенно изменилось. При массовом производстве приемно-передающих устройств для связи в радиусе нескольких десятков метров их стоимость не превышает трети стоимости несложного мобильного телефона [7]. Следует отметить, что ступенчатая траектория, представленная на рисунке 1, отражает явно идеализированный случай, при котором объекты связи неподвижны и располагаются строго на прямой линии. В реальных условиях объекты связи могут находиться в движении и располагаться в произвольных точках (рис. 3). При этом сумма длин участков между конечными объектами связи может оказаться больше расстояния между ними. В таких случаях целесообразность применения ступенчатого принципа организации связи определяется выполнением неравенства $P_{i1} > P_{i2}$.

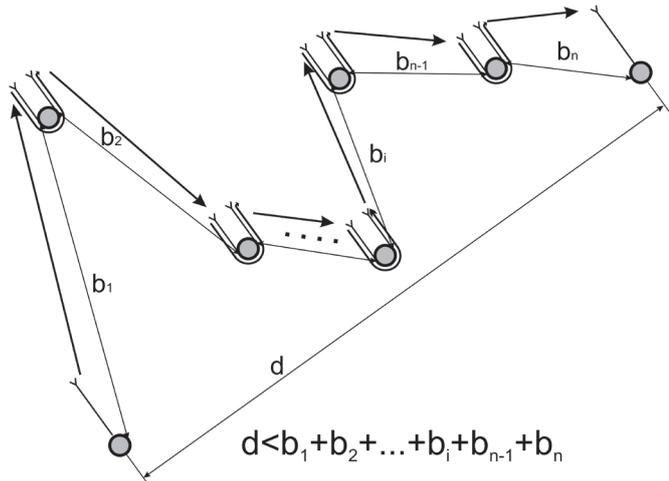


Рис. 3. Расположение объектов связи в реальных телеметрических системах

Fig. 3. Location of communication objects in real telemetry systems

Современные ZigBee-технологии не ограничиваются ступенчатым принципом передачи информации. Характерной их особенностью в телеметрии является способность отдельных ее элементов самостоятельно выстраивать оптимальные траектории прохождения сигналов. Это происходит непрерывно, полностью автоматически, с использованием заложенных критериев и результатов оценки реальных условий связи.

Вместе с тем использование классической схемы ZigBee-технологии в телеметрических системах АПК сдерживается следующими факторами:

1. Количество узлов в сельскохозяйственных телеметрических системах оказывается в несколько раз больше, чем в классических технологиях «умный дом». В реальных условиях в одной телеметрической системе могут присутствовать тысячи узлов. Рост количества датчиков

требует увеличения несущей частоты, что не всегда возможно. Во-первых, в типовом оборудовании ZigBee используются фиксированные частоты 858 МГц, 915 МГц и 2,4 ГГц [8]. Во-вторых, даже при использовании специально разработанного оборудования на более высокие частоты можно столкнуться с недостаточной дифракцией электромагнитных волн, что может исключить возможность связи вне прямой видимости. В то же время увеличение мощности передатчика неизбежно приведет к росту потребляемой энергии.

2. Неравномерная энергетическая нагрузка на отдельные элементы телеметрических систем, обусловленная разными объемами принимаемой, обрабатываемой и передаваемой информации. По мере удаления промежуточных приемно-передающих устройств от начала линии связи приходящая на них энергетическая нагрузка будет возрастать. Это объясняется необходимостью работы не только с информацией от первого объекта связи, но также с собственными данными и сигналами от соседних элементов системы. Неравномерность энергетической нагрузки и, в особенности, явная перегрузка последних элементов сети повышает требования к источникам питания и их обслуживанию.

Для решения обеих проблем предложено модернизировать классическую ZigBee-технологии дополнением алгоритма выбора траектории прохождения сигналов функцией поочередного подключения отдельных элементов системы. При реализации модернизированной технологии к пункту передачи данных в каждый момент времени будет подключен только один датчик. Все остальные элементы сети в этот момент либо остаются в «спящем» режиме, либо выполняют приемно-передающие функции. Техническая реализация поочередного подключения осуществляется программной перестройкой элемента системы, выполняющего функции координатора. При использовании модернизированной ZigBee-технологии функции самоорганизации и самовосстановления системы сохраняются, однако алгоритм выбора траектории прохождения сигнала ограничивается жесткими предписаниями номеров стартовых элементов. В такой технологии объем электрической энергии, потребляемой каждым элементом, задействованным в передаче информации, будет одинаковым. Исключения составляют первый и последний элементы. Первый элемент реализует только функцию передачи, а последний – функцию приема, поэтому эти элементы всегда будут потреблять энергии меньше, чем остальные.

Траекторию прохождения сигнала при осуществлении модернизированной технологии можно проследить по рисунку 4. В иллюстрируемом примере информационный сигнал передается от стартового элемента 1 к конечному элементу n . Траектория следования сигнала будет проходить через элементы 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ... и $n - 1$ (рис. 4а). В случае выхода из строя, например, элементов 3 и 4 сигнал пойдет по траектории 2, 9, 10, 5, 6, 7, 8, ... и $n - 1$ (рис. 4б). При этом изменение режима работы элементов 9 и 10 происходит без участия оператора, что определяется функцией самовосстановления. По завершении периода считывания информации с элемента 1 произойдет подключение элемента 11 (рис. 4в), который теперь будет являться стартовым. Аналогично подключится элемент 12 (рис. 4г),

а затем – последующие элементы системы. Поскольку опрос элементов осуществляется с достаточно высокой скоростью, очередность коммутации значения не имеет. После опроса периферийных элементов системы могут последовать подключения элементов из ее центральной области, а затем – элементов, расположенных рядом с конечным пунктом. Возможна и иная очередность коммутации, в зависимости от удобства составления программы.

Важным этапом проектирования телеметрической системы является обоснование частоты подключения датчиков. При решении этой задачи приходится искать компромисс между двумя альтернативными требованиями. С одной стороны, частота подключения должна быть высокой, чтобы измеряемый параметр не успел существенно измениться в течение цикла опроса других датчиков. С другой стороны, при подключении очередного датчика в линии связи могут возникнуть переходные процессы, до завершения которых получаемую информацию считать достоверной нельзя. Следовательно, частота подключения должна быть достаточно низкой.

в цифровой код [9, 10]. Успешность этого преобразования также зависит от правильно выбранной частоты, которую предлагается определить в соответствии с нижеприведенными рассуждениями.

В линиях связи всегда присутствуют шумы, принятые антенной, и собственные шумы, обусловленные работой приемных устройств. На входе приемного устройства принятый сигнал суммируется с помехами. Эта сумма подчиняется распределению Гаусса и имеет практически равномерный спектр в пределах полосы пропускания [11]. Мощность передающего устройства может быть рассчитана по формуле (1), а спектральную плотность шума легко вычислить в соответствии с выражением

$$S_{ш} = k \cdot T_{ш}, \tag{4}$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; $T_{ш}$ – суммарная температура шума, в градусах Кельвина.

Зная спектральную плотность, следует определить энергетический потенциал линии связи:

$$Q = P_{от}/S_{ш}, \text{ Гц.} \tag{5}$$

Степень искажения сигнала зависит от способа его восстановления, частоты дискретизации и ширины спектра сигнала. При сравнении двух способов восстановления (ступенчатой экстраполяции и линейной интерполяции) становится очевидным, что ступенчатая экстраполяция менее требовательна к вычислительным ресурсам, однако она характеризуется в полтора раза большей среднеквадратической ошибкой. Для оценки этих ошибок целесообразно воспользоваться формулами:

$$\varepsilon_{д.с.}^2 = \pi F_{cp} / F_{опр} - \text{для ступенчатой экстраполяции;}$$

$$\varepsilon_{д.с.}^2 = 2\pi F_{cp} / 3F_{опр} - \text{для линейной интерполяции.}$$

Будем считать, что три составляющие суммарной погрешности (погрешность дискретизации и восстановления, погрешность квантования и anomальная погрешность) равны между собой:

$$\varepsilon_{д.с.}^2 = \varepsilon_{к.в.}^2 = \varepsilon_{ан.}^2.$$

Тогда частота опроса датчиков, удовлетворяющая заданной ошибке, может быть рассчитана по выражениям:

$$f_{опр} = \pi F_{cp} / \varepsilon_{д.с.}^2, \text{ Гц} - \text{для статической экстраполяции;}$$

$$f_{опр} = 2\pi F_{cp} / 3\varepsilon_{д.с.}^2, \text{ Гц} - \text{для линейной интерполяции.}$$

Все приемо-передающие операции, а также функции координатора и маршрутизатора в организации связи реализуются стандартным оборудованием, например, elegendis или ICP DAS [12] на основе протокола IEEE802.15.4.

Таким образом, телеметрические системы на основе ZigBee-технологии потребляют в десятки раз меньше энергии, чем широко распространенные сети Wi-Fi. Эта разница в энергопотреблении возникает из-за ступенчатого принципа передачи радиосигнала, а также вследствие пониженной скорости передачи информации. Снижение скорости передачи до 250 кбит/с приводит к повышению надежности связи, но практически не уменьшает пропускную способность линии, поскольку в телеметрических системах не транслируются звуковая или видеoinформация. Кроме того, переход из «спящего» режима

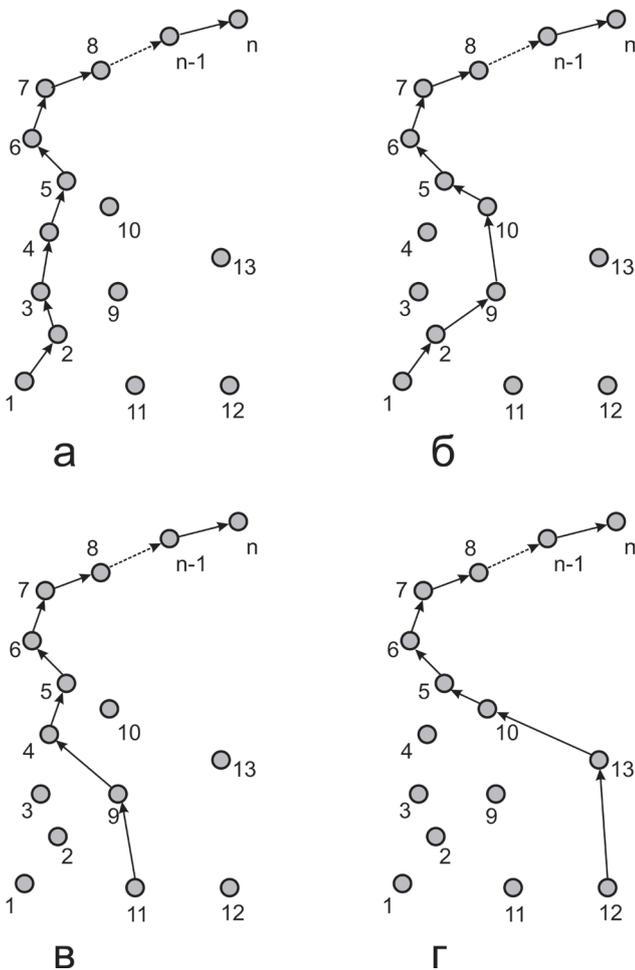


Рис. 4. Траектория прохождения сигнала при различных режимах реализации ZigBee-технологии

Fig. 4. Signal trajectory in different modes of ZigBee-technology implementation

В связи с тем, что большинство современных датчиков выдают сигналы в аналоговом виде, приемо-передающие устройства должны обеспечивать их преобразование

к рабочему состоянию для ZigBee-устройств исчисляется десятками миллисекунд, что на два порядка меньше, чем в сетях Bluetooth или Wi-Fi.

Выводы

Снижение электропотребления телеметрических систем сельскохозяйственного назначения при реализации беспроводной связи датчиков с пунктом обработки данных может быть достигнуто применением ZigBee-технологии. Дальнейшее совершенствование этой технологии связано с дополнением ее алгоритма поочередной коммутацией отдельных элементов системы.

Библиографический список

1. Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. Современная телеметрия в теории и на практике. М.: Наука и техника. 2007. 672 с.
2. Голицын М.В. Альтернативные энергоносители / М.В. Голицын, А.М. Голицын, Н.В. Пронина. М.: Наука, 2004. 159 с.
3. Андреев С.А., Матвеев С.А. Электропитание измерительно-передающих устройств в телеметрических системах сельскохозяйственного назначения // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 2. С. 34-39.
4. Cislason Drew. ZigBee Wireless Networking. N.Y.: Gardners Books. 2008. 218 p.
5. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006. 288 с.
6. Шахгильдян В.В., Козырев В.В., Ляховкин А.А. Радиопередающие устройства; Под ред. В.В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь. 2003. 560 с.
7. Пушкарев О. Построение ZigBee модуля на базе беспроводного микроконтроллера JENNIC JN5139 с питанием от дисковых элементов // Беспроводные технологии. 2007. № 2. С. 68-71.
8. Шейкин М. Сетевые технологии ZigBee. Обзор элементной базы. Электроника: наука, технология, бизнес. 2011. № 6. С. 36-40.
9. Уолт Кестер Мир электроники. Аналого-цифровые преобразователи. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 1016 с.
10. Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник. СПб: КОРОНА принт; М.: Альтекс-А, 2003. 224 с.
11. Кириевский Е.В. Расчет устройств адресного опроса датчиков для многоточечных измерительных систем. Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет. 2013. 17 с.
12. Кравченко Т. ZigBee-модемы ETRX2 компании Telegesis // Беспроводные технологии. 2007. № 2. С. 31-33.

Критерии авторства

Андреев С.А., Воробьев В.А., Матвеев А.И. провели обобщение и написали рукопись. Андреев С.А., Воробьев В.А., Матвеев А.И. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 10.12.2018

References

1. Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V. Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike [Modern telemetry in theory and practice]. Moscow, Nauka i tekhnika. 2007: 672.
2. Golitsyn M.V., Golitsyn A.M., Pronina N.V. Al'ternativnyye energonositeli [Alternative energy carriers]. Moscow, Nauka, 2004: 159.
3. Andreyev S.A., Matveyev S.A. Elektropitaniye izmeritel'no-peredayushchikh ustroystv v telemetricheskikh sistemakh sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Power supply of measuring and transmitting devices in telemetric systems of agricultural use]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal*. 2018. Vol. 2: 34-39.
4. Cislason Drew. ZigBee Wireless Networking. N.Y., Gardners Books. 2008. 218 p. (In English)
5. Shakhnovich I.V. Sovremennyye tekhnologii besprovodnoy svyazi [Modern wireless technologies]. Moscow, Tekhnosfera, 2006: 288.
6. Shakhgil'dyan V.V., Kozyrev V.V., Lyakhovkin A.A. Radiopereadayushchiye ustroystva [Radio transmitting devices]; Ed. by V.V. Shakhgil'dyan. Moscow, Radio i svyaz'. 2003: 560.
7. Pushkarev O. Postroyeniye ZigBee modulya na baze besprovodnogo mikrokontrollera JENNIC JN5139 s pitaniyem ot diskovykh elementov [Building a ZigBee module based on a JENNIC JN5139 wireless micro controller with power supply from disk elements]. *Besprovodnyye tekhnologii*, 2007; 2: 68-71.
8. Sheykin M. Setevyye tekhnologii ZigBee. Obzor elementnoy bazy. Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes [ZigBee network technologies. Overview of the element base], 2011; 6: 36-40.
9. Uolt Kester. Mir elektroniki. Analogo-tsifrovyye preobrazovateli [World of Electronics. Analog-to-digital converters]. Translated from English. Moscow, Tekhnosfera, 2007: 1016.
10. Nikamin V.A. Analogo-tsifrovyye i tsifro-analogovyye preobrazovateli. Spravochnik [Analog-to-digital and digital-to-analog converters. Reference book]. SPb, KORONA print; Moscow, Al'teks-A, 2003: 224.
11. Kiriyevskiy Ye.V. Raschet ustroystv adresnogo oprosa datchikov dlya mnogotochechnykh izmeritel'nykh system [Calculating the parameters of sensor address polling devices for multipoint measuring systems]. Novocherkassk, Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2013: 17.
12. Kravchenko T. ZigBee-modemy ETRX2 kompanii Telegesis [ZigBee-modems ETRX2 of the Telegesis company]. *Besprovodnyye tekhnologii*, 2007; 2: 31-33.

Contribution

Andreyev S.A., Vorobyev V.A., Matveyev A.I. summarized the material and wrote the manuscript. Andreyev S.A., Vorobyev V.A., Matveyev A.I. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on December 10, 2018